

**¡¡APRUEBE SU EXAMEN CON SCHAUM!!**

# Estadística

Schaum

4<sup>a</sup> EDICIÓN

Murray R. Spiegel • Larry J. Stephens

486 PROBLEMAS RESUELTOS PASO A PASO

660 PROBLEMAS DE PRÁCTICA

INCLUYE SOLUCIONES A PROBLEMAS DE LOS PROGRAMAS DE CÓMPUTO ACTUALES

Utilícelo para las siguientes asignaturas:

- ESTADÍSTICA BÁSICA     MÉTODOS ESTADÍSTICOS BÁSICOS     INTRODUCCIÓN A LA ESTADÍSTICA
- INTRODUCCIÓN A LA PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA     INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS



# ESTADÍSTICA



# ESTADÍSTICA

## Cuarta edición

**Murray R. Spiegel**  
*Rensselaer Polytechnic Institute  
Hartford Graduate Center*

**Larry J. Stephens**  
*University of Nebraska at Omaha*

**Revisión técnica**  
**Raúl Gómez Castillo**  
*Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey,  
Campus Estado de México*



MÉXICO • BOGOTÁ • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA  
LISBOA • MADRID • NUEVA YORK • SAN JUAN • SANTIAGO  
AUCKLAND • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI  
SAN FRANCISCO • SINGAPUR • SAN LUIS • SIDNEY • TORONTO

**Director Higher Education:** Miguel Ángel Toledo Castellanos  
**Director editorial:** Ricardo A. del Bosque Alayón  
**Coordinadora editorial:** Marcela I. Rocha Martínez  
**Editor sponsor:** Pablo E. Roig Vázquez  
**Editora de desarrollo:** Ana L. Delgado Rodríguez  
**Supervisor de producción:** Zeferino García García  
**Traducción:** María del Carmen Enriqueta Hano Roa

## ESTADÍSTICA

### Cuarta edición

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra,  
por cualquier medio, sin la autorización escrita del editor.



DERECHOS RESERVADOS © 2009, respecto a la cuarta edición en español por  
McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.

A Subsidiary of *The McGraw-Hill Companies, Inc.*

Edificio Punta Santa Fe  
Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A  
Piso 17, Colonia Desarrollo Santa Fe  
Delegación Álvaro Obregón  
C.P. 01376, México, D. F.  
Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736

**ISBN-13: 978-970-10-6887-8**

**ISBN-10: 970-10-6887-8**

(ISBN 970-10-3271-3 anterior)

Traducido de la cuarta edición de: *Theory and Problems of Statistics*.

Copyright © MMVIII by The McGraw-Hill Companies, Inc.

All rights reserved

ISBN: 978-0-07-148584-5

1234567890

0876543219

Impreso en México

*Printed in Mexico*

**A la memoria de mi madre y de mi padre, Rosie y Johnie Stephens**

L. J. S.



# ACERCA DE LOS AUTORES

**MURRAY R. SPIEGEL**† obtuvo su maestría en física y su doctorado en matemáticas, ambos en Cornell University. Trabajó en Harvard University, Columbia University, Oak Ridge and Rensselaer Polytechnic Institute; además fue asesor en matemáticas para diversas compañías. Su último cargo fue como profesor y presidente de matemáticas en el Hartford Graduate Center del Rensselaer Polytechnic Institute. Su interés por las matemáticas lo acompañó durante toda su trayectoria, en especial en la rama que comprende la aplicación de la física y los problemas de ingeniería. Fue autor de numerosos artículos periodísticos y de más de una docena de libros sobre temas matemáticos.

**LARRY J. STEPHENS** es profesor de matemáticas en University of Nebraska at Omaha, donde imparte cátedras desde 1974. Su labor como docente la ha desarrollado también en instituciones como University of Arizona, Gonzaga University y Oklahoma State University. En su experiencia laboral destacan sus trabajos para la NASA, el Livermore Radiation Laboratory y el Los Alamos Laboratory. Desde 1989, el doctor Stephens es consultor e instructor en seminarios de estadística para grupos de ingeniería en 3M, en la planta de Nebraska. Ha colaborado en más de cuarenta publicaciones a nivel profesional. Es autor de numerosos bancos de pruebas computarizados, además de textos elementales de estadística.



# PREFACIO A LA CUARTA EDICIÓN

Esta nueva edición contiene ejemplos nuevos, 130 figuras nuevas y resultados obtenidos empleando cinco paquetes de software representativos de los cientos o quizá miles de paquetes de software usados en estadística. Todas las figuras de la tercera edición han sido sustituidas por figuras nuevas, un poco diferentes, creadas empleando estos cinco paquetes de software: EXCEL, MINITAB, SAS, SPSS y STATISTIX. Los ejemplos tienen una gran influencia de *USA Today*, pues este periódico es una gran fuente de temas y ejemplos actuales de la estadística.

Otros de los cambios que se encontrarán en esta edición son: el capítulo 18 sobre análisis de serie de tiempos fue eliminado y el capítulo 19 sobre control estadístico de procesos y capacidad de procesos se convirtieron en el capítulo 18. Las respuestas a los ejercicios complementarios, al final de cada capítulo, se presentan ahora con más detalle. En todo el libro se analizan y emplean más los valores  $p$ .

## RECONOCIMIENTOS

Dado que el software para estadística es muy importante en este libro, quiero agradecer a las personas y empresas siguientes por permitirme usar su software.

**MINITAB:** Laura Brown, coordinadora del Programa de Ayuda a los Autores, Minitab, Inc., 1829 Pine Hall Road, State College, PA 16801. Yo soy miembro del programa de ayuda a los autores que practica Minitab, Inc. “Partes de los datos y de los resultados que se encuentran en esta publicación/libro han sido impresas con la autorización de Minitab, Inc. Todo este material, así como los derechos de autor, son propiedad exclusiva de Minitab, Inc.” La dirección de Minitab en la red es [www.minitab.com](http://www.minitab.com).

**SAS:** Sandy Varner, directora de operaciones de mercadotecnia, SAS Publishing, Cary, NC. “Creado con el software SAS. Copyright 2006. SAS Institute Inc., Cary, NC.” Se cita de su sitio en la red: “SAS es el líder en servicios y software inteligente para negocios. A lo largo de sus 30 años, SAS ha crecido —de siete empleados a casi 10 000 en todo el mundo, de unos cuantos clientes a más de 40 000— y todos estos años ha sido rentable”. La dirección en la red de SAS es [www.sas.com](http://www.sas.com).

**SPSS:** Jill Rietema, gerente de cuenta, Publicaciones, SPSS. Se cita de su sitio en la red: “SPSS Inc. es líder como proveedor mundial de soluciones y software para análisis predictivo. Fundada en 1968, actualmente SPSS tiene más de 250 000 clientes en todo el mundo, atendidos por más de 1 200 empleados en 60 países.” La dirección en la Red de SPSS es [www.spss.com](http://www.spss.com).

**STATISTIX:** Dr. Gerard Nimis, presidente, Analytical Software, P.O. Box (apartado postal) 12185, Tallahassee, FL 32317. Se toma de su sitio en la red: “Si se tiene que analizar datos y se es un investigador, pero no un especialista en estadística, STATISTIX está diseñado para ello. No necesitará programar ni usar un manual. Este software fácil de aprender y de usar ahorrará valioso tiempo y dinero. STATISTIX combina, en un solo y económico paquete, la esta-

dística, tanto básica como avanzada, con las poderosas herramientas para la manipulación de datos que se necesitan.” La dirección en la Red de Statistix es [www.statistix.com](http://www.statistix.com).

**EXCEL:** Se cuenta con Excel, de Microsoft, desde 1985. Cuentan con él casi todos los estudiantes universitarios. En este libro se emplea ampliamente.

Deseo dar las gracias a Stanley Wileman por la asesoría informática desinteresada que me proporcionó en la creación de este libro. Quiero agradecer a mi esposa, Lana, por su comprensión durante los días que dediqué a pensar en la mejor manera de presentar algunos conceptos. Mi agradecimiento a Chuck Wall, Senior Adquisitions Editor, y a su equipo de McGraw-Hill. Por último, quiero dar las gracias a Jeremy Toynbee, director de proyecto en Keyword Publishing Services Ltd., Londres, Inglaterra, y a John Omiston, copy editor independiente, por su excelente trabajo de producción.

LARRY J. STEPHENS

# PREFACIO A LA TERCERA EDICIÓN

Al preparar esta tercera edición de Estadística, Serie Schaum, he reemplazado problemas antiguos por problemas que reflejan los cambios tecnológicos y sociológicos ocurridos desde que se publicó la primera edición en 1961. Por ejemplo, uno de los problemas en la segunda edición trata del tiempo de vida de los bulbos de radio. Como la mayoría de las personas menores de treinta años probablemente no sepan lo que es un bulbo de radio, este problema, lo mismo que muchos otros, fue sustituido por ejercicios que se refieren a temas actuales como el cuidado de la salud, el sida, Intenet, los teléfonos celulares, entre otros. Los asuntos matemáticos y estadísticos no han cambiado, sólo lo hicieron las áreas de aplicación y los aspectos de cálculo en estadística.

Otra mejora es la introducción en el texto de software para estadística. El desarrollo de software para estadística, como SAS, SPSS y Minitab, ha variado drásticamente las aplicaciones de la estadística a problemas de la vida real. El software para estadística más utilizado, tanto en el medio académico como en el industrial, es el Minitab. Quiero agradecer a Minitab Inc., por haberme otorgado el permiso para incluir, a lo largo de todo el libro, los resultados de Minitab. Muchos de los textos modernos de estadística traen, como parte del libro, resultados de algún paquete de software para estadística. En esta obra decidí emplear Minitab, ya que es muy utilizado y porque es muy amigable.

Una vez que el estudiante aprende las diversas estructuras de archivos de datos necesarios para utilizar Minitab, así como la estructura de comandos y subcomandos, puede transferir con facilidad ese conocimiento a otros paquetes de software para estadística. Gracias a la introducción de menús como las cajas de diálogo, el software resulta muy amigable. La obra adiciona tanto los menús como las cajas de diálogo que presenta Minitab. En muchos de los problemas nuevos se discute el importante concepto de pruebas estadísticas. Cuando se publicó la primera edición, en 1961, el valor  $p$  no se utilizaba tan ampliamente como ahora, debido a que con frecuencia resulta difícil determinarlo sin la ayuda de un software. En la actualidad, el software para estadística da el valor  $p$  de manera rutinaria, puesto que, con este apoyo, su cálculo es a menudo un asunto trivial.

Un nuevo capítulo titulado “Control estadístico de procesos y capacidad de procesos” reemplazó al capítulo 19, “Números índices”. Estos temas tienen gran aplicación industrial, por lo que se agregaron al libro. La inclusión, en los paquetes de software modernos, de técnicas de control estadístico de procesos y capacidad de procesos ha facilitado su utilización en nuevos campos industriales. El software lleva a cabo todos los cálculos, que son bastante laboriosos.

Quiero agradecer a mi esposa Lana por su comprensión durante la preparación de este libro; a mi amigo Stanley Wileman, por la ayuda computacional que me brindó; y a Alan Hunt y su equipo de Keyword Publishing Service, en Londres, por su minucioso trabajo de producción. Por último quiero agradecer al equipo de McGraw-Hill por su cooperación y ayuda.

LARRY J. STEPHENS



# PREFACIO A LA SEGUNDA EDICIÓN

La estadística, o los métodos estadísticos, como se llaman algunas veces, desempeñan un papel cada vez más importante en casi todas las áreas del quehacer humano. Aunque en un principio tenía que ver solamente con asuntos de Estado, a lo que debe su nombre, en la actualidad la influencia de la estadística se ha extendido a la agricultura, la biología, el comercio, la química, la comunicación, la economía, la educación, la electrónica, la medicina, la física, las ciencias políticas, la psicología, la sociología y a muchos otros campos de la ciencia y la ingeniería.

El propósito de esta obra es presentar una introducción a los principios generales de la estadística, que será útil a todos los individuos sin importar su campo de especialización. Se diseñó para usarse ya sea como consulta para todos los textos estándar modernos o como un libro para un curso formal de estadística. Será también de gran valor como referencia para todos aquellos que estén aplicando la estadística en su campo de investigación particular.

Cada capítulo empieza con una presentación clara de las definiciones correspondientes, los teoremas y principios, junto con algunos materiales ilustrativos y descriptivos. A esto le sigue un conjunto de problemas resueltos y complementarios, que en muchos casos usan datos de situaciones estadísticas reales. Los problemas resueltos sirven para ilustrar y ampliar la teoría, hacen énfasis en aquellos pequeños puntos importantes sin los cuales el estudiante se sentiría continuamente inseguro; además, proporciona una repetición de los principios básicos, aspecto que es vital para una enseñanza eficiente. En los problemas resueltos se incluyen numerosas deducciones de fórmulas. La cantidad de problemas complementarios con respuestas constituyen una revisión completa del material de cada capítulo.

Los únicos conocimientos matemáticos necesarios para la comprensión de todo el libro son la aritmética y el álgebra elemental. En el capítulo 1 viene una revisión de los conceptos matemáticos importantes, que se pueden leer al principio del curso o después, cuando la necesidad se presente.

Los primeros capítulos se ocupan del análisis de las distribuciones de frecuencia y de las correspondientes medidas de tendencia central, dispersión, sesgo y curtosis. Lo anterior lleva, de manera natural, a una discusión de la teoría de probabilidad elemental y sus aplicaciones, lo que prepara el camino para el estudio de la teoría del muestreo. De entrada, se abordan las técnicas de las muestras grandes, que comprenden la distribución normal, así como las aplicaciones a la estimación estadística y las pruebas de hipótesis y de significancia. La teoría de las muestras pequeñas, que comprende la distribución  $t$  de Student, la distribución  $\chi^2$  cuadrada y la distribución  $F$ , junto con sus aplicaciones, aparecen en un capítulo posterior. Otro capítulo sobre ajuste de curvas y el método de mínimos cuadrados lleva, de manera lógica, a los temas de correlación y regresión que involucran dos variables. La correlación múltiple y la parcial, que involucran más de dos variables, son tratadas en un capítulo aparte. A este tema le siguen capítulos sobre el análisis de varianza y métodos no paramétricos, que son nuevos en esta segunda edición. Dos capítulos finales tratan de series de tiempo y número índice, en ese orden. Además, se ha incluido más material del que se alcanza a cubrir en un primer curso. El objetivo es hacer el libro más flexible para proporcionar una obra de referencia más útil y estimular un posterior interés en estos temas. La obra permite cambiar el orden de muchos de los últimos capítulos u omitir algunos sin dificultad. Por ejemplo, los capítulos 13 a 15 y 18 y 19 pueden ser introducidos, en su mayor parte, inmediatamente después del capítulo 5, si se desea tratar correlación, regresión, series de tiempo y números índice antes de la teoría del muestreo. De igual manera, dejar de lado la mayor parte del capítulo 6, si no se desea dedicar mucho tiempo a probabilidad. En un primer curso, en ocasiones el capítulo 15 se ignora en su totalidad. El orden se plantea debido a que en

los cursos modernos hay una tendencia creciente a introducir teoría del muestreo y la inferencia estadística tan pronto como sea posible.

Quiero agradecer a varias instituciones, tanto públicas como privadas, su cooperación al proporcionar datos para tablas. A lo largo del libro se dan las referencias apropiadas para esas fuentes. En particular, agradezco al profesor sir Roland A. Fisher, F.R.S., Cambridge; al doctor Frank Yates, F.R.S., Rothamster; y a Messrs. Oliver and Bond Ltd., Edinburgh, por haber otorgado el permiso para utilizar los datos de la tabla III de su libro *Statistical Tables for Biological, Agricultural, and Medical Research*. También quiero agradecer a Esther y a Meyer Scher, su apoyo, y al equipo de McGraw-Hill, su cooperación.

# CONTENIDO

|                   |  |           |
|-------------------|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b> | <b>Variables y gráficas</b>  | <b>1</b>  |
|                   | Estadística  | 1         |
|                   | Población y muestra; estadística inductiva (o inferencial) y estadística descriptiva | 1         |
|                   | Variables: discretas y continuas   | 1         |
|                   | Redondeo de cantidades numéricas   | 2         |
|                   | Notación científica  | 2         |
|                   | Cifras significativas  | 3         |
|                   | Cálculos   | 3         |
|                   | Funciones  | 4         |
|                   | Coordenadas rectangulares  | 4         |
|                   | Gráficas   | 4         |
|                   | Ecuaciones   | 5         |
|                   | Desigualdades  | 5         |
|                   | Logaritmos   | 6         |
|                   | Propiedades de los logaritmos  | 7         |
|                   | Ecuaciones logarítmicas  | 7         |
| <b>CAPÍTULO 2</b> | <b>Distribuciones de frecuencia</b>  | <b>37</b> |
|                   | Datos en bruto   | 37        |
|                   | Ordenaciones   | 37        |
|                   | Distribuciones de frecuencia   | 37        |
|                   | Intervalos de clase y límites de clase   | 38        |
|                   | Fronteras de clase   | 38        |
|                   | Tamaño o amplitud de un intervalo de clase   | 38        |
|                   | La marca de clase  | 38        |
|                   | Reglas generales para formar una distribución de frecuencia                          | 38        |
|                   | Histogramas y polígonos de frecuencia  | 39        |
|                   | Distribuciones de frecuencia relativa  | 39        |
|                   | Distribuciones de frecuencia acumulada y ojivas                                      | 40        |
|                   | Distribuciones de frecuencia acumulada relativa y ojivas porcentuales                | 40        |
|                   | Curvas de frecuencia y ojivas suavizadas   | 41        |
|                   | Tipos de curvas de frecuencia  | 41        |

|                   |  |            |
|-------------------|--|------------|
| <b>CAPÍTULO 3</b> | <b>Media, mediana y moda, y otras medidas de tendencia central</b> | <b>61</b>  |
|                   | Índices o subíndices   | 61         |
|                   | Sumatoria  | 61         |
|                   | Promedios o medidas de tendencia central                           | 62         |
|                   | La media aritmética  | 62         |
|                   | Media aritmética ponderada   | 62         |
|                   | Propiedades de la media aritmética                                 | 63         |
|                   | Cálculo de la media aritmética para datos agrupados                | 63         |
|                   | La mediana   | 64         |
|                   | La moda  | 64         |
|                   | Relación empírica entre la media, la mediana y la moda             | 64         |
|                   | La media geométrica $G$  | 65         |
|                   | La media armónica $H$  | 65         |
|                   | Relación entre las medias aritmética, geométrica y armónica        | 66         |
|                   | La raíz cuadrada media   | 66         |
|                   | Cuartiles, deciles y percentiles                                   | 66         |
|                   | Software y medidas de tendencia central                            | 67         |
| <b>CAPÍTULO 4</b> | <b>Desviación estándar y otras medidas de dispersión</b>           | <b>95</b>  |
|                   | Dispersión o variación   | 95         |
|                   | Rango  | 95         |
|                   | Desviación media   | 95         |
|                   | Rango semiintercuartílico  | 96         |
|                   | Rango percentil 10-90  | 96         |
|                   | Desviación estándar  | 96         |
|                   | Varianza   | 97         |
|                   | Método abreviado para el cálculo de la desviación estándar         | 97         |
|                   | Propiedades de la desviación estándar                              | 98         |
|                   | Comprobación de Charlier   | 99         |
|                   | Corrección de Sheppard para la varianza                            | 100        |
|                   | Relaciones empíricas entre las medidas de dispersión               | 100        |
|                   | Dispersión absoluta y relativa; coeficiente de variación           | 100        |
|                   | Variable estandarizada; puntuaciones estándar                      | 101        |
|                   | Software y medidas de dispersión                                   | 101        |
| <b>CAPÍTULO 5</b> | <b>Momentos, sesgo y curtosis</b>                                  | <b>123</b> |
|                   | Momentos   | 123        |
|                   | Momentos para datos agrupados                                      | 123        |
|                   | Relaciones entre momentos  | 124        |
|                   | Cálculo de momentos con datos agrupados                            | 124        |
|                   | Comprobación de Charlier y corrección de Sheppard                  | 124        |
|                   | Momentos en forma adimensional                                     | 124        |
|                   | Sesgo  | 125        |
|                   | Curtosis   | 125        |

|   |     |
|---|-----|
| Momentos, sesgo y curtosis poblacionales                                    | 126 |
| Cálculo del sesgo (o asimetría) y de la curtosis empleando software         | 126 |
| <b>CAPÍTULO 6 Teoría elemental de la probabilidad 139</b>                   |     |
| Definiciones de probabilidad  | 139 |
| Probabilidad condicional; eventos independientes y dependientes             | 140 |
| Eventos mutuamente excluyentes  | 141 |
| Distribuciones de probabilidad  | 142 |
| Esperanza matemática  | 144 |
| Relación entre media y varianza poblacionales y muestrales                  | 144 |
| Análisis combinatorio   | 145 |
| Combinaciones   | 146 |
| Aproximación de Stirling para $n!$  | 146 |
| Relación entre la probabilidad y la teoría de conjuntos                     | 146 |
| Diagramas de Euler o de Venn y probabilidad                                 | 146 |
| <b>CAPÍTULO 7 Las distribuciones binomial, normal y de Poisson 172</b>      |     |
| La distribución binomial  | 172 |
| La distribución normal  | 173 |
| Relación entre las distribuciones binomial y normal                         | 174 |
| La distribución de Poisson  | 175 |
| Relación entre las distribuciones binomial y de Poisson                     | 176 |
| La distribución multinomial   | 177 |
| Ajuste de distribuciones teóricas a distribuciones muestrales de frecuencia | 177 |
| <b>CAPÍTULO 8 Teoría elemental del muestreo 203</b>                         |     |
| Teoría del muestreo   | 203 |
| Muestras aleatorias y números aleatorios                                    | 203 |
| Muestreo con reposición y sin ella  | 204 |
| Distribuciones muestrales   | 204 |
| Distribuciones muestrales de medias   | 204 |
| Distribuciones muestrales de proporciones                                   | 205 |
| Distribuciones muestrales de diferencias y sumas                            | 205 |
| Errores estándar  | 207 |
| Demostración de la teoría elemental del muestreo empleando software         | 207 |
| <b>CAPÍTULO 9 Teoría de la estimación estadística 227</b>                   |     |
| Estimación de parámetros  | 227 |
| Estimaciones insesgadas   | 227 |
| Estimaciones eficientes   | 228 |
| Estimaciones puntuales y estimaciones por intervalo; su confiabilidad       | 228 |
| Estimación de parámetros poblacionales mediante un intervalo de confianza   | 228 |
| Error probable  | 230 |

|                    |  |            |
|--------------------|--|------------|
| <b>CAPÍTULO 10</b> | <b>Teoría estadística de la decisión</b>                     | <b>245</b> |
|                    | Decisiones estadísticas                                      | 245        |
|                    | Hipótesis estadísticas                                       | 245        |
|                    | Pruebas de hipótesis y de significancia o reglas de decisión | 246        |
|                    | Errores Tipo I y Tipo II                                     | 246        |
|                    | Nivel de significancia                                       | 246        |
|                    | Pruebas empleando distribuciones normales                    | 246        |
|                    | Pruebas de una y de dos colas                                | 247        |
|                    | Pruebas especiales   | 248        |
|                    | Curva característica de operación; potencia de una prueba    | 248        |
|                    | Valor $p$ en pruebas de hipótesis                            | 248        |
|                    | Gráficas de control  | 249        |
|                    | Pruebas para diferencias muestrales                          | 249        |
|                    | Pruebas empleando distribuciones binomiales                  | 250        |
| <b>CAPÍTULO 11</b> | <b>Teoría de las muestras pequeñas</b>                       | <b>275</b> |
|                    | Distribución $t$ de Student                                  | 275        |
|                    | Intervalos de confianza                                      | 276        |
|                    | Pruebas de hipótesis y de significancia                      | 277        |
|                    | Distribución $\chi^2$ cuadrada                               | 277        |
|                    | Intervalos de confianza para $\sigma$                        | 278        |
|                    | Grados de libertad   | 278        |
|                    | La distribución $F$  | 279        |
| <b>CAPÍTULO 12</b> | <b>La prueba <math>\chi^2</math> cuadrada</b>                | <b>294</b> |
|                    | Frecuencias observadas y frecuencias teóricas                | 294        |
|                    | Definición de $\chi^2$                                       | 294        |
|                    | Pruebas de significancia                                     | 295        |
|                    | La prueba $\chi^2$ cuadrada de bondad de ajuste              | 295        |
|                    | Tablas de contingencia                                       | 296        |
|                    | Corrección de Yates por continuidad                          | 297        |
|                    | Fórmulas sencillas para calcular $\chi^2$                    | 297        |
|                    | Coeficiente de contingencia                                  | 298        |
|                    | Correlación de atributos                                     | 298        |
|                    | Propiedad aditiva de $\chi^2$                                | 299        |
| <b>CAPÍTULO 13</b> | <b>Ajuste de curva y método de mínimos cuadrados</b>         | <b>316</b> |
|                    | Relación entre variables                                     | 316        |
|                    | Ajuste de curvas   | 316        |
|                    | Ecuaciones de curvas de aproximación                         | 317        |
|                    | Método de ajuste de curvas a mano                            | 318        |
|                    | La línea recta   | 318        |
|                    | El método de mínimos cuadrados                               | 319        |
|                    | La recta de mínimos cuadrados                                | 319        |

|   |     |
|---|-----|
| Relaciones no lineales  | 320 |
| La parábola de mínimos cuadrados  | 320 |
| Regresión   | 321 |
| Aplicaciones a series de tiempo   | 321 |
| Problemas en los que intervienen más de dos variables                                       | 321 |
| <b>CAPÍTULO 14 Teoría de la correlación 345</b>   |     |
| Correlación y regresión   | 345 |
| Correlación lineal  | 345 |
| Medidas de la correlación   | 346 |
| Las rectas de regresión de mínimos cuadrados  | 346 |
| El error estándar de estimación   | 347 |
| Variación explicada y no explicada  | 348 |
| Coeficiente de correlación  | 348 |
| Observaciones acerca del coeficiente de correlación   | 349 |
| Fórmula producto-momento para el coeficiente de correlación lineal                          | 350 |
| Fórmulas simplificadas para el cálculo  | 350 |
| Rectas de regresión y el coeficiente de correlación lineal                                  | 351 |
| Correlación de series de tiempo   | 351 |
| Correlación de atributos  | 351 |
| Teoría muestral de la correlación   | 351 |
| Teoría muestral de la regresión   | 352 |
| <b>CAPÍTULO 15 Correlación múltiple y correlación parcial 382</b>                           |     |
| Correlación múltiple  | 382 |
| Notación empleando subíndice  | 382 |
| Ecuaciones de regresión y planos de regresión   | 382 |
| Ecuaciones normales para los planos de regresión de mínimos cuadrados                       | 383 |
| Planos de regresión y coeficientes de correlación   | 383 |
| Error estándar de estimación  | 384 |
| Coeficiente de correlación múltiple   | 384 |
| Cambio de la variable dependiente   | 384 |
| Generalizaciones a más de tres variables  | 385 |
| Correlación parcial   | 385 |
| Relaciones entre coeficientes de correlación múltiple y coeficientes de correlación parcial | 386 |
| Regresión múltiple no lineal  | 386 |
| <b>CAPÍTULO 16 Análisis de varianza 403</b>   |     |
| Objetivo del análisis de varianza   | 403 |
| Clasificación en un sentido o experimentos con un factor                                    | 403 |
| Variación total, variación dentro de tratamientos y variación entre tratamientos            | 404 |
| Métodos abreviados para obtener las variaciones   | 404 |

|  |     |
|--|-----|
| Modelo matemático para el análisis de varianza   | 405 |
| Valores esperados de las variaciones   | 405 |
| Distribuciones de las variaciones  | 406 |
| Prueba $F$ para la hipótesis nula de medias iguales  | 406 |
| Tablas para el análisis de varianza  | 406 |
| Modificaciones para cantidades desiguales de observaciones   | 407 |
| Clasificación en dos sentidos o experimentos con dos factores  | 407 |
| Notación para experimentos con dos factores  | 408 |
| Variaciones en los experimentos con dos factores   | 408 |
| Análisis de varianza para experimentos con dos factores  | 409 |
| Experimentos con dos factores con replicación  | 410 |
| Diseño experimental  | 412 |
| <b>CAPÍTULO 17 Pruebas no paramétricas 446</b>   |     |
| Introducción   | 446 |
| La prueba de los signos  | 446 |
| La prueba $U$ de Mann-Whitney  | 447 |
| La prueba $H$ de Kruskal-Wallis  | 448 |
| Prueba $H$ corregida para empates  | 448 |
| Prueba de las rachas para aleatoriedad   | 449 |
| Otras aplicaciones de la prueba de las rachas  | 450 |
| Correlación de rangos de Spearman  | 450 |
| <b>CAPÍTULO 18 Control estadístico de procesos y capacidad de procesos 480</b>   |     |
| Análisis general de las gráficas de control  | 480 |
| Gráficas de control de variables y gráficas de control de atributos  | 481 |
| Gráficas $X$ -barra y gráficas $R$   | 481 |
| Pruebas para causas especiales   | 484 |
| Capacidad de procesos  | 484 |
| Gráficas $P$ y $NP$  | 487 |
| Otras gráficas de control  | 489 |
| <b>Respuestas a los problemas supplementarios 505</b>  |     |
| <b>Apéndices 559</b>   |     |
| <b>I Ordenadas (<math>Y</math>) en <math>z</math>, en la curva normal estándar 561</b>   |     |
| <b>II Áreas bajo la curva normal estándar, desde 0 hasta <math>z</math> 562</b>  |     |
| <b>III Valores percentiles (<math>t_p</math>) correspondientes a la distribución <math>t</math> de Student con <math>\nu</math> grados de libertad (área sombreada = <math>p</math>) 563</b> |     |
| <b>IV Valores percentiles (<math>\chi_p^2</math>) correspondientes a la distribución Ji cuadrada con <math>\nu</math> grados de libertad (área sombreada = <math>p</math>) 564</b>           |     |

|               |   |            |
|---------------|---|------------|
| <b>V</b>      | Valores del percentil 95 correspondientes a la distribución $F$ ( $\nu_1$ grados de libertad en el numerador) ( $\nu_2$ grados de libertad en el denominador) | 565        |
| <b>VI</b>     | Valores del percentil 99 correspondientes a la distribución $F$ ( $\nu_1$ grados de libertad en el numerador) ( $\nu_2$ grados de libertad en el denominador) | 566        |
| <b>VII</b>    | Logaritmos comunes con cuatro cifras decimales  | 567        |
| <b>VIII</b>   | Valores de $e^{-\lambda}$   | 569        |
| <b>IX</b>     | Números aleatorios  | 570        |
| <b>Índice</b> |   | <b>571</b> |



# VARIABLES Y GRÁFICAS

1

## ESTADÍSTICA

La estadística se ocupa de los métodos científicos que se utilizan para recolectar, organizar, resumir, presentar y analizar datos así como para obtener conclusiones válidas y tomar decisiones razonables con base en este análisis.

El término *estadística* también se usa para denotar los datos o los números que se obtienen de esos datos; por ejemplo, los promedios. Así, se habla de estadísticas de empleo, estadísticas de accidentes, etcétera.

## POBLACIÓN Y MUESTRA; ESTADÍSTICA INDUCTIVA (O INFERENCIAL) Y ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Cuando se recolectan datos sobre las características de un grupo de individuos o de objetos, por ejemplo, estatura y peso de los estudiantes de una universidad o cantidad de pernos defectuosos y no defectuosos producidos en determinado día en una fábrica, suele ser imposible o poco práctico observar todo el grupo, en especial si se trata de un grupo grande. En vez de examinar todo el grupo, al que se le conoce como *población* o *universo*, se examina sólo una pequeña parte del grupo, al que se le llama *muestra*.

Las poblaciones pueden ser *finitas* o *infinitas*. Por ejemplo, la población que consta de todos los pernos producidos determinado día en una fábrica es finita, en tanto que la población que consta de todos los resultados (cara o cruz) que se pueden obtener lanzando una y otra vez una moneda es infinita.

Si la muestra es representativa de la población, el análisis de la muestra permite inferir conclusiones válidas acerca de la población. A la parte de la estadística que se ocupa de las condiciones bajo las cuales tales inferencias son válidas se le llama *estadística inductiva* o *inferencial*. Como estas inferencias no pueden ser absolutamente ciertas, para presentar estas conclusiones se emplea el lenguaje de la probabilidad.

A la parte de la estadística que únicamente trata de describir y analizar un grupo dado, sin sacar ninguna conclusión ni hacer inferencia alguna acerca de un grupo más grande, se le conoce como *estadística descriptiva* o *deductiva*.

Antes de proceder al estudio de la estadística, se analizarán algunos conceptos matemáticos importantes.

## VARIABLES: DISCRETAS Y CONTINUAS

Una variable es un símbolo; por ejemplo,  $X$ ,  $Y$ ,  $H$ ,  $x$  o  $B$ , que puede tomar cualquiera de los valores de determinado conjunto al que se le conoce como *dominio* de la variable. A una variable que sólo puede tomar un valor se le llama *constante*.

Una variable que puede tomar cualquiera de los valores entre dos números dados es una *variable continua*; de lo contrario es una *variable discreta*.

**EJEMPLO 1** La cantidad  $N$  de hijos que tiene una familia puede tomar los valores 0, 1, 2, 3, ..., pero no puede tomar valores como 2.5 o 3.842; ésta es una variable discreta.

**EJEMPLO 2** La estatura  $H$  de una persona que puede ser 62 pulgadas (in), 63.8 in o 65.8341 in, dependiendo de la exactitud con que se mida, es una variable continua.

Los datos descritos mediante una variable discreta son *datos discretos* y los datos descritos mediante una variable continua son *datos continuos*. Un ejemplo de datos discretos es la cantidad de hijos que tiene cada una de 1 000 familias, en tanto que un ejemplo de datos continuos son las estaturas de 100 estudiantes universitarios. En general, una *medición* proporciona datos continuos; en cambio, una *enumeración* o un *conteo* proporciona datos discretos.

Es útil ampliar el concepto de variable a entidades no numéricas; por ejemplo, en el arco iris, color  $C$  es una variable que puede tomar los “valores” rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo o violeta. Estas variables se pueden reemplazar por números; por ejemplo, se puede denotar rojo con 1, anaranjado con 2, etcétera.

## REDONDEO DE CANTIDADES NUMÉRICAS

El resultado de redondear un número por ejemplo 72.8 a la unidad más cercana es 73 debido a que 72.8 está más cerca de 73 que de 72. De igual manera, 72.8146 redondeado a la centésima más cercana (o a dos lugares decimales) es 72.81, ya que 72.8146 está más cerca de 72.81 que de 72.82.

Sin embargo, para redondear 72.465 a la centésima más cercana, ocurre un dilema debido a que 72.465 se encuentra *precisamente a la mitad* entre 72.46 y 72.47. En estos casos, lo que se acostumbra hacer es redondear al *entero par* antes del 5. Así, 72.465 se redondea a 72.46, 183.575 se redondea a 183.58 y 116 500 000, redondeado al millón más cercano, es 116 000 000. Hacer esto es especialmente útil cuando se realiza una gran cantidad de operaciones para minimizar, así, el *error de redondeo acumulado* (ver problema 1.4).

## NOTACIÓN CIENTÍFICA

Al escribir números, en especial aquellos en los que hay muchos ceros antes o después del punto decimal, es conveniente usar la notación científica empleando potencias de 10.

**EJEMPLO 3**  $10^1 = 10$ ,  $10^2 = 10 \times 10 = 100$ ,  $10^5 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 100\,000$  y  $10^8 = 100\,000\,000$ .

**EJEMPLO 4**  $10^0 = 1$ ,  $10^{-1} = .1$  o  $0.1$ ;  $10^{-2} = .01$  o  $0.01$ ; y  $10^{-5} = .00001$  o  $0.00001$ .

**EJEMPLO 5**  $864\,000\,000 = 8.64 \times 10^8$  y  $0.00003416 = 3.416 \times 10^{-5}$ .

Obsérvese que el efecto de multiplicar un número, por ejemplo, por  $10^8$ , es recorrer el punto decimal del número ocho lugares *a la derecha*. El efecto de multiplicar un número por  $10^{-6}$  es recorrer el punto decimal del número seis lugares *a la izquierda*.

Con frecuencia, para hacer énfasis en que no se ha omitido un número distinto de cero antes del punto decimal, se escribe 0.1253 en lugar de .1253. Sin embargo, en casos en los que no pueda haber lugar a confusión, como en tablas, el cero antes del punto decimal puede omitirse.

Para indicar la multiplicación de dos o más números se acostumbra usar paréntesis o puntos. Así  $(5)(3) = 5 \cdot 3 = 5 \times 3 = 15$ , y  $(10)(10)(10) = 10 \cdot 10 \cdot 10 = 10 \times 10 \times 10 = 1\,000$ . Cuando se utilizan letras para representar números suelen omitirse los paréntesis y los puntos; por ejemplo,  $ab = (a)(b) = a \cdot b = a \times b$ .

La notación científica es útil al hacer cálculos, en especial para localizar el punto decimal. Entonces se hace uso de las reglas siguientes:

$$(10^p)(10^q) = 10^{p+q} \quad \frac{10^p}{10^q} = 10^{p-q}$$

donde  $p$  y  $q$  son números cualesquiera.

En  $10^p$ ,  $p$  es el *exponente* y 10 es la *base*.

**EJEMPLO 6**  $(10^3)(10^2) = 1\ 000 \times 100 = 100\ 000 = 10^5$  es decir,  $10^{3+2}$

$$\frac{10^6}{10^4} = \frac{1\ 000\ 000}{10\ 000} = 100 = 10^2 \quad \text{es decir, } 10^{6-4}$$

**EJEMPLO 7**  $(4\ 000\ 000)(0.0000000002) = (4 \times 10^6)(2 \times 10^{-10}) = (4)(2)(10^6)(10^{-10}) = 8 \times 10^{6-10}$   
 $= 8 \times 10^{-4} = 0.0008$

**EJEMPLO 8**  $\frac{(0.006)(80\ 000)}{0.04} = \frac{(6 \times 10^{-3})(8 \times 10^4)}{4 \times 10^{-2}} = \frac{48 \times 10^1}{4 \times 10^{-2}} = \left(\frac{48}{4}\right) \times 10^{1-(-2)}$   
 $= 12 \times 10^3 = 12\ 000$

## CIFRAS SIGNIFICATIVAS

Si se anota la estatura de una persona como 65.4 in, esto significa que la estatura verdadera estará entre 65.35 y 65.45 in. Los dígitos exactos, fuera de los ceros necesarios para localizar el punto decimal, son los *dígitos significativos* o *cifras significativas* del número.

**EJEMPLO 9** 65.4 tiene tres cifras significativas.

**EJEMPLO 10** 4.5300 tiene cinco cifras significativas.

**EJEMPLO 11**  $.0018 = 0.0018 = 1.8 \times 10^{-3}$  tiene dos cifras significativas.

**EJEMPLO 12**  $.001800 = 0.001800 = 1.800 \times 10^{-3}$  tiene cuatro cifras significativas.

Los números obtenidos de enumeraciones (o conteos), a diferencia de los obtenidos de mediciones, por supuesto son exactos y por lo tanto tienen un número ilimitado de cifras significativas. Sin embargo, en algunos de estos casos puede ser difícil decidir, sin más información, cuáles cifras son significativas. Por ejemplo, el número 186 000 000 puede tener 3, 4, ..., 9 cifras significativas. Si se sabe que tiene cinco cifras significativas puede ser más adecuado escribirlo como 186.00 millones o como  $1.8600 \times 10^8$ .

## CÁLCULOS

Al realizar cálculos en los que intervienen multiplicaciones, divisiones o raíces de números, el resultado final no puede tener más cifras significativas que el número con menos cifras significativas (ver problema 1.9).

**EJEMPLO 13**  $73.24 \times 4.53 = (73.24)(4.53) = 331$

**EJEMPLO 14**  $1.648 / 0.023 = 72$

**EJEMPLO 15**  $\sqrt{38.7} = 6.22$

**EJEMPLO 16**  $(8.416)(50) = 420.8$  (si 50 es exacto)

Cuando se suman o restan números, el resultado final no puede tener más cifras significativas después del punto decimal que los números con menos cifras significativas después del punto decimal (ver problema 1.10).

**EJEMPLO 17**  $3.16 + 2.7 = 5.9$

**EJEMPLO 18**  $83.42 - 72 = 11$ **EJEMPLO 19**  $47.816 - 25 = 22.816$  (si 25 es exacto)

La regla anterior para la suma y la resta puede extenderse (ver problema 1.11).

## FUNCIONES

Si a cada valor que puede tomar la variable  $X$  le corresponde un valor de una variable  $Y$ , se dice que  $Y$  es *función* de  $X$  y se escribe  $Y = F(X)$  (se lee “ $Y$  es igual a  $F$  de  $X$ ”) para indicar esta dependencia funcional. En lugar de  $F$  también pueden usarse otras letras ( $G, \phi$ , etcétera).

La variable  $X$  es la *variable independiente* y la variable  $Y$  es la *variable dependiente*.

Si a cada valor de  $X$  le corresponde únicamente un valor de  $Y$ , se dice que  $Y$  es una *función univaluada* de  $X$ ; de lo contrario, se dice que es una *función multivaluada* de  $X$ .

**EJEMPLO 20** La población  $P$  de Estados Unidos es función del tiempo  $t$ , lo que se escribe  $P = F(t)$ .**EJEMPLO 21** El estiramiento  $S$  de un resorte vertical es función del peso  $W$  que hay en el extremo del resorte, es decir,  $S = G(W)$ .

La dependencia (o correspondencia) funcional entre variables puede describirse mediante una tabla. Pero también puede indicarse mediante una ecuación que relaciona las variables, por ejemplo,  $Y = 2X - 3$ , a partir de la cual puede determinarse el valor de  $Y$  que corresponde a los diversos valores de  $X$ .

Si  $Y = F(X)$ ,  $F(3)$  denota “el valor de  $Y$  cuando  $X = 3$ ”,  $F(10)$  denota “el valor de  $Y$  cuando  $X = 10$ ”, etc. Así, si  $Y = F(X) = X^2$ , entonces,  $F(3) = 3^2 = 9$  es el valor de  $Y$  cuando  $X = 3$ .

El concepto de función puede ampliarse a dos o más variables (ver problema 1.17).

## COORDENADAS RECTANGULARES

En la figura 1-1 se muestra un diagrama de dispersión de EXCEL con cuatro puntos. Este *diagrama de dispersión* está formado por dos rectas mutuamente perpendiculares llamadas *ejes X* y *Y*. El eje *X* es horizontal y el eje *Y* es vertical. Estos dos ejes se cortan en un punto llamado *origen*. Estas dos rectas dividen al *plano XY* en cuatro regiones que se denominan I, II, III y IV, a las que se les conoce como primero, segundo, tercero y cuarto *cuadrantes*. En la figura 1-1 se muestran cuatro puntos. El punto  $(2, 3)$  está en el primer cuadrante y se grafica avanzando, desde el origen, 2 unidades a la derecha sobre el eje *X* y desde ahí, 3 unidades hacia arriba. El punto  $(-2.3, 4.5)$  está en el segundo cuadrante y se grafica avanzando, desde el origen, 2.3 unidades a la izquierda sobre el eje *X* y desde ahí, 4.5 unidades hacia arriba. El punto  $(-4, -3)$  está en el tercer cuadrante y se grafica avanzando, desde el origen, 4 unidades a la izquierda sobre el eje *X*, y desde ahí 3 unidades hacia abajo. El punto  $(3.5, -4)$  está en el cuarto cuadrante y se grafica avanzando 3.5 unidades a la derecha sobre el eje *X*, y desde ahí 4 unidades hacia abajo. El primer número de cada uno de estos pares es la *abscisa* del punto y el segundo número es la *ordenada* del punto. La abscisa y la ordenada, juntas, son las *coordenadas* del punto.

Las ideas anteriores pueden ampliarse construyendo un eje *Z* a través del origen y perpendicular al plano *XY*. En este caso las coordenadas de cada punto se denotan  $(X, Y, Z)$ .

## GRÁFICAS

Una *gráfica* es una representación visual de la relación entre las variables. En estadística, dependiendo de la naturaleza de los datos y del propósito que se persiga, se emplean distintos tipos de gráficas: *gráficas de barras*, *de pastel*, *pictogramas*, etc. A las gráficas también se les suele llamar *cartas* o *diagramas*. Así, se habla de cartas de barras, diagramas de pastel, etc. (ver los problemas 1.23, 1.24, 1.25, 1.26 y 1.27).

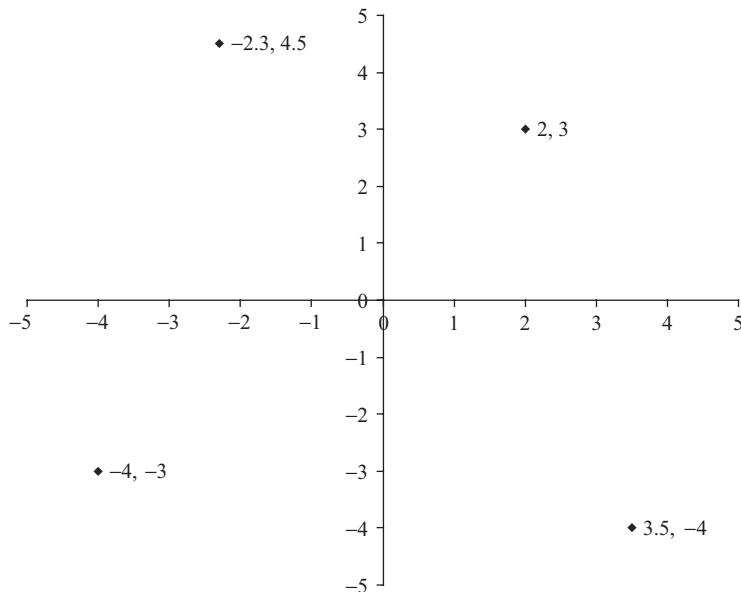


Figura 1-1 EXCEL, gráfica de puntos en los cuatro cuadrantes.

## ECUACIONES

Las ecuaciones son expresiones de la forma  $A = B$ , donde  $A$  es el *miembro (o lado) izquierdo* de la ecuación y  $B$  es el *miembro (o lado) derecho*. Si se aplican las mismas operaciones a ambos lados de una ecuación se obtienen *ecuaciones equivalentes*. Así, si a ambos miembros de una ecuación se suma o resta un mismo número se obtiene una ecuación equivalente; también, si ambos lados se multiplican por un mismo número o se dividen entre un mismo número, con excepción de la *división entre cero que no es válida*, se obtiene una ecuación equivalente.

**EJEMPLO 22** Dada la ecuación  $2X + 3 = 9$ , se resta 3 a ambos miembros:  $2X + 3 - 3 = 9 - 3$  o  $2X = 6$ . Se dividen ambos miembros entre 2:  $2X/2 = 6/2$  o  $X = 3$ . Este valor de  $X$  es una solución de la ecuación dada, como se puede ver sustituyendo  $X$  por 3, con lo que se obtiene  $2(3) + 3 = 9$ , o  $9 = 9$ , que es una *identidad*. Al proceso de obtener las soluciones de una ecuación se le conoce como *resolver* la ecuación.

Las ideas anteriores pueden extenderse a hallar soluciones de dos ecuaciones en dos incógnitas, de tres ecuaciones en tres incógnitas, etc. A tales ecuaciones se les conoce como *ecuaciones simultáneas* (ver problema 1.30).

## DESIGUALDADES

Los símbolos  $<$  y  $>$  significan “menor que” y “mayor que”, respectivamente. Los símbolos  $\leq$  y  $\geq$  significan “menor o igual a” y “mayor o igual a”, respectivamente. Todos estos símbolos se conocen como *signos de desigualdad*.

**EJEMPLO 23**  $3 < 5$  se lee “3 es menor que 5”.

**EJEMPLO 24**  $5 > 3$  se lee “5 es mayor que 3”.

**EJEMPLO 25**  $X < 8$  se lee “ $X$  es menor que 8”.

**EJEMPLO 26**  $X \geq 10$  se lee “ $X$  es mayor o igual a 10”.

**EJEMPLO 27**  $4 < Y \leq 6$  se lee “4 es menor que  $Y$  y  $Y$  es menor o igual a 6” o “ $Y$  está entre 4 y 6, excluyendo al 4 e incluyendo al 6” o “ $Y$  es mayor que 4 y menor o igual a 6”.

A las relaciones en las que intervienen signos de desigualdad se les llama *desigualdades*. Así como se habla de miembros de una ecuación, también se habla de *miembros de una desigualdad*. Por lo tanto, en la desigualdad  $4 < Y \leq 6$ , los miembros son 4,  $Y$  y 6.

Una desigualdad válida sigue siendo válida si:

1. A cada miembro de la desigualdad se le suma o se le resta un mismo número.

**EJEMPLO 28** Como  $15 > 12$ ,  $15 + 3 > 12 + 3$  (es decir,  $18 > 15$ ) y  $15 - 3 > 12 - 3$  (es decir,  $12 > 9$ ).

2. Cada miembro de la desigualdad se multiplica por un mismo número *positivo* o se divide entre un mismo número positivo.

**EJEMPLO 29** Como  $15 > 12$ ,  $(15)(3) > (12)(3)$  (es decir,  $45 > 36$ ) y  $15/3 > 12/3$  (es decir,  $5 > 4$ ).

3. Cada miembro se multiplica o se divide por un mismo número *negativo*, lo que indica que los símbolos de la desigualdad son invertidos.

**EJEMPLO 30** Como  $15 > 12$ ,  $(15)(-3) < (12)(-3)$  (es decir,  $-45 < -36$ ) y  $15/(-3) < 12/(-3)$  (es decir,  $-5 < -4$ ).

## LOGARITMOS

Si  $x > 0$ ,  $b > 0$  y  $b \neq 1$ ,  $y = \log_b x$  si y sólo si  $\log b^y = x$ . Un logaritmo es un exponente. Es la potencia a la que hay que elevar la base  $b$  para obtener el número del que se busca el logaritmo. Las dos bases más utilizadas son el 10 y la  $e$ , que es igual a 2.71828182... A los logaritmos base 10 se les llama *logaritmos comunes* y se escriben  $\log_{10}x$  o simplemente  $\log(x)$ . A los logaritmos base  $e$  se les llama *logaritmos naturales* y se escriben  $\ln(x)$ .

**EJEMPLO 31** Encuentre los siguientes logaritmos y después encuéntrelos usando EXCEL:  $\log_2 8$ ,  $\log_5 25$  y  $\log_{10} 1\,000$ . La potencia a la que hay que elevar al 2 para obtener 8 es tres, así  $\log_2 8 = 3$ . La potencia a la que hay que elevar al 5 para obtener 25 es dos, así  $\log_5 25 = 2$ . La potencia a la que hay que elevar al 10 para obtener 1 000 es tres, así  $\log_{10} 1\,000 = 3$ . EXCEL tiene tres funciones para calcular logaritmos. La función LN calcula logaritmos naturales, la función LOG10 calcula logaritmos comunes y la función LOG(x,b) calcula el logaritmo de  $x$  base  $b$ . =LOG(8,2) da 3, =LOG(25,5) da 2, =LOG10(1 000) da 3.

**EJEMPLO 32** Calcule los logaritmos naturales de los números del 1 al 5 usando EXCEL. Los números 1 a 5 se ingresan en las celdas B1:F1 y en la celda B2 se ingresa la expresión =LN(B1), se hace clic y se arrastra desde B2 hasta F2. EXCEL proporciona el siguiente resultado.

|       |   |          |          |          |          |
|-------|---|----------|----------|----------|----------|
| X     | 1 | 2        | 3        | 4        | 5        |
| LN(x) | 0 | 0.693147 | 1.098612 | 1.386294 | 1.609438 |

**EJEMPLO 33** Muestre que las respuestas del ejemplo 32 son correctas mostrando que  $e^{\ln(x)}$  da el valor  $x$ . Los logaritmos se ingresan en B1:F1 y la expresión  $e^{\ln(x)}$ , que está representada por =EXP(B1) se ingresa en B2, se hace clic y se arrastra de B2 a F2. EXCEL da los resultados siguientes. Los números en D2 y E2 difieren de 3 y 4 debido a error de redondeo.

|                                |   |          |          |          |          |
|--------------------------------|---|----------|----------|----------|----------|
| LN(x)                          | 0 | 0.693147 | 1.098612 | 1.386294 | 1.609438 |
| $x = \text{EXP}(\text{LN}(x))$ | 1 | 2        | 2.999999 | 3.999999 | 5        |

El ejemplo 33 ilustra que si se tiene el logaritmo de un número ( $\log_b(x)$ ) se puede volver a obtener el número  $x$  usando la relación  $b^{\log_b(x)} = x$ .

**EJEMPLO 34** El número  $e$  puede definirse como un límite. La cantidad  $(1 + (1/x))^x$  se va acercando a  $e$  a medida que  $x$  va creciendo. Obsérvense las evaluaciones de EXCEL de  $(1 + (1/x))^x$  para  $x = 1, 10, 100, 1\,000, 10\,000, 100\,000$  y  $1\,000\,000$ .

|             |   |          |          |          |          |          |           |
|-------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| x           | 1 | 10       | 100      | 1 000    | 10 000   | 100 000  | 1 000 000 |
| $(1+1/x)^x$ | 2 | 2.593742 | 2.704814 | 2.716924 | 2.718146 | 2.718268 | 2.71828   |

Los números 1, 10, 100, 1 000, 10 000, 100 000 y 1 000 000 se ingresan en B1:H1 y la expresión  $= (1 + 1/B1)^B1$  se ingresa en B2, se hace clic y se arrastra de B2 a H2. Esto se expresa matemáticamente mediante la expresión  $\lim_{x \rightarrow \infty} (1 + (1/x))^x = e$ .

**EJEMPLO 35** El saldo de una cuenta que gana interés compuesto  $n$  veces por año está dado por  $A(t) = P(1 + (r/n))^{nt}$  donde  $P$  es el capital,  $r$  es la tasa de interés,  $t$  es el tiempo en años y  $n$  es el número de períodos compuestos por año. El saldo de una cuenta que gana interés continuo está dado por  $A(t) = Pe^{rt}$ . Para comparar el crecimiento de \$1 000 a interés continuo con el de \$1 000 a interés compuesto trimestralmente, después de 1, 2, 3, 4 y 5 años, ambos a una tasa de interés de 5%, se usa EXCEL. Los resultados son:

| Años            | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Trimestralmente | 1 050.95 | 1 104.49 | 1 160.75 | 1 219.89 | 1 282.04 |
| Continuamente   | 1 051.27 | 1 105.17 | 1 161.83 | 1 221.4  | 1 284.03 |

Se ingresan los tiempos 1, 2, 3, 4 y 5 en B1:F1; en B2 se ingresa la expresión de EXCEL  $=1\,000*(1.0125)^(4*B1)$ , se hace clic y se arrastra desde B2 hasta F2. En B3 se ingresa la expresión  $=1\,000*EXP(0.05*B1)$ , se hace clic y se arrastra desde B3 hasta F3. El interés continuo compuesto da resultados ligeramente mejores.

## PROPIEDADES DE LOS LOGARITMOS

Las propiedades más importantes de los logaritmos son las siguientes:

1.  $\log_b MN = \log_b M + \log_b N$
2.  $\log_b M/N = \log_b M - \log_b N$
3.  $\log_b M^P = p \log_b M$

**EJEMPLO 36** Escriba  $\log_b(xy^4/z^3)$  como suma o diferencia de logaritmos de  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

$$\log_b \frac{xy^4}{z^3} = \log_b xy^4 - \log_b z^3 \quad \text{propiedad 2}$$

$$\log_b \frac{xy^4}{z^3} = \log_b x + \log_b y^4 - \log_b z^3 \quad \text{propiedad 1}$$

$$\log_b \frac{xy^4}{z^3} = \log_b x + 4 \log_b y - 3 \log_b z \quad \text{propiedad 3}$$

## ECUACIONES LOGARÍTMICAS

Para resolver ecuaciones logarítmicas:

1. Todos los logaritmos se aíslan en un lado de la ecuación.
2. Las sumas o diferencias de logaritmos se expresan como un solo logaritmo.
3. La ecuación obtenida en el paso 2 se expresa en forma exponencial.
4. Se resuelve la ecuación obtenida en el paso 3.
5. Se verifican las soluciones.

**EJEMPLO 37** Solucione la siguiente ecuación logarítmica:  $\log_4(x + 5) = 3$ . Primero, se expresa esta ecuación en forma exponencial como  $x + 5 = 4^3 = 64$ . A continuación se despeja  $x$  como sigue,  $x = 64 - 5 = 59$ . Por último se verifica la solución.  $\log_4(59 + 5) = \log_4(64) = 3$  ya que  $4^3 = 64$ .

**EJEMPLO 38** Resuelva la ecuación logarítmica siguiente:  $\log(6y - 7) + \log y = \log(5)$ . La suma de logaritmos se reemplaza como el logaritmo del producto,  $\log(6y - 7)y = \log(5)$ . Se igualan  $(6y - 7)y$  y  $5$ . El resultado es  $6y^2 - 7y = 5$  o  $6y^2 - 7y - 5 = 0$ . Se factoriza esta ecuación cuadrática como  $(3y - 5)(2y + 1) = 0$ . Las soluciones son  $y = 5/3$  y  $y = -1/2$ . El  $-1/2$  se descarta como solución, ya que los logaritmos de números negativos no están definidos.  $y = 5/3$  demuestra ser una solución cuando se sustituye en la ecuación original. Por lo tanto, la única solución es  $y = 5/3$ .

**EJEMPLO 39** Resuelva la ecuación logarítmica siguiente:

$$\ln(5x) - \ln(4x + 2) = 4$$

La diferencia de logaritmos se convierte en el logaritmo del cociente,  $\ln(5x/(4x + 2)) = 4$ . Aplicando la definición de logaritmo:  $5x/(4x + 2) = e^4 = 54.59815$ . Despejando  $x$  de la ecuación  $5x = 218.39260x + 109.19630$  se obtiene  $x = -0.5117$ . Sin embargo, esta respuesta no satisface la ecuación  $\ln(5x) - \ln(4x + 2) = 4$ , ya que la función  $\log$  no está definida para números negativos. La ecuación  $\ln(5x) - \ln(4x + 2) = 4$  no tiene solución.

## PROBLEMAS RESUELTOS

### VARIABLES

**1.1** En cada uno de los casos siguientes indíquese si se trata de datos continuos o de datos discretos:

- a) Cantidad de acciones que se venden diariamente en la bolsa de valores.
- b) Temperatura registrada cada media hora en un observatorio.
- c) Vida media de los cinescopios producidos por una empresa.
- d) Ingreso anual de los profesores universitarios.
- e) Longitud de 100 pernos producidos en una fábrica

### SOLUCIÓN

- a) Discreta; b) continua; c) continua; d) discreta; e) continua.

**1.2** Dar el dominio de cada una de las variables siguiente e indicar si es una variable continua o discreta.

- a) Cantidad  $G$  de galones (gal) de agua en una lavadora.
- b) Cantidad  $B$  de libros en un anaquel.
- c) Suma  $S$  de la cantidad de puntos que se obtienen al lanzar un par de dados.
- d) Diámetro  $D$  de una esfera.
- e) País  $C$  en Europa.

### SOLUCIÓN

- a) *Dominio:* Cualquier valor desde 0 gal hasta la capacidad de la máquina. *Variable:* continua.
- b) *Dominio:* 0, 1, 2, 3, ... hasta la mayor cantidad de libros que se quepan en el anaquel. *Variable:* discreta.
- c) *Dominio:* Con un solo dado se pueden obtener 1, 2, 3, 4, 5 o 6 puntos. Por lo tanto, la suma de puntos en un par de dados puede ser 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12, los cuales constituyen el dominio de  $S$ . *Variable:* discreta.
- d) *Dominio:* Si se considera un punto como una esfera de diámetro cero, el dominio de  $D$  son todos los valores desde cero en adelante. *Variable:* continua.
- e) *Dominio:* Inglaterra, Francia, Alemania, etc., que pueden representarse por medio de los números 1, 2, 3, etc. *Variable:* discreta.

### REDONDEO DE CANTIDADES NUMÉRICAS

**1.3** Redondear cada uno de los números siguientes como se indica:

- |            |                            |            |                            |
|------------|----------------------------|------------|----------------------------|
| a) 48.6    | a la unidad más cercana    | f) 143.95  | a la décima más cercana    |
| b) 136.5   | a la unidad más cercana    | g) 368     | a la centena más cercana   |
| c) 2.484   | a la centésima más cercana | h) 24 448  | al millar más cercano      |
| d) 0.0435  | a la milésima más cercana  | i) 5.56500 | a la centésima más cercana |
| e) 4.50001 | a la unidad más cercana    | j) 5.56501 | a la centésima más cercana |

### SOLUCIÓN

- a) 49; b) 136; c) 2.48; d) 0.044; e) 5; f) 144.0; g) 400; h) 24 000; i) 5.56; j) 5.57

- 1.4** Sumar los números 4.35, 8.65, 2.95, 12.45, 6.65, 7.55 y 9.75: *a)* directamente, *b)* redondeando a la décima más cercana de acuerdo con la convención del “entero par” y *c)* redondeando de manera que se incremente el dígito antes del 5.

**SOLUCIÓN**

|           |       |           |      |           |      |
|-----------|-------|-----------|------|-----------|------|
| <i>a)</i> | 4.35  | <i>b)</i> | 4.4  | <i>c)</i> | 4.4  |
|           | 8.65  |           | 8.6  |           | 8.7  |
|           | 2.95  |           | 3.0  |           | 3.0  |
|           | 12.45 |           | 12.4 |           | 12.5 |
|           | 6.65  |           | 6.6  |           | 6.7  |
|           | 7.55  |           | 7.6  |           | 7.6  |
|           | 9.75  |           | 9.8  |           | 9.8  |
| Total     | 52.35 | Total     | 52.4 | Total     | 52.7 |

Obsérvese que el procedimiento *b)* es mejor que el procedimiento *c)* debido a que en el procedimiento *b)* se minimiza la *acumulación de errores de redondeo*.

**NOTACIÓN CIENTÍFICA Y CIFRAS SIGNIFICATIVAS**

- 1.5** Expresar cada uno de los números siguiente sin utilizar potencias de 10.

|                                |                                |                                     |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| <i>a)</i> $4.823 \times 10^7$  | <i>c)</i> $3.8 \times 10^{-7}$ | <i>e)</i> $300 \times 10^8$         |
| <i>b)</i> $8.4 \times 10^{-6}$ | <i>d)</i> $1.86 \times 10^5$   | <i>f)</i> $70\,000 \times 10^{-10}$ |

**SOLUCIÓN**

- a)* Se recorre el punto decimal siete lugares a la derecha y se obtiene 48 230 000; *b)* se recorre el punto decimal seis lugares a la izquierda y se obtiene 0.0000084; *c)* 0.000380; *d)* 186 000; *e)* 30 000 000 000; *f)* 0.0000070000.

- 1.6** En cada inciso diga cuántas cifras significativas hay, entendiéndose que los números se han dado exactamente.

|                             |                        |  |
|-----------------------------|------------------------|--|
| <i>a)</i> 149.8 in          | <i>d)</i> 0.00280 m    | <i>g)</i> 9 casas                        |
| <i>b)</i> 149.80 in         | <i>e)</i> 1.00280 m    | <i>h)</i> $4.0 \times 10^3$ libras (lb)  |
| <i>c)</i> 0.0028 metros (m) | <i>f)</i> 9 gramos (g) | <i>i)</i> $7.58400 \times 10^{-5}$ dinas |

**SOLUCIÓN**

- a)* Cuatro; *b)* cinco; *c)* dos; *d)* tres; *e)* seis; *f)* una; *g)* ilimitadas; *h)* dos; *i)* seis.

- 1.7** ¿Cuál es el error máximo en cada una de las mediciones siguientes, entendiéndose que se han registrado exactamente?

|                     |  |   |
|---------------------|--|---|
| <i>a)</i> 73.854 in | <i>b)</i> 0.09800 pies cúbicos ( $\text{ft}^3$ ) | <i>c)</i> $3.867 \times 10^8$ kilómetros (km) |
|---------------------|--|---|

**SOLUCIÓN**

- a)* Esta medida puede variar desde 73.8535 hasta 73.8545 in; por lo tanto, el error máximo es 0.0005 in. Hay cinco cifras significativas.
- b)* La cantidad de pies cúbicos puede variar desde 0.097995 hasta 0.098005 pies cúbicos; por lo tanto, el error máximo es 0.0005  $\text{ft}^3$ . Hay cuatro cifras significativas.
- c)* El verdadero número de kilómetros es mayor que  $3.8665 \times 10^8$ , pero menor que  $3.8675 \times 10^8$ ; por lo tanto, el error máximo es  $0.0005 \times 10^8$ , o 50 000 km. Hay cuatro cifras significativas.

- 1.8** Escribir cada número empleando la notación científica. A menos que se indique otra cosa, supóngase que todas las cifras son significativas.

- a) 24 380 000 (cuatro cifras significativas)  
 b) 0.000009851  
 c) 7 300 000 000 (cinco cifras significativas)  
 d) 0.00018400

### SOLUCIÓN

$$a) 2.438 \times 10^7; \quad b) 9.851 \times 10^{-6}; \quad c) 7.30000 \times 10^9; \quad d) 1.8400 \times 10^{-4}$$

## CÁLCULOS

- 1.9** Mostrar que el producto de los números 5.74 y 3.8, entendiéndose que tienen tres y dos cifras significativas, respectivamente, no puede ser exacto a más de dos cifras significativas.

### SOLUCIÓN

#### Primer método

$5.74 \times 3.8 = 21.812$ , pero en este producto no todas las cifras son significativas. Para determinar cuántas cifras son significativas, obsérvese que 5.74 representa algún número entre 5.735 y 5.745, y 3.8 representa algún número entre 3.75 y 3.85. Por lo tanto, el menor valor que puede tener este producto es  $5.735 \times 3.75 = 21.50625$  y el mayor valor que puede tener es  $5.745 \times 3.85 = 22.11825$ .

Dado que este intervalo de valores es 21.50625 a 22.11825, es claro que sólo los dos primeros dígitos del producto son significativos y el resultado se escribe como 22. Nótese que el número 22 se determina para cualquier número entre 21.5 y 22.5.

#### Segundo método

Imprimiendo en cursivas las cifras dudosas, este producto se puede calcular como sigue:

$$\begin{array}{r} 5.74 \\ 38 \\ \hline 4592 \\ 1722 \\ \hline 21.812 \end{array}$$

En el resultado no se debe conservar más de una cifra dudosa, por lo que el resultado es 22 a dos cifras significativas. Obsérvese que no es necesario trabajar con más cifras significativas que las presentes en el factor menos exacto; por lo tanto, si 5.74 se redondea a 5.7, el producto será  $5.7 \times 3.8 = 21.66 = 22$ , a dos cifras significativas, lo cual coincide con el resultado obtenido antes.

Cuando los cálculos se hacen sin calculadora, se puede ahorrar trabajo si no se conserva más de una o dos cifras más de las que tiene el factor menos exacto y se redondea el resultado al número adecuado de cifras significativas. Cuando se usa una computadora, que puede dar muchos dígitos, hay que tener cuidado de no creer que todos los dígitos son significativos.

- 1.10** Sume los números 4.19355, 15.28, 5.9561, 12.3 y 8.472, entendiéndose que todas las cifras son significativas.

### SOLUCIÓN

En el cálculo a), que se presenta en la página siguiente, las cifras dudosas están en cursivas. El resultado final con no más de una cifra dudosa es 46.2

$$\begin{array}{r}
 a) \quad 4.19355 \\
 15.28 \\
 5.9561 \\
 12.3 \\
 8.472 \\
 \hline
 46.20165
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 b) \quad 4.19 \\
 15.28 \\
 5.96 \\
 12.3 \\
 8.47 \\
 \hline
 46.20
 \end{array}$$

Se puede ahorrar un poco de trabajo si se hacen los cálculos como en el inciso *b*), donde únicamente se ha conservado un lugar decimal más de los que tiene el número menos exacto. El resultado final se redondea a 46.2, que coincide con el resultado en el inciso *a*).

- 1.11** Calcular  $475\,000\,000 + 12\,684\,000 - 1\,372\,410$  si estos números tienen tres, cinco y siete cifras significativas, respectivamente.

### SOLUCIÓN

En el cálculo *a*) que se muestra abajo, se conservan todas las cifras y se redondea el resultado final. En el cálculo se usa un método similar al del problema 1.10 *b*). En ambos casos las cifras dudosas aparecen en cursivas.

$$\begin{array}{r}
 a) \quad 475\,000\,000 \\
 + 12\,684\,000 \\
 \hline
 487\,684\,000
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 b) \quad 475\,000\,000 \\
 + 12\,700\,000 \\
 \hline
 487\,700\,000
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 487\,700\,000 \\
 - 1\,400\,000 \\
 \hline
 486\,300\,000
 \end{array}$$

El resultado final se redondea a 486 000 000; o mejor aún, para indicar que hay tres cifras significativas, se escribe 486 millones o  $4.86 \times 10^8$ .

- 1.12.** Realizar las operaciones siguientes

$$\begin{array}{ll}
 a) \quad 48.0 \times 943 & e) \quad \frac{(1.47562 - 1.47322)(4\,895.36)}{0.000159180} \\
 b) \quad 8.35/98 & f) \quad \text{Si los denominadores 5 y 6 son exactos, } \frac{(4.38)^2}{5} + \frac{(5.482)^2}{6} \\
 c) \quad (28)(4\,193)(182) & g) \quad 3.1416 \sqrt{71.35} \\
 d) \quad \frac{(526.7)(0.001280)}{0.000034921} & h) \quad \sqrt{128.5 - 89.24}
 \end{array}$$

### SOLUCIÓN

$$\begin{aligned}
 a) \quad 48.0 \times 943 &= (48.0)(943) = 45\,300 \\
 b) \quad 8.35/98 &= 0.085 \\
 c) \quad (28)(4\,193)(182) &= (2.8 \times 10^1)(4.193 \times 10^3)(1.82 \times 10^2) \\
 &= (2.8)(4.193)(1.82) \times 10^{1+3+2} = 21 \times 10^6 = 2.1 = 10^7
 \end{aligned}$$

Lo que también puede escribirse como 21 millones, para indicar que hay dos cifras significativas.

$$\begin{aligned}
 d) \quad \frac{(526.7)(0.001280)}{0.000034921} &= \frac{(5.267 \times 10^2)(1.280 \times 10^{-3})}{3.4921 \times 10^{-5}} = \frac{(5.267)(1.280)}{3.4921} \times \frac{(10^2)(10^{-3})}{10^{-5}} \\
 &= 1.931 \times \frac{10^{2-3}}{10^{-5}} = 1.931 \times \frac{10^{-1}}{10^{-5}} \\
 &= 1.931 \times 10^{-1+5} = 1.931 \times 10^4
 \end{aligned}$$

Lo que también se puede escribir como 19.31 miles, para indicar que hay cuatro cifras significativas.

$$\begin{aligned}
e) \quad & \frac{(1.47562 - 1.47322)(4895.36)}{0.000159180} = \frac{(0.00240)(4895.36)}{0.000159180} = \frac{(2.40 \times 10^{-3})(4.89536 \times 10^3)}{1.59180 \times 10^{-4}} \\
& = \frac{(2.40)(4.89536)}{1.59180} \times \frac{(10^{-3})(10^3)}{10^{-4}} = 7.38 \times \frac{10^0}{10^{-4}} = 7.38 \times 10^4
\end{aligned}$$

Lo que también se puede escribir como 73.8 miles para indicar que hay tres cifras significativas. Obsérvese que aunque originalmente en todos los números había seis cifras significativas, al sustraer 1.47322 de 1.47562 algunas de estas cifras significativas se perdieron.

$$f) \quad \text{Si los denominadores 5 y 6 son exactos, } \frac{(4.38)^2}{5} = \frac{(5.482)^2}{6} = 3.84 + 5.009 = 8.85$$

$$g) \quad 3.1416\sqrt{71.35} = (3.1416)(8.447) = 26.54$$

$$h) \quad \sqrt{128.5 - 89.24} = \sqrt{39.3} = 6.27$$

- 1.13** Evaluar cada una de las expresiones siguientes, con  $X = 3$ ,  $Y = -5$ ,  $A = 4$  y  $B = -7$ , donde todos los números se supone que son exactos:

$$a) \quad 2X - 3Y$$

$$f) \quad \frac{X^2 - Y^2}{A^2 - B^2 + 1}$$

$$b) \quad 4Y - 8X + 28$$

$$g) \quad \sqrt{2X^2 - Y^2 - 3A^2 + 4B^2 + 3}$$

$$c) \quad \frac{AX + BY}{BX - AY}$$

$$h) \quad \sqrt{\frac{6A^2}{X} + \frac{2B^2}{Y}}$$

$$d) \quad X^2 - 3XY - 2Y^2$$

$$e) \quad 2(X + 3Y) - 4(3X - 2Y)$$

### SOLUCIÓN

$$a) \quad 2X - 3Y = 2(3) - 3(-5) = 6 + 15 = 21$$

$$b) \quad 4Y - 8X + 28 = 4(-5) - 8(3) + 28 = -20 - 24 + 28 = -16$$

$$c) \quad \frac{AX + BY}{BX - AY} = \frac{(4)(3) + (-7)(-5)}{(-7)(3) - (4)(-5)} = \frac{12 + 35}{-21 + 20} = \frac{47}{-1} = -47$$

$$d) \quad X^2 - 3XY - 2Y^2 = (3)^2 - 3(3)(-5) - 2(-5)^2 = 9 + 45 - 50 = 4$$

$$\begin{aligned}
e) \quad 2(X + 3Y) - 4(3X - 2Y) &= 2[(3) + 3(-5)] - 4[3(3) - 2(-5)] \\
&= 2(3 - 15) - 4(9 + 10) = 2(-12) - 4(19) = -24 - 76 = -100
\end{aligned}$$

### Otro método

$$\begin{aligned}
2(X + 3Y) - 4(3X - 2Y) &= 2X + 6Y - 12X + 8Y = -10X + 14Y = -10(3) + 14(-5) \\
&= -30 - 70 = -100
\end{aligned}$$

$$f) \quad \frac{X^2 - Y^2}{A^2 - B^2 + 1} = \frac{(3)^2 - (-5)^2}{(4)^2 - (-7)^2 + 1} = \frac{9 - 25}{16 - 49 + 1} = \frac{-16}{-32} + \frac{1}{2} = 0.5$$

$$\begin{aligned}
g) \quad \sqrt{2X^2 - Y^2 - 3A^2 + 4B^2 + 3} &= \sqrt{2(3)^2 - (-5)^2 - 3(4)^2 + 4(-7)^2 + 3} \\
&= \sqrt{18 - 25 - 48 + 196 + 3} = \sqrt{144} = 12
\end{aligned}$$

$$h) \quad \sqrt{\frac{6A^2}{X} + \frac{2B^2}{Y}} = \sqrt{\frac{6(4)^2}{3} + \frac{2(-7)^2}{-5}} = \sqrt{\frac{96}{3} + \frac{98}{-5}} = \sqrt{12.4} = 3.52 \quad \text{aproximadamente}$$

### FUNCIONES Y GRÁFICAS

- 1.14** En la tabla 1.1 se presentan las cantidades de bushels (bu) de trigo y de maíz producidas en una granja en los años 2002, 2003, 2004, 2005 y 2006. De acuerdo con esta tabla, determinar el año o los años en los que: *a)* se produjeron menos bushels de trigo, *b)* se produjo la mayor cantidad de bushels de maíz, *c)* hubo la mayor dis-

**Tabla 1.1** Producción de trigo y maíz desde 2002 hasta 2006

| Año  | Bushels de trigo | Bushels de maíz |
|------|------------------|-----------------|
| 2002 | 205              | 80              |
| 2003 | 215              | 105             |
| 2004 | 190              | 110             |
| 2005 | 205              | 115             |
| 2006 | 225              | 120             |

minución en la producción de trigo, *d*) se produjo una misma cantidad de trigo, *e*) la suma de las producción de trigo y maíz fue máxima.

### SOLUCIÓN

- a) 2004; b) 2006; c) 2004; d) 2002 y 2005; e) 2006

**1.15** Sean  $W$  y  $C$ , respectivamente, las cantidades de bushels de trigo y maíz producidas en el año  $t$  en la granja del problema 1.14. Es claro que  $W$  y  $C$  son funciones de  $t$ ; esto se indica como  $W = F(t)$  y  $C = G(t)$ .

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| a) Encontrar $W$ para $t = 2004$ . | g) ¿Cuál es el dominio de la variable $t$ ?         |
| b) Encontrar $C$ para $t = 2002$ . | h) ¿Es $W$ una función univaluada de $t$ ?          |
| c) Encontrar $t$ para $W = 205$ .  | i) ¿Es $t$ función de $W$ ?                         |
| d) Encontrar $F(2005)$ .           | j) ¿Es $C$ función de $W$ ?                         |
| e) Encontrar $G(2005)$ .           | k) ¿Cuál es una variable independiente, $t$ o $W$ ? |
| f) Encontrar $C$ para $W = 190$ .  |   |

### SOLUCIÓN

- |   |  |
|---|--|
| a) 190  |  |
| b) 80   |  |
| c) 2002 y 2005  |  |
| d) 205  |  |
| e) 115  |  |
| f) 110  |  |
| g) Todos los años, desde el 2002 hasta el 2006.   |  |
| h) Sí, ya que a cada uno de los valores que puede tomar $t$ le corresponde uno y sólo un valor de $W$ .   |  |
| i) Sí, para indicar que $t$ es función de $W$ se puede escribir $t = H(W)$ .  |  |
| j) Sí.  |  |
| k) Físicamente, suele considerarse que $W$ está determinada por $t$ y no que $t$ está determinada por $W$ . Por lo tanto, $t$ es la variable dependiente y $W$ es la variable independiente. Sin embargo, matemáticamente, en algunos casos, cualquiera de las dos variables puede considerarse como la variable independiente y la otra variable como la variable dependiente. La variable independiente es a la que se le pueden asignar diversos valores, y la otra variable cuyos valores dependen de los valores asignados es la variable dependiente. |  |

**1.16** Una variable  $Y$  está determinada por otra variable  $X$  de acuerdo con la ecuación  $Y = 2X - 3$ , donde el 2 y el 3 son exactos.

- a) Encontrar  $Y$  para  $X = 3, -2$  y  $1.5$ .
- b) Construir una tabla en la que se den los valores de  $Y$  para  $X = -2, -1, 0, 1, 2, 3$  y  $4$ .
- c) Si  $Y = F(X)$  denota que  $Y$  depende de  $X$ , determinar  $F(2.4)$  y  $F(0.8)$ .
- d) ¿Cuál es el valor de  $X$  que corresponde a  $Y = 15$ ?
- e) ¿Puede expresarse  $X$  como función de  $Y$ ?

- f) ¿Es  $Y$  una función univaluada de  $X$ ?  
 g) ¿Es  $X$  una función univaluada de  $Y$ ?

### SOLUCIÓN

- a) Para  $X = 3$ ,  $Y = 2X - 3 = 2(3) - 3 = 6 - 3 = 3$ . Para  $X = -2$ ,  $Y = 2X - 3 = 2(-2) - 3 = -4 - 3 = -7$ . Para  $X = 1.5$ ,  $Y = 2X - 3 = 2(1.5) - 3 = 3 - 3 = 0$ .  
 b) En la tabla 1.2 se presentan los valores de  $Y$  obtenidos en el inciso a). Obsérvese que se pueden construir muchas tablas usando otros valores de  $X$ . La relación expresada por  $Y = 2X - 3$  es equivalente a la colección de *todas* esas tablas.

**Tabla 1.2**

|     |    |    |    |    |   |   |   |
|-----|----|----|----|----|---|---|---|
| $X$ | -2 | -1 | 0  | 1  | 2 | 3 | 4 |
| $Y$ | -7 | -5 | -3 | -1 | 1 | 3 | 5 |

- c)  $F(2.4) = 2(2.4) - 3 = 4.8 - 3 = 1.8$  y  $F(0.8) = 2(0.8) - 3 = 1.6 - 3 = -1.4$ .  
 d) En  $Y = 2X - 3$  se sustituye  $Y = 15$ . Esto da  $15 = 2X - 3$ ,  $2X = 18$  y  $X = 9$ .  
 e) Sí. Ya que  $Y = 2X - 3$ ,  $Y + 3 = 2X$  y  $X = \frac{1}{2}(Y + 3)$ . Así,  $X$  queda expresada *explícitamente* como función de  $Y$ .  
 f) Sí. Ya que para cada uno de los valores que puede tomar  $X$  (que es una cantidad infinita) hay uno y sólo un valor de  $Y$ .  
 g) Sí. Ya que de acuerdo con el inciso e)  $X = \frac{1}{2}(Y + 3)$ , de manera que para cada uno de los valores que puede tomar  $Y$  hay uno y sólo un valor de  $X$ .

- 1.17** Si  $Z = 16 + 4X - 3Y$ , hallar el valor de  $Z$  que corresponda a: a)  $X = 2$ ,  $Y = 5$ ; b)  $X = -3$ ,  $Y = -7$ ; c)  $X = -4$ ,  $Y = 2$ .

### SOLUCIÓN

- a)  $Z = 16 + 4(2) - 3(5) = 16 + 8 - 15 = 9$   
 b)  $Z = 16 + 4(-3) - 3(-7) = 16 - 12 + 21 = 25$   
 c)  $Z = 16 + 4(-4) - 3(2) = 16 - 16 - 6 = -6$

A valores dados de  $X$  y  $Y$ , les corresponde un valor de  $Z$ . Para denotar que  $Z$  depende de  $X$  y de  $Y$  se escribe  $Z = F(X, Y)$  (que se lee “ $Z$  es función de  $X$  y  $Y$ ”).  $F(2, 5)$  denota el valor de  $Z$  para  $X = 2$  y  $Y = 5$  que, de acuerdo con el inciso a), es 9. De igual manera,  $F(-3, -7) = 25$  y  $F(-4, 2) = -6$ , de acuerdo con los incisos b) y c), respectivamente.

Las variables  $X$  y  $Y$  son las *variables independientes* y la variable  $Z$  es la *variable dependiente*.

- 1.18** Los gastos fijos de una empresa son de \$1 000 por día y los costos de producción de cada artículo son de \$25.

- a) Escribir una ecuación que exprese el costo total de producción de  $x$  unidades por día.  
 b) Usando EXCEL, elaborar una tabla en la que se den los costos de producción de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 unidades por día.  
 c) Evaluar e interpretar  $f(100)$ .

### SOLUCIÓN

- a)  $f(x) = 1\,000 + 25x$ .  
 b) Los números 5, 10, ..., 50 se ingresan en B1:K1, la expresión  $= 1\,000 + 25*B1$  se ingresa en B2, se da clic y se arrastra desde B2 hasta K2 para obtener el resultado siguiente:

|        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| x      | 5     | 10    | 15    | 20    | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    |
| $f(x)$ | 1 025 | 1 050 | 1 075 | 1 100 | 1 125 | 1 150 | 1 175 | 1 200 | 1 225 |

- c)  $f(100) = 1\,000 + 25(100) = 1\,000 + 2\,500 = 3\,500$ . Fabricar  $x = 100$  unidades en un día cuesta 3 500.

**1.19** El ancho de un rectángulo es  $x$  y el largo es  $x + 10$ .

- Escribir una función,  $A(x)$ , que exprese el área en función de  $x$ .
- Usar EXCEL para elaborar una tabla que dé el valor de  $A(x)$  para  $x = 0, 1, \dots, 5$ .
- Escribir una función,  $P(x)$ , que exprese el perímetro en función de  $x$ .
- Usar EXCEL para elaborar una tabla que dé el valor de  $P(x)$  para  $x = 0, 1, \dots, 5$ .

### SOLUCIÓN

- $A(x) = x(x + 10) = x^2 + 10x$
- En las celdas B1:G1 se ingresan los números 0, 1, 2, 3, 4 y 5; en la celda B2 se ingresa la expresión  $=B1^2+10*B1$ , se da clic y se arrastra desde B2 hasta G2 con lo que se obtiene:

|        |   |    |    |    |    |    |
|--------|---|----|----|----|----|----|
| X      | 0 | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |
| $A(x)$ | 0 | 11 | 24 | 39 | 56 | 75 |

- $P(x) = x + (x + 10) + x + (x + 10) = 4x + 20$ .
- En las celdas B1:G1 se ingresan los números 0, 1, 2, 3, 4 y 5; en la celda B2 se ingresa la expresión  $=4*B1+20$ , se da clic y se arrastra desde B2 hasta G2 con lo que se obtiene:

|        |    |    |    |    |    |    |
|--------|----|----|----|----|----|----|
| X      | 0  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |
| $P(x)$ | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 |

**1.20** En un sistema de coordenadas rectangulares localizar los puntos que tienen como coordenadas: a) (5, 2), b) (2, 5), c) (-5, 1), d) (1, -3), e) (3, -4), f) (-2.5, -4.8), g) (0, -2.5) y h) (4, 0). Usar MAPLE para graficar estos puntos.

### SOLUCIÓN

Véase la figura 1-2. A continuación se da el comando de MAPLE para graficar estos ocho puntos. Cada punto está representado por un círculo.

```
L := [[5, 2], [2, 5], [-5, 1], [1, -3], [3, -4], [-2.5, -4.8], [0, -2.5], [4, 0]];
pointplot(L, font = [TIMES, BOLD, I4], symbol = circle);
```

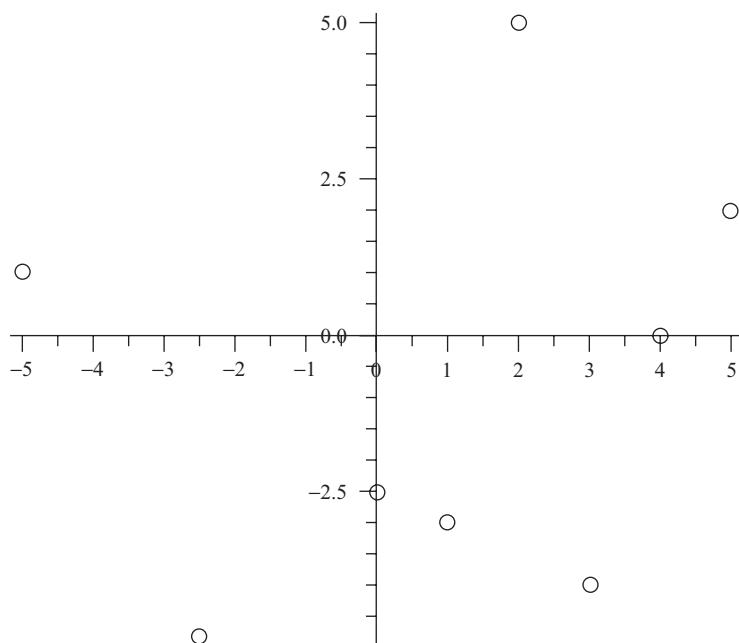


Figura 1-2 Gráfica MAPLE de puntos.

- 1.21** Graficar la ecuación  $Y = 4X - 4$  usando MINITAB.

### SOLUCIÓN

Obsérvese que la gráfica se extiende indefinidamente tanto en dirección positiva como en dirección negativa del eje  $X$ . Aquí se decidió, arbitrariamente, graficar sólo desde  $-5$  hasta  $5$ . En la figura 1-3 se muestra el diagrama de la recta  $Y = 4X - 4$  obtenida con MINITAB. De la barra de herramientas se selecciona la secuencia “Graph ⇒ Scatterplots” para activar scatter plots (gráfica de dispersión). Los puntos sobre la recta se obtienen ingresando los enteros desde  $-5$  hasta  $5$  y usando la calculadora de MINITAB para calcular los valores correspondientes de  $Y$ . Los valores de  $X$  y  $Y$  son los siguientes:

|   |     |     |     |     |    |    |   |   |   |    |    |
|---|-----|-----|-----|-----|----|----|---|---|---|----|----|
| X | -5  | -4  | -3  | -2  | -1 | 0  | 1 | 2 | 3 | 4  | 5  |
| Y | -24 | -20 | -16 | -12 | -8 | -4 | 0 | 4 | 8 | 12 | 16 |

Los puntos se han unido para dar una idea de cómo se ve la gráfica de la ecuación  $Y = 4X - 4$ .

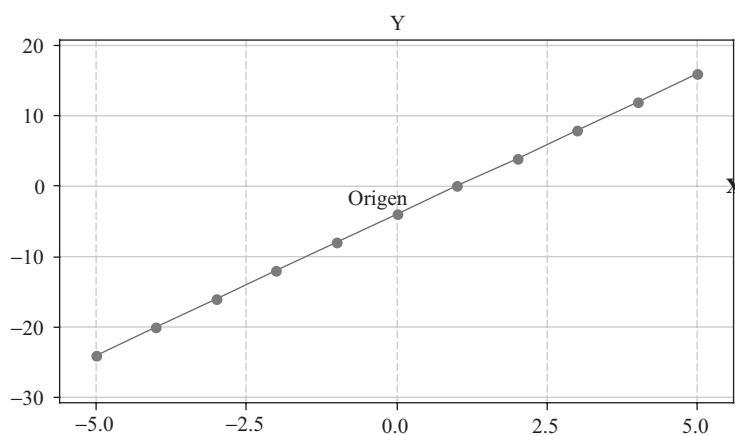


Figura 1-3 Gráfica MINITAB de una función lineal.

- 1.22** Grafique la ecuación  $Y = 2X^2 - 3X - 9$  usando EXCEL.

### SOLUCIÓN

Tabla 1.3 Valores de una función cuadrática generados con EXCEL

|   |    |    |    |    |    |    |     |    |   |    |    |
|---|----|----|----|----|----|----|-----|----|---|----|----|
| X | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | 0  | 1   | 2  | 3 | 4  | 5  |
| Y | 56 | 35 | 18 | 5  | -4 | -9 | -10 | -7 | 0 | 11 | 26 |

Se usó EXCEL para elaborar esta tabla que da los valores de  $Y$  para los valores de  $X$  igual a  $-5, -4, \dots, 5$ . Se ingresa la expresión  $=2*B1^2-3*B1-9$  en la celda B2, se da clic y se arrastra desde B2 hasta L2. Para obtener la gráfica que se muestra en la figura 1-4 se usa el asistente para gráficos de EXCEL. Ésta es una *función cuadrática*. Las *raíces* (puntos en los que la gráfica cruza el eje  $x$ ) de esta función cuadrática están una en  $X = 3$  y la otra entre  $-2$  y  $-1$ . Haciendo clic sobre el asistente para gráficos de EXCEL, se muestran las diversas gráficas que es posible hacer. Obsérvese que a medida que  $X$  toma valores cada vez más grandes, tanto positivos como negativos, la gráfica de esta función cuadrática va hacia el infinito positivo. Obsérvese también que la gráfica toma su valor más bajo cuando  $X$  está entre  $0$  y  $1$ .

- 1.23** La tabla 1.4 muestra el aumento de la cantidad de diabéticos desde 1997 hasta 2005. Grafique estos datos.

Tabla 1.4 Cantidad de nuevos diabéticos

|                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Año<br>Millones | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|                 | 0.88 | 0.90 | 1.01 | 1.10 | 1.20 | 1.25 | 1.28 | 1.36 | 1.41 |

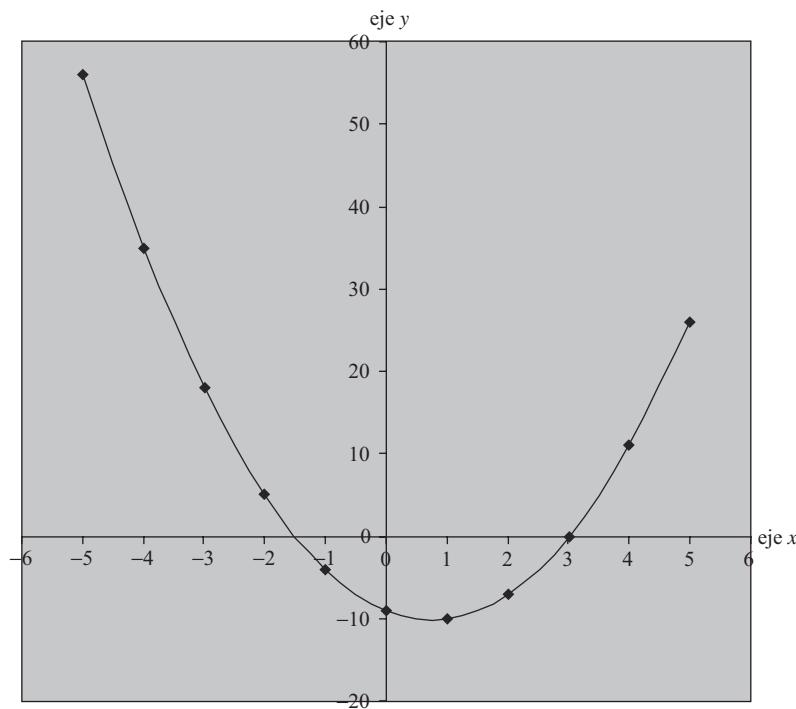


Figura 1-4 Diagrama EXCEL de una curva llamada parábola.

## SOLUCIÓN

### Primer método

La primer gráfica que se muestra en la figura 1-5 es la *gráfica de una serie de tiempos*. En este diagrama se presentan los nuevos casos de diabetes desde 1997 hasta 2005. Se muestra que durante este periodo la cantidad de nuevos casos ha ido aumentando.

### Segundo método

A la figura 1-6 se le conoce como *gráfica de barras*, *carta de barras* o *diagrama de barras*. El ancho de las barras, que en todas es el mismo, no tiene ningún significado en este caso y pueden ser de cualquier tamaño en tanto no se traslapen.

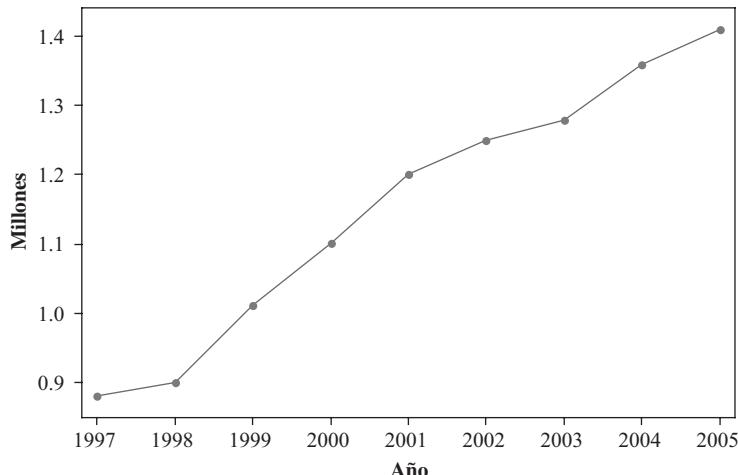


Figura 1-5 MINITAB, serie de tiempos de nuevos casos de diabetes por año.

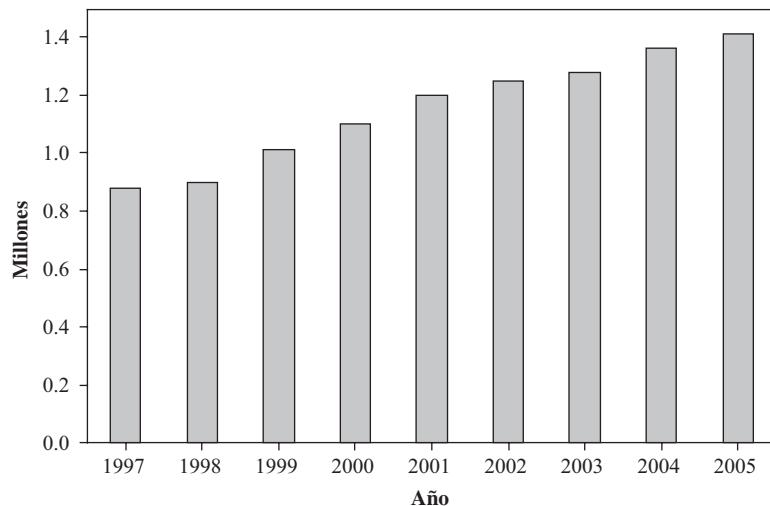


Figura 1-6 MINITAB, gráfica de barras de los nuevos casos de diabetes por año.

### Tercer método

En la figura 1-7 se muestra una gráfica de barras en la que las barras son horizontales en vez de verticales.

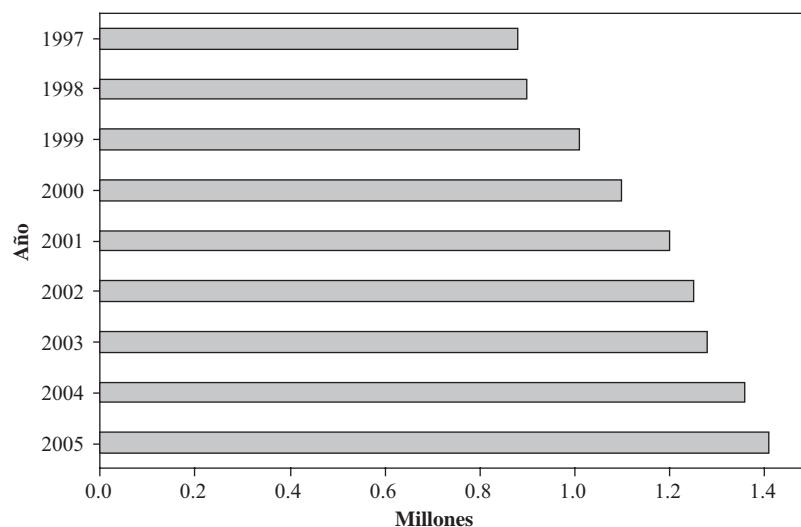


Figura 1-7 MINITAB, gráfica de barras horizontales de nuevos casos de diabetes por año.

- 1.24** Grafique los datos del problema 1.14 usando una gráfica de MINITAB para serie de tiempos, una gráfica de barras agrupadas con efecto tridimensional (3-D) de EXCEL y una gráfica de barras apiladas con efecto 3-D de EXCEL.

### SOLUCIÓN

Las soluciones se dan en las figuras 1-8, 1-9 y 1-10.

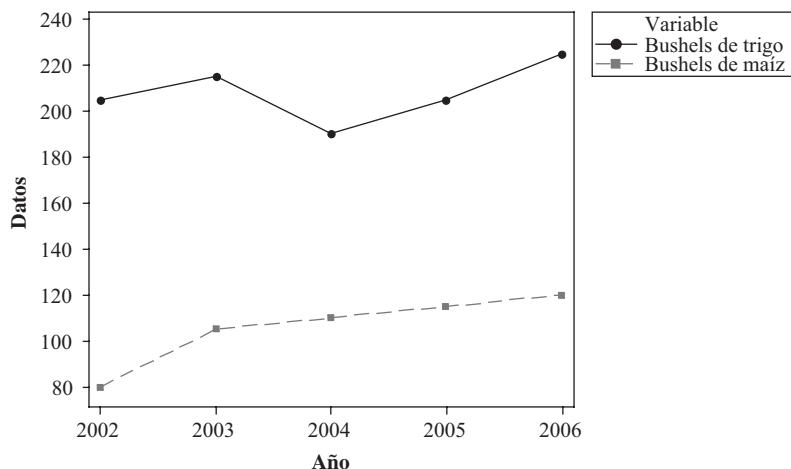


Figura 1-8 MINITAB, serie de tiempos de la producción (2002 a 2006) de trigo y maíz.

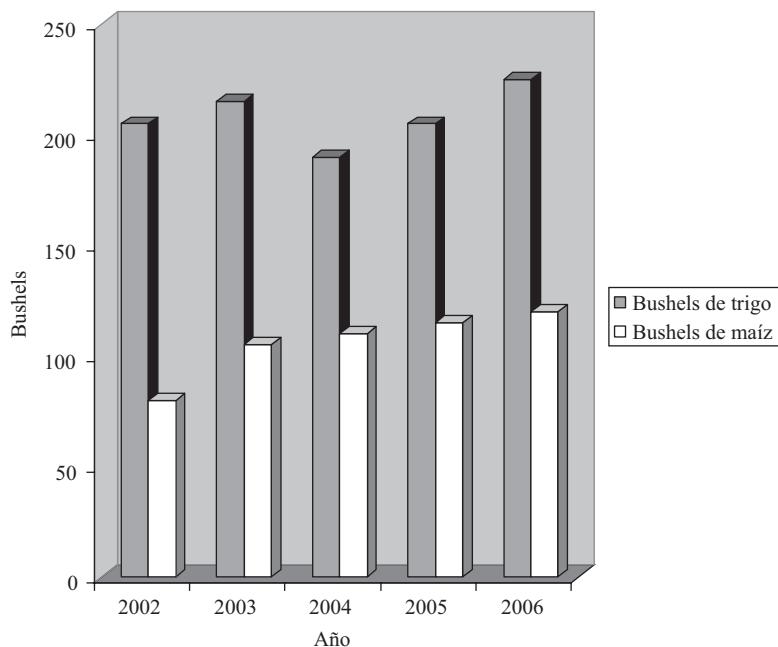
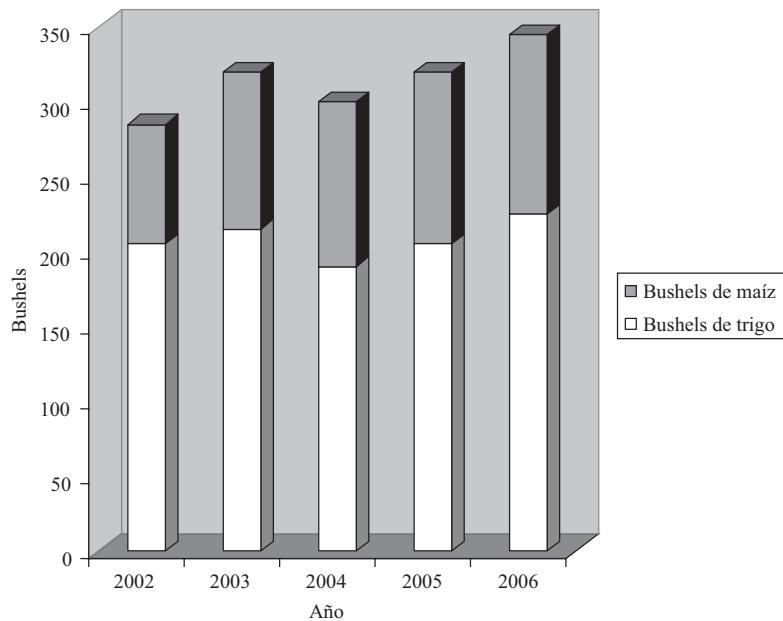


Figura 1-9 EXCEL, barras agrupadas con efecto 3-D.

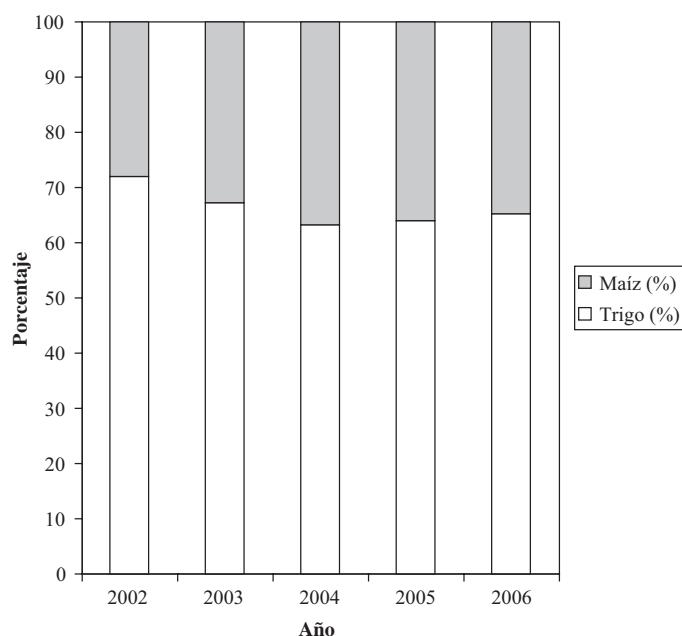
- 1.25** a) Expresar las cantidades anuales de bushels de trigo y de maíz, presentadas en la tabla 1.1 del problema 1.4, como porcentajes de la producción anual total.  
 b) Graficar los porcentajes obtenidos en el inciso a).

### SOLUCIÓN

- a) El porcentaje de trigo correspondiente al 2002 es  $= 205/(205 + 80) = 71.9\%$  y porcentaje de maíz  $= 100\% - 71.9\% = 28.1\%$ , etc. Estos porcentajes se muestran en la tabla 1.5.  
 b) Las columnas apiladas 100% comparan los porcentajes con la contribución de cada valor al total de cada categoría (figura 1-11).

**Figura 1-10 EXCEL, barras apiladas con efecto 3-D.****Tabla 1.5 Producción de trigo y maíz desde 2002 hasta 2006**

| Año  | Trigo (%) | Maíz (%) |
|------|-----------|----------|
| 2002 | 71.9      | 28.1     |
| 2003 | 67.2      | 32.8     |
| 2004 | 63.3      | 36.7     |
| 2005 | 64.1      | 35.9     |
| 2006 | 65.2      | 34.8     |

**Figura 1-11 EXCEL, columnas 100% apiladas.**

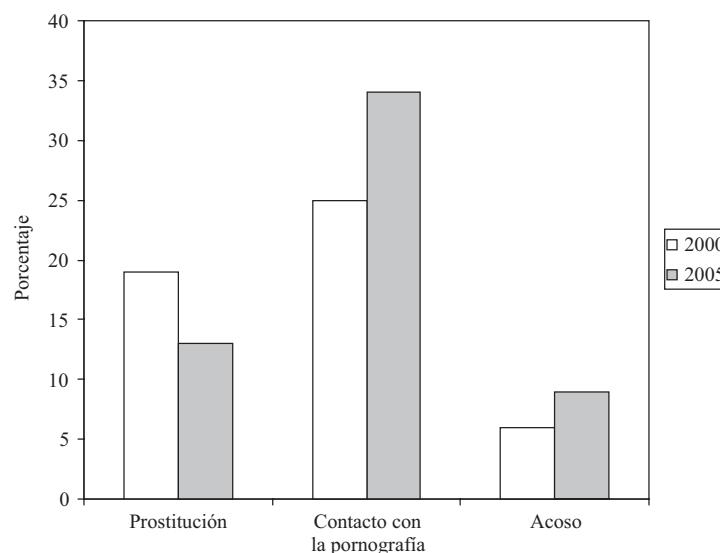
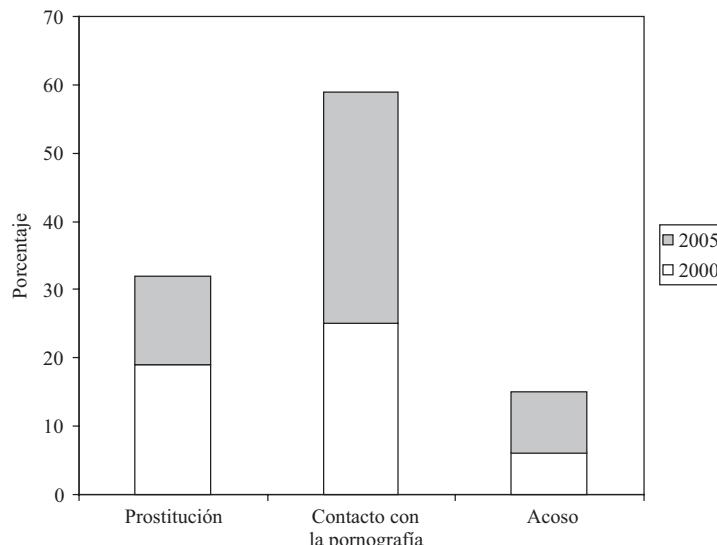
- 1.26** En un número reciente de *USA Today*, una nota titulada “Peligro en línea”, informa de un estudio realizado en 1 500 niños entre 10 y 17 años de edad. Presentar la información de la tabla 1.6 en una gráfica de barras agrupadas y en una gráfica de barras apiladas.

**Tabla 1.6**

|      | Prostitución | Contacto con la pornografía | Acoso |
|------|--------------|-----------------------------|-------|
| 2000 | 19%          | 25%                         | 6%    |
| 2005 | 13%          | 34%                         | 9%    |

**SOLUCIÓN**

En la figura 1-12 se muestra la gráfica de barras con columnas agrupadas y en la figura 1-13 la gráfica de barras con columnas apiladas obtenida con esta información.

**Figura 1-12 EXCEL, gráfica de barras con columnas agrupadas.****Figura 1-13 EXCEL, gráfica de barras con columnas apiladas.**

- 1.27** En una nota reciente de *USA Today* titulada “¿Dónde están los estudiantes universitarios?”, se informó que en Estados Unidos hay más de 17.5 millones de universitarios que estudian en más de 6 400 escuelas. En la tabla 1.7 se da la matrícula de acuerdo al tipo de escuela.

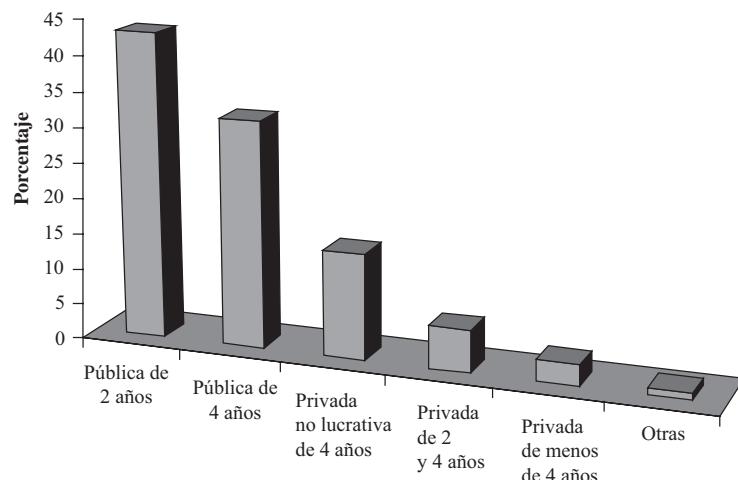
**Tabla 1.7** ¿Dónde están los estudiantes universitarios?

| Tipo de escuela                | Porcentaje |
|--------------------------------|------------|
| Pública de 2 años              | 43         |
| Pública de 4 años              | 32         |
| Privada no lucrativa de 4 años | 15         |
| Privada de 2 y 4 años          | 6          |
| Privada de menos de 4 años     | 3          |
| Otras                          | 1          |

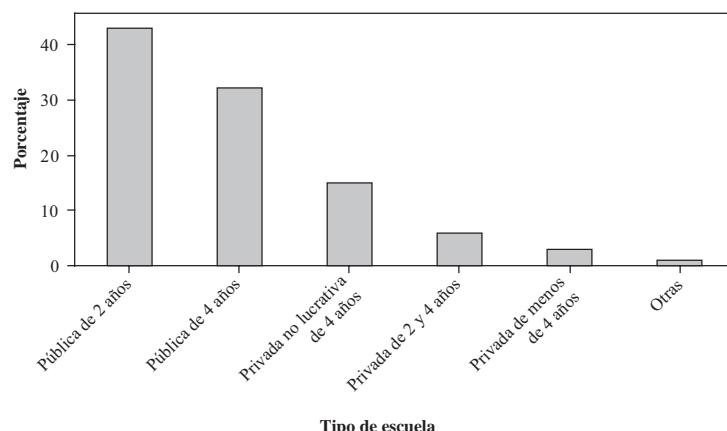
Con la información de la tabla 1.7 construya una gráfica de barras 3-D usando EXCEL y una gráfica de barras usando MINITAB.

### SOLUCIÓN

Las figuras 1-14 y 1-15 dan las gráficas pedidas.



**Figura 1-14** EXCEL, gráfica de barras 3-D con los datos de la tabla 1.7.



**Figura 1-15** MINITAB, gráfica de barras con los datos de la tabla 1.7.

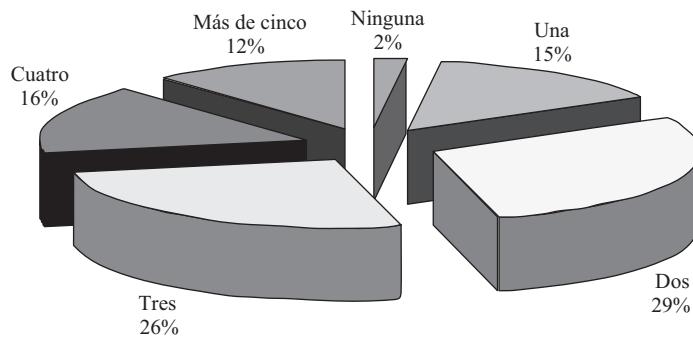
- 1.28** Los estadounidenses tienen en promedio 2.8 televisores por hogar. Con los datos de la tabla 1.8 elabore una gráfica de pastel usando EXCEL.

**Tabla 1.8 Televisores por hogar**

| Televisores  | Porcentaje |
|--------------|------------|
| Ninguno      | 2          |
| Uno          | 15         |
| Dos          | 29         |
| Tres         | 26         |
| Cuatro       | 16         |
| Más de cinco | 12         |

### SOLUCIÓN

En la figura 1-16 se presenta la gráfica de pastel obtenida con EXCEL para los datos de la tabla 1.8.



**Figura 1-16 EXCEL, gráfica de pastel con la información de la tabla 1.8.**

### ECUACIONES

- 1.29** Resuelva las siguientes ecuaciones:

$$\begin{array}{ll} a) \quad 4a - 20 = 8 & c) \quad 18 - 5b = 3(b + 8) + 10 \\ b) \quad 3X + 4 = 24 - 2X & d) \quad \frac{Y + 2}{3} + 1 = \frac{Y}{2} \end{array}$$

### SOLUCIÓN

- a) Sumar 20 a ambos miembros:  $4a - 20 + 20 = 8 + 20$  o bien  $4a = 28$ .  
 Dividir ambos lados entre 4:  $4a/4 = 28/4$  y  $a = 7$ .  
*Verificación:*  $4(7) - 20 = 8$ ,  $28 - 20 = 8$  y  $8 = 8$ .
- b) Restar 4 de ambos miembros:  $3X + 4 - 4 = 24 - 2X - 4$  o bien  $3X = 20 - 2X$ .  
 Sumar  $2X$  a ambos lados:  $3X + 2X = 20 - 2X + 2X$  o bien  $5X = 20$ .  
 Dividir ambos lados entre 5:  $5X/5 = 20/5$  y  $X = 4$ .  
*Verificación:*  $3(4) + 4 = 24 - 2(4)$ ,  $12 + 4 = 24 - 8$  y  $16 = 16$ .

Este resultado se puede obtener mucho más rápidamente si se observa que todos los términos se pueden pasar o trasponer de un miembro a otro de la ecuación cambiándoles simplemente el signo. Así, se puede escribir

$$3X + 4 = 24 - 2X \quad 3X + 2X = 24 - 4 \quad 5X = 20 \quad X = 4$$

- c)  $18 - 5b = 3b + 24 + 10$  y  $18 - 5b = 34$ .  
 Transponiendo,  $-5b - 3b = 34 - 18$  o bien  $-8b = 16$ .  
 Dividiendo entre  $-8$ ,  $-8b/(-8) = 16/(-8)$  y  $b = -2$ .  
*Verificación:*  $18 - 5(-2) = 3(-2 + 8) + 10$ ,  $18 + 10 = 3(6) + 10$  y  $28 = 28$ .
- d) Primero se multiplican ambos miembros por 6, que es el mínimo común denominador.

$$6\left(\frac{Y+2}{3} + 1\right) = 6\left(\frac{Y}{2}\right) \quad 6\left(\frac{Y+2}{3}\right) + 6(1) = \frac{6Y}{2} \quad 2(Y+2) + 6 = 3Y$$

$$2Y + 4 + 6 = 3Y \quad 2Y + 10 = 3Y \quad 10 = 3Y - 2Y \quad Y = 10$$

$$\text{Verificación: } \frac{10+2}{3} + 1 = \frac{10}{2}, \frac{12}{3} + 1 = \frac{10}{2}, 4 + 1 = 5 \text{ y } 5 = 5.$$

**1.30** Resolver los siguientes sistemas de ecuaciones simultáneas:

|                          |                           |                               |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| <i>a)</i> $3a - 2b = 11$ | <i>b)</i> $5X + 14Y = 78$ | <i>c)</i> $3a + 2b + 5c = 15$ |
| $5a + 7b = 39$           | $7X + 3Y = -7$            | $7a - 3b + 2c = 52$           |
|                          |                           | $5a + b - 4c = 2$             |

### SOLUCIÓN

|   |                  |       |
|---|------------------|-------|
| <i>a)</i> Multiplicando la primera ecuación por 7: $21a - 14b = 77$ | $21a - 14b = 77$ | $(1)$ |
| Multiplicando la segunda ecuación por 2: $10a + 14b = 78$           | $10a + 14b = 78$ | $(2)$ |
| Sumando: $31a = 155$  |                  |       |
| Dividiendo entre 31: $a = 5$  |                  |       |

Obsérvese que multiplicando cada una de las ecuaciones dadas por un número adecuado, se obtienen las ecuaciones equivalentes (1) y (2), en las que los coeficientes de la variable  $b$  son numéricamente iguales. Después, sumando las dos ecuaciones se elimina la incógnita  $b$  y se encuentra  $a$ .

Sustituyendo  $a = 5$  en la primera ecuación:  $3(5) - 2b = 11$ ,  $-2b = -4$  y  $b = 2$ . Por lo tanto,  $a = 5$  y  $b = 2$ .

*Verificación:*  $3(5) - 2(2) = 11$ ,  $15 - 4 = 11$  y  $11 = 11$ ;  $5(5) + 7(2) = 39$ ,  $25 + 14 = 39$  y  $39 = 39$ .

|   |                   |       |
|---|-------------------|-------|
| <i>b)</i> Multiplicando la primera ecuación por 3: $15X + 42Y = 234$  | $15X + 42Y = 234$ | $(3)$ |
| Multiplicando la segunda ecuación por -14: $-98X - 42Y = 98$  | $-98X - 42Y = 98$ | $(4)$ |
| Sumando: $-83X = 332$   |                   |       |
| Dividiendo entre -83: $X = -4$  |                   |       |
| Sustituyendo $X = -4$ en la primera ecuación: $5(-4) + 14Y = 78$ , $14Y = 98$ , y $Y = 7$ .                                   |                   |       |
| Por lo tanto, $X = -4$ y $Y = 7$ .  |                   |       |
| <i>Verificación:</i> $5(-4) + 14(7) = 78$ , $-20 + 98 = 78$ y $78 = 78$ ; $7(-4) + 3(7) = -7$ , $-28 + 21 = -7$ y $-7 = -7$ . |                   |       |

|   |                           |       |
|---|---------------------------|-------|
| <i>c)</i> Multiplicando la primera ecuación por 2: $6a + 4b + 10c = 30$ | $6a + 4b + 10c = 30$      |       |
| Multiplicando la segunda ecuación por -5: $-35a + 15b - 10c = -260$     | $-35a + 15b - 10c = -260$ |       |
| Sumando: $-29a + 19b = -230$  | $-29a + 19b = -230$       | $(5)$ |
| Multiplicando la segunda ecuación por 2: $14a - 6b + 4c = 104$          | $14a - 6b + 4c = 104$     |       |
| Repetiendo la tercera ecuación: $5a + b - 4c = 2$                       | $5a + b - 4c = 2$         |       |
| Sumando: $19a - 5b = 106$   | $19a - 5b = 106$          | $(6)$ |

De esta manera se ha eliminado  $c$  y quedan dos ecuaciones (5) y (6), que deben resolverse simultáneamente para encontrar  $a$  y  $b$ .

|   |                       |  |
|---|-----------------------|--|
| <i>Multiplicando la ecuación (5) por 5:</i> $-145a + 95b = -1150$ | $-145a + 95b = -1150$ |  |
| <i>Multiplicando la ecuación (6) por 19:</i> $361a - 95b = 2014$  | $361a - 95b = 2014$   |  |
| Sumando: $216a = 864$   | $216a = 864$          |  |
| Dividiendo entre 216: $a = 4$                                     | $a = 4$               |  |

Sustituyendo  $a = 4$  en la ecuación (5) o bien (6), se encuentra que  $b = -6$ .

Sustituyendo  $a = 4$  y  $b = -6$  en cualquiera de las ecuaciones dadas, se obtiene  $c = 3$ .

Por lo tanto,  $a = 4$ ,  $b = -6$  y  $c = 3$ .

*Verificación:*  $3(4) + 2(-6) + 5(3) = 15$  y  $15 = 15$ ;  $7(4) - 3(-6) + 2(3) = 52$  y  $52 = 52$ ;  $5(4) + (-6) - 4(3) = 2$  y  $2 = 2$ .

## DESIGUALDADES

**1.31** Expresar con palabras el significado de:

- a)  $N > 30$       b)  $X \leq 12$       c)  $0 < p \leq 1$       d)  $\mu - 2t < X < \mu + 2t$

### SOLUCIÓN

- a)  $N$  es mayor que 30.
- b)  $X$  es menor o igual a 12.
- c)  $p$  es mayor que cero y menor o igual a 1.
- d)  $X$  es mayor que  $\mu - 2t$  pero menor que  $\mu + 2t$ .

**1.32** Traducir a símbolos lo siguiente:

- a) La variable  $X$  toma valores entre 2 y 5 inclusive.
- b) La media aritmética  $\bar{X}$  es mayor que 28.42 y menor que 31.56.
- c)  $m$  es un número positivo menor o igual a 10.
- d)  $P$  es un número no negativo.

### SOLUCIÓN

- a)  $2 \leq X \leq 5$ ; b)  $28.42 < \bar{X} < 31.56$ ; c)  $0 < m \leq 10$ ; d)  $P \geq 0$ .

**1.33** Empleando los signos de desigualdad, ordenar los números 3.42,  $-0.6$ ,  $-2.1$ ,  $1.45$  y  $-3$  en a) en orden creciente de magnitud y en b) en orden decreciente de magnitud.

### SOLUCIÓN

- a)  $-3 < -2.1 < -0.6 < 1.45 < 3.42$
- b)  $3.42 > 1.45 > -0.6 > -2.1 > -3$

Obsérvese que cuando estos puntos se grafican como puntos en la línea (ver problema 1.18), aumentan de izquierda a derecha.

**1.34** Resolver cada una de las desigualdades siguientes (es decir, despejar  $X$ ):

$$\begin{array}{lll} a) 2X < 6 & c) 6 - 4X < -2 & e) -1 \leq \frac{3 - 2X}{5} \leq 7 \\ b) 3X - 8 \geq 4 & d) -3 < \frac{X - 5}{2} < 3 & \end{array}$$

### SOLUCIÓN

- a) Dividiendo ambos lados entre 2 se obtiene  $X < 3$ .
- b) Sumando 8 a ambos lados,  $3X \geq 12$ ; dividiendo ambos lados entre 3,  $X \geq 4$ .
- c) Sumando  $-6$  a ambos lados,  $-4X < -8$ ; dividiendo ambos lados entre  $-4$ ,  $X > 2$ . Obsérvese que como ocurre en las ecuaciones, también en una desigualdad se puede trasponer un término de un lado a otro de la desigualdad cambiando simplemente el signo del término; por ejemplo, en el inciso b),  $3X \geq 8 + 4$ .
- d) Multiplicando por 2,  $-6 < X - 5 < 6$ ; sumando 5,  $-1 < X < 11$ .
- e) Multiplicando por 5,  $-5 \leq 3 - 2X \leq 35$ ; sumando  $-3$ ,  $-8 \leq -2X \leq 32$ ; dividiendo entre  $-2$ ,  $4 \geq X \geq -16$ , o bien  $-16 \leq X \leq 4$ .

## LOGARITMOS Y PROPIEDADES DE LOS LOGARITMOS

- 1.35** Utilizar la definición  $y = \log_b x$  para hallar los logaritmos siguientes y después usar EXCEL para verificar la respuesta. (Obsérvese que  $y = \log_b x$  significa que  $b^y = x$ ).

- Encontrar el log de base 2 de 32.
- Encontrar el log de base 4 de 64.
- Encontrar el log de base 6 de 216.
- Encontrar el log de base 8 de 4 096.
- Encontrar el log de base 10 de 10 000.

### SOLUCIÓN

- a) 5; b) 3; c) 3; d) 4; e) 4.

La expresión de EXCEL  $=\text{LOG}(32,2)$  da 5,  $=\text{LOG}(64,4)$  da 3,  $=\text{LOG}(216,6)$  da 3,  $=\text{LOG}(4\,096,8)$  da 4 y  $=\text{LOG}(10\,000,10)$  da 4.

- 1.36** Empleando las propiedades de los logaritmos, volver a escribir los logaritmos siguientes como sumas y diferencias de logaritmos.

a)  $\ln\left(\frac{x^2y^3z}{ab}\right)$       b)  $\log\left(\frac{a^2b^3c}{yz}\right)$

Empleando las propiedades de los logaritmos, reescribir los logaritmos siguientes como un solo logaritmo.

- c)  $\ln(5) + \ln(10) - 2 \ln(5)$       d)  $2 \log(5) - 3 \log(5) + 5 \log(5)$

### SOLUCIÓN

- a)  $2 \ln(x) + 3 \ln(y) + \ln(z) - \ln(a) - \ln(b)$   
 b)  $2 \log(a) + 3 \log(b) + \log(c) - \log(y) - \log(z)$   
 c)  $\ln(2)$   
 d)  $\log(625)$

- 1.37** Usando SAS y SPSS, graficar  $y = \ln(x)$ .

### SOLUCIÓN

Las soluciones se muestran en las figuras 1-17 y 1-18.

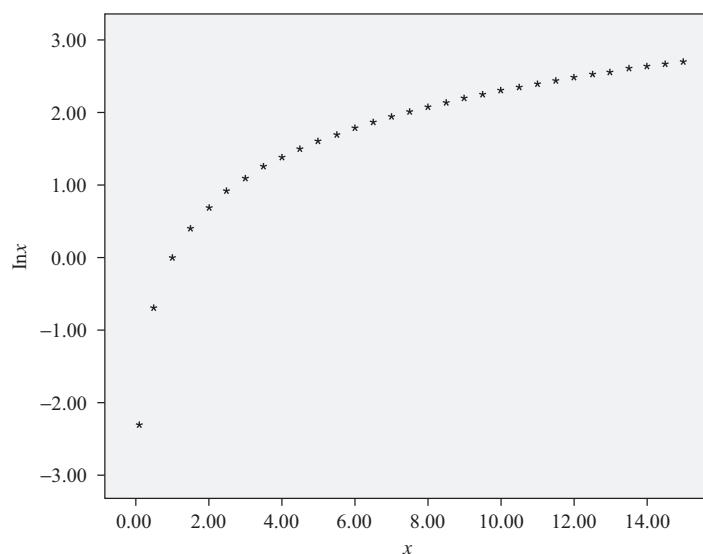
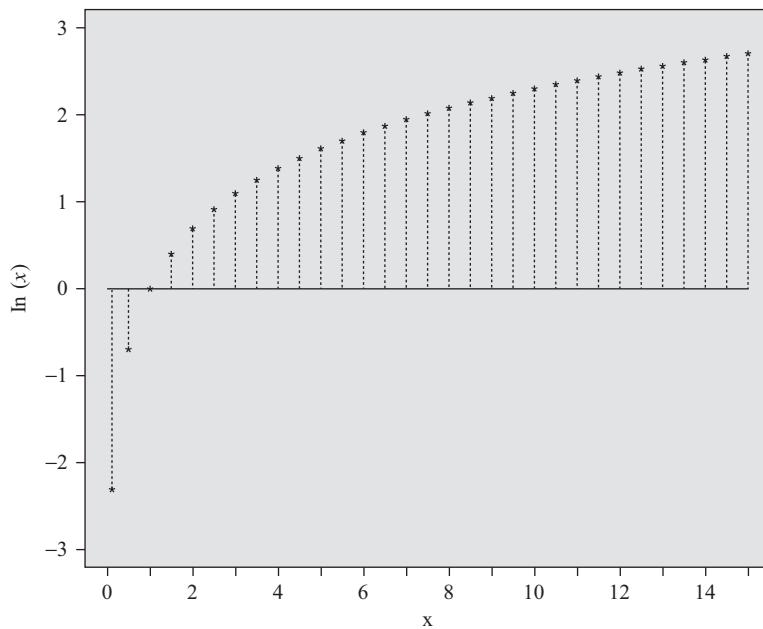


Figura 1-17 Gráfica SPSS de  $y = \ln(x)$ .

Figura 1-18 Gráfica SAS de  $y = \ln(x)$ .

Las figuras 1-17 y 1-18 muestran una gráfica de la curva  $y = \ln(x)$ . A medida que  $x$  se approxima a 0, los valores de  $\ln(x)$  se aproximan cada vez más a  $-\infty$ . A medida que  $x$  crece, los valores de  $\ln(x)$  se aproximan a  $+\infty$ .

## ECUACIONES LOGARÍTMICAS

- 1.38** Resolver la ecuación logarítmica  $\ln(x) = 10$ .

### SOLUCIÓN

Empleando la definición de logaritmo,  $x = e^{10} = 22026.47$ . Como verificación se saca el logaritmo natural de 22026.47 y se obtiene 10.00000019.

- 1.39** Resolver la ecuación logarítmica  $\log(x + 2) + \log(x - 2) = \log(5)$ .

### SOLUCIÓN

El lado izquierdo se puede escribir como  $\log[(x + 2)(x - 2)]$ . Se obtiene la ecuación  $\log(x + 2)(x - 2) = \log(5)$ , de la cual  $(x + 2)(x - 2) = 5$ . A partir de la cual sigue la ecuación  $x^2 - 4 = 5$  o bien  $x^2 = 9$  o bien  $x = -3$  o bien 3. Cuando estos valores se verifican en la ecuación original,  $x = -3$  debe descartarse como solución porque el logaritmo de números negativos no está definido. Si en la ecuación original se sustituye  $x = 3$ , se tiene  $\log(5) + \log(1) = \log(5)$ , ya que  $\log(1) = 0$ .

- 1.40** Resuelva la ecuación logarítmica  $\log(a + 4) - \log(a - 2) = 1$ .

### SOLUCIÓN

Esta ecuación se puede escribir como  $\log((a + 4)/(a - 2)) = 1$ . Aplicando la definición de logaritmo, se tiene  $(a + 4)/(a - 2) = 10^1$  o bien  $a + 4 = 10a - 20$ . Despejando  $a$ ,  $a = 24/9 = 2.6$  (siendo el 6 periódico). Sustituyendo en la ecuación original a por 2.6667, se tiene  $0.8239 - (-0.1761) = 1$ . La única solución es 2.6667.

- 1.41** Resolver la ecuación logarítmica  $\ln(x)^2 - 1 = 0$ .

### SOLUCIÓN

Esta ecuación se puede factorizar como  $[\ln(x) + 1][\ln(x) - 1] = 0$ . Haciendo el factor  $\ln(x) + 1 = 0$ , se obtiene  $\ln(x) = -1$  o bien  $x = e^{-1} = 0.3678$ . Haciendo el segundo factor  $\ln(x) - 1 = 0$ , se tiene  $\ln(x) = 1$  o bien  $x = e^1 = 2.7183$ . Ambos valores son solución de la ecuación.

- 1.42** En la ecuación logarítmica siguiente, despejar  $x$ :  $2\log(x+1) - 3\log(x+1) = 2$ .

### SOLUCIÓN

Esta ecuación se puede escribir como  $\log[(x+1)^2/(x+1)^3] = 2$  o bien  $\log[1/(x+1)] = 2$  o bien  $\log(1) - \log(x+1) = 2$  o bien  $0 - \log(x+1) = 2$  o bien  $\log(x+1) = -2$  o bien  $x+1 = 10^{-2}$  o bien  $x = -0.99$ . Sustituyendo en la ecuación original, se encuentra  $2\log(0.01) - 3\log(0.01) = 2$ . Por lo tanto, la solución satisface la ecuación.

- 1.43** Para resolver ecuaciones logarítmicas que no son fáciles de resolver a mano, se puede usar el paquete de software MAPLE. Resolver la ecuación siguiente usando MAPLE.

$$\log(x+2) - \ln(x^2) = 4$$

### SOLUCIÓN

El comando de MAPLE para resolver la ecuación es “solve( $\log10(x+2) - \ln(x^2) = 4$ );” la solución dada es  $-0.154594$ . Obsérvese que MAPLE usa  $\log10$  para el logaritmo común.

Para comprobar que la solución es correcta, sustituyendo en la ecuación original se tiene  $\log(1.845406) - \ln(0.023899)$  que es igual a  $4.00001059$ .

- 1.44** EXCEL también se puede usar para resolver ecuaciones logarítmicas. Resolver la siguiente ecuación logarítmica usando EXCEL:  $\log(x+4) + \ln(x+5) = 1$ .

### SOLUCIÓN

En la figura 1-19 se da la hoja de cálculo de EXCEL.

|      |          |   |
|------|----------|---|
| -3   | -0.30685 | $\text{LOG10}(A1+4)+\text{LN}(A1+5)^{-1}$   |
| -2   | 0.399642 |   |
| -1   | 0.863416 |   |
| 0    | 1.211498 |   |
| 1    | 1.490729 |   |
| 2    | 1.724061 |   |
| 3    | 1.92454  |   |
| 4    | 2.100315 |   |
| 5    | 2.256828 |   |
| <br> |          |   |
| -3   | -0.30685 | $\text{LOG10}(A11+4)+\text{LN}(A11+5)^{-1}$ |
| -2.9 | -0.21667 |   |
| -2.8 | -0.13236 |   |
| -2.7 | -0.05315 |   |
| -2.6 | 0.021597 |   |
| -2.5 | 0.092382 |   |
| -2.4 | 0.159631 |   |
| -2.3 | 0.223701 |   |
| -2.2 | 0.284892 |   |
| -2.1 | 0.343464 |   |
| -2   | 0.399642 |   |

Figura 1-19 EXCEL, hoja de trabajo para el problema 1.44

Se puede usar la técnica iterativa que se muestra antes. La mitad superior encuentra que la raíz de  $\log(x + 4) + \ln(x + 5) - 1$  está entre  $-3$  y  $-2$ . La mitad inferior encuentra que la raíz está entre  $-2.7$  y  $-2.6$ . Para dar la raíz con la exactitud que se desee, sólo hace falta continuar con este proceso. Al usar esta técnica se emplea la de clic y arrastre.

- 1.45** Encuentre la solución al problema 1.44 usando MAPLE.

### SOLUCIÓN

El comando de MAPLE “> solve( $\log(10(x + 4)) + \ln(x + 5) = 1$ ;” da como solución  $-2.62947285$ . Compare este resultado con el obtenido en el problema 1.44.

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### VARIABLES

- 1.46** Cuáles de los datos siguientes son datos discretos y cuáles son datos continuos.

- a) Precipitación pluvial, en pulgadas, en una ciudad, en diversos meses del año.
- b) Velocidad de un automóvil, en millas por hora.
- c) Cantidad de billetes de \$20 que circulan en Estados Unidos en determinado momento.
- d) Valor total diario de las acciones vendidas en la bolsa.
- e) Cantidad de estudiantes inscritos anualmente en una universidad.

- 1.47** Dar el dominio de cada una de las variables siguientes e indicar si es una variable discreta o continua.

- a) Cantidad anual  $W$  de bushels de trigo por acre que se producen en una granja.
- b) Cantidad  $N$  de individuos en una familia.
- c) Estado civil de un individuo.
- d) Tiempo  $T$  de vuelo de un misil.
- e) Número  $P$  de pétalos que tiene una flor.

## REDONDEO DE CANTIDADES NUMÉRICAS, NOTACIÓN CIENTÍFICA Y CIFRAS SIGNIFICATIVAS

- 1.48** Redondear cada uno de los números siguientes como se indica.

- |    |             |                              |
|----|-------------|------------------------------|
| a) | 3 256       | a la centena más cercana     |
| b) | 5.781       | a la décima más cercana      |
| c) | 0.0045      | a la milésima más cercana    |
| d) | 46.7385     | a la centésima más cercana   |
| e) | 125.9995    | a dos lugares decimales      |
| f) | 3 502 378   | al millón más cercano        |
| g) | 148.475     | a la unidad más cercana      |
| h) | 0.000098501 | a la millonésima más cercana |
| i) | 2 184.73    | a la decena más cercana      |
| j) | 43.87500    | a la centésima más cercana   |

- 1.49** Expresar cada número sin usar potencias de 10.

- |    |                         |    |                         |
|----|-------------------------|----|-------------------------|
| a) | $132.5 \times 10^4$     | d) | $7 300 \times 10^6$     |
| b) | $418.72 \times 10^{-5}$ | e) | $3.487 \times 10^{-4}$  |
| c) | $280 \times 10^{-7}$    | f) | $0.0001850 \times 10^5$ |

**1.50** ¿Cuántas cifras significativas hay en cada una de las cantidades siguientes entendiendo que se han registrado exactamente?

- |                        |                             |
|------------------------|-----------------------------|
| a) 2.54 cm             | g) 378 oz                   |
| b) 0.004500 yd         | h) $4.50 \times 10^{-3}$ km |
| c) 3 510 000 bu        | i) $500.8 \times 10^5$ kg   |
| d) 3.51 millones de bu | j) 100.00 mi                |
| e) 10.000100 ft        |                             |
| f) 378 personas        |                             |

**1.51** ¿Cuál es el error máximo en cada una de las mediciones siguientes, entendiéndose que han sido registradas exactamente? En cada caso dar el número de cifras significativas.

- |                     |                        |                 |
|---------------------|------------------------|-----------------|
| a) 7.20 millones bu | c) 5 280 ft            | e) 186 000 mi/s |
| b) 0.00004835 cm    | d) $3.5 \times 10^8$ m | f) 186 mil mi/s |

**1.52** Escribir cada uno de los números siguientes en notación científica. Supóngase que todas las cifras son significativas a menos que se indique otra cosa.

- |   |                       |
|---|-----------------------|
| a) 0.000317                                   | d) 0.000009810        |
| b) 428 000 000 (cuatro cifras significativas) | e) 732 mil            |
| c) 21 600.00                                  | f) 18.0 diezmilésimas |

## CÁLCULOS

**1.53** Mostrar que: a) el producto y b) el cociente de los números 72.48 y 5.16, considerando que tienen cuatro y tres cifras significativas, respectivamente, no puede ser exacto a más de tres cifras significativas. Escribir el producto y el cociente exactos.

**1.54** Realizar cada una de las operaciones indicadas. A menos que se indique otra cosa, supóngase que los números se han registrado exactamente.

- |   |  |
|---|--|
| a) $0.36 \times 781.4$                                    | g) $14.8641 + 4.48 - 8.168 + 0.36125$  |
| b) $\frac{873.00}{4.881}$                                 | h) $4\ 173\ 000 - 170\ 264 + 1\ 820\ 470 - 78\ 320$<br>(estos números son exactos a cuatro, seis, seis y cinco cifras significativas, respectivamente) |
| c) $5.78 \times 2\ 700 \times 16.00$                      |  |
| d) $\frac{0.00480 \times 2\ 300}{0.2084}$                 | i) $\sqrt{\frac{7(4.386)^2 - 3(6.47)^2}{6}}$ (el 3, el 6 y el 7 son exactos)   |
| e) $\sqrt{120 \times 0.5386 \times 0.4614}$ (120 exactos) | j) $4.120 \sqrt{\frac{3.1416[(9.483)^2 - (5.075)^2]}{0.0001980}}$  |
| f) $\frac{(416\ 000)(0.000187)}{\sqrt{73.84}}$            |  |

**1.55** Evaluar cada una de las expresiones siguientes, si  $U = -2$ ,  $V = \frac{1}{2}$ ,  $W = 3$ ,  $X = -4$ ,  $Y = 9$  y  $Z = \frac{1}{6}$ , donde se entiende que todos los números son exactos.

- |                              |                                     |
|------------------------------|-------------------------------------|
| a) $4U + 6V - 2W$            | d) $3(U - X)^2 + Y$                 |
| b) $\frac{XYZ}{UVW}$         | e) $\sqrt{U^2 - 2UV + W}$           |
| c) $\frac{2X - 3Y}{UW + XV}$ | f) $3X(4Y + 3Z) - 2Y(6X - 5Z) - 25$ |

g)  $\sqrt{\frac{(W-2)^2}{V} + \frac{(Y-5)^2}{Z}}$

i)  $X^3 + 5X^2 - 6X - 8$

h)  $\frac{X-3}{\sqrt{(Y-4)^2 + (U+5)^2}}$

j)  $\frac{U-V}{\sqrt{U^2 + V^2}} [U^2 V (W+X)]$

## FUNCIONES, TABLAS Y GRÁFICAS

**1.56** Una variable  $Y$  está determinada por una variable  $X$  de acuerdo con la ecuación  $Y = 10 - 4X$ .

- a) Encontrar el valor de  $Y$  para  $X = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4$  y  $5$  y presentar los resultados en una tabla.
- b) Encontrar el valor de  $Y$  para  $X = -2.4, -1.6, -0.8, 1.8, 2.7, 3.5$  y  $4.6$ .
- c) Si  $Y = F(X)$  denota que  $Y$  depende de  $X$ , hallar  $F(2.8), F(-5), F(\sqrt{2})$  y  $F(-\pi)$ .
- d) Dar el valor de  $X$  que corresponde a  $Y = -2, 6, -10, 1.6, 16, 0$  y  $10$ .
- e) Expresar  $X$  explícitamente como función de  $Y$ .

**1.57** Si  $Z = X^2 - Y^2$ , encontrar el valor de  $Z$  para: a)  $X = -2, Y = 3$  y b)  $X = 1, Y = 5$ . c) Si se usa la notación funcional  $Z = F(X, Y)$ , encontrar  $F(-3, -1)$ .

**1.58** Si  $W = 3XZ - 4Y^2 + 2XY$ , encontrar el valor de  $W$  para: a)  $X = 1, Y = -2, Z = 4$  y b)  $X = -5, Y = -2, Z = 0$ . c) Si se usa la notación funcional  $W = F(X, Y, Z)$ , encontrar  $F(3, 1, -2)$ .

**1.59** En un sistema de coordenadas rectangulares, localizar los puntos cuyas coordenadas son: a)  $(3, 2)$ , b)  $(2, 3)$ , c)  $(-4, 4)$ , d)  $(4, -4)$ , e)  $(-3, -2)$ , f)  $(-2, -3)$ , g)  $(-4.5, 3)$ , h)  $(-1.2, -2.4)$ , i)  $(0, -3)$  y j)  $(1.8, 0)$ .

**1.60** Grafique las ecuaciones: a)  $Y = 10 - 4X$  (ver problema 1.56), b)  $Y = 2X + 5$ , c)  $Y = \frac{1}{3}(X - 6)$ , d)  $2X + 3Y = 12$  y e)  $3X - 2Y = 6$ .

**1.61** Graficar las ecuaciones: a)  $Y = 2X^2 + X - 10$  y b)  $Y = 6 - 3X - X^2$ .

**1.62** Graficar  $Y = X^3 - 4X^2 + 12X - 6$ .

**1.63** En la tabla 1.9 se presenta la cantidad de gimnasios y la cantidad de sus miembros en millones para los años desde 2000 hasta 2005. Emplear un paquete de software para trazar una gráfica de serie de tiempos para los gimnasios y otra para sus miembros.

Tabla 1.9

| Año       | 2000   | 2001   | 2002   | 2003   | 2004   | 2005   |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Gimnasios | 13 000 | 13 225 | 15 000 | 20 000 | 25 500 | 28 500 |
| Miembros  | 32.5   | 35.0   | 36.5   | 39.0   | 41.0   | 41.3   |

**1.64** Emplear un paquete de software para trazar, con los datos de la tabla 1.9, una gráfica de barras de los gimnasios y de los miembros.

**1.65** Emplear EXCEL para trazar, con los datos de la tabla 1.9, un diagrama de dispersión de los gimnasios y de los miembros.

**1.66** En la tabla 1.10 se da la mortalidad infantil por 1 000 nacidos vivos, para blancos y para no blancos, desde el año 2000 hasta el 2005. Usar una gráfica adecuada para representar estos datos.

**Tabla 1.10**

| Año        | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| Blancos    | 6.6  | 6.3  | 6.1  | 6.0  | 5.9  | 5.7  |
| No blancos | 7.6  | 7.5  | 7.3  | 7.2  | 7.1  | 6.8  |

- 1.67** En la tabla 1.11 se dan las velocidades orbitales de los planetas de nuestro sistema solar. Graficar estos datos.

**Tabla 1.11**

| Planeta          | Mercurio | Venus | Tierra | Marte | Júpiter | Saturno | Urano | Neptuno | Plutón |
|------------------|----------|-------|--------|-------|---------|---------|-------|---------|--------|
| Velocidad (mi/s) | 29.7     | 21.8  | 18.5   | 15.0  | 8.1     | 6.0     | 4.2   | 3.4     | 3.0    |

- 1.68** En la tabla 1.12 se da la matrícula (en miles) de las escuelas públicas en los niveles kínder a grado 8, grado 9 a grado 12, y universidad, de 2000 a 2006. Graficar estos datos usando gráficas de línea, de barras y de columna apilada.

- 1.69** Graficar los datos de la tabla 1.12 en una gráfica de columnas 100% apiladas.

**Tabla 1.12**

| Año              | 2000   | 2001   | 2002   | 2003   | 2004   | 2005   | 2006   |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Kinder a grado 8 | 33 852 | 34 029 | 34 098 | 34 065 | 33 882 | 33 680 | 33 507 |
| Grados 9 a 12    | 13 804 | 13 862 | 14 004 | 14 169 | 14 483 | 14 818 | 15 021 |
| Universidad      | 12 091 | 12 225 | 12 319 | 12 420 | 12 531 | 12 646 | 12 768 |

Fuente: U.S. National Center for Educational Statistics and Projections of Education Statistic, annual.

- 1.70** En la tabla 1.13 se muestra el estado civil de varones y mujeres (18 años o mayores) en Estados Unidos en 1995. Graficar estos datos en: *a*) gráficas de pastel de un mismo diámetro y *b*) una gráfica a elegir.

**Tabla 1.13**

| Estado civil | Varones<br>(porcentaje del total) | Mujeres<br>(porcentaje del total) |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Solteros     | 26.8                              | 19.4                              |
| Casados      | 62.7                              | 59.2                              |
| Viudos       | 2.5                               | 11.1                              |
| Divorciados  | 8.0                               | 10.3                              |

Fuente: U.S. Bureau of Census—Current Population Reports.

- 1.71** En la tabla 1.14 se da la cantidad de reclusos menores de 18 años en las prisiones estatales de Estados Unidos, de 2001 a 2005. Graficar estos datos en el tipo adecuado de gráficas.

**Tabla 1.14**

| Año      | 2001  | 2002  | 2003  | 2004  | 2005  |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cantidad | 3 147 | 3 038 | 2 741 | 2 485 | 2 266 |

- 1.72 En la tabla 1.15 se da la cantidad (en millones) de visitas al Instituto Smithsoniano, del 2001 al 2005. Con estos datos, construir una gráfica de barras.

Tabla 1.15

| Año      | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|----------|------|------|------|------|------|
| Cantidad | 32   | 26   | 24   | 20   | 24   |

- 1.73 En la tabla 1.16 se presentan las poblaciones de los siete países más poblados del mundo en 1997. Con estos datos, elaborar una gráfica de pastel.

Tabla 1.16

| País                 | China | India | Estados Unidos | Indonesia | Brasil | Rusia | Pakistán |
|----------------------|-------|-------|----------------|-----------|--------|-------|----------|
| Población (millones) | 1 222 | 968   | 268            | 210       | 165    | 148   | 132      |

Fuente: U.S. Bureau of the Census, International database.

- 1.74 Un *diagrama de Pareto* es una gráfica de barras ordenadas de mayor a menor, de izquierda a derecha. Con los datos de la tabla 1.16, construir un diagrama de Pareto.

- 1.75 En la tabla 1.17 se dan las áreas, en millones de millas cuadradas, de los océanos del mundo. Graficar estos datos en una gráfica: a) de barras, b) de pastel.

Tabla 1.17

| Océano                              | Pacífico | Atlántico | Índico | Antártico | Ártico |
|-------------------------------------|----------|-----------|--------|-----------|--------|
| Área (millones de millas cuadradas) | 63.8     | 31.5      | 28.4   | 7.6       | 4.8    |

Fuente: Naciones Unidas.

## ECUACIONES

- 1.76 Resolver las ecuaciones siguientes:

$$\begin{array}{lll} a) \quad 16 - 5c = 36 & c) \quad 4(X - 3) - 11 = 15 - 2(X + 4) & e) \quad 3[2(X + 1) - 4] = 10 - 5(4 - 2X) \\ b) \quad 2Y - 6 = 4 - 3Y & d) \quad 3(2U + 1) = 5(3 - U) + 3(U - 2) & f) \quad \frac{2}{5}(12 + Y) = 6 - \frac{1}{4}(9 - Y) \end{array}$$

- 1.77 Resolver las siguientes ecuaciones simultáneas:

$$\begin{array}{ll} a) \quad 2a + b = 10 & e) \quad 2a + b - c = 2 \\ 7a - 3b = 9 & 3a - 4b + 2c = 4 \\ b) \quad 3a + 5b = 24 & 4a + 3b - 5c = -8 \\ 2a + 3b = 14 & f) \quad 5X + 2Y + 3Z = -5 \\ c) \quad 8X - 3Y = 2 & 2X - 3Y - 6Z = 1 \\ 3X + 7Y = -9 & X + 5Y - 4Z = 22 \\ d) \quad 5A - 9B = -10 & g) \quad 3U - 5V + 6W = 7 \\ 3A - 4B = 16 & 5U + 3V - 2W = -1 \\ & 4U - 8V + 10W = 11 \end{array}$$

- 1.78** *a)* Graficar las ecuaciones  $5X + 2Y = 4$  y  $7X - 3Y = 23$  en el mismo conjunto de ejes coordenados.  
*b)* A partir de la gráfica, determinar la solución de estas dos ecuaciones simultáneas.  
*c)* Usar los procedimientos de los incisos *a)* y *b)* para obtener las soluciones de las ecuaciones simultáneas *a)* a *d)* del problema 1.77.
- 1.79** *a)* Usar la gráfica del problema 1.61*a)* para resolver la ecuación  $2X^2 + X - 10 = 0$ . (*Sugerencia:* Encontrar los valores de  $X$  en los que la parábola cruza el eje  $X$ : es decir, en los que  $Y$  vale 0.)  
*b)* Emplear el método del inciso *a)* para resolver  $3X^2 - 4X - 5 = 0$ .
- 1.80** Las soluciones de una ecuación cuadrática  $aX^2 + bX + c = 0$  se obtienen mediante la *fórmula cuadrática*:

$$X = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Empleando esta fórmula, encontrar las soluciones de: *a)*  $3X^2 - 4X - 5 = 0$ , *b)*  $2X^2 - X - 10 = 0$ , *c)*  $5X^2 + 10X = 7$  y *d)*  $X^2 + 8X + 25 = 0$ .

## DESIGUALDADES

- 1.81** Utilizando los símbolos de desigualdad, ordenar los números  $-4.3, -6.15, 2.37, 1.52$  y  $-1.5$  en: *a)* en orden creciente, *b)* en orden decreciente de magnitud.
- 1.82** Usar los símbolos de desigualdad para expresar cada una de las afirmaciones siguientes.
- a)* El número  $N$  de niños está entre 30 y 50 inclusive.  
*b)* El número  $S$  de puntos en un par de dados no es menor a 7.  
*c)*  $X$  es mayor o igual a  $-4$  y menor que 3.  
*d)*  $P$  vale a lo mucho 5.  
*e)*  $X$  es mayor que  $Y$  aumentada en 2.

- 1.83** Resolver cada una de las desigualdades siguientes:

|                               |  |   |
|-------------------------------|--|---|
| <i>a)</i> $3X \geq 12$        | <i>d)</i> $3 + 5(Y - 2) \leq 7 - 3(4 - Y)$     | <i>g)</i> $-2 \leq 3 + \frac{1}{2}(a - 12) < 8$ |
| <i>b)</i> $4X < 5X - 3$       | <i>e)</i> $-3 \leq \frac{1}{3}(2X + 1) \leq 3$ |   |
| <i>c)</i> $2N + 15 > 10 + 3N$ | <i>f)</i> $0 < \frac{1}{2}(15 - 5N) \leq 12$   |   |

## LOGARITMOS Y PROPIEDADES DE LOS LOGARITMOS

- 1.84** Encontrar los logaritmos comunes:
- a)*  $\log(10)$     *b)*  $\log(100)$     *c)*  $\log(1\,000)$     *d)*  $\log(0.1)$     *e)*  $\log(0.01)$
- 1.85** Encontrar los logaritmos naturales de los siguientes números a cuatro lugares decimales:
- a)*  $\ln(e)$     *b)*  $\ln(10)$     *c)*  $\ln(100)$     *d)*  $\ln(1\,000)$     *e)*  $\ln(0.1)$
- 1.86** Encontrar los logaritmos:
- a)*  $\log_4 4$     *b)*  $\log_5 25$     *c)*  $\log_6 216$     *d)*  $\log_7 2\,401$     *e)*  $\log_8 32\,768$

## 36 CAPÍTULO 1 VARIABLES Y GRÁFICAS

- 1.87** Usar EXCEL para hallar los logaritmos siguientes. Dar la respuesta y los comandos.
- a)  $\log_4 5$       b)  $\log_5 24$       c)  $\log_6 215$       d)  $\log_7 8$       e)  $\log_8 9$
- 1.88** Repetir el problema 1.87 usando MAPLE. Dar la respuesta y los comandos de MAPLE.
- 1.89** Emplear las propiedades de los logaritmos para escribir la expresión siguiente en forma de sumas y diferencias de logaritmos:  $\ln((a^3b^4)/c^5)$
- 1.90** Emplear las propiedades de los logaritmos para escribir la expresión siguiente en forma de sumas y diferencias de logaritmos:  $\log((xyz)/w^3)$
- 1.91** Transformar la siguiente expresión en una expresión que contenga un solo logaritmo:  $5 \ln(a) - 4 \ln(b) + \ln(c) + \ln(d)$
- 1.92** Transformar la siguiente expresión en una expresión que contenga un solo logaritmo:  $\log(u) + \log(v) + \log(w) - 2 \log(x) - 3 \log(y) - 4 \log(z)$ .

### ECUACIONES LOGARÍTMICAS

- 1.93** Encontrar la solución de  $\log(3x - 4) = 2$
- 1.94** Encontrar la solución de  $\ln(3x^2 - x) = \ln(10)$
- 1.95** Encontrar la solución de  $\log(w - 2) - \log(2w + 7) = \log(w + 2)$
- 1.96** Encontrar la solución de  $\ln(3x + 5) + \ln(2x - 5) = 12$
- 1.97** Usar MAPLE o EXCEL para encontrar la solución de  $\ln(2x) + \log(3x - 1) = 10$
- 1.98** Usar MAPLE o EXCEL para encontrar la solución de  $\log(2x) + \ln(3x - 1) = 10$
- 1.99** Usar MAPLE o EXCEL para encontrar la solución de  $\ln(3x) - \log(x) = \log_2 3$
- 1.100** Usar MAPLE o EXCEL para encontrar la solución de  $\log_2(3x) - \log(x) = \ln(3)$

# DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIAS

2

## DATOS EN BRUTO

Los *datos en bruto* son los datos recolectados que aún no se han organizado. Por ejemplo, las estaturas de 100 estudiantes tomados de la lista alfabética de una universidad.

## ORDENACIONES

*Ordenación* se le llama a los datos numéricos en bruto dispuestos en orden creciente o decreciente de magnitud. A la diferencia entre el número mayor y el número menor se le conoce como el *rango* de los datos. Por ejemplo, si la estatura mayor en los 100 estudiantes es 74 pulgadas (in) y la menor es 60 in, el rango es  $74 - 60 = 14$  pulgadas (in).

## DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIA

Al organizar una gran cantidad de datos en bruto, suele resultar útil distribuirlos en *clases* o *categorías* y determinar la cantidad de datos que pertenece a cada clase; esta cantidad se conoce como la *frecuencia de clase*. A la disposición tabular de los datos en clases con sus respectivas frecuencias de clase se le conoce como *distribución de frecuencias* o *tabla de frecuencias*. La tabla 2.1 es una distribución de frecuencias de las estaturas (registradas a la pulgada más cercana) de 100 estudiantes de la universidad XYZ.

**Tabla 2.1 Estaturas de 100 estudiantes  
de la universidad XYZ**

| Estatura<br>(in) | Cantidad de<br>estudiantes |
|------------------|----------------------------|
| 60-62            | 5                          |
| 63-65            | 18                         |
| 66-68            | 42                         |
| 69-71            | 27                         |
| 72-74            | 8                          |
| Total            | 100                        |

La primera clase (o categoría), por ejemplo, consta de las estaturas que van desde 60 hasta 62 pulgadas y queda identificada por el símbolo 60-62. Como hay cinco estudiantes cuyas estaturas pertenecen a esta clase, la frecuencia de clase correspondiente es 5.

A los datos organizados y resumidos como en la distribución de frecuencias anterior se les llama *datos agrupados*. Aunque al agrupar los datos se pierden muchos de los detalles originales de los datos, esto tiene la ventaja de que se obtiene una visión general clara y se hacen evidentes las relaciones.

## INTERVALOS DE CLASE Y LÍMITES DE CLASE

Al símbolo que representa una clase, como 60-62 en la tabla 2.1, se le conoce como *intervalo de clase*. A los números de los extremos, 60 y 62, se les conoce como *límites de clase*; el número menor (60) es el *límite inferior de clase*, y el número mayor (62) es el *límite superior de clase*. Los términos *clase* e *intervalo de clase* se suelen usar indistintamente, aunque el intervalo de clase en realidad es un símbolo para la clase.

Un intervalo de clase que, por lo menos teóricamente, no tenga indicado el límite de clase superior o el límite de clase inferior, se conoce como *intervalo de clase abierto*. Por ejemplo, al considerar grupos de edades de personas, un intervalo que sea “65 años o mayores” es un intervalo de clase abierto.

## FRONTERAS DE CLASE

Si las estaturas se registran a la pulgada más cercana, el intervalo de clase 60-62 comprende teóricamente todas las mediciones desde 59.500 hasta 62.500 in. Estos números que se indican brevemente mediante los números exactos 59.5 y 62.5 son las *fronteras de clase* o los *límites de clase reales*; el menor de los números (59.5) es la *frontera inferior de clase* y el número mayor (62.5) es la *frontera superior de clase*.

En la práctica, las fronteras de clase se obtienen sumando el límite superior de un intervalo de clase al límite inferior del intervalo de clase inmediato superior y dividiendo entre 2.

Algunas veces, las fronteras de clase se usan para representar a las clases. Por ejemplo, las clases de la tabla 2.1 pueden indicarse como 59.5-62.5, 62.5-65.5, etc. Para evitar ambigüedades cuando se usa esta notación, las fronteras de clase no deben coincidir con las observaciones. Por lo tanto, si una observación es 62.5, no es posible decidir si pertenece al intervalo 59.5-62.5 o al intervalo 62.5-65.5.

## TAMAÑO O AMPLITUD DE UN INTERVALO DE CLASE

El tamaño, o la amplitud, de un intervalo de clase es la diferencia entre sus fronteras superior e inferior y se le conoce también como *amplitud de clase*, *tamaño de clase* o *longitud de clase*. Si en una distribución de frecuencia todos los intervalos de clase tienen la misma amplitud, esta amplitud común se denota  $c$ . En este caso,  $c$  es igual a la diferencia entre dos límites inferiores de clases sucesivas o entre dos límites superiores de clases sucesivas. Por ejemplo, en los datos de la tabla 2.1, el intervalo de clase es  $c = 62.5 - 59.5 = 65.5 - 62.5 = 3$ .

## LA MARCA DE CLASE

La *marca de clase* es el punto medio del intervalo de clase y se obtiene sumando los límites de clase inferior y superior y dividiendo entre 2. Así, la marca de clase del intervalo 60-62 es  $(60 + 62)/2 = 61$ . A la marca de clase también se le conoce como *punto medio de clase*.

Para los análisis matemáticos posteriores, se supone que todas las observaciones que pertenecen a un intervalo de clase dado coinciden con la marca de clase. Así, se considera que todas las estaturas en el intervalo de clase 60-62 in son de 61 in.

## REGLAS GENERALES PARA FORMAR UNA DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS

1. En el conjunto de los datos en bruto, se determina el número mayor y el número menor y se halla, así, el rango (la diferencia entre los números mayor y menor).

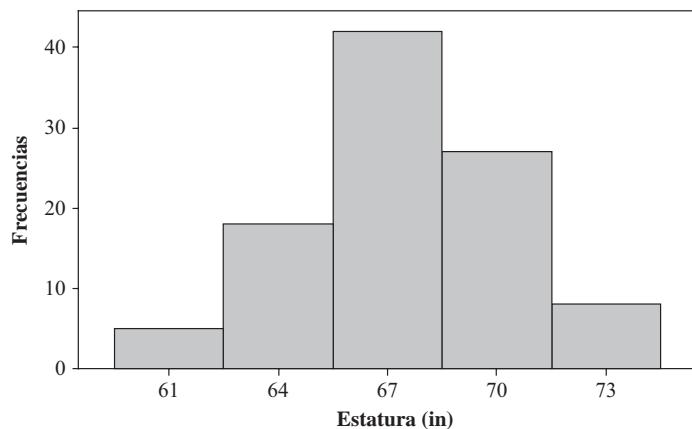
2. Se divide el rango en una cantidad adecuada de intervalos de clase de una misma amplitud. Si esto no es posible, se usan intervalos de clase de diferentes amplitudes o intervalos de clase abiertos (ver problema 2.12). La cantidad de intervalos suele ser de 5 a 20, dependiendo de los datos. Los intervalos de clase también suelen elegirse de manera que las marcas de clase (o puntos medios de clase) coincidan con datos observados. Esto tiende a disminuir el llamado *error de agrupamiento* en los análisis matemáticos subsiguientes. En cambio, las fronteras de clase no deben coincidir con datos observados.
3. Se determina la cantidad de observaciones que caen dentro de cada intervalo de clase; es decir, se encuentran las frecuencias de clase. La mejor manera de hacer esto es utilizando una *hoja de conteo* (ver problema 2.8).

## HISTOGRAMAS Y POLÍGONOS DE FRECUENCIAS

Los histogramas y los polígonos de frecuencias son dos representaciones gráficas de las distribuciones de frecuencias.

1. Un *histograma* o *histograma de frecuencias* consiste en un conjunto de rectángulos que tienen: *a*) sus bases sobre un eje horizontal (el eje *X*), con sus centros coincidiendo con las marcas de clase de longitudes iguales a la amplitud del intervalo de clase, y *b*) áreas proporcionales a las frecuencias de clase.
2. Un *polígono de frecuencias* es una gráfica de línea que presenta las frecuencias de clase graficadas contra las marcas de clase. Se puede obtener conectando los puntos medios de las partes superiores de los rectángulos de un histograma.

En las figuras 2.1 y 2.2 se muestran el histograma y el polígono de frecuencias correspondientes a la distribución de frecuencias de las estaturas presentada en la tabla 2.1.



**Figura 2-1** MINITAB, histograma que muestra los puntos medios y las frecuencias de clase.

Obsérvese en la figura 2.2 cómo el polígono de frecuencias se ha anclado por sus extremos, es decir, en 58 y 76.

## DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIAS RELATIVAS

La *frecuencia relativa* de una clase es la frecuencia de la clase dividida entre la suma de las frecuencias de todas las clases y generalmente se expresa como porcentaje. Por ejemplo, en la tabla 2.1, la frecuencia relativa de la clase 66-68 es  $42/100 = 42\%$ . Por supuesto, la suma de las frecuencias relativas de todas las clases es 1, o 100%.

Si en la tabla 2.1 las frecuencias se sustituyen por frecuencias relativas, la tabla que se obtiene es una *distribución de frecuencias relativas*, *distribución porcentual* o *tabla de frecuencias relativas*.

Las representaciones gráficas de las distribuciones de frecuencias relativas se obtienen a partir de los histogramas o polígonos de frecuencias, cambiando únicamente, en la escala vertical, las frecuencias por las frecuencias relativas y conservando la gráfica exactamente igual. A las gráficas que se obtienen se les llama *histogramas de frecuencias relativas* (o *histogramas porcentuales*) y *polígonos de frecuencias relativas* (o *polígonos porcentuales*), respectivamente.

## DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIAS ACUMULADAS Y OJIVAS

A la suma de todas las frecuencias menores que la frontera superior de un intervalo de clase dado se le llama *frecuencia acumulada* hasta ese intervalo de clase inclusive. Por ejemplo, en la tabla 2.1, la frecuencia acumulada hasta el intervalo de clase 66-68 inclusive es  $5 + 18 + 42 = 65$ , lo que significa que 65 estudiantes tienen una estatura menor a 68.5 in.

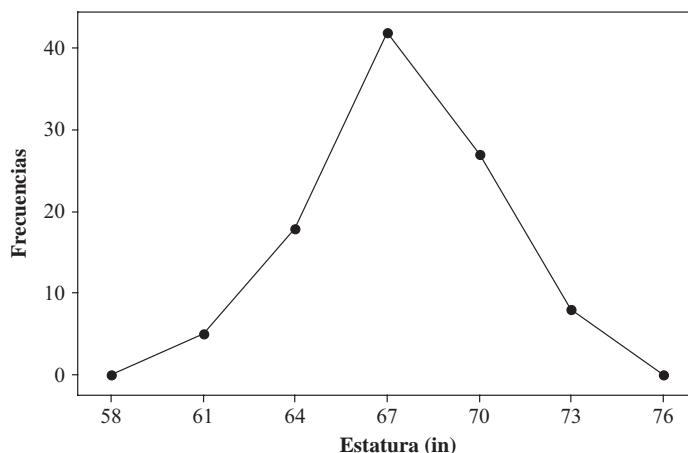


Figura 2-2 MINITAB, polígono de frecuencias de las estaturas de los estudiantes.

A una tabla en la que se presentan las frecuencias acumuladas se le llama *distribución de frecuencias acumuladas*, *tabla de frecuencias acumuladas* o simplemente *distribución acumulada*, y se presenta en la tabla 2.2 para la distribución de las estaturas de los estudiantes de la tabla 2.1.

Tabla 2.2

| Estatura (in) | Cantidad de estudiantes |
|---------------|-------------------------|
| Menos de 59.5 | 0                       |
| Menos de 62.5 | 5                       |
| Menos de 65.5 | 23                      |
| Menos de 68.5 | 65                      |
| Menos de 71.5 | 92                      |
| Menos de 74.5 | 100                     |

Una gráfica que muestra las frecuencias acumuladas menores de cada frontera superior de clase respecto a cada frontera superior de clase se le conoce como *gráfica de frecuencias acumuladas* u *ojiva*. En algunas ocasiones se desea considerar distribuciones de frecuencias mayores o iguales que la frontera inferior de cada intervalo de clase. Como en ese caso se consideran las estaturas de 59.5 in o más, de 62.5 in o más, etc., a estas distribuciones se les suele llamar *distribuciones acumuladas “o más que”*, en tanto que las distribuciones consideradas antes son *distribuciones acumuladas “o menos que”*. Una puede obtenerse fácilmente de la otra. A las ojivas correspondientes se les llama ojivas “más que” y ojivas “menos que”. Aquí, siempre que se hable de distribuciones acumuladas o de ojivas, sin más, se tratará del tipo “menos que”.

## DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIAS ACUMULADAS RELATIVAS Y OJIVAS PORCENTUALES

La *frecuencia acumulada relativa* o *frecuencia acumulada porcentual* es la frecuencia acumulada dividida entre la suma de todas las frecuencias (frecuencia total). Por ejemplo, la frecuencia acumulada relativa de las estaturas menores que 68.5 in es  $65/100 = 0.65$  o 65%, lo que significa que 65% de los estudiantes tienen estaturas menores a

68.5 in. Si en la tabla 2.2 se emplean las frecuencias acumuladas relativas en lugar de las frecuencias acumuladas, se obtiene una *distribución de frecuencias acumuladas relativas* (o *distribución acumulada porcentual*) y una gráfica de *frecuencias acumuladas relativas* (u *ojiva porcentual*), respectivamente.

## CURVAS DE FRECUENCIAS Y OJIVAS SUAVIZADAS

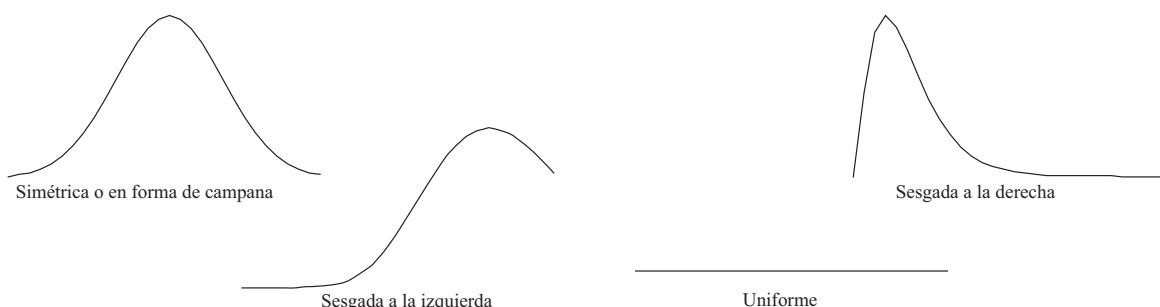
Suele considerarse que los datos recolectados pertenecen a una muestra obtenida de una población grande. Como de esta población se pueden obtener muchas observaciones, teóricamente es posible (si son datos continuos) elegir intervalos de clase muy pequeños y, a pesar de eso, tener un número adecuado de observaciones que caigan en cada clase. De esta manera, cuando se tienen poblaciones grandes puede esperarse que los polígonos de frecuencias, o los polígonos de frecuencias relativas, correspondientes a estas poblaciones estén formados por una gran cantidad de pequeños segmentos de recta de manera que sus formas se aproximen a las de unas curvas, a las cuales se les llama *curvas de frecuencias* o *curvas de frecuencias relativas*, respectivamente.

Es razonable esperar que estas curvas teóricas puedan ser aproximadas suavizando los polígonos de frecuencias o los polígonos de frecuencias relativas de la muestra; esta aproximación mejorará a medida que aumenta el tamaño de la muestra. Ésta es la razón por la que a las curvas de frecuencias se les suele llamar polígonos de *frecuencias suavizadas*.

De igual manera, suavizando las gráficas de frecuencias acumuladas u ojivas, se obtienen *ojivas suavizadas*. Por lo general, es más fácil suavizar una ojiva que un polígono de frecuencias.

## TIPOS DE CURVAS DE FRECUENCIAS

Las curvas de frecuencias que surgen en la práctica toman ciertas formas características, como las que se muestran en la figura 2-3.



**Figura 2-3 Cuatro distribuciones que se encuentran con por lo común.**

1. Las curvas *simétricas* o *en forma de campana* se caracterizan porque las observaciones equidistantes del máximo central tienen la misma frecuencia. Las estaturas tanto de hombres como de mujeres adultos tienen distribuciones en forma de campana.
2. Las curvas que tienen colas hacia la izquierda se dice que son *sesgadas a la izquierda*. Las curvas de la cantidad de años que viven hombres y mujeres son sesgadas a la izquierda. Pocos mueren jóvenes y la mayoría muere entre los 60 y los 80 años. En general, las mujeres viven en promedio diez años más que los hombres.
3. Las curvas que tienen colas hacia la derecha se dice que son *sesgadas a la derecha*. Las curvas de las edades a las que se casan tanto hombres como mujeres son sesgadas a la derecha. La mayoría se casa entre los veinte y treinta años y pocos se casan alrededor de cuarenta, cincuenta, sesenta o setenta años.
4. Las curvas que tienen aproximadamente las mismas frecuencias para todos sus valores se dice que son curvas *distribuidas uniformemente*. Por ejemplo, las máquinas dispensadoras de refresco lo hacen de manera uniforme entre 15.9 y 16.1 onzas.
5. Las curvas de frecuencias en *forma de J* o en *forma de J inversa* son curvas en las que el máximo se presenta en uno de sus extremos.
6. Las curvas de frecuencias en *forma de U* son curvas que tienen un máximo en cada extremo y un mínimo en medio.
7. Las curvas *bimodales* son curvas que tienen dos máximos.
8. Las curvas *multimodales* tienen más de dos máximos.

## PROBLEMAS RESUELTOS

### ORDENACIONES

- 2.1** *a)* Disponer los números 17, 45, 38, 27, 6, 48, 11, 57, 34 y 22 en una ordenación.  
*b)* Determinar el rango de estos números.

### SOLUCIÓN

- a)* En orden ascendente de magnitud, la ordenación es: 6, 11, 17, 22, 27, 34, 38, 45, 48, 57. En orden descendente de magnitud, la ordenación es: 57, 48, 45, 38, 34, 27, 22, 17, 11, 6.  
*b)* Como el número mayor es 57 y el número menor es 6, el rango es  $57 - 6 = 51$ .

- 2.2** En la tabla siguiente se presentan las calificaciones finales que obtuvieron en matemática 80 alumnos de una universidad.

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 68 | 84 | 75 | 82 | 68 | 90 | 62 | 88 | 76 | 93 |
| 73 | 79 | 88 | 73 | 60 | 93 | 71 | 59 | 85 | 75 |
| 61 | 65 | 75 | 87 | 74 | 62 | 95 | 78 | 63 | 72 |
| 66 | 78 | 82 | 75 | 94 | 77 | 69 | 74 | 68 | 60 |
| 96 | 78 | 89 | 61 | 75 | 95 | 60 | 79 | 83 | 71 |
| 79 | 62 | 67 | 97 | 78 | 85 | 76 | 65 | 71 | 75 |
| 65 | 80 | 73 | 57 | 88 | 78 | 62 | 76 | 53 | 74 |
| 86 | 67 | 73 | 81 | 72 | 63 | 76 | 75 | 85 | 77 |

De acuerdo con esta tabla, encontrar:

- a)* La calificación más alta.
- b)* La calificación más baja.
- c)* El rango.
- d)* Las calificaciones de los cinco mejores estudiantes.
- e)* Las calificaciones de los cinco peores estudiantes.
- f)* La calificación del alumno que tiene el décimo lugar entre las mejores calificaciones.
- g)* El número de estudiantes que obtuvieron 75 o más.
- h)* El número de estudiantes que obtuvieron 85 o menos.
- i)* El porcentaje de los estudiantes que obtuvieron calificaciones mayores a 65 pero no mayores a 85.
- j)* Las calificaciones que no aparecen en esta tabla.

### SOLUCIÓN

Como algunas de estas preguntas son tan minuciosas, es mejor construir primero una ordenación. Esto se hace dividiendo los datos, de manera adecuada, en clases y colocando cada número de la tabla en su clase correspondiente, como se ve en la tabla 2.3, llamada *tabla de entradas*. Después, los números de cada clase se disponen en una ordenación, como se muestra en la tabla 2.4, con lo que se obtiene la ordenación deseada. Consultando la tabla 2.4 es relativamente fácil responder a las preguntas anteriores.

- a)* La calificación más alta es 97.
- b)* La calificación más baja es 53.
- c)* El rango es  $97 - 53 = 44$ .
- d)* Las calificaciones de los cinco mejores estudiantes son 97, 96, 95, 95 y 94.

**Tabla 2.3**

|       |  |
|-------|--|
| 50-54 | 53   |
| 55-59 | 59, 57   |
| 60-64 | 62, 60, 61, 62, 63, 60, 61, 60, 62, 62, 63   |
| 65-69 | 68, 68, 65, 66, 69, 68, 67, 65, 65, 67   |
| 70-74 | 73, 73, 71, 74, 72, 74, 71, 71, 73, 74, 73, 72                                     |
| 75-79 | 75, 76, 79, 75, 75, 78, 78, 75, 77, 78, 75, 79, 79, 78, 76, 75, 78, 76, 76, 75, 77 |
| 80-84 | 84, 82, 82, 83, 80, 81   |
| 85-89 | 88, 88, 85, 87, 89, 85, 88, 86, 85   |
| 90-94 | 90, 93, 93, 94   |
| 95-99 | 95, 96, 95, 97   |

**Tabla 2.4**

|       |  |
|-------|--|
| 50-54 | 53   |
| 55-59 | 57, 59   |
| 60-64 | 60, 60, 61, 61, 62, 62, 62, 62, 63, 63   |
| 65-69 | 65, 65, 65, 66, 67, 67, 68, 68, 68, 69   |
| 70-74 | 71, 71, 71, 72, 72, 73, 73, 73, 73, 74, 74, 74                                 |
| 75-79 | 75, 75, 75, 75, 75, 75, 76, 76, 76, 76, 77, 77, 78, 78, 78, 78, 78, 79, 79, 79 |
| 80-84 | 80, 81, 82, 82, 83, 84   |
| 85-89 | 85, 85, 85, 86, 87, 88, 88, 88, 88, 89   |
| 90-94 | 90, 93, 93, 94   |
| 95-99 | 95, 95, 96, 97   |

- e) Las calificaciones de los cinco peores estudiantes son 53, 57, 59, 60 y 60.
- f) La calificación del alumno que tiene el décimo lugar entre las mejores calificaciones es 88.
- g) La cantidad de estudiantes que obtuvieron 75 o más es 44.
- h) La cantidad de estudiantes que obtuvieron menos de 85 es 63.
- i) El porcentaje de estudiantes que obtuvieron calificaciones mayores a 65 pero no mayores a 85 es  $49/80 = 61.2\%$ .
- j) Las calificaciones que no aparecen en esta tabla son desde 0 hasta 52, 54, 55, 56, 58, 64, 70, 91, 92, 98, 99 y 100.

## DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIAS, HISTOGRAMAS Y POLÍGONOS DE FRECUENCIAS

- 2.3** La tabla 2.5 muestra una distribución de frecuencias de los salarios semanales de 65 empleados de la empresa P&R. Con los datos de esta tabla, determinar:
- a) El límite inferior de la sexta clase.
  - b) El límite superior de la cuarta clase.
  - c) La marca de clase (o punto medio de clase) de la tercera clase.
  - d) Las fronteras de clase de la quinta clase.
  - e) La amplitud del intervalo de la quinta clase.
  - f) La frecuencia de la tercera clase.
  - g) La frecuencia relativa de la tercera clase.
  - h) El intervalo de clase de mayor frecuencia. A este intervalo se le suele llamar *intervalo de clase modal* y a su frecuencia se le conoce como *frecuencia de la clase modal*.

Tabla 2.5

| Salarios          | Número de empleados |
|-------------------|---------------------|
| \$250.00-\$259.99 | 8                   |
| \$260.00-\$269.99 | 10                  |
| \$270.00-\$279.99 | 16                  |
| \$280.00-\$289.99 | 14                  |
| \$290.00-\$299.99 | 10                  |
| \$300.00-\$309.99 | 5                   |
| \$310.00-\$319.99 | 2                   |
| Total 65          |                     |

- i) El porcentaje de empleados que gana menos de \$280.00 por semana.
- j) El porcentaje de empleados que gana menos de \$300.00 por semana, pero por lo menos \$260.00 por semana.

### SOLUCIÓN

- a) \$300.00.
- b) \$289.99.
- c) La marca de clase (o punto medio de clase) de la tercera clase =  $\frac{1}{2}($270.00 + $279.99) = $274.995$ . Para propósitos prácticos, esta cantidad se redondea a \$275.00.
- d) La frontera inferior de la quinta clase =  $\frac{1}{2}($290.00 + $289.99) = $289.995$ . La frontera superior de la quinta clase =  $\frac{1}{2}($299.99 + $300.00) = $299.995$ .
- e) La amplitud del intervalo de la quinta clase = frontera superior de la quinta clase – frontera inferior de la quinta clase =  $$299.995 - $289.985 = \$10.00$ . En este caso, todos los intervalos de clase son del mismo tamaño: \$10.00.
- f) 16.
- g)  $16/65 = 0.246 = 24.6\%$ .
- h) \$270.00 – \$279.99.
- i) El número total de empleados que gana menos de \$280 por semana =  $16 + 10 + 8 = 34$ . El porcentaje de empleados que gana menos de \$280 por semana =  $34/65 = 52.3\%$ .
- j) El número de empleados que gana menos de \$300 por semana pero más de \$260 por semana =  $10 + 14 + 16 + 10 = 50$ . El porcentaje de empleados que gana menos de \$300 por semana, pero por lo menos \$260 por semana =  $50/65 = 76.9\%$ .

- 2.4 Si las marcas de clase en una distribución de frecuencias de pesos de estudiantes son 128, 137, 146, 155, 164, 173 y 182 libras, encuentre: a) la amplitud del intervalo de clase, b) las fronteras de clase y c) los límites de clase, suponiendo que los pesos se hayan redondeado a la libra más cercana.

### SOLUCIÓN

- a) La amplitud del intervalo de clase = diferencia entre marcas sucesivas de clase =  $137 - 128 = 146 - 137 = \text{etc.} = 9 \text{ lb.}$
- b) Como todos los intervalos de clase tienen la misma amplitud, las fronteras de clase están a medio camino entre dos marcas de clase y por lo tanto se tienen los valores

$$\frac{1}{2}(128 + 137), \frac{1}{2}(137 + 146), \dots, \frac{1}{2}(173 + 182) \quad \text{o bien} \quad 132.5, 141.5, 150.5, \dots, 177.5 \text{ lb}$$

La frontera de la primera clase es  $132.5 - 9 = 123.5$  y la frontera de la última clase es  $177.5 + 9 = 186.5$ , ya que la amplitud común de los intervalos de clase es 9 lb. Por lo tanto, todas las fronteras de clase son:

$$123.5, 132.5, 141.5, 150.5, 159.5, 168.5, 177.5, 186.5 \text{ lb}$$

- c) Como los límites de clase son enteros, se eligen éstos como los enteros más cercanos a las fronteras de clase, es decir, 123, 124, 132, 133, 141, 142... Así, los límites de la primera clase son 124-132, de la siguiente, 133-141, etcétera.

- 2.5** Se toma una muestra de la cantidad de tiempo, en horas por semana, que los estudiantes universitarios usan su celular. Usando SPSS, la secuencia “**Analyze** ⇒ **Descriptive Statistics** ⇒ **Frequencies**” da el resultado mostrado en la figura 2-4.

|        |       | Tiempo      |             |                     |                        |
|--------|-------|-------------|-------------|---------------------|------------------------|
|        |       | Frecuencias | Porcentajes | Porcentajes válidos | Porcentajes acumulados |
| Válido | 3.00  | 3           | 6.0         | 6.0                 | 6.0                    |
|        | 4.00  | 3           | 6.0         | 6.0                 | 12.0                   |
|        | 5.00  | 5           | 10.0        | 10.0                | 22.0                   |
|        | 6.00  | 3           | 6.0         | 6.0                 | 28.0                   |
|        | 7.00  | 4           | 8.0         | 8.0                 | 36.0                   |
|        | 8.00  | 4           | 8.0         | 8.0                 | 44.0                   |
|        | 9.00  | 3           | 6.0         | 6.0                 | 50.0                   |
|        | 10.00 | 4           | 8.0         | 8.0                 | 58.0                   |
|        | 11.00 | 2           | 4.0         | 4.0                 | 62.0                   |
|        | 12.00 | 2           | 4.0         | 4.0                 | 66.0                   |
|        | 13.00 | 3           | 6.0         | 6.0                 | 72.0                   |
|        | 14.00 | 1           | 2.0         | 2.0                 | 74.0                   |
|        | 15.00 | 2           | 4.0         | 4.0                 | 78.0                   |
|        | 16.00 | 5           | 10.0        | 10.0                | 88.0                   |
|        | 17.00 | 2           | 4.0         | 4.0                 | 92.0                   |
|        | 18.00 | 1           | 2.0         | 2.0                 | 94.0                   |
|        | 19.00 | 2           | 4.0         | 4.0                 | 98.0                   |
|        | 20.00 | 1           | 2.0         | 2.0                 | 100.0                  |
|        | Total | 50          | 100.0       | 100.0               |                        |

**Figura 2-4** SPSS, resultados para el problema 2.5.

- a) ¿Qué porcentaje usa su celular 15 o menos horas por semana?  
 b) ¿Qué porcentaje usa su celular 10 o más horas por semana?

### SOLUCIÓN

- a) El porcentaje acumulado correspondiente a 15 horas es 78%. Es decir, 78% usa su celular 15 horas o menos por semana.  
 b) El porcentaje acumulado correspondiente a 10 horas es 58%. Es decir, 58% usa su celular 10 horas o menos por semana. Por lo tanto, 42% usa su celular más de 10 horas por semana.

- 2.6** De 150 mediciones, la menor es 5.18 in y la mayor es 7.44 in. Determinar un conjunto adecuado: a) de intervalos de clase, b) de fronteras de clase y c) de marcas de clase que se pueda usar para elaborar una distribución de frecuencias con estas mediciones.

### SOLUCIÓN

El rango es  $7.44 - 5.18 = 2.26$  in. Para un mínimo de cinco intervalos de clases, la amplitud del intervalo de clase es  $2.26/5 = 0.45$ , aproximadamente, y para un máximo de 20 intervalos de clase, la amplitud del intervalo de clase es  $2.26/20 = 0.11$ , aproximadamente. Las amplitudes adecuadas para el intervalo de clase, entre 0.11 y 0.45, podrían ser 0.20, 0.30 o 0.40.

- a) En las columnas I, II y III de la tabla siguiente se presentan intervalos de clase de amplitud 0.20, 0.30 y 0.40, respectivamente.

| I         | II        | III       |
|-----------|-----------|-----------|
| 5.10-5.29 | 5.10-5.39 | 5.10-5.49 |
| 5.30-5.49 | 5.40-5.69 | 5.50-5.89 |
| 5.50-5.69 | 5.70-5.99 | 5.90-6.29 |
| 5.70-5.89 | 6.00-6.29 | 6.30-6.69 |
| 5.90-6.09 | 6.30-6.59 | 6.70-7.09 |
| 6.10-6.29 | 6.60-6.89 | 7.10-7.49 |
| 6.30-6.49 | 6.90-7.19 |           |
| 6.50-6.69 | 7.20-7.49 |           |
| 6.70-6.89 |           |           |
| 6.90-7.09 |           |           |
| 7.10-7.29 |           |           |
| 7.30-7.49 |           |           |

Obsérvese que el límite inferior de cada una de las primeras clases puede ser también distinto a 5.10. Por ejemplo, si en la columna I se empieza con 5.15 como límite inferior, el primer intervalo de clase será 5.15-5.34.

- b) Las fronteras de clase correspondientes a las columnas I, II y III del inciso a) son:

$$\begin{array}{lll} \text{I} & 5.095-5.295, 5.295-5.495, 5.495-5.695, \dots, 7.295-7.495 \\ \text{II} & 5.095-5.395, 5.395-5.695, 5.695-5.995, \dots, 7.195-7.495 \\ \text{III} & 5.095-5.495, 5.495-5.895, 5.895-6.295, \dots, 7.095-7.495 \end{array}$$

Obsérvese que estas fronteras de clase son adecuadas, ya que no coinciden con las mediciones observadas.

- c) A continuación se dan las marcas de clase correspondientes a las columnas I, II y III del inciso a).

$$\text{I } 5.195, 5.395, \dots, 7.395 \quad \text{II } 5.245, 5.545, \dots, 7.345 \quad \text{III } 5.295, 5.695, \dots, 7.295$$

Estas marcas de clase tienen la desventaja de no coincidir con mediciones observadas

- 2.7 Al resolver el problema 2.6a), un estudiante elige como intervalos de clase 5.10-5.40, 5.40-5.70, ..., 6.90-7.20 y 7.20-7.50. ¿Hay algún problema con esta elección?

## SOLUCIÓN

Estos intervalos de clase se traslanan en 5.40, 5.70, ..., 7.20. De esta manera, una medición que se registre, por ejemplo como 5.40, podrá colocarse en cualquiera de los dos primeros intervalos de clases. Algunos justifican esto acordando colocar la mitad de los casos ambiguos en una de las clases y la otra mitad en la otra.

Esta ambigüedad se elimina escribiendo los intervalos de clase como de 5.10 hasta menos de 5.40, de 5.40 hasta menos de 5.70, etc. En este caso, los límites de clase coinciden con las fronteras de clase y las marcas de clase pueden coincidir con datos observados.

En general, siempre que sea posible, se desea evitar que los intervalos de clase se superpongan y escogerlos de manera que las fronteras de clase sean valores que no coincidan con datos observados. Por ejemplo, los intervalos de clase del problema 2.6 pueden ser 5.095-5.395, 5.395-5.695, etc., sin que haya ambigüedad. La desventaja de este caso particular es que las marcas de clase no coincidirán con datos observados.

- 2.8** En la tabla siguiente se presentan los pesos, dados a la libra más cercana, de 40 estudiantes de una universidad. Elaborar una distribución de frecuencias.

|     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 138 | 164 | 150 | 132 | 144 | 125 | 149 | 157 |
| 146 | 158 | 140 | 147 | 136 | 148 | 152 | 144 |
| 168 | 126 | 138 | 176 | 163 | 119 | 154 | 165 |
| 146 | 173 | 142 | 147 | 135 | 153 | 140 | 135 |
| 161 | 145 | 135 | 142 | 150 | 156 | 145 | 128 |

### SOLUCIÓN

El peso mayor es 176 lb y el peso menor es 119 lb, de manera que el rango es  $176 - 119 = 57$  lb. Si se emplean cinco intervalos de clase, la amplitud del intervalo de clase será  $57/5 = 11$ , aproximadamente; si se usan 20 intervalos de clase, la amplitud de cada intervalo de clase será  $57/20 = 3$ , aproximadamente.

Una amplitud adecuada para los intervalos de clase es 5 lb. También es conveniente que las marcas de clase sean 120, 125, 130, 135, ..., lb. Por lo tanto, los intervalos de clase serán 118-122, 123-127, 128-132, ... Y entonces las fronteras de clase serán 117.5, 122.5, 127.5, ..., las cuales no coinciden con datos observados.

La distribución de frecuencias buscada se muestra en la tabla 2.6. La columna central, llamada *hoja de conteo*, se usa para tabular las frecuencias de clase a partir de los datos en bruto y suele omitirse en la presentación final de una distribución de frecuencias. No es necesario hacer una ordenación, pero si se cuenta con ella, se puede usar para tabular las frecuencias.

### Otro método

Por supuesto, hay otras posibles distribuciones de frecuencias. En la tabla 7.2, por ejemplo, se muestra una distribución de frecuencias que tiene sólo siete clases y en la que el intervalo de clase es de 9 lb.

Tabla 2.6

| Peso (lb) | Conteo | Frecuencias |
|-----------|--------|-------------|
| 118-122   | /      | 1           |
| 123-127   | //     | 2           |
| 128-132   | //     | 2           |
| 133-137   | ///    | 4           |
| 138-142   | /// /  | 6           |
| 143-147   | /// // | 8           |
| 148-152   | ///    | 5           |
| 153-157   | ///    | 4           |
| 158-162   | //     | 2           |
| 163-167   | ///    | 3           |
| 168-172   | /      | 1           |
| 173-177   | //     | 2           |
|           |        | Total 40    |

Tabla 2.7

| Peso (lb) | Conteo | Frecuencias |
|-----------|--------|-------------|
| 118-126   | ///    | 3           |
| 127-135   | ///    | 5           |
| 136-144   | /// // | 9           |
| 145-153   | /// // | 12          |
| 154-162   | ///    | 5           |
| 163-171   | ///    | 4           |
| 172-180   | //     | 2           |
|           |        | Total 40    |

- 2.9** Se toman las estaturas de 45 estudiantes del sexo femenino de una universidad; a continuación se presentan estas estaturas registradas a la pulgada más cercana. Para elaborar un histograma, usar el paquete STATISTIX para estadística.

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 67 | 67 | 64 | 64 | 74 | 61 | 68 | 71 | 69 | 61 | 65 | 64 | 62 | 63 | 59 |
| 70 | 66 | 66 | 63 | 59 | 64 | 67 | 70 | 65 | 66 | 66 | 56 | 65 | 67 | 69 |
| 64 | 67 | 68 | 67 | 67 | 65 | 74 | 64 | 62 | 68 | 65 | 65 | 65 | 66 | 67 |

**SOLUCIÓN**

Después de ingresar los datos en la hoja de cálculo de STATISTIX, la secuencia “Statistics ⇒ Summary Statistics ⇒ Histogram” produce el histograma que se muestra en la figura 2-5.

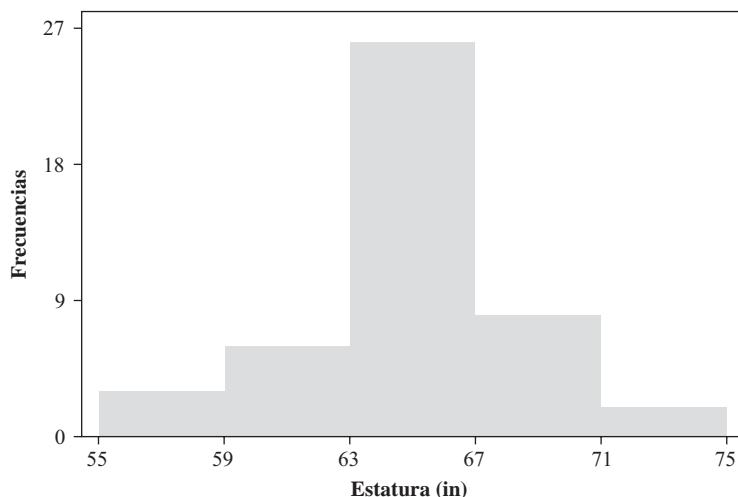


Figura 2-5 STATISTIX, histograma de las estaturas de 45 estudiantes universitarios.

- 2.10** En la tabla 2.8 se dan las distancias, en millas, que recorren 50 estudiantes del Metropolitan College de su casa a la universidad.

Tabla 2.8 Distancias al Metropolitan College (millas)

|     |      |      |     |      |     |      |      |      |     |
|-----|------|------|-----|------|-----|------|------|------|-----|
| 4.3 | 7.0  | 8.0  | 3.9 | 3.7  | 8.4 | 2.6  | 1.0  | 15.7 | 3.9 |
| 6.5 | 8.7  | 0.9  | 0.9 | 12.6 | 4.0 | 10.3 | 10.0 | 6.2  | 1.1 |
| 7.2 | 8.8  | 7.8  | 4.9 | 2.0  | 3.0 | 4.2  | 3.3  | 4.8  | 4.4 |
| 7.7 | 2.4  | 8.0  | 8.0 | 4.6  | 1.4 | 2.2  | 1.9  | 3.2  | 4.8 |
| 5.0 | 10.3 | 12.3 | 3.8 | 3.8  | 6.6 | 2.0  | 1.6  | 4.4  | 4.3 |

En la figura 2.6 se muestra el histograma obtenido con SPSS con las distancias de la tabla 2.8. Obsérvese que las clases son 0 a 2, 2 a 4, 4 a 6, 6 a 8, 8 a 10, 10 a 12, 12 a 14 y 14 a 16. Las frecuencias 7, 13, 11, 7, 6, 3, 2 y 1. Un número que cae en el límite inferior de clase se cuenta dentro de esa clase, pero los que caen en el límite superior, se cuentan dentro de la clase siguiente.

- a) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la primera clase?
- b) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la segunda clase?
- c) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la tercera clase?
- d) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la cuarta clase?
- e) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la quinta clase?
- f) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la sexta clase?
- g) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la séptima clase?
- h) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la octava clase?

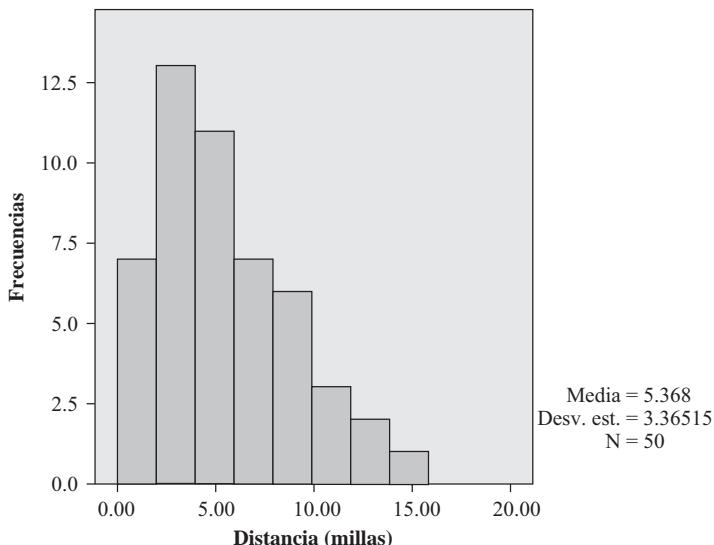


Figura 2-6 SPSS, histograma de las distancias al Metropolitan College.

### SOLUCIÓN

- a) 0.9, 0.9, 1.0, 1.1, 1.4, 1.6, 1.9
- b) 2.0, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 3.0, 3.2, 3.3, 3.7, 3.8, 3.8, 3.9, 3.9
- c) 4.0, 4.2, 4.3, 4.3, 4.4, 4.4, 4.6, 4.8, 4.8, 4.9, 5.0
- d) 6.2, 6.5, 6.6, 7.0, 7.2, 7.7, 7.8
- e) 8.0, 8.0, 8.0, 8.4, 8.7, 8.8
- f) 10.0, 10.3, 10.3
- g) 12.3, 12.6
- h) 15.7

- 2.11** En la figura 2-7 se muestra un histograma obtenido con SAS, con las distancias de la tabla 2.8. Se muestran los puntos medios (marcas de clase) de los intervalos de clase. Las clases son 0 a 2.5, 2.5 a 5.0, 5.0 a 7.5, 7.5 a 10.0, 10 a 12.5, 12.5 a 15.0, 15.0 a 17.5, 17.5 a 20.0. Los números que caen en el límite inferior de clase se cuentan dentro de esa clase, pero si caen en el límite superior se cuentan dentro de la clase siguiente.

- a) ¿Cuáles son los valores (de la tabla 2.8) que pertenecen a la primera clase?
- b) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la segunda clase?
- c) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la tercera clase?
- d) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la cuarta clase?
- e) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la quinta clase?
- f) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la sexta clase?
- g) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la séptima clase?

### SOLUCIÓN

- a) 0.9, 0.9, 1.0, 1.1, 1.4, 1.6, 1.9, 2.0, 2.0, 2.2, 2.4
- b) 2.6, 3.0, 3.2, 3.3, 3.7, 3.8, 3.8, 3.9, 3.9, 4.0, 4.2, 4.3, 4.3, 4.4, 4.4, 4.6, 4.8, 4.8, 4.9
- c) 5.0, 6.2, 6.5, 6.6, 7.0, 7.2
- d) 7.7, 7.8, 8.0, 8.0, 8.4, 8.7, 8.8

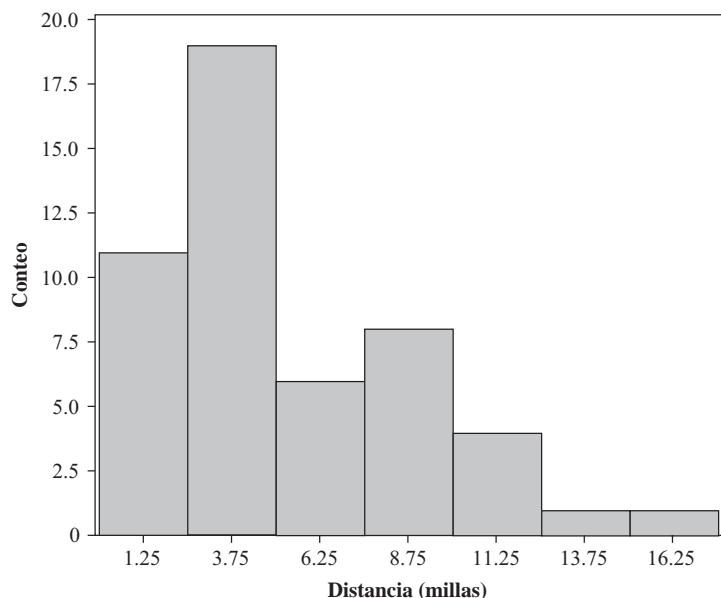


Figura 2-7 SAS, histograma con las distancias al Metropolitan College.

- e) 10.0, 10.3, 10.3, 12.3  
 f) 12.6  
 g) 15.7
- 2.12 La empresa P&R (problema 2.3) contrata cinco empleados nuevos, cuyos salarios semanales son \$285.34, \$316.83, \$335.78, \$356.21 y \$374.50. Construir una distribución de frecuencias con los salarios de los 70 empleados.

### SOLUCIÓN

En las tablas 2.9, a) y b), se presentan varias distribuciones de frecuencias posibles.

Tabla 2.9a)

| Salarios          | Frecuencias |
|-------------------|-------------|
| \$250.00-\$259.99 | 8           |
| 260.00-269.99     | 10          |
| 270.00-279.99     | 16          |
| 280.00-289.99     | 15          |
| 290.00-299.99     | 10          |
| 300.00-309.99     | 5           |
| 310.00-319.99     | 3           |
| 320.00-329.99     | 0           |
| 330.00-339.99     | 1           |
| 340.00-349.99     | 0           |
| 350.00-359.99     | 1           |
| 360.00-369.99     | 0           |
| 370.00-379.99     | 1           |
| Total             | 70          |

Tabla 2.9b)

| Salarios          | Frecuencias |
|-------------------|-------------|
| \$250.00-\$259.99 | 8           |
| 260.00-269.99     | 10          |
| 270.00-279.99     | 16          |
| 280.00-289.99     | 15          |
| 290.00-299.99     | 10          |
| 300.00-309.99     | 5           |
| 310.00-319.99     | 3           |
| 320.00 y más      | 3           |
| Total             | 70          |

**Tabla 2.9c)**

| Salarios          | Frecuencias |
|-------------------|-------------|
| \$250.00-\$269.99 | 18          |
| 270.00-289.99     | 31          |
| 290.00-309.99     | 15          |
| 310.00-329.99     | 3           |
| 330.00-349.99     | 1           |
| 350.00-369.99     | 1           |
| 370.00-389.99     | 1           |
| Total             | 70          |

**Tabla 2.9d)**

| Salarios          | Frecuencias |
|-------------------|-------------|
| \$250.00-\$259.99 | 8           |
| 260.00-269.99     | 10          |
| 270.00-279.99     | 16          |
| 280.00-289.99     | 15          |
| 290.00-299.99     | 10          |
| 300.00-319.99     | 8           |
| 320.00-379.99     | 3           |
| Total             | 70          |

En la tabla 2.9a) se conserva una misma amplitud de intervalo de clase, \$10.00. Esto da por resultado que haya demasiadas clases vacías y que sea demasiado detallada en la parte superior de la escala de los salarios.

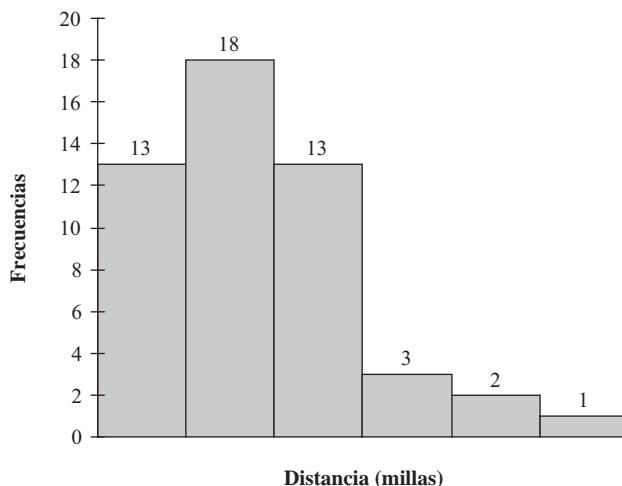
En la tabla 2.9b) se han evitado las clases vacías y el excesivo detalle empleando el intervalo abierto “\$320 y más”. La desventaja es que esta tabla no es útil para realizar ciertos cálculos matemáticos. Por ejemplo, no se puede determinar cuál es la cantidad total pagada como salarios semanalmente, ya que en “más de \$320.00” puede haber individuos que ganen hasta \$1 400.00 por semana.

En la tabla 2.9c) se emplea \$20.00 como amplitud del intervalo de clase. La desventaja es que en el extremo inferior de la escala de salarios se pierde mucha información, en tanto que en el extremo superior de la escala, la tabla sigue siendo demasiado detallada.

En la tabla 2.9d) se emplean amplitudes desiguales de intervalos de clase. La desventaja es que se complican ciertos cálculos que puede desearse hacer después, lo que no ocurre cuando los intervalos de clase son de la misma amplitud. También, cuanto mayor sea la amplitud del intervalo de clase, mayor será el error de agrupamiento.

- 2.13** En la figura 2-8 se muestra un histograma, obtenido con EXCEL, con las distancias de la tabla 2.8. Las clases son 0 a 3, 3 a 6, 6 a 9, 9 a 12, 12 a 15 y 15 a 18. Los números que caigan en el límite superior de clase se cuentan dentro de esa clase, pero si caen en el límite inferior se cuentan dentro de la clase anterior.

- a) ¿Cuáles son los valores (de la tabla 2.8) que pertenecen a la primera clase?
- b) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la segunda clase?
- c) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la tercera clase?

**Figura 2-8** EXCEL, histograma con las distancias al Metropolitan College.

- d) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la cuarta clase?  
e) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la quinta clase?  
f) ¿Cuáles son los valores que pertenecen a la sexta clase?

**SOLUCIÓN**

- a) 0.9, 0.9, 1.0, 1.1, 1.4, 1.6, 1.9, 2.0, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 3.0  
b) 3.2, 3.3, 3.7, 3.8, 3.8, 3.9, 3.9, 4.0, 4.2, 4.3, 4.3, 4.4, 4.4, 4.6, 4.8, 4.8, 4.9, 5.0  
c) 6.2, 6.5, 6.6, 7.0, 7.2, 7.7, 7.8, 8.0, 8.0, 8.0, 8.4, 8.7, 8.8  
d) 10.0, 10.3, 10.3  
e) 12.3, 12.6  
f) 15.7

**DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIAS ACUMULADAS Y OJIVAS**

- 2.14** A partir de la distribución de frecuencias dada en la tabla 2.5 del problema 2.3, construir: a) una distribución de frecuencias acumuladas, b) una distribución acumulada porcentual, c) una ojiva y d) una ojiva porcentual.

**Tabla 2.10**

| Salarios          | Frecuencias acumuladas | Distribución acumulada porcentual |
|-------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Menos de \$250.00 | 0                      | 0.0                               |
| Menos de \$260.00 | 8                      | 12.3                              |
| Menos de \$270.00 | 18                     | 27.7                              |
| Menos de \$280.00 | 34                     | 52.3                              |
| Menos de \$290.00 | 48                     | 73.8                              |
| Menos de \$300.00 | 58                     | 89.2                              |
| Menos de \$310.00 | 63                     | 96.9                              |
| Menos de \$320.00 | 65                     | 100.0                             |

**SOLUCIÓN**

- a) y b) En la tabla 2.10 se muestran la distribución de frecuencias acumuladas y la distribución de frecuencia porcentual (o distribución de frecuencias acumuladas relativas).

Obsérvese que las entradas de la columna 2 se obtienen sumando las entradas sucesivas de la columna 2 de la tabla 2.5, así,  $18 = 8 + 10$ ,  $34 = 8 + 10 + 16$ , etcétera.

Las entradas de la columna 3 se obtienen dividiendo cada una de las entradas de la columna anterior entre 65, la suma de todas las frecuencias, y expresando el resultado como porcentaje. Así,  $34/65 = 0.523$ , o 52.3%. Las entradas en esta columna también pueden obtenerse añadiendo entradas sucesivas de la columna 2 de la tabla 2.8. Así,  $27.7 = 12.3 + 15.4$ ,  $52.3 = 12.3 + 15.4 + 24.6$ , etcétera.

- c) y d) En la figura 2-9a) se muestra la ojiva (gráfica de frecuencias acumuladas porcentuales), y en la figura 2-9b) se presenta la ojiva porcentual (gráfica de frecuencias acumuladas relativas). Ambas son gráficas generadas con Minitab.

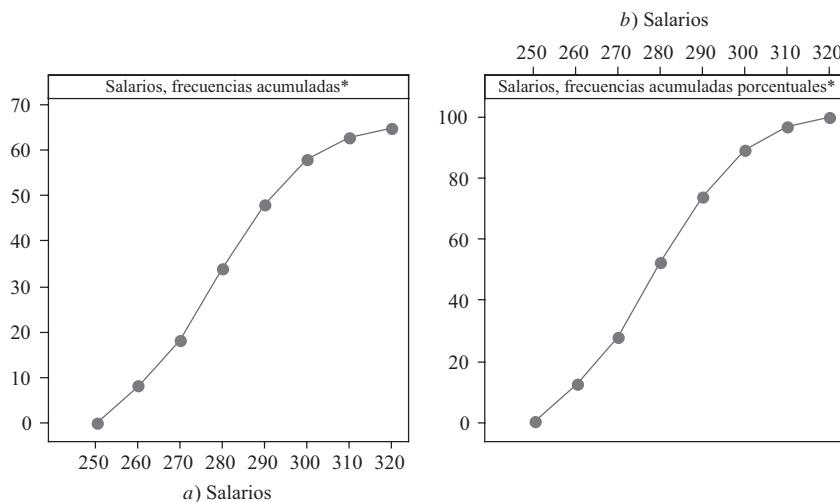


Figura 2-9 MINITAB, a) gráfica de frecuencias acumuladas y b) gráfica de frecuencias acumuladas porcentuales.

- 2.15** A partir de la distribución de frecuencias dada en la tabla 2.5 del problema 2.3, construir: a) una distribución de frecuencias “o más” y b) una ojiva “o más”.

### SOLUCIÓN

- En la tabla 2.11, obsérvese que cada entrada de la columna 2 se obtiene sumando las entradas sucesivas de la columna 2 de la tabla 2.5, *empezando en la parte inferior* de la tabla 2.5; así,  $7 = 2 + 5$ ,  $17 = 2 + 5 + 10$ , etc. Estas entradas también pueden obtenerse restando las entradas en la columna 2 de la tabla 2.10 del total de las frecuencias, 65; así,  $57 = 65 - 8$ ,  $47 = 65 - 18$ , etcétera.
- En la figura 2.10 se muestra la ojiva “o más”.

Tabla 2.11

| Salarios       | Frecuencias acumuladas<br>“o más” |
|----------------|-----------------------------------|
| \$250.00 o más | 65                                |
| \$260.00 o más | 57                                |
| \$270.00 o más | 47                                |
| \$280.00 o más | 31                                |
| \$290.00 o más | 17                                |
| \$300.00 o más | 7                                 |
| \$310.00 o más | 2                                 |
| \$320.00 o más | 0                                 |

- 2.16** A partir de las ojivas de las figuras 2-9 y 2-10 (problemas 2.14 y 2.15, respectivamente), estimar la cantidad de empleados que ganan: a) menos de \$288.00 por semana, b) \$296.00 o más por semana, c) por lo menos \$263.00 por semana, pero menos de \$275.00 por semana.

### SOLUCIÓN

- En la ojiva “menos de” de la figura 2-9 se traza una recta vertical que cruce la recta de los salarios en \$288.00. Este punto cruza la ojiva en un punto cuyas coordenadas son (288, 45); por lo tanto, la cantidad de empleados que gana menos de \$288.00 por semana es 45.
- En la ojiva “o más” de la figura 2-10 se traza una recta vertical en \$296.00. Esta recta cruza la ojiva en el punto (296, 11); por lo tanto, la cantidad de empleados que gana \$296.00 o más por semana es 11 empleados.

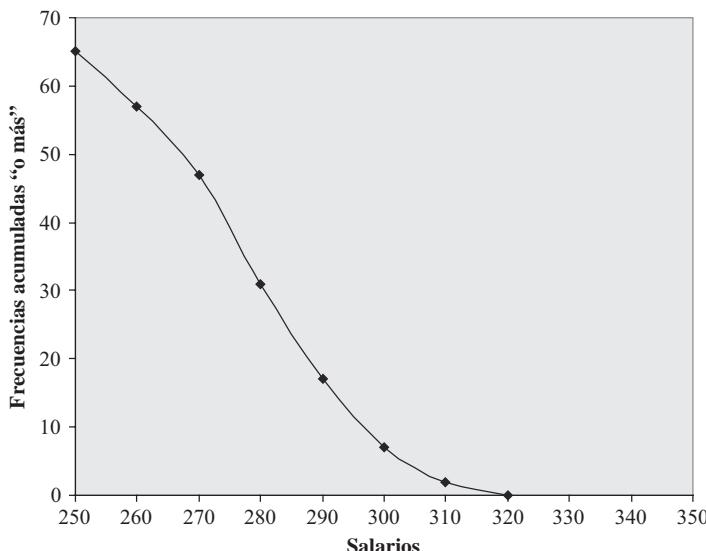


Figura 2-10 EXCEL, gráfica de frecuencias acumuladas “o más”

Esto también puede obtenerse a partir de la ojiva “menos de” de la figura 2-9. Trazando una recta en \$296.00, se encuentra que 54 empleados ganan menos de \$296.00 por semana; por lo tanto,  $65 - 54 = 11$  empleados ganan \$296.00 o más por semana.

- c) Utilizando la ojiva “menos de” de la figura 2-9, se tiene: cantidad de empleados buscada = cantidad de empleados que gana menos de \$275.00 por semana – cantidad de empleados que gana menos de \$263.00 por semana = 26 – 11 = 15.

Obsérvese que los resultados anteriores también pueden obtenerse mediante *interpolación* en la tabla de frecuencias acumuladas. Para el inciso a), por ejemplo, ya que \$288.00 está a  $8/10$  o  $4/5$  entre \$280.00 y \$290.00, la cantidad de empleados buscada debe estar a  $4/5$  entre 34 y 48 (ver tabla 2.10). Y  $4/5$  entre 34 y 48 es  $4/5(48 - 34) = 11$ . Por lo tanto, el número de empleados buscado es  $3 + 11 = 45$ .

- 2.17** Se lanzan cinco monedas 1 000 veces y en cada lanzamiento se anota el número de caras que se obtiene. En la tabla 2.12 se muestran las cantidades 0, 1, 2, 3, 4 y 5 de caras que se obtuvieron.

- a) Graficar los datos de la tabla 2.12.
- b) Elaborar una tabla en la que se dé el porcentaje de los lanzamientos en los que se obtuvo menos de 0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6 caras.
- c) Graficar los datos de la tabla del inciso b).

Tabla 2.12

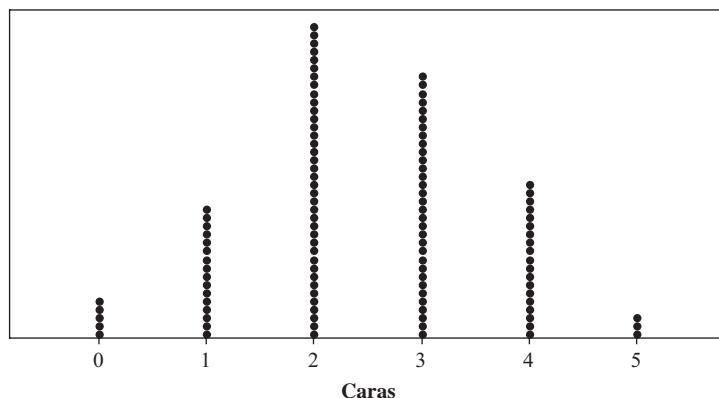
| Cantidad de caras | Cantidad de lanzamientos<br>(frecuencias) |
|-------------------|---|
| 0                 | 38  |
| 1                 | 144                                       |
| 2                 | 342                                       |
| 3                 | 287                                       |
| 4                 | 164                                       |
| 5                 | 25  |
| Total             | 1 000                                     |

**SOLUCIÓN**

- a) Estos datos se pueden mostrar gráficamente, ya sea como en la figura 2-11 o como en la figura 2-12.

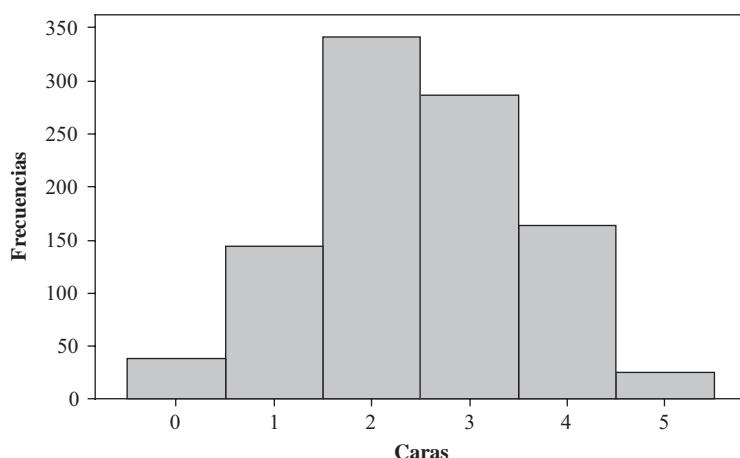
Al parecer es más natural usar la figura 2-11, ya que la cantidad de caras no puede ser, por ejemplo, 1.5 o 3.2.

A esta gráfica se le llama *gráfica de puntos* y se usa cuando los datos son discretos.



Cada símbolo (punto) representa hasta 9 observaciones.

**Figura 2-11** MINITAB, gráfica de puntos con la cantidad de caras.



**Figura 2-12** MINITAB, histograma de la cantidad de caras.

En la figura 2-12 se presenta un histograma de los datos. Obsérvese que toda el área del histograma corresponde a la frecuencia total, 1 000, como debe ser. Cuando se usa un histograma o el correspondiente polígono de frecuencias, se está tratando a los datos *como si* fueran continuos. Esto, como se verá más tarde, resulta útil. Obsérvese que ya en el problema 2.10 se usó un histograma y un polígono de frecuencias para datos discretos.

- b) La tabla 2.13 es la requerida. Obsérvese que en esta tabla simplemente se da una distribución de las frecuencias acumuladas y una distribución de las frecuencias acumuladas porcentuales de la cantidad de caras. Hay que notar que las entradas “Menor de 1”, “Menor de 2”, etc., también podrían haber sido “Menor o igual a 0”, “Menor o igual a 1”, etcétera.
- c) La gráfica pedida se puede representar como en la figura 2-13 o la figura 2-14.

La figura 2-13 es más natural para representar datos discretos, ya que el porcentaje de lanzamientos en el que se obtienen dos caras es igual al porcentaje en el que habrá menos de 1.75, 1.56 o 1.23 caras, es decir, es un mismo porcentaje (18.2%) el que corresponde a todos estos valores (lo que se indica por la línea horizontal).

Tabla 2.13

| Número de caras | Número de lanzamientos<br>(frecuencias acumuladas) | Cantidades porcentuales<br>de lanzamientos<br>(frecuencias acumuladas<br>porcentuales) |
|-----------------|--|--|
| Menos de 0      | 0  | 0.0  |
| Menos de 1      | 38   | 3.8  |
| Menos de 2      | 182  | 18.2   |
| Menos de 3      | 524  | 52.4   |
| Menos de 4      | 811  | 81.1   |
| Menos de 5      | 975  | 97.5   |
| Menos de 6      | 1 000  | 100.0  |

En la figura 2-14 se presenta la gráfica de frecuencias acumuladas, u ojiva; los datos se tratan como si fueran continuos.

Obsérvese que las figuras 2-13 y 2-14 corresponden, respectivamente, a las figuras 2-11 y 2-12 del inciso a).

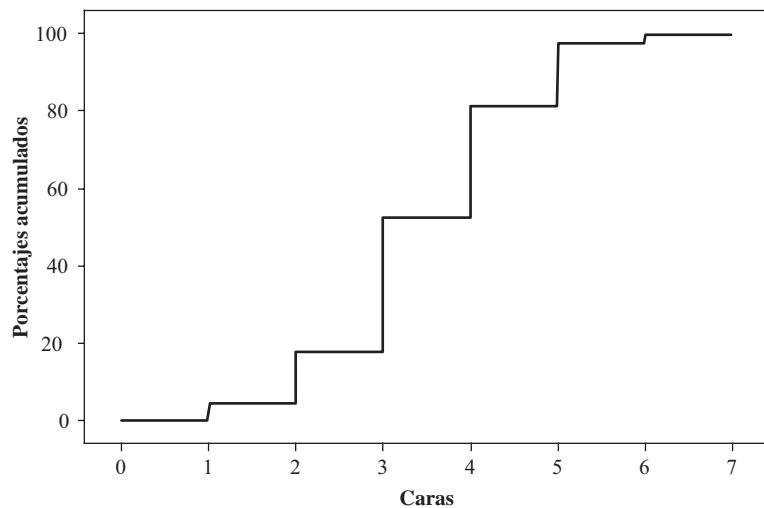


Figura 2-13 MINITAB, función escalonada.

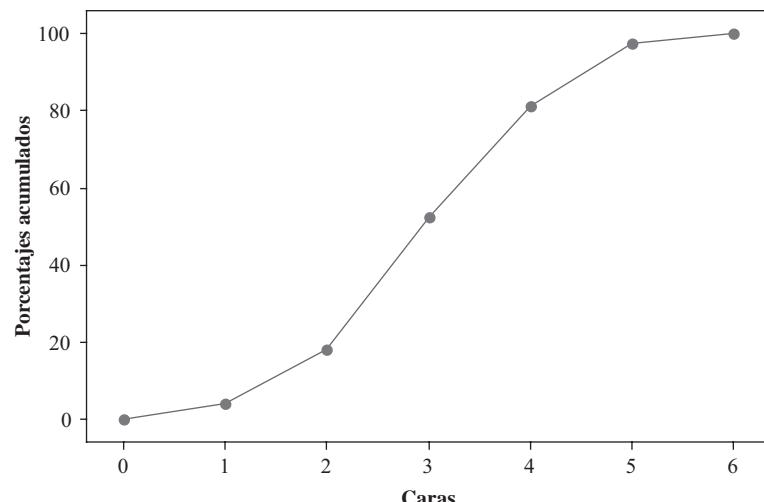


Figura 2-14 MINITAB, gráfica de frecuencias acumuladas.

## CURVAS DE FRECUENCIAS Y OJIVAS SUAVIZADAS

- 2.18** Las muestras de poblaciones tienen histogramas y polígonos de frecuencias con ciertas formas. Si las muestras son muy grandes, los histogramas y los polígonos de frecuencias se aproximan a la distribución de la población. Considérense dos distribuciones de frecuencias poblacionales. *a)* Considérese una máquina que llena uniformemente envases de refresco con una cantidad entre 15.9 y 16.1 onzas. Trazar la curva de frecuencias y determinar qué porcentaje de los envases tiene más de 15.95 onzas. *b)* Considérense estaturas de mujeres. Estas estaturas tienen una distribución de frecuencias poblacional que es simétrica o en forma de campana, en la que el promedio es igual a 65 in y la desviación estándar es igual a 3 in. (La desviación estándar se estudia en un capítulo posterior.) ¿Qué porcentaje de las estaturas se encuentran entre 62 y 68 in, es decir, están a no más de una desviación estándar de la media? ¿Qué porcentaje se encuentra a no más de dos desviaciones estándar de la media? ¿Qué porcentaje se encuentra a no más de tres desviaciones estándar de la media?

### SOLUCIÓN

En la figura 2-15 se muestra una curva de frecuencias uniforme. La región sombreada corresponde a los envases con más de 15.95 onzas. Obsérvese que la región abarcada por la curva de frecuencias tiene forma de rectángulo. El área bajo la curva de frecuencias está dada por largo  $\times$  ancho, es decir  $(16.10 - 15.90) \times 5 = 1$ . El área de la región sombreada es  $(16.10 - 15.95) \times 5 = 0.75$ . Esto se interpreta como que 75% de los envases llenados tiene más de 15.95 onzas.

En la figura 2-16 se muestra una curva de frecuencias en forma de campana o simétrica. En esta figura se muestran en una región sombreada las estaturas a no más de una desviación estándar. Para calcular esta área es necesario hacer uso

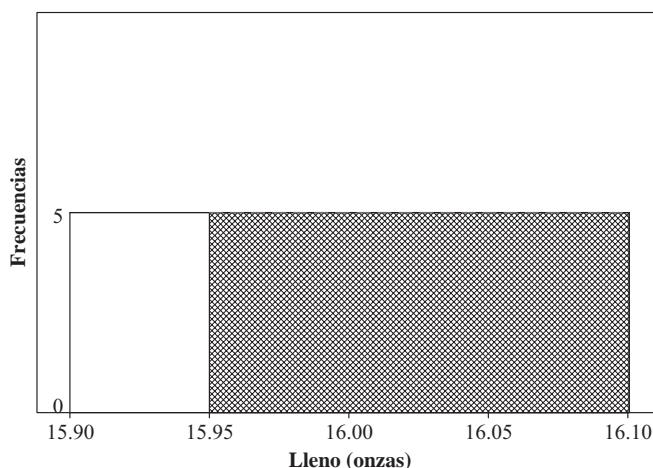


Figura 2-15 MINITAB, curva de frecuencias uniforme que muestra llenado a más de 15.95 onzas.

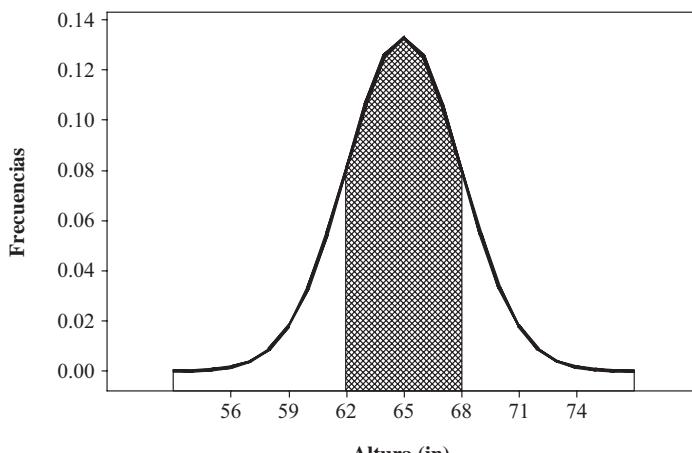


Figura 2-16 MINITAB, curva de frecuencias en forma de campana que muestra la altura entre 62 y 68 in y sus frecuencias.

del cálculo. El área comprendida a no más de una desviación estándar es aproximadamente 68% de toda el área bajo la curva. El área a no más de dos desviaciones estándar es aproximadamente 95% de toda el área bajo la curva. El área a no más de tres desviaciones estándar es aproximadamente 99.7% de toda el área bajo la curva.

En capítulos posteriores se verá más acerca de cómo encontrar áreas bajo estas curvas.

### PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

- 2.19** a) Disponga los números 12, 56, 42, 21, 5, 18, 10, 3, 61, 34, 65 y 24 en una ordenación, y b) determine el rango.
- 2.20** En la tabla 2.14 se presenta una distribución de frecuencias de la cantidad de minutos por semana que ven televisión 400 estudiantes. De acuerdo con esta tabla, determinar:
- El límite superior de la quinta clase.
  - El límite inferior de la octava clase.
  - La marca de clase de la séptima clase.
  - Las fronteras de clase de la última clase.
  - El tamaño del intervalo de clase.
  - La frecuencia de la cuarta clase.
  - La frecuencia relativa de la sexta clase.
  - El porcentaje de estudiantes que no ven televisión más de 600 minutos por semana.
  - El porcentaje de estudiantes que ven televisión 900 o más minutos por semana.
  - El porcentaje de estudiantes que ven televisión por lo menos 500 minutos por semana, pero menos de 1 000 minutos por semana.

Tabla 2.14

| Tiempo (minutos) | Número de estudiantes |
|------------------|-----------------------|
| 300-399          | 14                    |
| 400-499          | 46                    |
| 500-599          | 58                    |
| 600-699          | 76                    |
| 700-799          | 68                    |
| 800-899          | 62                    |
| 900-999          | 48                    |
| 1 000-1 099      | 22                    |
| 1 100-1 199      | 6                     |

- 2.21** Elaborar: a) un histograma y b) un polígono de frecuencias para la distribución de frecuencias de la tabla 2.14.
- 2.22** Con los datos de la tabla 2.14 del problema 2.20, construir: a) una distribución de frecuencias relativas, b) un histograma de frecuencias relativas y c) un polígono de frecuencias relativas.

- 2.23** Con los datos de la tabla 2.14, construir: *a)* una distribución de frecuencias acumuladas, *b)* una distribución acumulada porcentual, *c)* una ojiva y *d)* una ojiva porcentual. (Obsérvese que a menos que se especifique otra cosa, una distribución acumulada es del tipo “menos que”.)
- 2.24** Repetir el problema 2.23, pero para el caso en que las frecuencias acumuladas sean del tipo “o mayor”.
- 2.25** Con los datos de la tabla 2.14, estimar el porcentaje de estudiantes que ven la televisión: *a)* menos de 560 minutos por semana, *b)* 970 o más minutos por semana y *c)* entre 620 y 890 minutos por semana.
- 2.26** El diámetro interno de las lavadoras producidas por una empresa se mide con una exactitud de milésimas de pulgada. Si las marcas de clase de la distribución de estos diámetros dados en pulgadas son 0.321, 0.324, 0.327, 0.330, 0.333 y 0.336, encontrar: *a)* la amplitud del intervalo de clase, *b)* las fronteras de clase y *c)* los límites de clase.
- 2.27** En la tabla siguiente se dan los diámetros en centímetros de una muestra de 60 balines fabricados en una empresa. Elaborar una distribución de frecuencias de los diámetros empleando los intervalos de clase adecuados.

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.738 | 1.729 | 1.743 | 1.740 | 1.736 | 1.741 | 1.735 | 1.731 | 1.726 | 1.737 |
| 1.728 | 1.737 | 1.736 | 1.735 | 1.724 | 1.733 | 1.742 | 1.736 | 1.739 | 1.735 |
| 1.745 | 1.736 | 1.742 | 1.740 | 1.728 | 1.738 | 1.725 | 1.733 | 1.734 | 1.732 |
| 1.733 | 1.730 | 1.732 | 1.730 | 1.739 | 1.734 | 1.738 | 1.739 | 1.727 | 1.735 |
| 1.735 | 1.732 | 1.735 | 1.727 | 1.734 | 1.732 | 1.736 | 1.741 | 1.736 | 1.744 |
| 1.732 | 1.737 | 1.731 | 1.746 | 1.735 | 1.735 | 1.729 | 1.734 | 1.730 | 1.740 |

- 2.28** Con los datos del problema 2.27, construir: *a)* un histograma, *b)* un polígono de frecuencias, *c)* una distribución de frecuencias relativas, *d)* un histograma de frecuencias relativas, *e)* un polígono de frecuencias relativas, *f)* una distribución de frecuencias acumuladas, *g)* una distribución acumulada porcentual, *h)* una ojiva, *i)* una ojiva porcentual.
- 2.29** Empleando los resultados del problema 2.28, determinar el porcentaje de balines cuyo diámetro: *a)* es mayor que 1.732 cm, *b)* no es mayor que 1.736 cm y *c)* está entre 1.730 y 1.738 cm. Comparar los resultados con los obtenidos directamente a partir de los datos en bruto del problema 2.27.
- 2.30** Repetir el problema 2.28 con los datos del problema 2.20.
- 2.31** De acuerdo con la Oficina de los Censos de Estados Unidos, en 1996 la población de este país era de 265 284 000. La tabla 2.15 da la distribución porcentual en los diversos grupos de edad.
- a)* ¿Cuál es la amplitud o el tamaño del segundo intervalo de clase? ¿Y la del cuarto intervalo de clase?
  - b)* ¿Cuántos tamaños distintos de intervalos de clase hay?
  - c)* ¿Cuántos intervalos de clase abiertos hay?
  - d)* ¿Cómo se deberá escribir el último intervalo de clase de manera que su amplitud sea igual a la del penúltimo intervalo de clase?
  - e)* ¿Cuál es la marca de clase del segundo intervalo de clase? ¿Y la del cuarto intervalo de clase?
  - f)* ¿Cuáles son las fronteras de clase del cuarto intervalo de clase?
  - g)* ¿Qué porcentaje de la población tiene 35 años o más? ¿Qué porcentaje de la población tiene 64 años o menos?
  - h)* ¿Qué porcentaje de la población tiene entre 20 y 49 inclusive?
  - i)* ¿Qué porcentaje de la población tiene más de 70 años?
- 2.32**
- a)* ¿Por qué es imposible construir un histograma porcentual o un polígono de frecuencias con la distribución de la tabla 2.15?
  - b)* ¿Cómo hay que modificar esta distribución para que se pueda construir un histograma porcentual o un polígono de frecuencias?
  - c)* Usando la modificación del inciso *b*), construir estas gráficas.

Tabla 2.15

| Grupo de edad en años | % de Estados Unidos |
|-----------------------|---------------------|
| Menos de 5            | 7.3                 |
| 5-9                   | 7.3                 |
| 10-14                 | 7.2                 |
| 15-19                 | 7.0                 |
| 20-24                 | 6.6                 |
| 25-29                 | 7.2                 |
| 30-34                 | 8.1                 |
| 35-39                 | 8.5                 |
| 40-44                 | 7.8                 |
| 45-49                 | 6.9                 |
| 50-54                 | 5.3                 |
| 55-59                 | 4.3                 |
| 60-64                 | 3.8                 |
| 65-74                 | 7.0                 |
| 75-84                 | 4.3                 |
| 85 o más              | 1.4                 |

Fuente: U.S. Bureau of the Census, Current Population Reports.

- 2.33** Con relación a la tabla 2.15, supóngase que la población total es 265 millones y que la clase “menos de 5” comprende a niños menores de 1 año. Dar el número de individuos que hay en cada grupo, en millones, con una exactitud de una décima de millón.
- 2.34**
- a) Trazar un polígono de frecuencias porcentuales suavizado y una ojiva porcentual suavizada que correspondan a los datos de la tabla 2.14.
  - b) Empleando los resultados del inciso a), estimar la probabilidad de que un estudiante vea menos de 10 horas de televisión por semana.
  - c) Empleando los resultados del inciso a), estimar la probabilidad de que un estudiante vea 15 horas o más de televisión por semana.
  - d) Empleando los resultados del inciso a), estimar la probabilidad de que un estudiante vea menos de 5 horas de televisión por semana.
- 2.35**
- a) Lanzar 50 veces cuatro monedas y tabular la cantidad de caras que obtiene en cada lanzamiento.
  - b) Elaborar una distribución de frecuencias en la que se muestre la cantidad de lanzamientos en los que se obtuvo 0, 1, 2, 3 y 4 caras.
  - c) Elaborar la distribución porcentual correspondiente al inciso b).
  - d) Comparar los porcentajes obtenidos con los teóricos, 6.25%, 25%, 37.5%, 25% y 6.25% (proporcionales a 1, 4, 6, 4, y 1), que se obtienen por las reglas de la probabilidad.
  - e) Graficar las distribuciones de los incisos b) y c)
  - f) Trazar la ojiva porcentual correspondiente a los datos.
- 2.36** Repetir el problema 2.35 con 50 lanzamientos más de las cuatro monedas y ver si hay mayor coincidencia con lo que se espera teóricamente. Si no es así, dar los razonamientos que puedan explicar esas diferencias.

# MEDIA, MEDIANA, MODA, Y OTRAS MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL

3

## ÍNDICES O SUBÍNDICES

El símbolo,  $X_j$  (que se lee “ $X$  subíndice  $j$ ”) representa cualquiera de los  $N$  valores  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$  que puede tomar la variable  $X$ . A la letra  $j$  que aparece en  $X_j$  representando a cualquiera de los números  $1, 2, 3, \dots, N$  se le llama *subíndice* o *índice*. En lugar de  $j$  se puede usar, por supuesto, cualquier otra letra,  $i, k, p, q$  o  $s$ .

## SUMATORIA

El símbolo  $\sum_{j=1}^N X_j$  se emplea para denotar la suma de todas las  $X_j$  desde  $j = 1$  hasta  $j = N$ ; por definición,

$$\sum_{j=1}^N X_j = X_1 + X_2 + X_3 + \cdots + X_N$$

Cuando no puede haber confusión, esta suma se denota simplemente como  $\sum X$ ,  $\sum X_j$  o  $\sum_j X_j$ . El símbolo  $\sum$  es la letra griega mayúscula *sigma* y denota suma.

**EJEMPLO 1**  $\sum_{j=1}^N X_j Y_j = X_1 Y_1 + X_2 Y_2 + X_3 Y_3 + \cdots + X_N Y_N$

**EJEMPLO 2**  $\sum_{j=1}^N aX_j = aX_1 + aX_2 + \cdots + aX_N = a(X_1 + X_2 + \cdots + X_N) = a \sum_{j=1}^N X_j$

donde  $a$  es una constante. O bien simplemente  $\sum aX = a \sum X$ .

**EJEMPLO 3** Si  $a, b$  y  $c$  son cualesquiera constantes, entonces  $\sum (aX + bY - cZ) = a \sum X + b \sum Y - c \sum Z$ . Ver problema 3.3.

## PROMEDIOS O MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL

Un *promedio* es un valor típico o representativo de un conjunto de datos. Como estos valores típicos tienden a encontrarse en el centro de los conjuntos de datos, ordenados de acuerdo con su magnitud, a los promedios se les conoce también como *medidas de tendencia central*.

Se pueden definir varios tipos de promedios; los más usados son la *media aritmética*, la *mediana*, la *moda*, la *media geométrica* y la *media armónica*. Cada una de ellas tiene ventajas y desventajas de acuerdo con el tipo de datos y el propósito de su uso.

### LA MEDIA ARITMÉTICA

La *media aritmética*, o brevemente la *media*, de un conjunto de  $N$  números  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$  se denota así:  $\bar{X}$  (que se lee “X barra”) y está definida como

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} = \frac{\sum X}{N} \quad (1)$$

**EJEMPLO 4** La media aritmética de los números 8, 3, 5, 12 y 10 es

$$\bar{X} = \frac{8 + 3 + 5 + 12 + 10}{5} = \frac{38}{5} = 7.6$$

Si los números  $X_1, X_2, \dots, X_K$  se presentan  $f_1, f_2, \dots, f_K$  veces, respectivamente (es decir, se presentan con frecuencias  $f_1, f_2, \dots, f_K$ ), su media aritmética es

$$\bar{X} = \frac{f_1 X_1 + f_2 X_2 + \dots + f_K X_K}{f_1 + f_2 + \dots + f_K} = \frac{\sum_{j=1}^K f_j X_j}{\sum_{j=1}^K f_j} = \frac{\sum f X}{\sum f} = \frac{\sum f X}{N} \quad (2)$$

donde  $N = \sum f$  es la *suma de las frecuencias* (es decir, la cantidad total de casos).

**EJEMPLO 5** Si 5, 8, 6 y 2 se presentan con frecuencias 3, 2, 4 y 1, respectivamente, su media aritmética es

$$\bar{X} = \frac{(3)(5) + (2)(8) + (4)(6) + (1)(2)}{3 + 2 + 4 + 1} = \frac{15 + 16 + 24 + 2}{10} = 5.7$$

### MEDIA ARITMÉTICA PONDERADA

Algunas veces, a los números  $X_1, X_2, \dots, X_K$  se les asignan ciertos *factores de ponderación* (o *pesos*)  $w_1, w_2, \dots, w_K$ , que dependen del significado o importancia que se les asigne a estos números. En este caso, a

$$\bar{X} = \frac{w_1 X_1 + w_2 X_2 + \dots + w_K X_K}{w_1 + w_2 + \dots + w_K} = \frac{\sum w X}{\sum w} \quad (3)$$

se le llama *media aritmética ponderada*. Obsérvese la semejanza con la ecuación (2), la cual se puede considerar como una media aritmética ponderada con pesos  $f_1, f_2, \dots, f_K$ .

**EJEMPLO 6** Si en una clase, al examen final se le da el triple de valor que a los exámenes parciales y un estudiante obtiene 85 en el examen final, y 70 y 90 en los dos exámenes parciales, su puntuación media es

$$\bar{X} = \frac{(1)(70) + (1)(90) + (3)(85)}{1 + 1 + 3} = \frac{415}{5} = 83$$

## PROPIEDADES DE LA MEDIA ARITMÉTICA

- En un conjunto de números, la suma algebraica de las desviaciones de estos números respecto a su media aritmética es cero.

**EJEMPLO 7** Las desviaciones de los números 8, 3, 5, 12 y 10 de su media aritmética, 7.6, son  $8 - 7.6$ ,  $3 - 7.6$ ,  $5 - 7.6$ ,  $12 - 7.6$  y  $10 - 7.6$  o bien  $0.4$ ,  $-4.6$ ,  $-2.6$ ,  $4.4$  y  $2.4$ , cuya suma algebraica es  $0.4 - 4.6 - 2.6 + 4.4 + 2.4 = 0$ .

- En un conjunto de números  $X_j$ , la suma de los cuadrados de sus desviaciones respecto a un número  $a$  es un mínimo si y sólo si  $a = \bar{X}$  (ver el problema 4.27).
- Si la media de  $f_1$  números es  $m_1$ , la media de  $f_2$  números es  $m_2$ , ..., la media de  $f_k$  números es  $m_k$ , entonces la media de todos estos números es

$$\bar{X} = \frac{f_1 m_1 + f_2 m_2 + \cdots + f_K m_K}{f_1 + f_2 + \cdots + f_K} \quad (4)$$

es decir, una media aritmética ponderada de todas las medias (véase el problemas 3.12).

- Si se *cree* o *se supone* que un número  $A$  (que puede ser cualquier número) es la *media aritmética* y si  $d_j = X_j - A$  son las desviaciones de  $X_j$  de  $A$ , entonces las ecuaciones (1) y (2) se convierten, respectivamente, en

$$\bar{X} = A + \frac{\sum_{j=1}^N d_j}{N} = A + \frac{\sum d}{N} \quad (5)$$

$$\bar{X} = A + \frac{\sum_{j=1}^K f_j d_j}{\sum_{j=1}^K f_j} = A + \frac{\sum f d}{N} \quad (6)$$

donde  $N = \sum_{j=1}^N f_j = \sum f$ . Obsérvese que las fórmulas (5) y (6) se resumen en la ecuación  $\bar{X} = A + \bar{d}$  (ver problema 3.18).

## CÁLCULO DE LA MEDIA ARITMÉTICA PARA DATOS AGRUPADOS

Cuando se presentan los datos en una distribución de frecuencias, se considera que todos los datos que caen en un intervalo de clase dado coinciden con la marca o punto medio del intervalo. Para datos agrupados, interpretando a las  $X_j$  como las marcas de clase, a las  $f_j$  como las correspondientes frecuencias de clase, a  $A$  como cualquier marca de clase supuesta y  $d_j = X_j - A$  como la desviación de  $X_j$  respecto de  $A$ , las fórmulas (2) y (6) son válidas.

A los cálculos empleando las fórmulas (2) y (6) se les suele conocer como *método largo* y *método abreviado*, respectivamente (ver los problemas 3.15 y 3.20).

Si todos los intervalos de clase son de una misma amplitud  $c$ , las desviaciones  $d_j = X_j - A$  se pueden expresar como  $c u_j$ , donde  $u_j$  puede tener valores enteros positivos o negativos o cero (es decir,  $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) con lo que la fórmula (6) se convierte en

$$\bar{X} = A + \left( \frac{\sum_{j=1}^K f_j u_j}{N} \right) = A + \left( \frac{\sum f u}{N} \right) c \quad (7)$$

lo que es equivalente a la ecuación  $\bar{X} = A + \bar{c} u$  (ver problema 3.21). A esta ecuación se le conoce como *método codificado* para calcular la media. Es un método muy breve recomendado para datos agrupados cuando los intervalos de clase tienen todos la misma amplitud (ver problemas 3.22 y 3.23). Obsérvese que en el método codificado los valores de la variable  $X$  se transforman en valores de la variable  $u$  de acuerdo con  $X = A + c u$ .

## LA MEDIANA

La *mediana* de un conjunto de números acomodados en orden de magnitud (es decir, en una ordenación) es el valor central o la media de los dos valores centrales.

**EJEMPLO 8** La mediana del conjunto de números 3, 4, 5, 6, 8, 8, 8 y 10 es 6.

**EJEMPLO 9** La mediana del conjunto de números 5, 5, 7, 9, 11, 12, 15 y 18 es  $\frac{1}{2}(9 + 11) = 10$ .

En datos agrupados, la mediana se obtiene por interpolación, como se expresa por la fórmula

$$\text{Mediana} = L_1 + \left( \frac{\frac{N}{2} - (\sum f)_1}{f_{\text{mediana}}} \right) c \quad (8)$$

donde  $L_1$  = frontera inferior de la clase mediana (es decir, de la clase que contiene la mediana)

$N$  = número de datos (es decir, la frecuencia total)

$(\sum f)_1$  = suma de las frecuencias de todas las clases anteriores a la clase mediana

$f_{\text{mediana}}$  = frecuencia de la clase mediana

$c$  = amplitud del intervalo de la clase mediana

Geométricamente, la mediana es el valor de  $X$  (abscisa) que corresponde a una recta vertical que divide al histograma en dos partes que tienen la misma área. A este valor de  $X$  se le suele denotar  $\tilde{X}$ .

## LA MODA

La *moda* de un conjunto de números es el valor que se presenta con más frecuencia; es decir, es el valor más frecuente. Puede no haber moda y cuando la hay, puede no ser única.

**EJEMPLO 10** La moda del conjunto 2, 2, 5, 7, 9, 9, 9, 10, 10, 11, 12 y 18 es 9.

**EJEMPLO 11** El conjunto 3, 5, 8, 10, 12, 15 y 16 no tiene moda.

**EJEMPLO 12** El conjunto 2, 3, 4, 4, 4, 5, 5, 7, 7, 7 y 9 tiene dos modas, 4 y 7, por lo que se le llama *bimodal*.

A una distribución que sólo tiene una moda se le llama *unimodal*.

En el caso de datos agrupados, para los que se ha construido una curva de frecuencia que se ajuste a los datos, la moda es el valor (o los valores) de  $X$  que corresponden al punto (o puntos) máximos de la curva. A este valor de  $X$  se le suele denotar  $\hat{X}$ .

En una distribución de frecuencia o en un histograma la moda se puede obtener mediante la fórmula siguiente:

$$\text{Moda} = L_1 + \left( \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} \right) c \quad (9)$$

donde  $L_1$  = frontera inferior de la clase modal (es decir, de la clase que contiene la moda)

$\Delta_1$  = exceso de frecuencia modal sobre la frecuencia en la clase inferior inmediata

$\Delta_2$  = exceso de frecuencia modal sobre la frecuencia en la clase superior inmediata

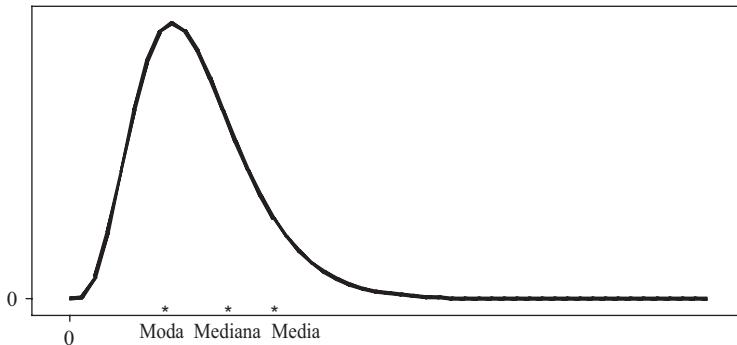
$c$  = amplitud del intervalo de la clase modal

## RELACIÓN EMPÍRICA ENTRE LA MEDIA, LA MEDIANA Y LA MODA

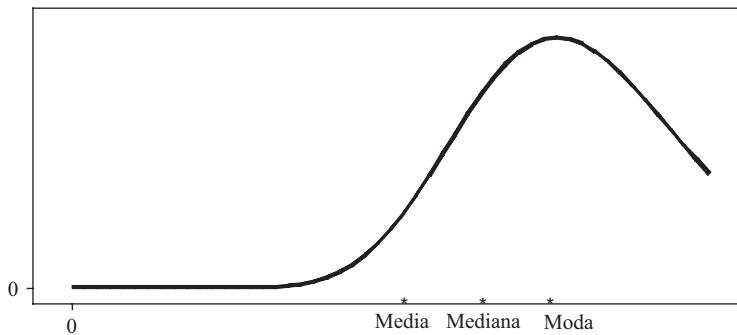
En las curvas de frecuencias unimodales que son ligeramente sesgadas (asimétricas), se tiene la relación empírica siguiente:

$$\text{Media} - \text{moda} = 3(\text{media} - \text{mediana}) \quad (10)$$

En las figuras 3-1 y 3-2 se muestran las posiciones relativas de la media, la mediana y la moda en curvas de frecuencias sesgadas a la derecha o a la izquierda, respectivamente. En las curvas simétricas, la media, la mediana y la moda coinciden.



**Figura 3-1** Posiciones relativas de la media, la mediana y la moda en curvas de frecuencias sesgadas a la derecha.



**Figura 3-2** Posiciones relativas de la media, la mediana y la moda en curvas de frecuencias sesgadas a la izquierda.

## LA MEDIA GEOMÉTRICA $G$

La media geométrica  $G$  de  $N$  números positivos  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$  es la raíz  $n$ -ésima del producto de los números:

$$G = \sqrt[N]{X_1 X_2 X_3 \cdots X_N} \quad (11)$$

**EJEMPLO 13** La media geométrica de los números 2, 4 y 8 es  $G = \sqrt[3]{(2)(4)(8)} = \sqrt[3]{64} = 4$ .

$G$  se puede calcular empleando logaritmos (ver problema 3.35) o usando una calculadora. Para la media geométrica de datos agrupados, ver los problemas 3.36 y 3.91.

## LA MEDIA ARMÓNICA $H$

La media armónica  $H$  de un conjunto de  $N$  números  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$  es el recíproco de la media aritmética de los recíprocos de los números:

$$H = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{X_j}} = \frac{N}{\sum \frac{1}{X_j}} \quad (12)$$

En la práctica es más fácil recordar que

$$\frac{1}{H} = \frac{\sum \frac{1}{X}}{N} = \frac{1}{N} \sum \frac{1}{X} \quad (13)$$

**EJEMPLO 14** La media armónica de los números 2, 4 y 8 es

$$H = \frac{3}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8}} = \frac{3}{\frac{7}{8}} = 3.43$$

Para la media armónica de datos agrupados ver los problemas 3.99 y 3.100.

## RELACIÓN ENTRE LAS MEDIAS ARITMÉTICA, GEOMÉTRICA Y ARMÓNICA

La media geométrica de un conjunto de números positivos  $X_1, X_2, \dots, X_N$  es menor o igual que su media aritmética, pero mayor o igual que su media armónica. En símbolos,

$$H \leq G \leq \bar{X} \quad (14)$$

La igualdad es válida sólo cuando todos los números  $X_1, X_2, \dots, X_N$  son idénticos.

**EJEMPLO 15** La media aritmética de los números 2, 4 y 8 es 4.67, su media geométrica es 4 y su media armónica es 3.43.

## LA RAÍZ CUADRADA MEDIA

La raíz cuadrada media (RCM) o *media cuadrática* de un conjunto de números  $X_1, X_2, \dots, X_N$  suele denominarse  $\sqrt{\bar{X}^2}$  y se define

$$\text{RCM} = \sqrt{\bar{X}^2} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N X_j^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum X^2}{N}} \quad (15)$$

Este tipo de promedio suele usarse en aplicaciones físicas.

**EJEMPLO 16** La raíz cuadrada media del conjunto 1, 3, 4, 5, y 7 es

$$\sqrt{\frac{1^2 + 3^2 + 4^2 + 5^2 + 7^2}{5}} = \sqrt{20} = 4.47$$

## CUARTILES, DECILES Y PERCENTILES

En un conjunto de datos en el que éstos se hallan ordenados de acuerdo con su magnitud, el valor de en medio (o la media aritmética de los dos valores de en medio), que divide al conjunto en dos partes iguales, es la mediana. Continuando con esta idea se puede pensar en aquellos valores que dividen al conjunto de datos en cuatro partes iguales. Estos valores, denotados  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  son el primero, segundo y tercer *cuartiles*, respectivamente; el valor  $Q_2$  coincide con la mediana.

De igual manera, los valores que dividen al conjunto en diez partes iguales son los *deciles* y se denotan  $D_1, D_2, \dots, D_9$ , y los valores que dividen al conjunto en 100 partes iguales son los percentiles y se les denota  $P_1, P_2, \dots, P_{99}$ . El quinto decil y el percentil 50 coinciden con la mediana. Los percentiles 25 y 75 coinciden con el primero y tercer cuartiles, respectivamente.

A los cuartiles, deciles, percentiles y otros valores obtenidos dividiendo al conjunto de datos en partes iguales se les llama en conjunto *cuantiles*. Para el cálculo de estos valores cuando se tienen datos agrupados ver los problemas 3.44 a 3.46.

**EJEMPLO 17** Utilizar EXCEL para hallar  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $D_9$  y  $P_{95}$ , en la muestra siguiente de puntuaciones.

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 88 | 45 | 53 | 86 | 33 | 86 | 85 | 30 | 89 | 53 | 41 | 96 | 56 | 38 | 62 |
| 71 | 51 | 86 | 68 | 29 | 28 | 47 | 33 | 37 | 25 | 36 | 33 | 94 | 73 | 46 |
| 42 | 34 | 79 | 72 | 88 | 99 | 82 | 62 | 57 | 42 | 28 | 55 | 67 | 62 | 60 |
| 96 | 61 | 57 | 75 | 93 | 34 | 75 | 53 | 32 | 28 | 73 | 51 | 69 | 91 | 35 |

Para encontrar el primer cuartil, ingrese los datos en los primeros 60 renglones de la columna A de la hoja de cálculo de EXCEL. Despues, dé el comando  $=\text{PERCENTILE}(\text{A1:A60},0.25)$ . EXCEL da el valor 37.75. Se encuentra que 15 de los 60 valores, o el 25%, son menores que 37.75. De igual manera  $=\text{PERCENTILE}(\text{A1:A60},0.5)$  da 57,  $=\text{PERCENTILE}(\text{A1:A60},0.75)$  da 76,  $=\text{PERCENTILE}(\text{A1:A60},0.9)$  da 89.2,  $=\text{PERCENTILE}(\text{A1:A60},0.95)$  da 94.1. EXCEL da los cuartiles, deciles y percentiles expresados como percentiles.

A continuación se describe un algoritmo que suele emplearse para hallar cuartiles, deciles y percentiles. Primero se ordenan los datos del ejemplo 17 de acuerdo con su magnitud; el resultado es:

Puntuaciones de examen

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 25 | 28 | 28 | 28 | 29 | 30 | 32 | 33 | 33 | 33 | 34 | 34 | 35 | 36 | 37 |
| 38 | 41 | 42 | 42 | 45 | 46 | 47 | 51 | 51 | 53 | 53 | 53 | 55 | 56 | 57 |
| 57 | 60 | 61 | 62 | 62 | 62 | 67 | 68 | 69 | 71 | 72 | 73 | 73 | 75 | 75 |
| 79 | 82 | 85 | 86 | 86 | 86 | 88 | 88 | 89 | 91 | 93 | 94 | 96 | 96 | 99 |

Supóngase que se quiere encontrar el primer cuartil (que es el percentil 25). Se calcula  $i = np/100 = 60(25)/100 = 15$ . Como 15 es un número entero, se saca el promedio de los datos en las posiciones 15 y 16 de los datos ordenados de menor a mayor. Es decir, se promedian 37 y 38 y se obtiene 37.5 como primer cuartil ( $Q_1 = 37.5$ ). Para hallar el percentil 93, se calcula  $np/100 = 60(93)/100$  y se obtiene 55.8. Como este número no es un entero, se redondea hacia arriba y se obtiene 56. El número que ocupa la posición 56 en los datos ordenados es 93 y  $P_{93} = 93$ . El comando de EXCEL  $=\text{PERCENTILE}(\text{A1:A60},0.93)$  da 92.74. Obsérvese que con EXCEL no se obtienen los mismos valores para los percentiles, pero sí valores cercanos. A medida que los conjuntos de datos son mayores, tienden a obtenerse los mismos valores.

## SOFTWARE Y MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL

Todos los paquetes de software utilizados en este libro dan las estadísticas descriptivas vistas en esta sección. A continuación se presentan los resultados que se obtienen con estos cinco paquetes empleando las puntuaciones de examen del ejemplo 17.

### EXCEL

Seleccionando la secuencia “Tools  $\Rightarrow$  Data Analysis  $\Rightarrow$  Descriptive Statistics”, se obtienen las medidas de tendencia central mediana, media y moda, así como varias medidas de dispersión.

|                          |          |
|--------------------------|----------|
| Media                    | 59.16667 |
| Error típico             | 2.867425 |
| Mediana                  | 57       |
| Moda                     | 28       |
| Desviación estándar      | 22.21098 |
| Varianza de la muestra   | 493.3277 |
| Curtosis                 | -1.24413 |
| Coeficiente de asimetría | 0.167175 |
| Rango                    | 74       |
| Mínimo                   | 25       |
| Máximo                   | 99       |
| Suma                     | 3 550    |
| Cuenta                   | 60       |

## MINITAB

Si se selecciona la secuencia “Stat ⇒ Basic Statistics ⇒ Display Descriptive Statistics”, como resultado se obtiene:

### Estadística descriptiva: calificación de examen

| Variable    | N  | N* | Media | SE media | Desv est | Mínimo | Q1    | Mediana | Q3    | Máxima |
|-------------|----|----|-------|----------|----------|--------|-------|---------|-------|--------|
| Punt examen | 60 | 0  | 59.17 | 2.87     | 22.21    | 25.00  | 37.25 | 57.00   | 78.00 | 99.00  |

## SPSS

Si se selecciona la secuencia “Analyze ⇒ Descriptive Statistics ⇒ Descriptives”, como resultado se obtiene:

### Estadística descriptiva

|                      | N  | Mínimo | Máximo | Media    | Desviación estándar |
|----------------------|----|--------|--------|----------|---------------------|
| Puntuación de examen | 60 | 25.00  | 99.00  | 59.16667 | 22.21098            |
| N válida             | 60 |        |        |          |                     |

## SAS

Si se selecciona la secuencia “Solutions ⇒ Análisis ⇒ Analyst” y los datos se leen como un archivo, seleccionando la secuencia “Statistics ⇒ Descriptive ⇒ Summary Statistics”, se obtiene como resultado:

```
The MEANS Procedure
Analysis Variable : Testscr

      Mean        Std Dev         N      Minimum      Maximum
fffff59.1666667 22.2109811 60 25.0000000 99.0000000
fffff
```

## STATISTIX

Si se selecciona la secuencia “Statistics ⇒ Summary Statistics ⇒ Descriptive Statistics” del paquete STATISTIX, como resultado se obtiene:

```
Statistix 8.0
Descriptive Staistics

      Testscore
N          60
Mean      59.167
SD        22.211
Minimum   25.000
1st Quartile 37.250
3rd Quartile 78.000
Maximum   99.000
```

## PROBLEMAS RESUELTOS

### SUMATORIA

**3.1** Escribir los términos de cada una de las sumas siguientes:

$$\begin{array}{lll} a) \sum_{j=1}^6 X_j & c) \sum_{j=1}^N a & e) \sum_{j=1}^3 (X_j - a) \\ b) \sum_{j=1}^4 (Y_j - 3)^2 & d) \sum_{k=1}^5 f_k X_k & \end{array}$$

### SOLUCIÓN

- a)  $X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6$
- b)  $(Y_1 - 3)^2 + (Y_2 - 3)^2 + (Y_3 - 3)^2 + (Y_4 - 3)^2$
- c)  $a + a + a + \cdots + a = Na$
- d)  $f_1 X_1 + f_2 X_2 + f_3 X_3 + f_4 X_4 + f_5 X_5$
- e)  $(X_1 - a) + (X_2 - a) + (X_3 - a) = X_1 + X_2 + X_3 - 3a$

**3.2** Expresar cada una de las sumas siguientes empleado el símbolo de sumatoria.

$$\begin{array}{lll} a) X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + \cdots + X_{10}^2 & & \\ b) (X_1 + Y_1) + (X_2 + Y_2) + \cdots + (X_8 + Y_8) & & \\ c) f_1 X_1^3 + f_2 X_2^3 + \cdots + f_{20} X_{20}^3 & & \\ d) a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 + \cdots + a_N b_N & & \\ e) f_1 X_1 Y_1 + f_2 X_2 Y_2 + f_3 X_3 Y_3 + f_4 X_4 Y_4 & & \end{array}$$

### SOLUCIÓN

$$\begin{array}{lll} a) \sum_{j=1}^{10} X_j^2 & c) \sum_{j=1}^{20} f_j X_j^3 & e) \sum_{j=1}^4 f_j X_j Y_j \\ b) \sum_{j=1}^8 (X_j + Y_j) & d) \sum_{j=1}^N a_j b_j & \end{array}$$

**3.3** Probar que  $\sum_{j=1}^N (aX_j + bY_j - cZ_j) = a \sum_{j=1}^N X_j + b \sum_{j=1}^N Y_j - c \sum_{j=1}^N Z_j$ , donde  $a, b$  y  $c$  son constantes.

### SOLUCIÓN

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N (aX_j + bY_j - cZ_j) &= (aX_1 + bY_1 - cZ_1) + (aX_2 + bY_2 - cZ_2) + \cdots + (aX_N + bY_N - cZ_N) \\ &= (aX_1 + aX_2 + \cdots + aX_N) + (bY_1 + bY_2 + \cdots + bY_N) - (cZ_1 + cZ_2 + \cdots + cZ_N) \\ &= a(X_1 + X_2 + \cdots + X_N) + b(Y_1 + Y_2 + \cdots + Y_N) - c(Z_1 + Z_2 + \cdots + Z_N) \\ &= a \sum_{j=1}^N X_j + b \sum_{j=1}^N Y_j - c \sum_{j=1}^N Z_j \end{aligned}$$

o brevemente,  $\sum (aX + bY - cZ) = a \sum X + b \sum Y - c \sum Z$ .

- 3.4** Dos variables,  $X$  y  $Y$  toman los valores  $X_1 = 2$ ,  $X_2 = -5$ ,  $X_3 = 4$ ,  $X_4 = -8$  y  $Y_1 = -3$ ,  $Y_2 = -8$ ,  $Y_3 = 10$ ,  $Y_4 = 6$ , respectivamente. Calcular *a)*  $\sum X$ , *b)*  $\sum Y$ , *c)*  $\sum XY$ , *d)*  $\sum X^2$ , *e)*  $\sum Y^2$ , *f)*  $(\sum X)(\sum Y)$ , *g)*  $\sum XY^2$  y *h)*  $\sum(X + Y)(X - Y)$ .

### SOLUCIÓN

Obsérvese que en todos los casos se ha omitido en  $X$  y  $Y$  el subíndice  $j$  y que la  $\sum$  se entiende como  $\sum_{j=1}^4$ . Por lo tanto, por ejemplo  $\sum X$  es abreviación de  $\sum_{j=1}^4 X_j$ .

- a)*  $\sum X = (2) + (-5) + (4) + (-8) = 2 - 5 + 4 - 8 = -7$
- b)*  $\sum Y = (-3) + (-8) + (10) + (6) = -3 - 8 + 10 + 6 = 5$
- c)*  $\sum XY = (2)(-3) + (-5)(-8) + (4)(10) + (-8)(6) = -6 + 40 + 40 - 48 = 26$
- d)*  $\sum X^2 = (2)^2 + (-5)^2 + (4)^2 + (-8)^2 = 4 + 25 + 16 + 64 = 109$
- e)*  $\sum Y^2 = (-3)^2 + (-8)^2 + (10)^2 + (6)^2 = 9 + 64 + 100 + 36 = 209$
- f)*  $(\sum X)(\sum Y) = (-7)(5) = -35$ , de acuerdo con los incisos *a)* y *b)*. Obsérvese que  $(\sum X)(\sum Y) \neq \sum XY$ .
- g)*  $\sum XY^2 = (2)(-3)^2 + (-5)(-8)^2 + (4)(10)^2 + (-8)(6)^2 = -190$
- h)*  $\sum(X + Y)(X - Y) = \sum(X^2 - Y^2) = \sum X^2 - \sum Y^2 = 109 - 209 = -100$ , de acuerdo con los incisos *d)* y *e)*.

- 3.5** En una nota de *USA Today* se informa que el promedio de impuestos, per cápita, recolectados en 2005, en todo Estados Unidos, fue de \$2 189.84. Esta cantidad se desglosa así: ventas e ingresos, \$1051.42; ingreso, \$875.23; licencias, \$144.33; otros, \$80.49, y propiedades, \$38.36. Usando EXCEL, demostrar que la suma es igual a \$2 189.84.

### SOLUCIÓN

Obsérvese que la expresión `=sum(A1:A5)` es equivalente a  $\sum_{j=1}^5 X_j$ .

|          |                          |
|----------|--------------------------|
| 1 051.42 | ventas e ingresos        |
| 875.23   | ingreso                  |
| 144.33   | licencias                |
| 80.49    | otros                    |
| 38.36    | propiedades              |
| 2 189.83 | <code>=sum(A1:A5)</code> |

## LA MEDIA ARITMÉTICA

- 3.6** Las calificaciones de un estudiante en seis exámenes fueron 84, 91, 72, 68, 87 y 78. Hallar la media aritmética de estas calificaciones.

### SOLUCIÓN

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} = \frac{84 + 91 + 72 + 68 + 87 + 78}{6} = \frac{480}{6} = 80$$

El término *promedio* suele emplearse como sinónimo de *media aritmética*. Sin embargo, estrictamente hablando, esto no es correcto, ya que además de la media hay otros promedios.

- 3.7** Un científico mide diez veces el diámetro de un cilindro y obtiene los valores 3.88, 4.09, 3.92, 3.97, 4.02, 3.95, 4.03, 3.92, 3.98 y 4.06 centímetros (cm). Hallar la media aritmética de estas mediciones.

**SOLUCIÓN**

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} = \frac{3.88 + 4.09 + 3.92 + 3.97 + 4.02 + 3.95 + 4.03 + 3.92 + 3.98 + 4.06}{10} = \frac{39.82}{10} = 3.98 \text{ cm}$$

- 3.8** En el siguiente resultado obtenido con MINITAB se muestra la cantidad de tiempo por semana que 30 personas estuvieron empleando en Internet, así como la media de estas cantidades. ¿Podría decirse que este promedio es típico de las 30 cantidades?

MTB > print cl

**Muestra de datos**

tiempo

|   |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 3 | 4  | 4  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 6  |
| 6 | 6  | 6  | 7  | 7  | 7  | 7  | 8  | 8  |
| 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 12 | 55 | 60 |

MTB > mean cl

**Media de la columna**

Mean of time = 10.400

**SOLUCIÓN**

Esta media de 10.4 horas no es típica de estas cantidades. Obsérvese que 21 de estas cantidades son de un solo dígito y que la media es 10.4 horas. Una gran desventaja de la media es que es fuertemente afectada por valores atípicos (o valores extremos.)

- 3.9** Encontrar la media aritmética de los números 5, 3, 6, 5, 4, 5, 2, 8, 6, 5, 4, 8, 3, 4, 5, 4, 8, 2, 5 y 4.

**SOLUCIÓN****Primer método**

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} = \frac{5 + 3 + 6 + 5 + 4 + 5 + 2 + 8 + 6 + 5 + 4 + 8 + 3 + 4 + 5 + 4 + 8 + 2 + 5 + 4}{20} = \frac{96}{20} = 4.8$$

**Segundo método**

Hay las siguientes cantidades: seis 5, dos 3, dos 6, cinco 4, dos 2 y tres 8. Por lo tanto

$$\bar{X} = \frac{\sum fX}{\sum f} = \frac{\sum fX}{N} = \frac{(6)(5) + (2)(3) + (2)(6) + (5)(4) + (2)(2) + (3)(8)}{6 + 2 + 2 + 5 + 2 + 3} = \frac{96}{20} = 4.8$$

- 3.10** De 100 números, 20 fueron 4, 40 fueron 5, 30 fueron 6 y los restantes fueron 7. Encuéntrese la media aritmética de estos números.

**SOLUCIÓN**

$$\bar{X} = \frac{\sum fX}{\sum f} = \frac{\sum fX}{N} = \frac{(20)(4) + (40)(5) + (30)(6) + (10)(7)}{100} = \frac{530}{100} = 5.30$$

- 3.11** Las calificaciones finales de un estudiante en matemáticas, física, inglés e higiene son, respectivamente, 82, 86, 90 y 70. Si los créditos en cada uno de estos cursos son 3, 5, 3 y 1, determinar la correspondiente calificación promedio.

**SOLUCIÓN**

Se emplea la media aritmética ponderada, en donde los pesos que corresponden a cada puntuación son los créditos que les corresponden. Así,

$$\bar{X} = \frac{\sum wX}{\sum w} = \frac{(3)(82) + (5)(86) + (3)(90) + (1)(70)}{3 + 5 + 3 + 1} = 85$$

- 3.12** En una empresa en la que hay 80 empleados, 60 ganan \$10.00 por hora y 20 ganan \$13.00 por hora.

- a) Determinar el sueldo medio por hora.
- b) En el inciso a), ¿se obtiene la misma respuesta si los 60 empleados tienen un salario promedio de \$10.00 por hora? Probar la respuesta.
- c) ¿Se considera que este salario medio por hora es representativo?

**SOLUCIÓN**

a)

$$\bar{X} = \frac{\sum fX}{N} = \frac{(60)(\$10.00) + (20)(\$13.00)}{60 + 20} = \$10.75$$

- b) Sí, el resultado es el mismo. Para probar esto supóngase que la media de  $f_1$  números es  $m_1$  y que la media de  $f_2$  números es  $m_2$ . Hay que demostrar que la media de todos estos números es

$$\bar{X} = \frac{f_1 m_1 + f_2 m_2}{f_1 + f_2}$$

Sea  $M_1$  la suma de los  $f_1$  números y  $M_2$  la suma de los  $f_2$  números. Entonces, por definición de media aritmética,

$$m_1 = \frac{M_1}{f_1} \quad \text{y} \quad m_2 = \frac{M_2}{f_2}$$

o  $M_1 = f_1 m_1$  y  $M_2 = f_2 m_2$ . Como todos los  $(f_1 + f_2)$  números suman  $(M_1 + M_2)$ , la media aritmética de todos estos números es

$$\bar{X} = \frac{M_1 + M_2}{f_1 + f_2} = \frac{f_1 m_1 + f_2 m_2}{f_1 + f_2}$$

como se deseaba. Este resultado se puede ampliar fácilmente.

- c) Se puede decir que \$10.75 es un salario “representativo” por hora en el sentido de que la mayor parte de los empleados gana \$10.00 por hora, lo que no se aleja mucho de \$10.75 por hora. Se debe recordar que siempre que se resuman datos numéricos en un solo dato (como en un promedio) es posible que se cometa algún error. Sin embargo, el resultado desorienta tanto como en el problema 3.8

En realidad, para tener una mejor idea se debe dar una estimación de la “dispersión” o “variación” de los datos con respecto a la media. A esto se le llama *dispersión* de los datos. En el capítulo 4 se dan varias medidas de dispersión.

- 3.13** Los pesos medio de cuatro grupos de estudiantes que constan de 15, 20, 10 y 18 individuos son 162, 148, 153 y 140 libras, respectivamente. Encuentre el peso medio de todos los estudiantes.

**SOLUCIÓN**

$$\bar{X} = \frac{\sum fX}{\sum f} = \frac{(15)(162) + (20)(148) + (10)(153) + (18)(140)}{15 + 20 + 10 + 18} = 150 \text{ lb}$$

- 3.14** El ingreso medio anual de trabajadores agrícolas y no agrícolas es \$25 000 y \$35 000, respectivamente; ¿el ingreso medio anual de los dos grupos será \$30 000?

**SOLUCIÓN**

Sería \$30 000 únicamente si la cantidad de trabajadores agrícolas y no agrícolas fuese la misma. Para determinar el verdadero ingreso medio anual se necesita saber cuál es la cantidad relativa de trabajadores en cada grupo. Supóngase que 10% de los trabajadores son trabajadores agrícolas. En ese caso la media será  $(0.10)(25\ 000) + (0.90)(35\ 000) = \$34\ 000$ . Si la cantidad de trabajadores de ambos tipos es la misma, la media será  $(0.50)(25\ 000) + (0.50)(35\ 000) = \$30\ 000$ .

- 3.15** Usando la distribución de frecuencias de las estaturas que se presenta en la tabla 2.1, hallar la estatura media de los 100 estudiantes de la universidad XYZ.

**SOLUCIÓN**

En la tabla 3.1 se presentan los datos organizados para hacer los cálculos. Obsérvese que como estatura de los estudiantes que miden de 60 a 62 pulgadas (in), de 63 a 65 in, etc., se toman 61 in, 64 in, etc., respectivamente. Entonces, el problema se reduce a encontrar la estatura media de 100 estudiantes si 5 tienen una estatura de 61 in, 18 tienen una estatura de 64 in, etcétera.

Estos cálculos pueden resultar tediosos, en especial en los casos en que los números son grandes y se tienen muchas clases. Existen técnicas abreviadas para reducir el trabajo; ver los problemas 3.20 y 3.22.

**Tabla 3.1**

| Estatura (in) | Marcas de clase (X) | Frecuencias (f) | fX                 |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|
| 60-62         | 61                  | 5               | 305                |
| 63-65         | 64                  | 18              | 1 152              |
| 66-68         | 67                  | 42              | 2 814              |
| 69-71         | 70                  | 27              | 1 890              |
| 72-74         | 73                  | 8               | 584                |
|               |                     |                 | $N = \sum f = 100$ |
|               |                     |                 | $\sum fX = 6\ 745$ |

$$\bar{X} = \frac{\sum fX}{\sum f} = \frac{\sum fX}{N} = \frac{6\ 745}{100} = 67.45 \text{ in}$$

**PROPIEDADES DE LA MEDIA ARITMÉTICA**

- 3.16** Probar que la suma de las desviaciones de  $X_1, X_2, \dots, X_N$  respecto a su media  $\bar{X}$  es igual a cero.

**SOLUCIÓN**

Sean  $d_1 = X_1 - \bar{X}, d_2 = X_2 - \bar{X}, \dots, d_N = X_N - \bar{X}$  las desviaciones de  $X_1, X_2, \dots, X_N$  de su media,  $\bar{X}$ . Entonces

$$\begin{aligned} \text{La suma de las desviaciones} &= \sum d_j = \sum (X_j - \bar{X}) = \sum X_j - N\bar{X} \\ &= \sum X_j - N\left(\frac{\sum X_j}{N}\right) = \sum X_j - \sum X_j = 0 \end{aligned}$$

donde se usa  $\sum$  en vez de  $\sum_{j=1}^N$ . Si se desea, también se puede omitir el subíndice  $j$  de  $X_j$  siempre que éste se *sobreentienda*.

- 3.17** Si  $Z_1 = X_1 + Y_1, Z_2 = X_2 + Y_2, \dots, Z_N = X_N + Y_N$ , probar que  $\bar{Z} = \bar{X} + \bar{Y}$ .

**SOLUCIÓN**

Por definición

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} \quad \bar{Y} = \frac{\sum Y}{N} \quad \bar{Z} = \frac{\sum Z}{N}$$

$$\text{Por lo tanto } \bar{Z} = \frac{\sum Z}{N} = \frac{\sum (X + Y)}{N} = \frac{\sum X + \sum Y}{N} = \frac{\sum X}{N} + \frac{\sum Y}{N} = \bar{X} + \bar{Y}$$

en donde los subíndices de  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  se han omitido y donde  $\sum$  significa  $\sum_{j=1}^N$ .

- 3.18** a) Si las desviaciones de  $N$  números  $X_1, X_2, \dots, X_N$  de un número cualquiera  $A$  están dadas por  $d_1 = X_1 - A$ ,  $d_2 = X_2 - A, \dots, d_N = X_N - A$ , respectivamente, probar que

$$\bar{X} = A + \frac{\sum_{j=1}^N d_j}{N} = A + \frac{\sum d}{N}$$

- b) En caso de que  $X_1, X_2, \dots, X_K$  tengas frecuencias respectivas  $f_1, f_2, \dots, f_K$  y que  $d_1 = X_1 - A, \dots, d_K = X_K - A$  demostrar que en lugar del resultado del inciso a) se tiene

$$\bar{X} = A + \frac{\sum_{j=1}^K f_j d_j}{\sum_{j=1}^K f_j} = A + \frac{\sum f d}{N} \quad \text{donde} \quad \sum_{j=1}^K f_j = \sum f = N$$

### SOLUCIÓN

- a) **Primer método**

Ya que  $d_j = X_j - A$  y que  $X_j = A + d_j$ , se tiene

$$\bar{X} = \frac{\sum X_j}{N} = \frac{\sum (A + d_j)}{N} = \frac{\sum A + \sum d_j}{N} = \frac{NA + \sum d_j}{N} = A + \frac{\sum d_j}{N}$$

donde se usa  $\sum$  en lugar de  $\sum_{j=1}^N$  para abreviar.

#### Segundo método

Se tiene  $d = X - A$  o bien  $X = A + d$ , omitiendo los subíndices de  $d$  y  $X$ . Por lo tanto, de acuerdo con el problema 3.17,

$$\bar{X} = \bar{A} + \bar{d} = A + \frac{\sum d}{N}$$

ya que la media de cualquier cantidad de constantes todas iguales a  $A$  es  $A$ .

$$\begin{aligned} b) \quad \bar{X} &= \frac{\sum_{j=1}^K f_j X_j}{\sum_{j=1}^K f_j} = \frac{\sum f_j X_j}{N} = \frac{\sum f_j (A + d_j)}{N} = \frac{\sum Af_j + \sum f_j d_j}{N} = \frac{A \sum f_j + \sum f_j d_j}{N} \\ &= \frac{AN + \sum f_j d_j}{N} = A + \frac{\sum f_j d_j}{N} = A + \frac{\sum f d}{N} \end{aligned}$$

Obsérvese que *formalmente* este resultado se obtiene del inciso a) sustituyendo  $d_j$  por  $f_j d_j$  y sumando desde  $j = 1$  hasta  $K$  en lugar de desde  $j = 1$  hasta  $N$ . El resultado es equivalente a  $\bar{X} = \bar{A} + \bar{d}$ , donde  $\bar{d} = (\sum f d)/N$ .

### CÁLCULO DE LA MEDIA ARITMÉTICA A PARTIR DE DATOS AGRUPADOS

- 3.19** Emplee el método del problema 3.18a) para hallar la media aritmética de los números 5, 8, 11, 9, 12, 6, 14 y 10, eligiendo como “media supuesta”  $A$  los valores a) 9 y b) 20.

**SOLUCIÓN**

- a) Las desviaciones de los números dados respecto al 9 son  $-4, -1, 2, 0, 3, -3, 5$  y  $1$ , y la suma de las desviaciones es  $\sum d = -4 - 1 + 2 + 0 + 3 - 3 + 5 + 1 = 3$ . Por lo tanto

$$\bar{X} = A + \frac{\sum d}{N} = 9 + \frac{3}{8} = 9.375$$

- b) Las desviaciones de los números dados, respecto al 20, son  $-15, -12, -9, -11, -8, -14, -6$  y  $-10$  y  $\sum d = -85$ . Por lo tanto,

$$\bar{X} = A + \frac{\sum d}{N} = 20 + \frac{(-85)}{8} = 9.375$$

- 3.20** Emplee el método del problema 3.18b) para hallar la media aritmética de las estaturas de 100 estudiantes de la universidad XYZ (ver problema 3.15).

**SOLUCIÓN**

Para facilitar los cálculos pueden organizarse los datos como en la tabla 3.2. Como media supuesta  $A$  se toma la marca de clase 67 (que corresponde a la clase con mayor frecuencia), aunque para  $A$  se puede tomar cualquier marca de clase. Obsérvese que de esta manera los cálculos son más sencillos que en el problema 3.15. Para simplificar aún más el trabajo, se puede proceder como en el problema 3.22, donde se hace uso de que todas las desviaciones (columna 2 de la tabla 3.2) son múltiplos enteros de la amplitud del intervalo de clase.

**Tabla 3.2**

| Marcas de clase ( $X$ ) | Desviación<br>$d = X - A$ | Frecuencias ( $f$ ) | $fd$           |
|-------------------------|---------------------------|---------------------|----------------|
| 61                      | -6                        | 5                   | -30            |
| 64                      | -3                        | 18                  | -54            |
| $A \rightarrow 67$      | 0                         | 42                  | 0              |
| 70                      | 3                         | 27                  | 81             |
| 73                      | 6                         | 8                   | 48             |
|                         |                           | $N = \sum f = 100$  | $\sum fd = 45$ |

$$\bar{X} = A + \frac{\sum fd}{N} = 67 + \frac{45}{100} = 67.45 \text{ in}$$

- 3.21** Con  $d_j = X_j - A$  se denotan las desviaciones de las marcas de clase  $X_j$ , de una distribución de frecuencias, respecto a una marca de clase dada  $A$ . Mostrar que si todos los intervalos de clase son de una misma amplitud  $c$ , entonces: a) todas las desviaciones son múltiplos de  $c$  (es decir,  $d_j = cu_j$  donde  $u_j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) y b) que la media aritmética se puede calcular empleando la fórmula

$$\bar{X} = A + \left( \frac{\sum fu}{N} \right) c$$

**SOLUCIÓN**

- a) Lo pedido queda ilustrado en la tabla 3.2 del problema 3.20, donde en la columna 2 se observa que todas las desviaciones son múltiplos de la amplitud del intervalo de clase  $c = 3$  in.

Para ver que esto es válido en general, obsérvese que si  $X_1, X_2, X_3, \dots$  son marcas de clase sucesivas, la diferencia entre ellas será igual a  $c$ , de manera que  $X_2 = X_1 + c$ ,  $X_3 = X_1 + 2c$ , y en general,  $X_j = X_1 + (j - 1)c$ . Entonces, la diferencia entre cualesquiera dos marcas de clase, por ejemplo,  $X_p$  y  $X_q$ , será

$$X_p - X_q = [X_1 + (p - 1)c] - [X_1 + (q - 1)c] = (p - q)c$$

que es un múltiplo de  $c$ .

- b) De acuerdo con el inciso *a*), las desviaciones de todas las marcas de clase respecto a una marca de clase dada son múltiplos de  $c$  (es decir,  $d_j = cu_j$ ). Entonces, usando el problema 3.18*b*), se tiene

$$\bar{X} = A + \frac{\sum f_j d_j}{N} = A + \frac{\sum f_j (cu_j)}{N} = A + c \frac{\sum f_j u_j}{N} = A + \left( \frac{\sum f_j u_j}{N} \right) c$$

Obsérvese que esto es equivalente a  $\bar{X} = A + c\bar{u}$ , lo que se obtiene de  $\bar{X} = A + \bar{d}$  sustituyendo  $d = cu$  y observando que  $\bar{d} = c\bar{u}$  (ver problema 3.18).

- 3.22** Emplee los resultados del problema 3.21*b*) para hallar la estatura media de los 100 estudiantes de la universidad XYZ (ver problema 3.20).

### SOLUCIÓN

Para facilitar los cálculos pueden organizarse los datos como en la tabla 3.3. A este método de le llama *método de compilación* y se recomienda usarlo siempre que sea posible.

Tabla 3.3

| $X$    | $u$ | $f$       | $fu$           |
|--------|-----|-----------|----------------|
| 61     | -2  | 5         | -10            |
| 64     | -2  | 18        | -36            |
| A → 67 | 0   | 42        | 0              |
| 70     | 1   | 27        | 27             |
| 73     | 2   | 8         | 16             |
|        |     | $N = 100$ | $\sum fu = 15$ |

$$\bar{X} = A + \left( \frac{\sum fu}{N} \right) c = 67 + \left( \frac{15}{100} \right) (3) = 67.45 \text{ in}$$

- 3.23** Calcule el salario medio semanal de los 65 empleados de la empresa P&R a partir de la distribución de frecuencias de la tabla 2.5, empleando: *a*) el método largo y *b*) el método codificado.

### SOLUCIÓN

En las tablas 3.4 y 3.5 se dan las soluciones de *a*) y *b*), respectivamente.

Tabla 3.4

| $X$      | $f$      | $fX$                    |
|----------|----------|-------------------------|
| \$255.00 | 8        | \$2 040.00              |
| 265.00   | 10       | 2 650.00                |
| 275.00   | 16       | 4 400.00                |
| 285.00   | 14       | 3 990.00                |
| 295.00   | 10       | 2 950.00                |
| 305.00   | 5        | 1 525.00                |
| 315.00   | 2        | 630.00                  |
|          | $N = 65$ | $\sum fX = \$18 185.00$ |

Tabla 3.5

| $X$        | $u$ | $f$      | $fX$           |
|------------|-----|----------|----------------|
| \$255.00   | -2  | 8        | -16            |
| 265.00     | -1  | 10       | -10            |
| A → 275.00 | 0   | 16       | 0              |
| 285.00     | 1   | 14       | 14             |
| 295.00     | 2   | 10       | 20             |
| 305.00     | 3   | 5        | 15             |
| 315.00     | 4   | 2        | 8              |
|            |     | $N = 65$ | $\sum fu = 31$ |

Puede suponerse que estas tablas introducen un error, ya que en realidad las marcas de clase son \$254.995, \$264.995, etc., y no \$255.00, \$265.00, etc. Sin embargo, con las marcas de clase de la tabla 3.4,  $\bar{X}$  resulta ser \$279.76 en lugar de \$279.77, lo que es una diferencia despreciable.

$$\bar{X} = \frac{\sum fX}{N} = \frac{\$18\,185.00}{65} = \$279.77 \quad \bar{X} = A + \left( \frac{\sum fu}{N} \right) c = \$275.00 + \frac{31}{65} (\$10.00) = \$279.77$$

- 3.24** Empleando la tabla 2.9d), hallar el salario medio de los 70 empleados de la empresa P&R.

### SOLUCIÓN

En este caso, los intervalos de clase no son todos de la misma amplitud, por lo que se tiene que usar el método largo, como se muestra en la tabla 3.6

Tabla 3.6

| X        | u      | fX                       |
|----------|--------|--------------------------|
| \$255.00 | 8      | \$2 040.00               |
| 265.00   | 10     | 2 650.00                 |
| 275.00   | 16     | 4 400.00                 |
| 285.00   | 15     | 4 275.00                 |
| 295.00   | 10     | 2 950.00                 |
| 310.00   | 8      | 2 480.00                 |
| 350.00   | 3      | 1 050.00                 |
|          | N = 70 | $\sum fX = \$19\,845.00$ |

$$\bar{X} = \frac{\sum fX}{N} = \frac{\$19\,845.00}{70} = \$283.50$$

### LA MEDIANA

- 3.25** En los resultados de MINITAB, a continuación, se presenta el tiempo, por semana, que 30 usuarios de Internet pasaron haciendo búsquedas, así como la mediana de estos 30 tiempos. Verificar la mediana. ¿Se considera que este promedio es típico (representativo) de estos 30 tiempos? Compárense los resultados con los hallados en el problema 3.8.

```
MTB > print cl
Muestra de datos
tiempo
3   4   4   5   5   5   5   5   5   6
6   6   6   7   7   7   7   7   8   8
9  10  10  10  10  10  10  12  55  60
MTB > median cl
Mediana de columna
Median of time = 7.0000
```

### SOLUCIÓN

Obsérvese que los dos valores de en medio son 7 y que la media de estos dos valores de en medio es 7. En el problema 3.8 se encontró que la media es 10.4 horas. La mediana es más típica (representativa) de estos tiempos que la media.

- 3.26** En los cajeros automáticos de cinco lugares de una ciudad grande, se registró la cantidad de transacciones por día. Los datos fueron 35, 49, 225, 50, 30, 65, 40, 55, 52, 76, 48, 325, 47, 32 y 60. Encontrar: *a)* la cantidad mediana de transacciones y *b)* la cantidad media de transacciones.

### SOLUCIÓN

- a)* Los datos ordenados de menor a mayor son 30, 32, 35, 40, 47, 48, 49, 50, 52, 55, 60, 65, 76, 225 y 325. Como la cantidad de datos es un número non, sólo hay un valor de enmedio, 50, que es la mediana buscada.  
*b)* La suma de los 15 valores es 1 189. La media es  $1\,189/15 = 79.257$ .

Obsérvese que a la mediana no le afectan los dos valores extremos 225 y 325, en tanto que a la media sí. En este caso, la mediana es un mejor indicador de la cantidad promedio de transacciones diarias en los cajeros automáticos.

- 3.27** Si en una ordenación se tienen: *a)* 85 y *b)* 150 números, ¿cómo se encuentra la mediana de estos números?

### SOLUCIÓN

- a)* Como 85 es un número non, sólo hay un valor de en medio, habiendo 42 números mayores que él y 42 números menores que él. Por lo tanto, la mediana es el número que ocupa la posición 43 de la ordenación.  
*b)* Como 150 es un número par, hay dos valores de en medio con 74 números menores que ellos y 74 números mayores que ellos. Los dos números de en medio son los números en las posiciones 75 y 76 de la ordenación; su media aritmética es la mediana buscada.

- 3.28** A partir de los datos del problema 2.8, encontrar el peso mediano de los 40 estudiantes de la universidad estatal empleando: *a)* la distribución de frecuencias dada en la tabla 2.7 (reproducida aquí como tabla 3.7) y *b)* los datos originales.

### SOLUCIÓN

- a)* **Primer método** (empleando la interpolación)

Se supone que los pesos de la tabla 3.7 están distribuidos de manera continua. En ese caso, la mediana es un peso tal que la mitad del total de las frecuencias ( $40/2 = 20$ ) quede por encima de él y la mitad del total de las frecuencias quede por debajo de él.

Tabla 3.7

| Peso (lb) | Frecuencias |
|-----------|-------------|
| 118-126   | 3           |
| 127-135   | 5           |
| 136-144   | 9           |
| 145-153   | 12          |
| 154-162   | 5           |
| 163-171   | 4           |
| 172-180   | 2           |
| Total 40  |             |

La suma de las tres primeras frecuencias de clase es  $3 + 5 + 9 = 17$ . Por lo tanto, para dar la frecuencia 20, que es la buscada, se necesitan tres más de los 12 casos que pertenecen a la cuarta clase. Como el cuarto intervalo de clase, 145-153,

en realidad corresponde a los pesos desde 144.5 hasta 153.5, la mediana debe encontrarse a  $3/12$  entre 144.5 y 153.5, es decir, la mediana es

$$144.5 + \frac{3}{12}(153.5 - 144.5) = 144.5 + \frac{3}{12}(9) = 146.8 \text{ lb}$$

#### Segundo método (empleando la fórmula)

Como las sumas de las primeras tres clases y de las primeras cuatro clases son, respectivamente,  $3 + 5 + 9 = 17$  y  $3 + 5 + 9 + 12 = 29$ , la mediana se encuentra en la cuarta clase, que es, por lo tanto, la clase mediana. Entonces.

$$L_1 = \text{frontera inferior de clase de la clase mediana} = 144.5$$

$$N = \text{número de datos} = 40$$

$$(\sum f)_1 = \text{suma de las frecuencias de todas las clases anteriores a la clase mediana} = 3 + 5 + 9 = 17$$

$$f_{\text{mediana}} = \text{frecuencia de la clase mediana} = 12$$

$$c = \text{amplitud del intervalo de la clase mediana} = 9$$

y por lo tanto

$$\text{Mediana} = L_1 + \left( \frac{N/2 - (\sum f)_1}{f_{\text{mediana}}} \right) c = 144.5 + \left( \frac{40/2 - 17}{12} \right) (9) = 146.8 \text{ lb}$$

- b) Dispuestos en una ordenación, los pesos originales son

119, 125, 126, 128, 132, 135, 135, 135, 136, 138, 138, 140, 140, 142, 142, 144, 144, 145, 145, 146  
146, 147, 147, 147, 148, 149, 150, 150, 152, 153, 154, 156, 157, 158, 161, 163, 164, 165, 168, 173, 176

La mediana es la media aritmética de los pesos en las posiciones 20 y 21 de esta ordenación y es igual a 146 lb.

- 3.29** En la figura 3-3 se muestra una representación de tallo y hoja que proporciona el número de muertes en accidentes de tránsito en 2005 relacionados con el alcohol en los 50 estados y Washington, D.C.

#### Representación de tallo y hoja: Muertes

Representación de tallo y hoja: Muertes N = 51  
Leaf Unit = 10

|     |    |                |
|-----|----|----------------|
| 14  | 0  | 22334556667889 |
| 23  | 1  | 122255778      |
| (7) | 2  | 0334689        |
| 21  | 3  | 124679         |
| 15  | 4  | 22669          |
| 10  | 5  | 012448         |
| 4   | 6  | 3              |
| 3   | 7  |                |
| 3   | 8  |                |
| 3   | 9  |                |
| 3   | 10 |                |
| 3   | 11 |                |
| 3   | 12 |                |
| 3   | 13 |                |
| 3   | 14 | 7              |
| 2   | 15 | 6              |
| 1   | 16 |                |
| 1   | 17 | 1              |

**Figura 3-3** MINITAB, representación de tallo y hoja de las muertes en accidentes de tránsito relacionados con el alcohol.

Encontrar la media, la mediana y la moda de las muertes relacionadas con el alcohol dadas en la figura 3-3.

**SOLUCIÓN**

La cantidad de muertes va de 20 a 1 710. La distribución es bimodal. Las dos modas son 60 y 120. Ambas se presentan tres veces.

La clase (7) 2 0334689 es la clase mediana. Es decir, la mediana se encuentra en esta clase. La mediana es el dato de en medio o el dato que ocupa la posición 26 en la ordenación. El dato en la posición 24 es 200, el dato en la posición 25 es 230 y el dato en la posición 26 es 230. Por lo tanto, la mediana es 230.

La suma de estos 51 datos es 16 660 y la media es  $16\,660/51 = 326.67$ .

- 3.30** Encontrar el salario mediano de los 65 empleados de la empresa P&R (ver el problema 2.3).

**SOLUCIÓN**

En este caso,  $N = 65$  y  $N/2 = 32.5$ . Como la suma de las primeras dos y de las primeras tres frecuencias de clase son  $8 + 10 = 18$  y  $8 + 10 + 16 = 34$ , respectivamente, la clase mediana es la tercera clase. Usando la fórmula,

$$\text{Mediana} = L_1 + \left( \frac{N/2 - (\sum f)_1}{f_{\text{mediana}}} \right) c = \$269.995 + \left( \frac{32.5 - 18}{16} \right) (\$10.00) = \$279.06$$

**LA MODA**

- 3.31** Encontrar la media, la mediana y la moda de los conjuntos: a) 3, 5, 2, 6, 5, 9, 5, 2, 8, 6 y b) 51.6, 48.7, 50.3, 49.5, 48.9.

**SOLUCIÓN**

- a) En una ordenación, los números son 2, 2, 3, 5, 5, 5, 6, 6, 8 y 9.

$$\text{Media} = \frac{1}{10}(2 + 2 + 3 + 5 + 5 + 5 + 6 + 6 + 8 + 9) = 5.1$$

$$\text{Mediana} = \text{media aritmética de los dos valores de en medio} = \frac{1}{2}(5 + 5) = 5$$

$$\text{Moda} = \text{número que se presenta con mayor frecuencia} = 5$$

- b) En una ordenación, los números son 48.7, 48.9, 49.5 50.3 y 51.6.

$$\text{Media} = \frac{1}{5}(48.7 + 48.9 + 49.5 + 50.3 + 51.6) = 49.8$$

$$\text{Mediana} = \text{número de en medio} = 49.5$$

$$\text{Moda} = \text{número que se presenta con mayor frecuencia (no existe uno aquí)}$$

- 3.32** Supóngase que se desea hallar la moda de los datos de la figura 3-29. Se puede usar el procedimiento “frequencies” de SAS para obtener el resultado siguiente. Observando el resultado dado por el procedimiento FREQ (figura 3-4), ¿cuáles son las modas de la cantidad de muertes relacionadas con el alcohol?

| Procedimiento FREQ |             |            |                        |                        |
|--------------------|-------------|------------|------------------------|------------------------|
| Muertes            |             |            |                        |                        |
| Muertes            | Frecuencias | Porcentaje | Frecuencias acumuladas | Porcentajes acumulados |
| fffff              | fffff       | fffff      | fffff                  | fffff                  |
| 20                 | 2           | 3.92       | 2                      | 3.92                   |
| 30                 | 2           | 3.92       | 4                      | 7.84                   |
| 40                 | 1           | 1.96       | 5                      | 9.80                   |
| 50                 | 2           | 3.92       | 7                      | 13.73                  |
| 60                 | 3           | 5.88       | 10                     | 19.61                  |
| 70                 | 1           | 1.96       | 11                     | 21.57                  |
| 80                 | 2           | 3.92       | 13                     | 25.49                  |
| 90                 | 1           | 1.96       | 14                     | 27.45                  |
| 110                | 1           | 1.96       | 15                     | 29.41                  |
| 120                | 3           | 5.88       | 18                     | 35.29                  |
| 150                | 2           | 3.92       | 20                     | 39.22                  |
| 170                | 2           | 3.92       | 22                     | 43.14                  |
| 180                | 1           | 1.96       | 23                     | 45.10                  |
| 200                | 1           | 1.96       | 24                     | 47.06                  |
| 230                | 2           | 3.92       | 26                     | 50.98                  |
| 240                | 1           | 1.96       | 27                     | 52.94                  |
| 260                | 1           | 1.96       | 28                     | 54.90                  |
| 280                | 1           | 1.96       | 29                     | 56.86                  |
| 290                | 1           | 1.96       | 30                     | 58.82                  |
| 310                | 1           | 1.96       | 31                     | 60.78                  |
| 320                | 1           | 1.96       | 32                     | 62.75                  |
| 340                | 1           | 1.96       | 33                     | 64.71                  |
| 360                | 1           | 1.96       | 34                     | 66.67                  |
| 370                | 1           | 1.96       | 35                     | 68.63                  |
| 390                | 1           | 1.96       | 36                     | 70.59                  |
| 420                | 2           | 3.92       | 38                     | 74.51                  |
| 460                | 2           | 3.92       | 40                     | 78.43                  |
| 490                | 1           | 1.96       | 41                     | 80.39                  |
| 500                | 1           | 1.96       | 42                     | 82.35                  |
| 510                | 1           | 1.96       | 43                     | 84.31                  |
| 520                | 1           | 1.96       | 44                     | 86.27                  |
| 540                | 2           | 3.92       | 46                     | 90.20                  |
| 580                | 1           | 1.96       | 47                     | 92.16                  |
| 630                | 1           | 1.96       | 48                     | 94.12                  |
| 1470               | 1           | 1.96       | 49                     | 96.08                  |
| 1560               | 1           | 1.96       | 50                     | 98.04                  |
| 1710               | 1           | 1.96       | 51                     | 100.00                 |

Figura 3-4 SAS, resultados del procedimiento FREQ para la cantidad de decesos relacionados con el alcohol.

### SOLUCIÓN

Estos datos son bimodales y las modas son 60 y 120. Esto se encuentra al observar los resultados de SAS, donde se nota que la frecuencia, tanto de 60 como de 120, es 3, que es mayor que todas las demás frecuencias.

- 3.33** Algunos paquetes de software para estadística tienen rutinas para encontrar la moda, pero en los casos en los que los datos son multimodales, no dan todas las modas. En la figura 3-5 considerar el resultado que se obtiene con SPSS.

¿Qué hace SPSS cuando se le pide que encuentre las modas?

**Muertes**

|          | Frecuencias | Porcentaje | Porcentajes válidos | Porcentajes acumulados |
|----------|-------------|------------|---------------------|------------------------|
| Válido   |             |            |                     |                        |
| 20.00    | 2           | 3.9        | 3.9                 | 3.9                    |
| 30.00    | 2           | 3.9        | 3.9                 | 7.8                    |
| 40.00    | 1           | 2.0        | 2.0                 | 9.8                    |
| 50.00    | 2           | 3.9        | 3.9                 | 13.7                   |
| 60.00    | 3           | 5.9        | 5.9                 | 19.6                   |
| 70.00    | 1           | 2.0        | 2.0                 | 21.6                   |
| 80.00    | 2           | 3.9        | 3.9                 | 25.5                   |
| 90.00    | 1           | 2.0        | 2.0                 | 27.5                   |
| 110.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 29.4                   |
| 120.00   | 3           | 5.9        | 5.9                 | 35.3                   |
| 150.00   | 2           | 3.9        | 3.9                 | 39.2                   |
| 170.00   | 2           | 3.9        | 3.9                 | 43.1                   |
| 180.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 45.1                   |
| 200.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 47.1                   |
| 230.00   | 2           | 3.9        | 3.9                 | 51.0                   |
| 240.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 52.9                   |
| 260.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 54.9                   |
| 280.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 56.9                   |
| 290.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 58.8                   |
| 310.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 60.8                   |
| 320.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 62.7                   |
| 340.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 64.7                   |
| 360.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 66.7                   |
| 370.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 68.6                   |
| 390.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 70.6                   |
| 420.00   | 2           | 3.9        | 3.9                 | 74.5                   |
| 460.00   | 2           | 3.9        | 3.9                 | 78.4                   |
| 490.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 80.4                   |
| 500.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 82.4                   |
| 510.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 84.3                   |
| 520.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 86.3                   |
| 540.00   | 2           | 3.9        | 3.9                 | 90.2                   |
| 580.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 92.2                   |
| 630.00   | 1           | 2.0        | 2.0                 | 94.1                   |
| 1 470.00 | 1           | 2.0        | 2.0                 | 96.1                   |
| 1 560.00 | 1           | 2.0        | 2.0                 | 98.0                   |
| 1 710.00 | 1           | 2.0        | 2.0                 | 100.0                  |
| Total    | 51          | 100.0      | 100.0               |                        |

**Estadística****Muertes**

|      |            |                    |
|------|------------|--------------------|
| N    | Válido     | 51                 |
|      | Equivocado | 0                  |
| Moda |            | 60.00 <sup>a</sup> |

<sup>a</sup>Hay múltiples modas. Se muestra el valor más pequeño.

**Figura 3-5 SPSS, resultado para las muertes relacionadas con el alcohol.**

**SOLUCIÓN**

SPSS da la moda más pequeña. Pero se puede inspeccionar la distribución de frecuencias y hallar las modas de la misma manera que con SAS (ver el resultado dado antes).

**RELACIÓN EMPÍRICA ENTRE LA MEDIA, LA MEDIANA Y LA MODA**

- 3.34** a) Emplear la fórmula empírica media – moda = 3(media – mediana) para hallar el salario modal de los 65 empleados de la empresa P&R.  
 b) Comparar el resultado con la moda obtenida en el problema 3.33.

**SOLUCIÓN**

- a) De acuerdo con los problemas 3.23 y 3.30 se tiene media = \$279.77 y mediana = \$279.06. Por lo tanto,

$$\text{Moda} = \text{media} - 3(\text{media} - \text{mediana}) = \$279.77 - 3(\$279.77 - \$279.06) = \$277.64$$

- b) De acuerdo con el problema 3.33, el salario modal es \$277.50, de manera que en este caso coincide con el resultado empírico.

**LA MEDIA GEOMÉTRICA**

- 3.35** Encontrar: a) la media geométrica y b) la media aritmética de los números 3, 5, 6, 6, 7, 10 y 12. Se supone que los números son exactos.

**SOLUCIÓN**

- a) Media geométrica =  $G = \sqrt[7]{(3)(5)(6)(6)(7)(10)(12)} = \sqrt[7]{453\,600}$ . Empleando logaritmos comunes,  $\log G = \frac{1}{7} \log 453\,600 = \frac{1}{7}(5.6567) = 0.8081$  y  $G = 6.43$  (a la centésima más cercana). Otra posibilidad es usar una calculadora.

**Otro método**

$$\begin{aligned}\log G &= \frac{1}{7}(\log 3 + \log 5 + \log 6 + \log 6 + \log 7 + \log 10 + \log 12) \\ &= \frac{1}{7}(0.4771 + 0.6990 + 0.7782 + 0.7782 + 0.8451 + 1.0000 + 1.0792) \\ &= 0.8081\end{aligned}$$

$$\text{y} \quad G = 6.43$$

- b) Media aritmética =  $\hat{X} = \frac{1}{7}(3 + 5 + 6 + 6 + 7 + 10 + 12) = 7$ . Esto ilustra que la media geométrica de un conjunto de números positivos, no todos iguales, es menor que su media aritmética.

- 3.36** Los números  $X_1, X_2, \dots, X_K$  se presentan con frecuencias  $f_1, f_2, \dots, f_K$  donde  $f_1 + f_2 + \dots + f_K = N$  es la frecuencia total.

- a) Encontrar la media geométrica  $G$  de estos números.  
 b) Deducir una expresión para  $\log G$ .  
 c) ¿Cómo se pueden emplear los resultados para hallar la media geométrica de datos agrupados en una distribución de frecuencias?

**SOLUCIÓN**

a)

$$G = \sqrt[N]{\underbrace{X_1 X_1 \cdots X_1}_{f_1 \text{ veces}} \underbrace{X_2 X_2 \cdots X_2}_{f_2 \text{ veces}} \cdots \underbrace{X_K X_K \cdots X_K}_{f_K \text{ veces}}} = \sqrt[N]{X_1^{f_1} X_2^{f_2} \cdots X_K^{f_K}}$$

donde  $N = \sum f$ . A esta media suele llamársele *media geométrica ponderada*.

$$\begin{aligned}
 b) \quad \log G &= \frac{1}{N} \log (X_1^{f_1} X_2^{f_2} \cdots X_K^{f_K}) = \frac{1}{N} (f_1 \log X_1 + f_2 \log X_2 + \cdots + f_K \log X_K) \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^K f_j \log X_j = \frac{\sum f_j \log X_j}{N}
 \end{aligned}$$

donde se supone que todos los números son positivos; de otra manera, los logaritmos no están definidos.

Obsérvese que el logaritmo de una media geométrica de un conjunto de números positivos es la media aritmética de los logaritmos de los números.

- c) Al hallar la media geométrica de datos agrupados, este resultado puede emplearse tomando  $X_1, X_2, \dots, X_K$  como las marcas de clase y  $f_1, f_2, \dots, f_K$  como sus frecuencias correspondientes.
- 3.37** Durante un año la relación entre precios de un cuarto de galón de leche respecto a precios de una barra de pan fue 3.00, en tanto que al año siguiente la relación fue 2.00.
- a) Encontrar la media aritmética de esta relación en estos dos años.
  - b) Encontrar la media aritmética de las relaciones ahora entre los precios de una barra de pan respecto a los precios de un cuarto de galón de leche en este periodo de 2 años.
  - c) Analizar la conveniencia de emplear la media aritmética para promediar relaciones.
  - d) Analizar la idoneidad de la media geométrica para promediar relaciones.

### SOLUCIÓN

- a) Media de las relaciones (cocientes) precio de leche respecto a precios de pan =  $\frac{1}{2}(3.00 + 2.00) = 2.50$ .
- b) Como el primer año la relación entre precios de leche respecto a precios de pan es 3.00, la relación entre precios de pan respecto a precios de leche es  $1/3 = 0.333$ . De igual manera, la relación entre precios de pan y precios de leche el segundo año es  $1/2.00 = 0.500$ .

Por lo tanto,

$$\text{Media de las relaciones (cocientes) precio de pan respecto a precios de leche} = \frac{1}{2}(0.333 + 0.500) = 0.417$$

- c) Si la media fuera un promedio adecuado, se esperaría que la media de las relaciones de precios de leche respecto a precios de pan fuera el recíproco de la media de las relaciones precios de pan respecto a precios de leche. Sin embargo,  $1/0.417 = 2.40 \neq 2.50$ . Esto demuestra que la media no es un promedio adecuado para (cocientes) relaciones.
- d) La media geométrica de las relaciones entre precios de leche respecto a precios de pan =  $\sqrt{(3.00)(2.00)} = \sqrt{6.00}$

$$\text{La media geométrica de las relaciones entre precios de pan respecto a precios de leche} = \sqrt{(0.333)(0.500)} = \sqrt{0.167} = 1/\sqrt{6.00}$$

Dado que estos promedios son recíprocos, se concluye que la media geométrica es más adecuada que la media aritmética para promediar relaciones (cocientes).

- 3.38** La cuenta bacteriana en cierto medio de cultivo aumentó de 1 000 a 4 000 en 3 días. ¿Cuál es el incremento porcentual promedio por día?

### SOLUCIÓN

Como un incremento de 1 000 a 4 000 es un incremento de 300%, uno está inclinado a concluir que el aumento porcentual promedio por día es  $300\%/3 = 100\%$ . Sin embargo, esto significaría que el primer día la cuenta aumentó de 1 000 a 2 000, el segundo día de 2 000 a 4 000 y el tercer día de 4 000 a 8 000, lo cual no es así.

Para determinar este incremento porcentual promedio se denotará  $r$  a este incremento porcentual promedio. Entonces

$$\text{Cuenta bacteriana total un día después} = 1 000 + 1 000r = 1 000(1 + r)$$

$$\text{Cuenta bacteriana total dos días después} = 1 000(1 + r) + 1 000(1 + r)r = 1 000(1 + r)^2$$

$$\text{Cuenta bacteriana total tres días después} = 1 000(1 + r)^2 + 1 000(1 + r)^2r = 1 000(1 + r)^3$$

Esta última expresión debe ser igual a 4 000. De manera que  $1 000(1 + r)^3 = 4 000$ ,  $(1 + r)^3 = 4$ ,  $1 + r = \sqrt[3]{4}$ , y  $r = \sqrt[3]{4} - 1 = 1.587 - 1 = 0.587$ , y así,  $r = 58.7\%$ .

En general, si se parte de una cantidad  $P$  y se incrementa esta cantidad a una tasa constante  $r$  por unidad de tiempo, la cantidad que se tendrá después de  $n$  unidades de tiempo será

$$A = P(1 + r)^n$$

A esta fórmula se le llama *fórmula del interés compuesto* (ver problemas 3.94 y 3.95).

## LA MEDIA ARMÓNICA

- 3.39** Encontrar la media armónica  $H$  de los números 3, 5, 6, 6, 7, 10 y 12.

### SOLUCIÓN

$$\begin{aligned} \frac{1}{H} &= \frac{1}{N} \sum \frac{1}{X} = \frac{1}{7} \left( \frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{10} + \frac{1}{12} \right) = \frac{1}{7} \left( \frac{140 + 84 + 70 + 70 + 60 + 42 + 35}{420} \right) \\ &= \frac{501}{2940} \\ \text{y } H &= \frac{2940}{501} = 5.87 \end{aligned}$$

Suele ser mejor expresar primero las fracciones en forma decimal. Así

$$\begin{aligned} \frac{1}{H} &= \frac{1}{7} (0.3333 + 0.2000 + 0.1667 + 0.1667 + 0.1429 + 0.1000 + 0.0833) \\ &= \frac{1.1929}{7} \\ \text{y } H &= \frac{7}{1.1929} = 5.87 \end{aligned}$$

Comparando con los resultados del problema 3.35 se ilustra el hecho de que la media armónica de números positivos, no todos iguales, es menor que su media geométrica, la que a su vez es menor que su media aritmética.

- 3.40** Durante cuatro años consecutivos los precios del fuel para la calefacción son \$0.80, \$0.90, \$1.05 y \$1.25 por galón (gal). ¿Cuál es el precio promedio del fuel en estos cuatro años?

### SOLUCIÓN

#### Caso 1

Supóngase que todos los años se compra la misma cantidad de fuel, digamos 1 000 gal. Entonces

$$\text{Precio promedio} = \frac{\text{precio total}}{\text{cantidad total comprada}} = \frac{\$800 + \$900 + \$1\,050 + \$1\,250}{4\,000 \text{ gal}} = \$1.00/\text{gal}$$

Esto es lo mismo que la media aritmética del costo por galón; es decir  $\frac{1}{4}(\$0.80 + \$0.90 + \$1.05 + \$1.25) = 1.00/\text{gal}$ . Este resultado sería el mismo aun cuando se usaran  $x$  galones por año.

#### Caso 2

Supóngase que en el fuel se gasta la misma cantidad de dinero todos los años, o sea \$1 000. Entonces

$$\text{Precio promedio} = \frac{\text{precio total}}{\text{cantidad total comprada}} = \frac{\$4\,000}{(1\,250 + 1\,111 + 952 + 800)\text{gal}} = \$0.975/\text{gal}$$

Esto es lo mismo que la media armónica de los precios por galón:

$$\frac{4}{\frac{1}{0.80} + \frac{1}{0.90} + \frac{1}{1.05} + \frac{1}{1.25}} = 0.975$$

El resultado será el mismo si se gastan y dólares por año.

Ambos promedios son correctos, pero se calculan para condiciones diferentes.

Debe notarse que si la cantidad de galones empleados varía de un año a otro, en vez de ser siempre la misma, en lugar de la media aritmética ordinaria usada en el caso 1, hay que usar la media aritmética ponderada. De manera similar, si la cantidad gastada varía de un año a otro, en lugar de la media armónica empleada en el caso 2 se debe usar la media armónica ponderada.

- 3.41** Un automóvil recorre 25 millas a 25 millas por hora (mph), 25 millas a 50 mph y 25 millas a 75 mph. Encontrar la media aritmética de las tres velocidades y la media armónica de las tres velocidades. ¿Cuál es correcta?

### SOLUCIÓN

La velocidad promedio es igual a la distancia recorrida dividida entre el total del tiempo y es igual a lo siguiente:

$$\frac{75}{\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right)} = 40.9 \text{ mi/h}$$

La media aritmética de las tres velocidades es:

$$\frac{25 + 50 + 75}{3} = 50 \text{ mi/h}$$

La media armónica se encuentra como sigue:

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{N} \sum \frac{1}{X} = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{25} + \frac{1}{50} + \frac{1}{75} \right) = \frac{11}{450} \quad \text{y} \quad H = \frac{450}{11} = 40.9$$

La media armónica es la medida correcta de la velocidad promedio.

## LA RAÍZ CUADRADA MEDIA O MEDIA CUADRÁTICA

- 3.42** Encontrar la media cuadrática de los números 3, 5, 6, 6, 7, 10 y 12.

### SOLUCIÓN

$$\text{Media cuadrática} = \text{RCM} = \sqrt{\frac{3^2 + 5^2 + 6^2 + 6^2 + 7^2 + 10^2 + 12^2}{7}} = \sqrt{57} = 7.55$$

- 3.43** Demostrar que la media cuadrática de dos números positivos distintos  $a$  y  $b$  es mayor que su media geométrica.

### SOLUCIÓN

Se pide que se demuestre que  $\sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2)} > \sqrt{ab}$ . Si esto es verdad, entonces elevando al cuadrado ambos miembros  $\frac{1}{2}(a^2 + b^2) > ab$ , de manera que  $a^2 + b^2 > 2ab$ ,  $a^2 - 2ab + b^2 > 0$  o bien  $(a - b)^2 > 0$ . Pero esta igualdad es cierta, ya que el cuadrado de cualquier número real distinto de cero es positivo.

La prueba consiste en demostrar el proceso inverso. Entonces, partiendo de  $(a - b)^2 > 0$ , que se sabe que es verdadero, se puede mostrar que  $a^2 + b^2 > 2ab$ ,  $\frac{1}{2}(a^2 + b^2) > ab$  y finalmente  $\sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2)} > \sqrt{ab}$ , que es lo pedido.

Obsérvese que  $\sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2)} = \sqrt{ab}$  si y sólo si  $a = b$ .

## CUARTILES, DECILES Y PERCENTILES

- 3.44** Para los salarios de los 65 empleados de la empresa P&R (ver problema 2.9), encontrar: a) los cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  y b) los deciles  $D_1, D_2, \dots, D_9$ .

### SOLUCIÓN

- a) El primer cuartil  $Q_1$  es el salario que se encuentra contando  $N/4 = 65/4 = 16.25$  de los casos, comenzando con la primera clase (la más baja). Como la primera clase contiene 8 casos, hay que tomar  $8.5 (16.25 - 8)$  casos de los 10 de la segunda clase. Usando el método de interpolación lineal, se tiene

$$Q_1 = \$259.995 + \frac{8.25}{10} (\$10.00) = \$268.25$$

El segundo cuartil  $Q_2$  se encuentra contando los primeros  $2N/4 = N/2 = 65/2 = 32.5$  de los casos. Como las primeras dos clases comprenden 18 casos, se deben tomar  $32.5 - 18 = 14.5$  casos de los 16 de la tercera clase, por lo tanto

$$Q_2 = \$269.995 + \frac{14.5}{16} (\$10.00) = \$279.06$$

Obsérvese que  $Q_2$  es la mediana.

El tercer cuartil  $Q_3$  se encuentra contando los primeros  $3N/4 = \frac{3}{4}(65) = 48.75$  de los casos. Como las primeras cuatro clases comprenden 48 casos, se deben tomar  $48.75 - 48 = 0.75$  casos de los 10 de la quinta clase; por lo tanto

$$Q_3 = \$289.995 + \frac{0.75}{10} (\$10.00) = \$290.75$$

Así, 25% de los empleados ganan \$268.25 o menos, 50% gana \$279.06 o menos y 75% gana \$290.75 o menos.

- b) Los deciles primero, segundo, ..., y noveno se obtienen contando  $N/10, 2N/10, \dots, 9N/10$  de los casos empezando por la primer clase (inferior). Por lo tanto

$$\begin{aligned} D_1 &= \$249.995 + \frac{6.5}{8} (\$10.00) = \$258.12 & D_6 &= \$279.995 + \frac{5}{14} (\$10.00) = \$283.57 \\ D_2 &= \$259.995 + \frac{5}{10} (\$10.00) = \$265.00 & D_7 &= \$279.995 + \frac{11.5}{14} (\$10.00) = \$288.21 \\ D_3 &= \$269.995 + \frac{1.5}{16} (\$10.00) = \$270.94 & D_8 &= \$289.995 + \frac{4}{10} (\$10.00) = \$294.00 \\ D_4 &= \$269.995 + \frac{8}{16} (\$10.00) = \$275.00 & D_9 &= \$299.995 + \frac{0.5}{5} (\$10.00) = \$301.00 \\ D_5 &= \$269.995 + \frac{14.5}{16} (\$10.00) = \$279.06 \end{aligned}$$

De manera que 10% de los empleados ganan \$258.12 o menos, 20% ganan \$265.00 o menos, ..., 90% ganan \$301.00 o menos.

Obsérvese que el quinto decil es la mediana. Los deciles segundo, cuarto, sexto y octavo, que dividen la distribución en cinco partes iguales y a los que se les llama *quintiles*, también suelen usarse en la práctica.

- 3.45** En la distribución del problema 3.44, determinar *a)* el percentil 35o. y *b)* el percentil 60o.

### SOLUCIÓN

- a)* El percentil 35o., que se denota  $P_{35}$ , se obtiene contando los primeros  $35N/100 = 35(65)/100 = 22.75$  casos, empezando en la primera clase (la clase más baja). Entonces, como en el problema 3.44,

$$P_{35} = \$269.995 + \frac{4.75}{16} (\$10.00) = \$272.97$$

Esto significa que 35% de los empleados gana \$272.97 o menos.

- b)* El percentil 60o. es  $P_{60} = \$279.995 + \frac{5}{14} (\$10.00) = \$283.57$ . Obsérvese que éste coincide con el sexto decil o tercer quintil.

- 3.46** La siguiente hoja de cálculo de EXCEL está contenida en A1:D26. Esta hoja de cálculo contiene el ingreso per cápita en cada uno de los 50 estados de Estados Unidos. Dar los comandos de EXCEL para hallar  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  y  $P_{95}$ . Dar también los estados que están a ambos lados de estos cuartiles o percentiles.

| Estado        | Ingreso per cápita | Estado         | Ingreso per cápita |
|---------------|--------------------|----------------|--------------------|
| Wyoming       | 36 778             | Pennsylvania   | 34 897             |
| Montana       | 29 387             | Wisconsin      | 33 565             |
| North Dakota  | 31 395             | Massachusetts  | 44 289             |
| New Mexico    | 27 664             | Missouri       | 31 899             |
| West Virginia | 27 215             | Idaho          | 28 158             |
| Rhode Island  | 36 153             | Kentucky       | 28 513             |
| Virginia      | 38 390             | Minnesota      | 37 373             |
| South Dakota  | 31 614             | Florida        | 33 219             |
| Alabama       | 29 136             | South Carolina | 28 352             |
| Arkansas      | 26 874             | New York       | 40 507             |
| Maryland      | 41 760             | Indiana        | 31 276             |
| Iowa          | 32 315             | Connecticut    | 47 819             |
| Nebraska      | 33 616             | Ohio           | 32 478             |
| Hawaii        | 34 539             | New Hampshire  | 38 408             |
| Mississippi   | 25 318             | Texas          | 32 462             |
| Vermont       | 33 327             | Oregon         | 32 103             |
| Maine         | 31 252             | New Jersey     | 43 771             |
| Oklahoma      | 29 330             | California     | 37 036             |
| Delaware      | 37 065             | Colorado       | 37 946             |
| Alaska        | 35 612             | North Carolina | 30 553             |
| Tennessee     | 31 107             | Illinois       | 36 120             |
| Kansas        | 32 836             | Michigan       | 33 116             |
| Arizona       | 30 267             | Washington     | 35 409             |
| Nevada        | 35 883             | Georgia        | 31 121             |
| Utah          | 28 061             | Louisiana      | 24 820             |

### SOLUCIÓN

Estados más cercanos

|                          |             |                         |
|--------------------------|-------------|-------------------------|
| =PERCENTILE(A2:D26,0.25) | \$30 338.5  | Arizona y NorthCarolina |
| =PERCENTILE(A2:D26,0.50) | \$32 657    | Ohio y Kansas           |
| =PERCENTILE(A2:D26,0.75) | \$36 144.75 | Illinois y RhodeIsland  |
| =PERCENTILE(A2:D26,0.95) | \$42 866.05 | Maryland y NewJersey    |

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### SUMATORIA

**3.47** Escribir los términos de cada una de las sumas siguientes:

$$\begin{array}{lll} a) \sum_{j=1}^4 (X_j + 2) & c) \sum_{j=1}^3 U_j(U_j + 6) & e) \sum_{j=1}^4 4X_j Y_j \\ b) \sum_{j=1}^5 f_j X_j^2 & d) \sum_{k=1}^N (Y_k^2 - 4) & \end{array}$$

**3.48** Escribir cada una de las sumas siguientes usando el signo de sumatoria:

$$\begin{array}{l} a) (X_1 + 3)^3 + (X_2 + 3)^3 + (X_3 + 3)^3 \\ b) f_1(Y_1 - a)^2 + f_2(Y_2 - a)^2 + \cdots + f_{15}(Y_{15} - a)^2 \\ c) (2X_1 - 3Y_1) + (2X_2 - 3Y_2) + \cdots + (2X_N - 3Y_N) \\ d) (X_1/Y_1 - 1)^2 + (X_2/Y_2 - 1)^2 + \cdots + (X_8/Y_8 - 1)^2 \\ e) \frac{f_1 a_1^2 + f_2 a_2^2 + \cdots + f_{12} a_{12}^2}{f_1 + f_2 + \cdots + f_{12}} \end{array}$$

**3.49** Demostrar que  $\sum_{j=1}^N (X_j - 1)^2 = \sum_{j=1}^N X_j^2 - 2 \sum_{j=1}^N X_j + N$

**3.50** Demostrar que  $\sum (X + a)(Y + b) = \sum XY + a \sum Y + b \sum X + Nab$ , donde  $a$  y  $b$  son constantes. ¿Cuáles son los subíndices implícitos?

**3.51** Las variables  $U$  y  $V$  toman los valores  $U_1 = 3$ ,  $U_2 = -2$ ,  $U_3 = 5$  y  $V_1 = -4$ ,  $V_2 = -1$ ,  $V_3 = 6$ , respectivamente. Calcular *a)*  $\sum UV$ , *b)*  $\sum(U + 3)(V - 4)$ , *c)*  $\sum V^2$ , *d)*  $(\sum U)(\sum V)^2$ , *e)*  $\sum UV^2$ , *f)*  $\sum(U^2 - 2V^2 + 2)$  y *g)*  $\sum(U/V)$ .

**3.52** Dado que  $\sum_{j=1}^4 X_j = 7$ ,  $\sum_{j=1}^4 Y_j = -3$  y  $\sum_{j=1}^4 X_j Y_j = 5$ , encontrar *a)*  $\sum_{j=1}^4 (2X_j + 5Y_j)$  y *b)*  $\sum_{j=1}^4 (X_j - 3)(2Y_j + 1)$ .

### LA MEDIA ARITMÉTICA

**3.53** En cinco materias, un estudiante obtuvo las calificaciones siguientes: 85, 76, 93, 82 y 96. Determinar la media aritmética de estas calificaciones.

**3.54** Un psicólogo mide los tiempos de reacción de un individuo a ciertos estímulos; éstos fueron 0.53, 0.46, 0.50, 0.49, 0.52, 0.53, 0.44 y 0.55 segundos, respectivamente. Estimar el tiempo medio de reacción del individuo a estos estímulos.

**3.55** Un conjunto de números consta de 6 seises, 7 sietes, 8 ochos, 9 nueves y 10 dieces. ¿Cuál es la media aritmética de estos números?

**3.56** Un estudiante obtuvo las calificaciones siguientes en tres aspectos de un curso: 71, 78 y 89, respectivamente.

- a)* Si los pesos que se acuerda dar a estas calificaciones son 2, 4 y 5, respectivamente, ¿cuál es una calificación promedio apropiada?
- b)* ¿Cuál es la calificación promedio si se usan pesos iguales?

**3.57** Los promedios de calificación en los cursos de tres maestros de economía son 79, 74 y 82, y sus grupos constan de 32, 25 y 17 alumnos, respectivamente. Determinar la calificación media de los tres cursos.

- 3.58** El salario anual medio pagado a los empleados de una empresa es \$36 000. Los salarios anuales medios pagados a hombres y mujeres de la empresa son \$34 000 y \$40 000, respectivamente. Determinar el porcentaje de hombres y mujeres empleados por la empresa.
- 3.59** En la tabla 3.8 se presenta la distribución de las cargas máximas, en toneladas cortas (1 tonelada corta = 2 000 lb) que soportan ciertos cables producidos por una empresa. Determinar la carga máxima media usando: *a)* el método largo y *b)* el método de compilación.

**Tabla 3.8**

| Carga máxima<br>(toneladas cortas) | Cantidad de<br>cables |
|------------------------------------|-----------------------|
| 9.3-9.7                            | 2                     |
| 9.8-10.2                           | 5                     |
| 10.3-10.7                          | 12                    |
| 10.8-11.2                          | 17                    |
| 11.3-11.7                          | 14                    |
| 11.8-12.2                          | 6                     |
| 12.3-12.7                          | 3                     |
| 12.8-13.2                          | 1                     |
| Total                              | 60                    |

- 3.60** Encontrar  $\bar{X}$  para los datos de la tabla 3.9 usando: *a)* el método largo y *b)* el método de compilación.

**Tabla 3.9**

|   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| X | 462 | 480 | 498 | 516 | 534 | 552 | 570 | 588 | 606 | 624 |
| f | 98  | 75  | 56  | 42  | 30  | 21  | 15  | 11  | 6   | 2   |

- 3.61** En la tabla 3.10 se presenta la distribución de los diámetros de las cabezas de remaches producidos por una empresa. Calcular el diámetro medio.

- 3.62** Calcular la media de los datos de la tabla 3.11.

**Tabla 3.10**

| Diámetro (cm) | Frecuencias |
|---------------|-------------|
| 0.7247-0.7249 | 2           |
| 0.7250-0.7252 | 6           |
| 0.7253-0.7255 | 8           |
| 0.7256-0.7258 | 15          |
| 0.7259-0.7261 | 42          |
| 0.7262-0.7264 | 68          |
| 0.7265-0.7267 | 49          |
| 0.7268-0.7270 | 25          |
| 0.7271-0.7273 | 18          |
| 0.7274-0.7276 | 12          |
| 0.7277-0.7279 | 4           |
| 0.7280-0.7282 | 1           |
| Total         | 250         |

**Tabla 3.11**

| Clase                | Frecuencias |
|----------------------|-------------|
| 10 hasta menos de 15 | 3           |
| 15 hasta menos de 20 | 7           |
| 20 hasta menos de 25 | 16          |
| 25 hasta menos de 30 | 12          |
| 30 hasta menos de 35 | 9           |
| 35 hasta menos de 40 | 5           |
| 40 hasta menos de 45 | 2           |
| Total                | 54          |

- 3.63** Calcular la media de la cantidad de tiempo que ven televisión los 400 estudiantes del problema 2.20.
- 3.64** *a)* Emplear la distribución de frecuencias del problema 2.27 para calcular el diámetro medio de los balines.  
*b)* Calcular la media directamente de los datos en bruto y compararla con el inciso *a*); explicar cualquier discrepancia.

### LA MEDIANA

- 3.65** Encontrar la media y la mediana de estos conjuntos de números: *a)* 5, 4, 8, 3, 7, 2, 9 y *b)* 18.3, 20.6, 19.3, 22.4, 20.2, 18.8, 19.7, 20.0.
- 3.66** Encontrar la calificación mediana del problema 3.53.
- 3.67** Encontrar el tiempo mediano de reacción del problema 3.54.
- 3.68** Encontrar la mediana del conjunto de números del problema 3.55.
- 3.69** Encontrar la mediana de la carga máxima de los cables de la tabla 3.8 del problema 3.59.
- 3.70** Encontrar la mediana  $\tilde{X}$  de la distribución presentada en la tabla 3.9 del problema 3.60.
- 3.71** Encontrar el diámetro mediano de las cabezas de los remaches de la tabla 3.10 del problema 3.61.
- 3.72** Encontrar la mediana de la distribución presentada en la tabla 3.11 del problema 3.62.
- 3.73** En la tabla 3.12 se da la cantidad, en miles, de muertes en Estados Unidos ocurridas en 1993 a causa de enfermedades cardíacas. Encontrar la edad mediana.

**Tabla 3.12**

| Grupo de edad | Miles de muertes |
|---------------|------------------|
| Total         | 743.3            |
| Menos de 1    | 0.7              |
| 1 a 4         | 0.3              |
| 5 a 14        | 0.3              |
| 15 a 24       | 1.0              |
| 25 a 34       | 3.5              |
| 35 a 34       | 13.1             |
| 45 a 54       | 32.7             |
| 55 a 64       | 72.0             |
| 65 a 74       | 158.1            |
| 75 a 84       | 234.0            |
| 85 y más      | 227.6            |

Fuente: U.S. National Center for Health Statistics, Vital Statistics of the U.S., annual.

- 3.74** Con los datos de la tabla del problema 2.31 encontrar la edad mediana.
- 3.75** Encontrar la mediana de la cantidad de tiempo que ven la televisión los 400 estudiantes del problema 2.20.

**LA MODA**

- 3.76** Encontrar la media, la mediana y la moda de cada uno de los conjuntos de números siguientes: *a)* 7, 4, 10, 9, 15, 12, 7, 9, 7 y *b)* 8, 11, 4, 3, 2, 5, 10, 6, 4, 1, 10, 8, 12, 6, 5, 7.
- 3.77** En el problema 3.53 encontrar la calificación modal.
- 3.78** En el problema 3.54 encontrar el tiempo de reacción modal.
- 3.79** En el problema 3.55 encontrar la moda del conjunto de números.
- 3.80** En el problema 3.59 encontrar la moda de la carga máxima de los cables.
- 3.81** En el problema 3.60 encontrar la moda  $\hat{X}$  de la distribución dada en la tabla 3.9.
- 3.82** En el problema 3.61 encontrar el diámetro modal de las cabezas de los remaches de la tabla 3.10.
- 3.83** En el problema 3.62 encontrar la moda de la distribución dada.
- 3.84** En el problema 2.20 encontrar la moda de la cantidad de tiempo que ven televisión los 400 estudiantes.
- 3.85** *a)* ¿Cuál es el grupo de edad modal en la tabla 2.15?  
*b)* ¿Cuál es el grupo de edad modal en la tabla 3.12?
- 3.86** Empleando las fórmulas (9) y (10) de este capítulo, hallar la moda de las distribuciones dadas en los problemas siguientes. Comparar las respuestas obtenidas con cada una de las dos fórmulas.  
*a)* Problema 3.59 *b)* Problema 3.61 *c)* Problema 3.62 *d)* Problema 2.20.
- 3.87** La probabilidad de una variable aleatoria continua está descrita por la siguiente función de densidad de probabilidad.  $f(x) = -0.75x^2 + 1.5x$  para  $0 < x < 2$  y para todos los demás valores de  $x$ ,  $f(x) = 0$ . La moda se presenta en el punto en el que la función alcanza su máximo. Empleando los conocimientos sobre funciones cuadráticas, mostrar que la moda se presenta en  $x = 1$ .

**LA MEDIA GEOMÉTRICA**

- 3.88** Hallar la media geométrica de los números: *a)* 4.2 y 16.8 y *b)* 3.00 y 6.00.
- 3.89** Hallar: *a)* la media geométrica  $G$  y *b)* la media aritmética  $\bar{X}$  del conjunto 2, 4, 8, 16, 32.
- 3.90** Hallar la media geométrica de los conjuntos: *a)* 3, 5, 8, 3, 7, 2 y *b)* 28.5, 73.6, 47.2, 31.5, 64.8.
- 3.91** Hallar la media geométrica de las distribuciones de: *a)* el problema 3.59 y *b)* el problema 3.60. Verificar que en estos casos la media geométrica es menor o igual a la media aritmética.
- 3.92** Si en un periodo de 4 años se duplican los precios de un artículo, ¿cuál es el incremento porcentual anual promedio?

- 3.93** En 1980 y 1996 la población de Estados Unidos era de 226.5 millones y 266.0 millones, respectivamente. Empleando la fórmula dada en el problema 3.38, contestar lo siguiente.
- ¿Cuál es el incremento porcentual anual promedio?
  - Estimar la población en 1985.
  - Si el incremento porcentual anual promedio de 1996 a 2000 es el mismo que en el inciso a), ¿a cuánto ascenderá la población en 2000?
- 3.94** Se invierten \$1 000 a una tasa de interés anual de 8%. ¿A cuánto ascenderá la cantidad total después de 6 años si no se retira el capital inicial?
- 3.95** Si en el problema 3.94 el interés es compuesto trimestralmente (es decir, el dinero gana 2% de interés cada 3 meses), ¿cuál será la cantidad total después de 6 años?
- 3.96** Encontrar dos números cuya media aritmética sea 9.00 y cuya media geométrica sea 7.2.

### LA MEDIA ARMÓNICA

- 3.97** Encontrar la media armónica de los números: a) 2, 3 y 6 y b) 3.2, 5.2, 4.8, 6.1 y 4.2.
- 3.98** Encontrar: a) la media aritmética, b) la media geométrica y c) la media armónica de los números 0, 2, 4 y 6.
- 3.99** Si  $X_1, X_2, X_3, \dots$ , son las marcas de clase de una distribución de frecuencias y  $f_1, f_2, f_3, \dots$ , son sus frecuencias correspondientes, demostrar que su media armónica está dada por

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{N} \left( \frac{f_1}{X_1} + \frac{f_2}{X_2} + \frac{f_3}{X_3} + \dots \right) = \frac{1}{N} \sum \frac{f}{X}$$

donde  $N = f_1 + f_2 + \dots = \sum f$

- 3.100** Emplear el problema 3.99 para hallar la media armónica de la distribución: a) del problema 3.59 y b) del problema 3.60. Comparar con el problema 3.91.
- 3.101** Las ciudades A, B y C están equidistantes una de otra. Un conductor viaja de la ciudad A a la ciudad B a 30 mi/h, de la ciudad B a la ciudad C a 40 mi/h y de la ciudad C a la ciudad A a 50 mi/h. Determinar su velocidad promedio en este viaje.
- 3.102** a) Un aeroplano recorre las distancias  $d_1, d_2$  y  $d_3$  a las velocidades  $v_1, v_2$  y  $v_3$  mi/h, respectivamente. Mostrar que la velocidad promedio está dada por  $V$ , donde

$$\frac{d_1 + d_2 + d_3}{V} = \frac{d_1}{v_1} + \frac{d_2}{v_2} + \frac{d_3}{v_3}$$

Ésta es una media armónica ponderada.

- b) Encontrar:  $V$  si  $d_1 = 2\ 500, d_2 = 1\ 200, d_3 = 500, v_1 = 500, v_2 = 400$  y  $v_3 = 250$ .

- 3.103** Demostrar que la media geométrica de dos números  $a$  y  $b$  es: a) menor o igual que su media aritmética y b) mayor o igual que su media armónica. ¿Puede generalizarse la prueba a más de dos números?

### LA RAÍZ CUADRADA MEDIA O LA MEDIA CUADRÁTICA

- 3.104** Encontrar la RCM (o media cuadrática) de los números: *a)* 11, 23 y 35, *y b)* 2.7, 3.8, 3.2 y 4.3.
- 3.105** Probar que la RCM de dos números positivos, *a* y *b*, es: *a)* mayor o igual que la media aritmética y *b)* mayor o igual que la media armónica. Se puede extender la prueba a más de dos números.
- 3.106** Deducir una fórmula que pueda usarse para hallar la RCM de datos agrupados y aplicarla a una de las distribuciones de frecuencias ya consideradas.

### CUARTILES, DECILES Y PERCENTILES

- 3.107** En la tabla 3.13 se presenta una distribución de frecuencias de las calificaciones en un examen final de álgebra. *a)* Encontrar los cuartiles de esta distribución y *b)* interpretar claramente cada uno de ellos.

Tabla 3.13

| Calificación | Cantidad de estudiantes |
|--------------|-------------------------|
| 90-100       | 9                       |
| 80-89        | 32                      |
| 70-79        | 43                      |
| 60-69        | 21                      |
| 50-59        | 11                      |
| 40-49        | 3                       |
| 30-39        | 1                       |
| Total        | 120                     |

- 3.108** Encontrar los cuartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  de las distribuciones: *a)* del problema 3.59 y *b)* del problema 3.60. Interpretar claramente cada uno de ellos.
- 3.109** Proporcionar seis términos estadísticos diferentes para el punto de equilibrio o valor central en una curva de frecuencias en forma de campana.
- 3.110** Encontrar: *a)*  $P_{10}$ , *b)*  $P_{90}$ , *c)*  $P_{25}$  y *d)*  $P_{75}$  en los datos del problema 3.59. Interpretar claramente cada uno de ellos.
- 3.111** *a)* ¿Se pueden expresar todos los deciles y cuartiles como percentiles? Explicar.  
*b)* ¿Se pueden expresar los cuantiles como percentiles? Explicar.
- 3.112** Para los datos del problema 3.107, determinar: *a)* la calificación más baja obtenida por el 25% superior de los alumnos y *b)* la puntuación más alta alcanzada por el 20% inferior de los alumnos. Interpretar las respuestas en términos de percentiles.
- 3.113** Interpretar gráficamente los resultados del problema 3.107 empleando: *a)* un histograma porcentual, *b)* un polígono de frecuencia porcentual y *c)* una ojiva porcentual.
- 3.114** Repetir el problema 3.113 para los resultados del problema 3.108.
- 3.115** *a)* Desarrollar una fórmula similar a la de la ecuación (8) de este capítulo que permita calcular cualquier percentil de una distribución de frecuencias.  
*b)* Ilustrar el uso de la fórmula empleándola para obtener los resultados del problema 3.110.

# DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y OTRAS MEDIDAS DE DISPERSIÓN

4

## DISPERSIÓN O VARIACIÓN

El grado de dispersión de los datos numéricos respecto a un valor promedio se llama *dispersión* o *variación* de los datos. Existen varias medidas de dispersión (o variación); las más usadas son el rango, la desviación media, el rango semiintercuartil, el rango percentil 10-90 y la desviación estándar.

### RANGO

El *rango* de un conjunto de números es la diferencia entre el número mayor y el número menor del conjunto.

**EJEMPLO 1** El rango del conjunto 2, 3, 3, 5, 5, 5, 8, 10, 12 es  $12 - 2 = 10$ . Algunas veces el rango se da mediante el número menor y el número mayor; así, por ejemplo, en el caso del conjunto anterior, simplemente se indica de 2 a 12 o 2-12.

### DESVIACIÓN MEDIA

La *desviación media*, o *desviación promedio*, de un conjunto de  $N$  números  $X_1, X_2, \dots, X_N$  se abrevia DM y está definida así:

$$\text{Desviación media (DM)} = \frac{\sum_{j=1}^N |X_j - \bar{X}|}{N} = \frac{\sum |X - \bar{X}|}{N} = \overline{|X - \bar{X}|} \quad (I)$$

donde  $\bar{X}$  es la media aritmética de los números y  $|X_j - \bar{X}|$  es el valor absoluto de la desviación de  $X_j$  respecto de  $\bar{X}$ . (El valor absoluto de un número es el número sin signo; el valor absoluto de un número se indica por medio de dos barras verticales colocadas a los lados del número, así  $|-4| = 4$ ,  $|+3| = 3$ ,  $|6| = 6$  y  $|-0.84| = 0.84$ .)

**EJEMPLO 2** Encuentre la desviación media del conjunto 2, 3, 6, 8, 11.

$$\text{Media aritmética } (\bar{X}) = \frac{2 + 3 + 6 + 8 + 11}{5} = 6$$

$$\text{DM} = \frac{|2 - 6| + |3 - 6| + |6 - 6| + |8 - 6| + |11 - 6|}{5} = \frac{| - 4| + | - 3| + |0| + |2| + |5|}{5} = \frac{4 + 3 + 0 + 2 + 5}{5} = 2.8$$

Si  $X_1, X_2, \dots, X_K$  se presentan con frecuencias  $f_1, f_2, \dots, f_K$ , respectivamente, la desviación media puede expresarse como

$$\text{DM} = \frac{\sum_{j=1}^K f_j |X_j - \bar{X}|}{N} = \frac{\sum f |X - \bar{X}|}{N} = \overline{|X - \bar{X}|} \quad (2)$$

donde  $N = \sum_{j=1}^K f_j = \sum f$ . Esta fórmula es útil para datos agrupados, donde las  $X_j$  representan las marcas de clase y las  $f_j$  las correspondientes frecuencias de clase.

En ocasiones, la desviación media se define en términos de las desviaciones absolutas respecto de la mediana o de otro promedio, y no respecto de la media. Una propiedad interesante de la suma  $\sum_{j=1}^N |X_j - a|$  es que es mínima cuando  $a$  es la mediana (es decir, la desviación media absoluta con respecto de la mediana es un mínimo).

Obsérvese que sería más apropiado emplear el término *desviación media absoluta* en vez de *desviación media*.

## RANGO SEMIINTERCUARTIL

El *rango semiintercuartil*, o *desviación cuartil*, de un conjunto de datos se denota  $Q$  y está definido por

$$Q = \frac{Q_3 - Q_1}{2} \quad (3)$$

donde  $Q_1$  y  $Q_3$  son el primero y tercer cuartiles en los datos (ver problemas 4.6 y 4.7). Algunas veces se usa el rango intercuartil  $Q_3 - Q_1$ ; sin embargo, el rango semiintercuartil es más usado como medida de dispersión.

## RANGO PERCENTIL 10-90

El *rango percentil 10-90* de un conjunto de datos está definido por

$$\text{Rango percentil 10-90} = P_{90} - P_{10} \quad (4)$$

donde  $P_{10}$  y  $P_{90}$  son los percentiles 10o. y 90o. en los datos (ver problema 4.8). El rango semipercentil 10-90,  $\frac{1}{2}(P_{90} - P_{10})$ , también puede usarse, pero no es muy común.

## DESVIACIÓN ESTÁNDAR

La *desviación estándar* de un conjunto de  $N$  números  $X_1, X_2, \dots, X_N$  se denota como  $s$  y está definida por

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum x^2}{N}} = \sqrt{\overline{(X - \bar{X})^2}} \quad (5)$$

donde  $x$  representa la desviación de cada uno de los números  $X_j$  respecto a la media  $\bar{X}$ . Por lo tanto,  $s$  es la raíz cuadrada de la media (RCM) de las desviaciones respecto de la media, o, como suele llamársele algunas veces, la *desviación raíz-media-cuadrado*.

Si  $X_1, X_2, \dots, X_N$  se presentan con frecuencias  $f_1, f_2, \dots, f_K$ , respectivamente, la desviación estándar se puede expresar como

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^K f_j(X_j - \bar{X})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum f(X - \bar{X})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum fx^2}{N}} = \sqrt{\frac{(X - \bar{X})^2}{N}} \quad (6)$$

donde  $N = \sum_{j=1}^K f_j = \sum f$ . Esta fórmula es útil para datos agrupados.

Algunas veces la desviación estándar de una muestra de datos se define usando como el denominador, en las ecuaciones (5) y (6),  $(N - 1)$  en lugar de  $N$ . Esto se debe a que el valor que así se obtiene es una mejor aproximación a la desviación estándar de la población de la que se ha tomado la muestra. Con valores grandes de  $N$  ( $N > 30$ ), prácticamente no hay diferencia entre las dos definiciones. Y cuando se necesita una estimación mejor, ésta siempre se puede obtener multiplicando por  $\sqrt{N/(N - 1)}$  la desviación estándar obtenida de acuerdo con la primera definición. Por lo tanto, en este libro se emplearán las fórmulas (5) y (6).

## VARIANZA

La *varianza* de un conjunto de datos se define como el cuadrado de la desviación estándar y, por lo tanto, corresponde al valor  $s^2$  en las ecuaciones (5) y (6).

Cuando es necesario distinguir la desviación estándar de una población de la desviación estándar de una muestra obtenida de esa población, se suele emplear  $s$  para la última y  $\sigma$  (letra griega *sigma* minúscula) para la primera. De manera que  $s^2$  y  $\sigma^2$  representan la *varianza muestral* y la *varianza poblacional*, respectivamente.

## MÉTODO ABREVIADO PARA EL CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Las ecuaciones (5) y (6) se pueden expresar, respectivamente, mediante las fórmulas siguientes

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N X_j^2}{N} - \left( \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} \right)^2} = \sqrt{\frac{\sum X^2}{N} - \left( \frac{\sum X}{N} \right)^2} = \sqrt{\bar{X}^2 - \bar{X}^2} \quad (7)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^K f_j X_j^2}{N} - \left( \frac{\sum_{j=1}^K f_j X_j}{N} \right)^2} = \sqrt{\frac{\sum fx^2}{N} - \left( \frac{\sum fX}{N} \right)^2} = \sqrt{\bar{x}^2 - \bar{x}^2} \quad (8)$$

donde  $\bar{X}^2$  representa la media de los cuadrados de los diversos valores de  $X$ , en tanto que  $\bar{x}^2$  denota el cuadrado de la media de los diversos valores de  $X$  (ver problemas 4.12 a 4.14).

Si las  $d_j = X_j - A$  son las desviaciones de  $X_j$  respecto a una constante arbitraria  $A$ , las fórmulas (7) y (8) se transforman, respectivamente, en

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N d_j^2}{N} - \left( \frac{\sum_{j=1}^N d_j}{N} \right)^2} = \sqrt{\frac{\sum d^2}{N} - \left( \frac{\sum d}{N} \right)^2} = \sqrt{\bar{d}^2 - \bar{d}^2} \quad (9)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^K f_j d_j^2}{N} - \left( \frac{\sum_{j=1}^K f_j d_j}{N} \right)^2} = \sqrt{\frac{\sum fd^2}{N} - \left( \frac{\sum fd}{N} \right)^2} = \sqrt{\bar{d}^2 - \bar{d}^2} \quad (10)$$

(Ver los problemas 4.15 y 4.17.)

Cuando en una distribución de frecuencia se tienen datos agrupados y los intervalos de clase son de un mismo tamaño  $c$ , se tiene  $d_j = cu_j$ , o  $X_j = A + cu_j$  y la fórmula (10) se trasforma en

$$s = c \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^K f_j u_j^2}{N} - \left( \frac{\sum_{j=1}^K f_j u_j}{N} \right)^2} = c \sqrt{\frac{\sum f u^2}{N} - \left( \frac{\sum f u}{N} \right)^2} = c \sqrt{u^2 - \bar{u}^2} \quad (II)$$

Esta última fórmula proporciona un método muy sencillo para el cálculo de la desviación estándar y se recomienda su uso para datos agrupados, siempre que los intervalos de clase sean de un mismo tamaño. A este método se le llama *método de compilación* y es exactamente análogo al empleado en el capítulo 3 para calcular la media aritmética de datos agrupados. (Ver problemas 4.16 a 4.19.)

## PROPIEDADES DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR

1. La desviación estándar se puede definir como

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - a)^2}{N}}$$

donde  $a$  es un promedio cualquiera además de la media aritmética. De todas las desviaciones estándar, la mínima es aquella en la que  $a = \bar{X}$ , debido a la propiedad 2 del capítulo 3. Esta propiedad es una razón importante para definir la desviación estándar como se definió antes. En el problema 4.27 se presenta una demostración de esta propiedad.

2. En las distribuciones normales (ver capítulo 7) se encuentra que (como se muestra en la figura 4.1):
  - 68.27% de los casos está comprendido entre  $\bar{X} - s$  y  $\bar{X} + s$  (es decir, una desviación estándar a cada lado de la media).
  - 95.45% de los casos está comprendido entre  $\bar{X} - 2s$  y  $\bar{X} + 2s$  (es decir, dos desviaciones estándar a cada lado de la media).
  - 99.73% de los casos está comprendido entre  $\bar{X} - 3s$  y  $\bar{X} + 3s$  (es decir, tres desviaciones estándar a cada lado de la media).

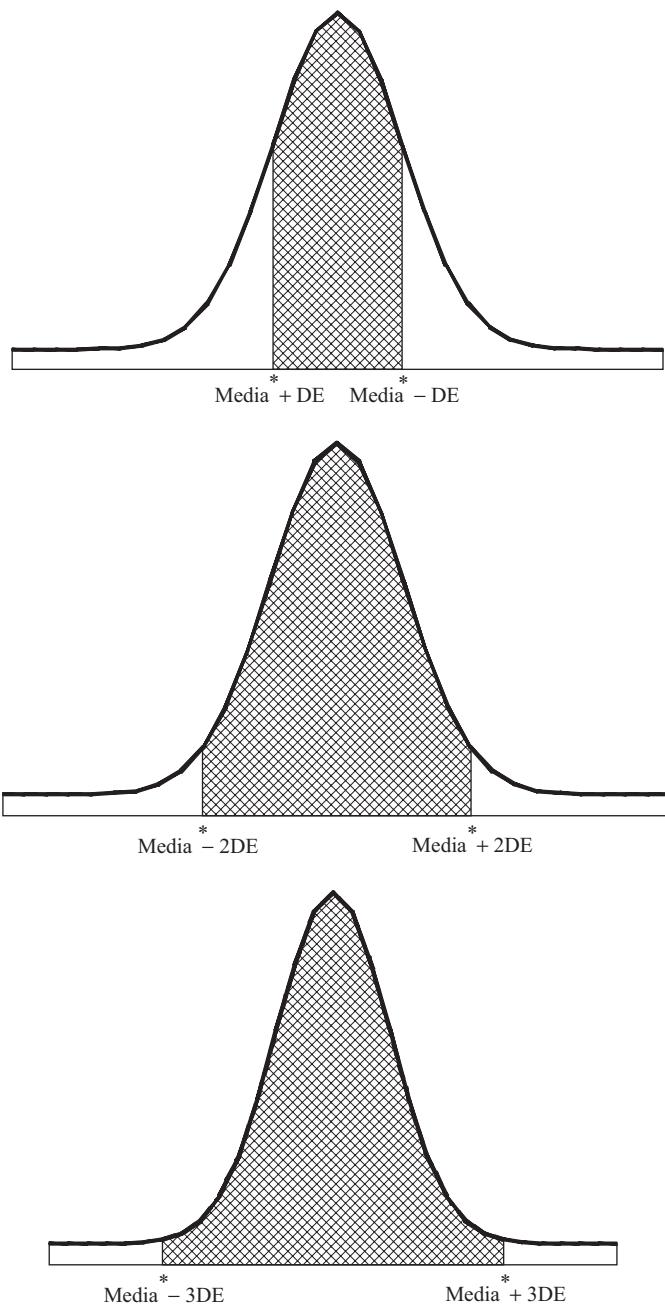
En distribuciones moderadamente sesgadas, estos porcentajes se satisfacen de manera aproximada (ver problema 4.24).

3. Supóngase que dos conjuntos que constan de  $N_1$  y  $N_2$  números (o dos distribuciones de frecuencia con frecuencias totales  $N_1$  y  $N_2$ ) tienen varianzas  $s_1^2$  y  $s_2^2$ , respectivamente, y una *misma* media  $\bar{X}$ . Entonces, la *varianza combinada o conjunta* de los dos conjuntos (o de las dos distribuciones de frecuencia) está dada por

$$s^2 = \frac{N_1 s_1^2 + N_2 s_2^2}{N_1 + N_2} \quad (12)$$

Obsérvese que ésta es una media aritmética ponderada de las dos varianzas. Esta fórmula puede generalizarse a tres o más conjuntos.

4. El teorema de Chebyshev establece que para  $k > 1$ , por lo menos  $(1 - (1/k^2)) \times 100\%$  de la distribución de probabilidad de cualquier variable está a no más de  $k$  desviaciones estándar de la media. En particular, para  $k = 2$ , por lo menos  $(1 - (1/2^2)) \times 100\%$  o bien 75% de los datos está en el intervalo  $(\bar{x} - 2S, \bar{x} + 2S)$ ; para  $k = 3$ , por lo menos  $(1 - (1/3^2)) \times 100\%$  u 89% de los datos está en el intervalo  $(\bar{x} - 3S, \bar{x} + 3S)$ , y para  $k = 4$ , por lo menos  $(1 - (1/4^2)) \times 100\%$  o bien 93.75% de los datos está en el intervalo  $(\bar{x} - 4S, \bar{x} + 4S)$ .



**Figura 4-1 Ilustración de la regla empírica.**

## COMPROBACIÓN DE CHARLIER

La comprobación de Charlier, en el cálculo de la media y de la desviación estándar mediante el método de la compilación, hace uso de las identidades

$$\sum f(u+1) = \sum fu + \sum f = \sum fu + N$$

$$\sum f(u+1)^2 = \sum f(u^2 + 2u + 1) = \sum fu^2 + 2\sum fu + \sum f = \sum fu^2 + 2\sum fu + N$$

(Ver el problema 4.20.)

## CORRECCIÓN DE SHEPPARD PARA LA VARIANZA

El cálculo de la desviación estándar tiene cierto error debido a la agrupación de los datos en clases (error de agrupamiento). Para hacer un ajuste respecto al error de agrupamiento, se usa la fórmula

$$\text{Varianza corregida} = \text{Varianza de los datos agrupados} - \frac{c^2}{12} \quad (13)$$

donde  $c$  es el tamaño del intervalo de clase. A la corrección  $c^2/12$  (que se resta) se le llama *corrección de Sheppard*. Esta corrección se usa para distribuciones de variables continuas, en las que las “colas”, en ambas direcciones, se aproximan gradualmente a cero.

Hay discrepancia respecto a *cuándo y si* la corrección de Sheppard debe ser aplicada. Desde luego no debe aplicarse antes de que se examine la situación cuidadosamente, ya que se tiende a una *sobre corrección*, con lo que sólo se sustituye un error por otro. En este libro, a menos que se indique otra cosa, no se usará la corrección de Sheppard.

## RELACIONES EMPÍRICAS ENTRE LAS MEDIDAS DE DISPERSIÓN

Para las distribuciones moderadamente sesgadas, se tiene la relación empírica

$$\text{Desviación media} = \frac{4}{5} (\text{desviación estándar})$$

$$\text{Rango semiintercuartil} = \frac{2}{3} (\text{desviación estándar})$$

Esto es consecuencia de que en una distribución normal se encuentre que la desviación media y el rango semiintercuartil son iguales, respectivamente, a 0.7979 y 0.6745 veces la desviación estándar.

## DISPERSIÓN ABSOLUTA Y RELATIVA; COEFICIENTE DE VARIACIÓN

La variación o dispersión real determinada mediante la desviación estándar u otra medida de dispersión se le conoce como *dispersión absoluta*. Sin embargo, una variación o dispersión de 10 pulgadas (in) en una distancia de 1 000 pies (ft) tiene un significado muy diferente a la misma variación de 10 in en una distancia de 20 ft. Este efecto se puede medir mediante la *dispersión relativa*, que se define como sigue:

$$\text{Dispersión relativa} = \frac{\text{dispersión absoluta}}{\text{promedio}} \quad (14)$$

Si la dispersión absoluta es la desviación estándar  $s$  y el promedio es la media  $\bar{X}$ , entonces a la dispersión relativa se le llama *coeficiente de variación* o *coeficiente de dispersión*; este coeficiente se denota por  $V$  y está dado por

$$\text{Coeficiente de variación } (V) = \frac{s}{\bar{X}} \quad (15)$$

y por lo general se expresa como porcentaje. También hay otras posibilidades (ver problema 4.30).

Obsérvese que el coeficiente de variación es independiente de las unidades que se empleen. Debido a esto, el coeficiente de variación es útil cuando se trata de comparar distribuciones en las que las unidades son diferentes. Una desventaja del coeficiente de variación es que no es útil cuando el valor de  $\bar{X}$  es cercano a cero.

## VARIABLE ESTANDARIZADA; PUNTUACIONES ESTÁNDAR

A la variable que mide la desviación respecto a la media en términos de unidades de desviaciones estándar se le llama *variable estandarizada* y es una cantidad adimensional (es decir, es independiente de las unidades empleadas) y está dada por

$$z = \frac{X - \bar{X}}{s} \quad (16)$$

Si las desviaciones respecto a la media se dan en términos de unidades de desviación estándar, se dice que las desviaciones se expresan en *unidades estándar* o en *puntuaciones estándar*. Las unidades estándar son de gran valor para comparar distribuciones (ver problema 4.31).

## SOFTWARE Y MEDIDAS DE DISPERSIÓN

El software para estadística proporciona diversas medidas de dispersión. Estas medidas de dispersión suelen proporcionarse en estadística descriptiva. EXCEL permite el cálculo de todas las medidas estudiadas en este libro. Aquí se discuten MINITAB y EXCEL y en los problemas resueltos se muestran los resultados que proporcionan otros paquetes.

### EJEMPLO 3

- a) EXCEL proporciona cálculos para varias medidas de dispersión, y en el siguiente ejemplo se ilustran algunas de ellas. En una empresa se hace una encuesta; la pregunta es: ¿cuántos e-mails recibe una persona por semana? Las respuestas dadas por los 75 empleados se muestran en las celdas A1:E15 de la hoja de cálculo de EXCEL.

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 32  | 113 | 70  | 60  | 84  |
| 114 | 31  | 58  | 86  | 102 |
| 113 | 79  | 86  | 24  | 40  |
| 44  | 42  | 54  | 71  | 25  |
| 42  | 116 | 68  | 30  | 63  |
| 121 | 74  | 77  | 77  | 100 |
| 51  | 31  | 61  | 28  | 26  |
| 47  | 54  | 74  | 57  | 35  |
| 77  | 80  | 125 | 105 | 61  |
| 102 | 45  | 115 | 36  | 52  |
| 58  | 24  | 24  | 39  | 40  |
| 95  | 99  | 54  | 35  | 31  |
| 77  | 29  | 69  | 58  | 32  |
| 49  | 118 | 44  | 95  | 65  |
| 71  | 65  | 74  | 122 | 99  |

El rango se obtiene mediante  $=MAX(A1:E15)-MIN(A1:E15)$  o bien  $125 - 24 = 101$ . La desviación media o desviación promedio se obtiene mediante  $= DESVPROM(A1:E15)$  o bien  $24.42$ . El rango semiintercuartil se obtiene mediante la expresión  $=(PERCENTIL(A1:E15,0.75)-(PERCENTIL(A1:E15,0.25))/2$  o bien  $22$ . El rango percentil 10-90 se obtiene mediante  $PERCENTIL(A1:E15,0.9)-PERCENTIL(A1:E15,0.1)$  u  $82.6$ .

La desviación estándar y la varianza se obtienen mediante  $=DESVEST(A1:E15)$ , que es  $29.2563$  y  $=VAR(A1:E15)$ , que es  $855.932$  para muestras, y  $=DESVESTP(A1:E15)$  que es  $29.0606$  y  $=VARP(A1:E15)$ , que es  $844.52$  para poblaciones.

b)

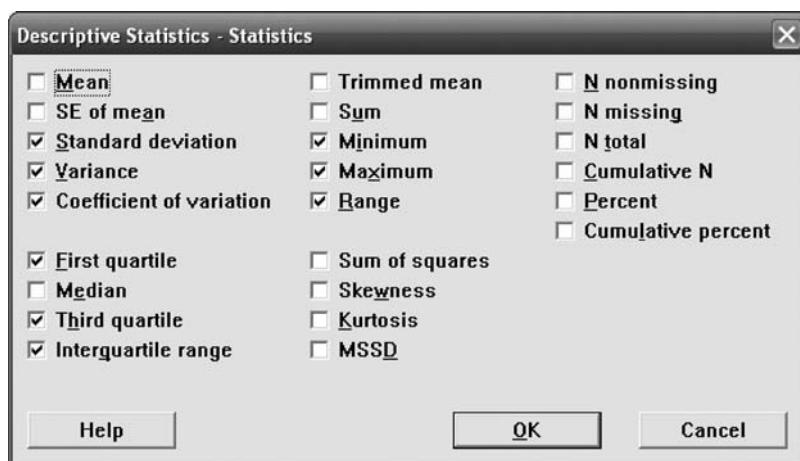


Figura 4-2 Ventana de diálogo de MINITAB.

En la ventana de diálogo de MINITAB, que se presenta en la figura 4-2, se han elegido las medidas de dispersión y de tendencia central. El resultado es el siguiente:

#### Estadística descriptiva: e-mails

| Variable | StDev | Variance | CoefVar | Minimum | Q1    | Q3    | Maximum | Range  | IQR   |
|----------|-------|----------|---------|---------|-------|-------|---------|--------|-------|
| e-mails  | 29.26 | 855.93   | 44.56   | 24.00   | 40.00 | 86.00 | 125.00  | 101.00 | 46.00 |

## PROBLEMAS RESUELTOS

### EL RANGO

- 4.1 Encontrar el rango de los conjuntos: a) 12, 6, 7, 3, 15, 10, 18, 5 y b) 9, 3, 8, 8, 9, 8, 9, 18.

#### SOLUCIÓN

En ambos casos, rango = número mayor – número menor = 18 – 3 = 15. Sin embargo, como se puede ver en las ordenaciones de los conjuntos a) y b),

$$\text{a)} \quad 3, 5, 6, 7, 10, 12, 15, 18 \qquad \text{b)} \quad 3, 8, 8, 8, 9, 9, 9, 18$$

en el conjunto a) hay mucha más variación que en el conjunto b). En efecto, b) consta casi únicamente de ochoes y nueves.

Dado que el rango no indica diferencia alguna entre estos conjuntos, en este caso no es una buena medida de dispersión. Cuando hay valores extremos, el rango no suele ser una buena medida de la dispersión.

Eliminando los valores extremos, 3 y 18, se logra una mejora. Entonces, el rango del conjunto a) es  $(15 - 5) = 10$ , en tanto que el rango del conjunto b) es  $(9 - 8) = 1$ , lo que muestra claramente que en a) hay mayor dispersión que en b). Sin embargo, el rango no ha sido definido de esta manera. El rango semiintercuartil y el rango percentil 10-90 están concebidos para obtener una medida mejor que el rango mediante la eliminación de los valores extremos.

- 4.2 Encontrar el rango de las estaturas de los estudiantes de la universidad XYZ dadas en la tabla 2.1.

**SOLUCIÓN**

Hay dos maneras para definir el rango de datos agrupados.

**Primer método**

$$\begin{aligned}\text{Rango} &= \text{marca de clase de la clase más alta} - \text{marca de clase de la clase más baja} \\ &= 73 - 61 = 12 \text{ in}\end{aligned}$$

**Segundo método**

$$\begin{aligned}\text{Rango} &= \text{frontera superior de la clase más alta} - \text{frontera inferior de la clase más baja} \\ &= 74.5 - 59.5 = 15 \text{ in}\end{aligned}$$

Empleando el primer método se tienden a eliminar, en cierta medida, los valores extremos.

**LA DESVIACIÓN MEDIA**

- 4.3** Encontrar la desviación media de los conjuntos de números del problema 4.1.

**SOLUCIÓN**

- a) La media aritmética es

$$\bar{X} = \frac{12 + 6 + 7 + 3 + 15 + 10 + 18 + 5}{8} = \frac{76}{8} = 9.5$$

La desviación media es

$$\begin{aligned}\text{DM} &= \frac{\sum |X - \bar{X}|}{N} \\ &= \frac{|12 - 9.5| + |6 - 9.5| + |7 - 9.5| + |3 - 9.5| + |15 - 9.5| + |10 - 9.5| + |18 - 9.5| + |5 - 9.5|}{8} \\ &= \frac{2.5 + 3.5 + 2.5 + 6.5 + 5.5 + 0.5 + 8.5 + 4.5}{8} = \frac{34}{8} = 4.25\end{aligned}$$

$$b) \quad \bar{X} = \frac{9 + 3 + 8 + 8 + 9 + 8 + 9 + 18}{8} = \frac{72}{8} = 9$$

$$\begin{aligned}\text{DM} &= \frac{\sum |X - \bar{X}|}{N} \\ &= \frac{|9 - 9| + |3 - 9| + |8 - 9| + |8 - 9| + |9 - 9| + |8 - 9| + |9 - 9| + |18 - 9|}{8} \\ &= \frac{0 + 6 + 1 + 1 + 0 + 1 + 0 + 9}{8} = 2.25\end{aligned}$$

La desviación media indica, como debe ser, que en el conjunto b) hay menos dispersión que en el conjunto a).

- 4.4** Encontrar la desviación media de las estaturas de 100 estudiantes de la universidad XYZ (ver tabla 3.2, problema 3.20).

**SOLUCIÓN**

De acuerdo con el problema 3.20,  $\bar{X} = 67.45$  in. Para facilitar los cálculos, éstos pueden organizarse como en la tabla 4.1. También se puede idear un método de compilación para el cálculo de la desviación media (ver problema 4.47).

Tabla 4.1

| Estaturas (in) | Marcas de clase ( $X$ ) | $ X - \bar{X}  =  X - 67.45 $ | Frecuencia ( $f$ ) | $f X - \bar{X} $               |
|----------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------------|
| 60-62          | 61                      | 6.45                          | 5                  | 32.25                          |
| 63-65          | 64                      | 3.45                          | 18                 | 62.10                          |
| 66-68          | 67                      | 0.45                          | 42                 | 18.90                          |
| 69-71          | 70                      | 2.55                          | 27                 | 68.85                          |
| 72-74          | 73                      | 5.55                          | 8                  | 44.40                          |
|                |                         |                               | $N = \sum f = 100$ | $\sum f X - \bar{X}  = 226.50$ |

$$DM = \frac{\sum f|X - \bar{X}|}{N} = \frac{226.50}{100} = 2.26 \text{ in}$$

- 4.5 Determinar el porcentaje de las estaturas de los estudiantes del problema 4.4 que cae dentro de los rangos *a)  $\bar{X} \pm DM$ , b)  $\bar{X} \pm 2 DM$  y c)  $\bar{X} \pm 3 DM$ .*

### SOLUCIÓN

- a) El rango de 65.19 a 69.71 in es  $\bar{X} \pm DM = 67.45 \pm 2.26$ . Este rango comprende a todos los individuos de la tercera clase  $+\frac{1}{3}(65.5 - 65.19)$  de los estudiantes de la segunda clase  $+\frac{1}{3}(69.71 - 68.5)$  de los estudiantes de la cuarta clase (ya que el tamaño del intervalo de clase es 3 in, la frontera superior de clase de la segunda clase es 65.5 in y la frontera inferior de clase de la cuarta clase es 68.5 in). La cantidad de estudiantes en el rango  $X \pm DM$  es

$$42 + \frac{0.31}{3} (18) + \frac{1.21}{3} (27) = 42 + 1.86 + 10.89 = 54.75 \quad \text{o sea} \quad 55$$

que es 55% del total.

- b) El rango de 62.93 a 71.97 in es  $\bar{X} \pm 2 DM = 67.45 \pm 2(2.26) = 67.45 \pm 4.52$ . El número de estudiantes en el rango  $\bar{X} \pm 2 DM$  es

$$18 - \left( \frac{62.93 - 62.5}{3} \right) (18) + 42 + 27 + \left( \frac{71.97 - 71.5}{3} \right) (8) = 85.67 \quad \text{u} \quad 86$$

que es 86% del total.

- c) El rango de 60.67 a 74.23 in es  $\bar{X} \pm 3 DM = 67.45 \pm 3(2.26) = 67.45 \pm 6.78$ . La cantidad de estudiantes en el rango  $\bar{X} \pm 3 DM$  es

$$5 - \left( \frac{60.67 - 59.5}{3} \right) (5) + 18 + 42 + 27 + \left( \frac{74.5 - 74.23}{3} \right) (8) = 97.33 \quad \text{o sea} \quad 97$$

que es 97% del total.

### EL RANGO SEMIINTERCUARTIL

- 4.6 Encontrar el rango semiintercuartil en la distribución de las estaturas de los estudiantes de la universidad XYZ (ver tabla 4.1 del problema 4.4).

### SOLUCIÓN

El cuartil inferior y el cuartil superior son  $Q_1 = 65.5 + \frac{2}{42}(3) = 65.64$  in y  $Q_3 = 68.5 + \frac{10}{27}(3) = 69.61$  in, respectivamente, y el rango semiintercuartil (o desviación cuartil) es  $Q = \frac{1}{2}(Q_3 - Q_1) = \frac{1}{2}(69.61 - 65.64) = 1.98$  in. Obsérvese que el 50% de los casos se encuentra entre  $Q_1$  y  $Q_3$  (es decir, la estatura de 50 estudiantes está entre 65.64 y 69.61 in).

Se puede considerar que  $\frac{1}{2}(Q_1 + Q_3) = 67.63$  in es una medida de tendencia central (es decir, una altura promedio). Por lo tanto, 50% de las estaturas se encuentra entre  $67.63 \pm 1.98$  in.

- 4.7** Encontrar el rango semiintercuartil de los salarios de 65 empleados de la empresa P&R (ver la tabla 2.5 del problema 2.3).

### SOLUCIÓN

De acuerdo con el problema 3.44,  $Q_1 = \$268.25$  y  $Q_3 = \$290.75$ . Por lo tanto, el rango semiintercuartil es  $Q = \frac{1}{2}(Q_3 - Q_1) = \frac{1}{2}(\$290.75 - \$268.25) = \$11.25$ . Como  $\frac{1}{2}(Q_1 + Q_3) = \$279.50$ , se puede concluir que 50% de los empleados tienen salarios que se encuentran en el rango de  $\$279.50 \pm \$11.25$ .

## EL RANGO PERCENTIL 10-90

- 4.8** Encontrar el rango percentil 10-90 de las estaturas de los estudiantes de la universidad XYZ (ver tabla 2.1).

### SOLUCIÓN

Aquí,  $P_{10} = 62.5 + \frac{5}{18}(3) = 63.33$  in y  $P_{90} = 68.5 + \frac{25}{27}(3) = 71.27$  in. Por lo tanto, el rango percentil 10-90 es  $P_{90} - P_{10} = 71.27 - 63.33 = 7.94$  in. Como  $\frac{1}{2}(P_{10} + P_{90}) = 67.30$  in y  $\frac{1}{2}(P_{90} - P_{10}) = 3.97$  in, se puede concluir que las estaturas de 80% de los estudiantes se encuentra en el rango de  $67.30 \pm 3.97$  in.

## LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR

- 4.9** Encontrar la desviación estándar  $s$  de cada uno de los conjuntos de números del problema 4.1.

### SOLUCIÓN

$$\begin{aligned}
 a) \quad \bar{X} &= \frac{\sum X}{N} = \frac{12 + 6 + 7 + 3 + 15 + 10 + 18 + 5}{8} = \frac{76}{8} = 9.5 \\
 s &= \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{N}} \\
 &= \sqrt{\frac{(12 - 9.5)^2 + (6 - 9.5)^2 + (7 - 9.5)^2 + (3 - 9.5)^2 + (15 - 9.5)^2 + (10 - 9.5)^2 + (18 - 9.5)^2 + (5 - 9.5)^2}{8}} \\
 &= \sqrt{23.75} = 4.87
 \end{aligned}$$
  

$$\begin{aligned}
 b) \quad \bar{X} &= \frac{9 + 3 + 8 + 8 + 9 + 8 + 9 + 18}{8} = \frac{72}{8} = 9 \\
 s &= \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{N}} \\
 &= \sqrt{\frac{(9 - 9)^2 + (3 - 9)^2 + (8 - 9)^2 + (8 - 9)^2 + (9 - 9)^2 + (8 - 9)^2 + (9 - 9)^2 + (18 - 9)^2}{8}} \\
 &= \sqrt{15} = 3.87
 \end{aligned}$$

Comparando los resultados anteriores con los del problema 4.3 se observa que la desviación estándar sí indica que el conjunto *b*) tiene menos dispersión que el conjunto *a*). Sin embargo, este efecto se enmascara por el hecho de que los valores extremos afectan a la desviación estándar mucho que a la desviación media. Esto es de esperar, ya que para calcular la desviación estándar las desviaciones se elevan al cuadrado.

- 4.10** La desviación estándar de los dos conjuntos de datos dados en el problema 4.1 pueden encontrarse con MINITAB. Adelante se presentan los resultados. Comparlos con los obtenidos en el problema 4.9.

```
MTB > print c1
set1
 12      6      7      3      15      10      18      5
MTB > print c2
set2
  9      3      8      8      9      8      9      18
MTB > standard deviation c1
```

#### Columna de desviación estándar

```
Standard deviation of set1 = 5.21
MTB > standard deviation c2
```

#### Columna de desviación estándar

```
Standard deviation of set2 = 4.14
```

### SOLUCIÓN

MINITAB emplea la fórmula

$$s = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

y por lo tanto, en los problemas 4.9 y 4.10 no se obtiene la misma desviación estándar. Las respuestas del problema 4.10 se pueden obtener de las del problema 4.9 multiplicando éstas por  $\sqrt{N/(N - 1)}$ . Como  $N = 8$  para ambos conjuntos,  $\sqrt{N/(N - 1)} = 1.069045$ . Entonces, para el conjunto 1 se tiene  $(1.069045)(4.87) = 5.21$ , que es la desviación estándar dada por MINITAB. De igual manera,  $(1.069045)(3.87) = 4.14$ , que es la desviación estándar dada por MINITAB para el problema 2.

- 4.11** Encuentre la desviación estándar de las estaturas de los 100 estudiantes de la universidad XYZ (ver tabla 2.1).

### SOLUCIÓN

De acuerdo con los problemas 3.15, 3.20 o bien 3.22,  $\bar{X} = 67.45$  in. Los cálculos pueden organizarse como en la tabla 4.2.

$$s = \sqrt{\frac{\sum f(X - \bar{X})^2}{N}} = \sqrt{\frac{852.7500}{100}} = \sqrt{8.5275} = 2.92 \text{ in}$$

Tabla 4.2

| Estaturas (in) | Marcas de clase ( $X$ ) | $X - \bar{X} = X - 67.45$ | $(X - \bar{X})^2$ | Frecuencias ( $f$ ) | $f(X - \bar{X})^2$                 |
|----------------|-------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------|------------------------------------|
| 60-62          | 61                      | -6.45                     | 41.6025           | 5                   | 208.0125                           |
| 63-65          | 64                      | -3.45                     | 11.9025           | 18                  | 214.2450                           |
| 66-68          | 67                      | -0.45                     | 0.2025            | 42                  | 8.5050                             |
| 69-71          | 70                      | 2.55                      | 6.5025            | 27                  | 175.5675                           |
| 72-74          | 73                      | 5.55                      | 30.8025           | 8                   | 246.4200                           |
|                |                         |                           |                   | $N = \sum f = 100$  | $\sum f(X - \bar{X})^2 = 852.7500$ |

## CÁLCULO DE LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR DE DATOS AGRUPADOS

- 4.12** a) Demostrar que

$$s = \sqrt{\frac{\sum X^2}{N} - \left(\frac{\sum X}{N}\right)^2} = \sqrt{\bar{X}^2 - \bar{X}^2}$$

- b) Usar la fórmula del inciso a) para hallar la desviación estándar del conjunto 12, 6, 7, 3, 15, 10, 18, 5.

### SOLUCIÓN

- a) Por definición

$$s = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{N}}$$

$$\begin{aligned} \text{Entonces } s^2 &= \frac{\sum(X - \bar{X})^2}{N} = \frac{\sum(X^2 - 2\bar{X}X + \bar{X}^2)}{N} = \frac{\sum X^2 - 2\bar{X}\sum X + N\bar{X}^2}{N} \\ &= \frac{\sum X^2}{N} - 2\bar{X} \frac{\sum X}{N} + \bar{X}^2 = \frac{\sum X^2}{N} - 2\bar{X}^2 + \bar{X}^2 = \frac{\sum X^2}{N} - \bar{X}^2 \\ &= \bar{X}^2 - \bar{X}^2 = \frac{\sum X^2}{N} - \left(\frac{\sum X}{N}\right)^2 \end{aligned}$$

$$\text{o bien } s = \sqrt{\frac{\sum X^2}{N} - \left(\frac{\sum X}{N}\right)^2} = \sqrt{\bar{X}^2 - \bar{X}^2}$$

Obsérvese que en las sumatorias anteriores se ha usado la forma abreviada, empleando  $X$  en lugar de  $X_j$  y  $\sum$  en lugar de  $\sum_{j=1}^N$ .

### Otro método

$$\begin{aligned} b) \quad s^2 &= \overline{(X - \bar{X})^2} = \overline{X^2 - 2X\bar{X} + \bar{X}^2} = \overline{X^2} - \overline{2X\bar{X}} + \overline{\bar{X}^2} = \overline{X^2} - 2\bar{X}\bar{X} + \bar{X}^2 = \overline{X^2} - \bar{X}^2 \\ &\quad \bar{X}^2 = \frac{\sum X^2}{N} = \frac{(12)^2 + (6)^2 + (7)^2 + (3)^2 + (15)^2 + (10)^2 + (18)^2 + (5)^2}{8} = \frac{912}{8} = 114 \\ &\quad \bar{X} = \frac{\sum X}{N} = \frac{12 + 6 + 7 + 3 + 15 + 10 + 18 + 5}{8} = \frac{76}{8} = 9.5 \end{aligned}$$

$$\text{Por lo tanto } s = \sqrt{\bar{X}^2 - \bar{X}^2} = \sqrt{114 - 90.25} = \sqrt{23.75} = 4.87$$

Compárese este método con el del problema 4.9a).

- 4.13** Modificar la fórmula del problema 4.12a) para introducir las frecuencias que corresponden a los diversos valores de  $X$ .

### SOLUCIÓN

La modificación apropiada es

$$s = \sqrt{\frac{\sum fX^2}{N} - \left(\frac{\sum fX}{N}\right)^2} = \sqrt{\bar{X}^2 - \bar{X}^2}$$

Como en el problema 4.12a), a esta fórmula se puede llegar partiendo de

$$s = \sqrt{\frac{\sum f(X - \bar{X})^2}{N}}$$

Entonces

$$\begin{aligned}
 s^2 &= \frac{\sum f(X - \bar{X})^2}{N} = \frac{\sum f(X^2 - 2\bar{X}X + \bar{X}^2)}{N} = \frac{\sum fX^2 - 2\bar{X}\sum fX + \bar{X}^2 \sum f}{N} \\
 &= \frac{\sum fX^2}{N} - 2\bar{X} \frac{\sum fX}{N} + \bar{X}^2 = \frac{\sum fX^2}{N} - 2\bar{X}^2 + \bar{X}^2 = \frac{\sum fX^2}{N} - \bar{X}^2 \\
 &= \frac{\sum fX^2}{N} - \left( \frac{\sum fX}{N} \right)^2
 \end{aligned}$$

o bien

$$s = \sqrt{\frac{\sum fX^2}{N} - \left( \frac{\sum fX}{N} \right)^2}$$

Obsérvese que la sumatoria anterior se ha usado en forma abreviada, empleando  $X$  y  $f$  en lugar de  $X_j$  y  $f_j$ ,  $\sum$  en lugar de  $\sum_{j=1}^K$  y  $\sum_{j=1}^K f_j = N$ .

- 4.14** Empleando la fórmula del problema 4.13, encontrar la desviación estándar de los datos de la tabla 4.2, problema 4.11.

### SOLUCIÓN

Los cálculos pueden organizarse como en la tabla 4.3, donde  $\bar{X} = (\sum fX)/N = 67.45$  in, según se obtuvo en el problema 3.15. Observar que este método, como el del problema 4.11, conlleva cálculos muy tediosos. En el problema 4.17 se muestra cómo con el método de compilación se simplifican los cálculos enormemente.

Tabla 4.3

| Estaturas (in) | Marcas de clase ( $X$ ) | $X^2$ | Frecuencias ( $f$ ) | $fX^2$                |
|----------------|-------------------------|-------|---------------------|-----------------------|
| 60-62          | 61                      | 3 721 | 5                   | 18 605                |
| 63-65          | 64                      | 4 096 | 18                  | 73 728                |
| 66-68          | 67                      | 4 489 | 42                  | 188 538               |
| 69-71          | 70                      | 4 900 | 27                  | 132 300               |
| 72-74          | 73                      | 5 329 | 8                   | 42 632                |
|                |                         |       |                     | $N = \sum f = 100$    |
|                |                         |       |                     | $\sum fX^2 = 455 803$ |

$$s = \sqrt{\frac{\sum fX^2}{N} - \left( \frac{\sum fX}{N} \right)^2} = \sqrt{\frac{455 803}{100} - (67.45)^2} = \sqrt{8.5275} = 2.92 \text{ in}$$

- 4.15** Si  $d = X - A$  son las desviaciones de  $X$  respecto a una constante arbitraria  $A$ , probar que

$$s = \sqrt{\frac{\sum fd^2}{N} - \left( \frac{\sum fd}{N} \right)^2}$$

### SOLUCIÓN

Como  $d = X - A$ ,  $X = A + d$  y  $\bar{X} = A + \bar{d}$  (ver problema 3.18), entonces

$$X - \bar{X} = (A + d) - (A + \bar{d}) = d - \bar{d}$$

de manera que

$$s = \sqrt{\frac{\sum f(X - \bar{X})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum f(d - \bar{d})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum fd^2}{N} - \left( \frac{\sum fd}{N} \right)^2}$$

de acuerdo con los resultados del problema 4.13 y sustituyendo  $X$  y  $\bar{X}$  en lugar de  $d$  y  $\bar{d}$ , respectivamente.

**Otro método**

$$\begin{aligned}s^2 &= \overline{(X - \bar{X})^2} = \overline{(d - \bar{d})^2} = \overline{d^2 - 2\bar{d}d + \bar{d}^2} \\&= \overline{d^2} - 2\bar{d}^2 + \bar{d}^2 = \overline{d^2} - \bar{d}^2 = \frac{\sum fd^2}{N} - \left(\frac{\sum fd}{N}\right)^2\end{aligned}$$

y la fórmula deseada se obtiene sacando la raíz cuadrada positiva.

- 4.16** Mostrar que si en una distribución de frecuencia en la que todos los intervalos de clase son del mismo tamaño  $c$ , se compila cada marca de clase  $X$  con su valor correspondiente  $u$  de acuerdo con la relación  $X = A + cu$ , donde  $A$  es una marca de clase dada, entonces la desviación estándar se puede expresar como

$$s = c\sqrt{\frac{\sum fu^2}{N} - \left(\frac{\sum fu}{N}\right)^2} = c\sqrt{\overline{u^2} - \bar{u}^2}$$

**SOLUCIÓN**

Esto se deduce inmediatamente del problema 4.15, ya que  $d = X - A = cu$ . Por lo tanto, como  $c$  es una constante,

$$s = \sqrt{\frac{\sum f(cu)^2}{N} - \left(\frac{\sum f(cu)}{N}\right)^2} = \sqrt{c^2 \frac{\sum fu^2}{N} - c^2 \left(\frac{\sum fu}{N}\right)^2} = c\sqrt{\frac{\sum fu^2}{N} - \left(\frac{\sum fu}{N}\right)^2}$$

**Otro método**

Esta fórmula se puede probar también directamente sin usar el problema 4.15. Dado que  $X = A + cu$ ,  $\bar{X} = A + c\bar{u}$  y  $X - \bar{X} = c(u - \bar{u})$ , entonces

$$s^2 = \overline{(X - \bar{X})^2} = \overline{c^2(u - \bar{u})^2} = c^2 \overline{(u^2 - 2\bar{u}u + \bar{u}^2)} = c^2 (\overline{u^2} - 2\bar{u}^2 + \bar{u}^2) = c^2 (\overline{u^2} - \bar{u}^2)$$

y

$$s = c\sqrt{\overline{u^2} - \bar{u}^2} = c\sqrt{\frac{\sum fu^2}{N} - \left(\frac{\sum fu}{N}\right)^2}$$

- 4.17** Encontrar la desviación estándar de las estaturas de los estudiantes de la universidad XYZ (ver la tabla 2.1) empleando: *a)* la fórmula obtenida en el problema 4.15 y *b)* el método de codificación del problema 4.16.

**SOLUCIÓN**

En las tablas 4.4 y 4.5 arbitrariamente se ha elegido  $A$  igual a la marca de clase 67. Obsérvese que en la tabla 4.4 las desviaciones  $d = X - A$  son múltiplos del tamaño del intervalo de clase  $c = 3$ . En la tabla 4.5 se ha eliminado este factor. Esto da como resultado que en la tabla 4.5 los cálculos se simplifican enormemente (en comparación con los de los problemas 4.11 y 4.14). Por esto se recomienda emplear el método de compilación siempre que sea posible.

- a)* Ver la tabla 4.4.

**Tabla 4.4**

| Marcas de clase ( $X$ ) | $d = X - A$ | Frecuencias ( $f$ ) | $fd$           | $fd^2$            |
|-------------------------|-------------|---------------------|----------------|-------------------|
| 61                      | -6          | 5                   | -30            | 180               |
| 64                      | -3          | 18                  | -54            | 162               |
| $A \rightarrow 67$      | 0           | 42                  | 0              | 0                 |
| 70                      | 3           | 27                  | 81             | 243               |
| 73                      | 6           | 8                   | 48             | 288               |
|                         |             | $N = \sum f = 100$  | $\sum fd = 45$ | $\sum fd^2 = 873$ |

$$s = \sqrt{\frac{\sum fd^2}{N} - \left(\frac{\sum fd}{N}\right)^2} = \sqrt{\frac{873}{100} - \left(\frac{45}{100}\right)^2} = \sqrt{8.5275} = 2.92 \text{ in}$$

b) Ver la tabla 4.5

Tabla 4.5

| Marcas de clase ( $X$ ) | $u = \frac{X - A}{c}$ | Frecuencias ( $f$ ) | $fu$           | $fu^2$           |
|-------------------------|-----------------------|---------------------|----------------|------------------|
| 61                      | -2                    | 5                   | -10            | 20               |
| 64                      | -2                    | 18                  | -18            | 18               |
| $A \rightarrow 67$      | 0                     | 42                  | 0              | 0                |
| 70                      | 1                     | 27                  | 27             | 27               |
| 73                      | 2                     | 8                   | 18             | 32               |
|                         |                       | $N = \sum f = 100$  | $\sum fu = 15$ | $\sum fu^2 = 97$ |

$$s = c \sqrt{\frac{\sum fu^2}{N} - \left(\frac{\sum fu}{N}\right)^2} = 3 \sqrt{\frac{97}{100} - \left(\frac{15}{100}\right)^2} = 3\sqrt{0.9475} = 2.92 \text{ in}$$

- 4.18 Empleando el método de compilación, encontrar: a) la media y b) la desviación estándar de la distribución de los salarios de los 65 empleados de la empresa P&R (ver la tabla 2.5 del problema 2.3).

### SOLUCIÓN

Los cálculos se pueden organizar como en la tabla 4.6.

$$a) \quad \bar{X} = A + c\bar{u} = A + c \frac{\sum fu}{N} = \$275.00 + (\$10.00) \left( \frac{31}{65} \right) = \$279.77$$

$$b) \quad s = c\sqrt{u^2 - \bar{u}^2} = c\sqrt{\frac{\sum fu^2}{N} - \left(\frac{\sum fu}{N}\right)^2} = (\$10.00)\sqrt{\frac{173}{65} - \left(\frac{31}{65}\right)^2} = (\$10.00)\sqrt{2.4341} = \$15.60$$

Tabla 4.6

| $X$                    | $u$ | $f$               | $fu$           | $fu^2$            |
|------------------------|-----|-------------------|----------------|-------------------|
| \$255.00               | -2  | 8                 | -16            | 32                |
| 265.00                 | -1  | 10                | -10            | 10                |
| $A \rightarrow 275.00$ | 0   | 16                | 0              | 0                 |
| 285.00                 | 1   | 14                | 14             | 14                |
| 295.00                 | 2   | 10                | 20             | 40                |
| 305.00                 | 3   | 5                 | 15             | 45                |
| 315.00                 | 4   | 2                 | 8              | 32                |
|                        |     | $N = \sum f = 65$ | $\sum fu = 31$ | $\sum fu^2 = 173$ |

- 4.19 La tabla 4.7 muestra el CI de 480 niños de primaria. Empleando el método de compilación, encontrar: a) la media y b) la desviación estándar.

Tabla 4.7

|                         |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Marca des clase ( $X$ ) | 70 | 74 | 78 | 82 | 86 | 90 | 94 | 98 | 102 | 106 | 110 | 114 | 118 | 122 | 126 |
| Frecuencias ( $f$ )     | 4  | 9  | 16 | 28 | 45 | 66 | 85 | 72 | 54  | 38  | 27  | 18  | 11  | 5   | 2   |

**SOLUCIÓN**

El cociente intelectual es

$$CI = \frac{\text{edad mental}}{\text{edad cronológica}}$$

expresado como porcentaje. Por ejemplo, un niño de 8 años que (de acuerdo con ciertos procedimientos educativos) tiene una mentalidad de un niño de 10 años, tendrá un CI de  $10/8 = 1.25 = 125\%$ , o simplemente 125, el signo % se sobreentiende.

Para hallar la media y la desviación estándar de los cocientes intelectuales de la tabla 4.7, se pueden organizar los cálculos como en la tabla 4.8.

$$a) \quad \bar{X} = A + c\bar{u} = A + c \frac{\sum fu}{N} = 94 + 4 \left( \frac{236}{480} \right) = 95.97$$

$$b) \quad s = c \sqrt{u^2 - \bar{u}^2} = c \sqrt{\frac{\sum fu^2}{N} - \left( \frac{\sum fu}{N} \right)^2} = 4 \sqrt{\frac{3\,404}{480} - \left( \frac{236}{480} \right)^2} = 4\sqrt{6.8499} = 10.47$$

**COMPROBACIÓN DE CHARLIER**

- 4.20** Emplear la comprobación de Charlier para verificar los cálculos de: a) la media y b) la desviación estándar realizados en el problema 4.19.

**SOLUCIÓN**

Para hacer la comprobación deseada, a las columnas de la tabla 4.8 se agregan las columnas de la tabla 4.9 (con excepción de la columna 2, que por comodidad se repite en la tabla 4.9).

- a) De acuerdo con la tabla 4.9,  $\sum f(u+1) = 716$ ; de acuerdo con la tabla 4.8,  $\sum fu + N = 236 + 480 = 716$ . Con esto se tiene la comprobación de la media.

Tabla 4.8

| $X$ | $u$ | $f$ | $fu$               | $fu^2$               |
|-----|-----|-----|--------------------|----------------------|
| A → | 70  | -6  | 4                  | -24                  |
|     | 74  | -5  | 9                  | -45                  |
|     | 78  | -4  | 16                 | -64                  |
|     | 82  | -3  | 28                 | -84                  |
|     | 86  | -2  | 45                 | -90                  |
|     | 90  | -1  | 66                 | -66                  |
|     | 94  | 0   | 85                 | 0                    |
|     | 98  | 1   | 72                 | 72                   |
|     | 102 | 2   | 54                 | 108                  |
|     | 106 | 3   | 38                 | 114                  |
|     | 110 | 4   | 27                 | 108                  |
|     | 114 | 5   | 18                 | 90                   |
|     | 118 | 6   | 11                 | 66                   |
|     | 122 | 7   | 5                  | 35                   |
|     | 126 | 8   | 2                  | 16                   |
|     |     |     | $N = \sum f = 480$ | $\sum fu = 236$      |
|     |     |     |                    | $\sum fu^2 = 3\,404$ |

Tabla 4.9

| $u + 1$            | $f$ | $f(u + 1)$            | $f(u + 1)^2$               |
|--------------------|-----|-----------------------|----------------------------|
| -5                 | 4   | -20                   | 100                        |
| -4                 | 9   | -36                   | 144                        |
| -3                 | 16  | -48                   | 144                        |
| -2                 | 28  | -56                   | 112                        |
| -1                 | 45  | -45                   | 45                         |
| 0                  | 66  | 0                     | 0                          |
| 1                  | 85  | 85                    | 85                         |
| 2                  | 72  | 144                   | 288                        |
| 3                  | 54  | 162                   | 486                        |
| 4                  | 38  | 152                   | 608                        |
| 5                  | 27  | 135                   | 675                        |
| 6                  | 18  | 108                   | 648                        |
| 7                  | 11  | 77                    | 539                        |
| 8                  | 5   | 40                    | 320                        |
| 9                  | 2   | 18                    | 162                        |
| $N = \sum f = 480$ |     | $\sum f(u + 1) = 716$ | $\sum f(u + 1)^2 = 4\,356$ |

- b) De acuerdo con la tabla 4.9,  $\sum f(u + 1)^2 = 4\,356$ ; de acuerdo con la tabla 4.8,  $\sum f^2 + 2 \sum fu + N = 3\,404 + 2(236) + 480 = 4\,356$ , con lo que se tiene la comprobación de la desviación estándar.

## CORRECCIÓN DE SHEPPARD PARA LA VARIANZA

- 4.21** Emplee la corrección de Sheppard para determinar la desviación estándar de los datos en: a) el problema 4.17, b) el problema 4.18 y c) el problema 4.19.

### SOLUCIÓN

- a)  $s^2 = 8.5275$  y  $c = 3$ . Varianza corregida =  $s^2 - c^2/12 = 8.5275 - 3^2/12 = 7.7775$ . Desviación estándar corregida =  $\sqrt{\text{varianza corregida}} = \sqrt{7.7775} = 2.79$  in.  
 b)  $s^2 = 243.41$  y  $c = 10$ . Varianza corregida =  $s^2 - c^2/12 = 243.41 - 10^2/12 = 235.08$ . Desviación estándar corregida =  $\sqrt{235.08} = \$15.33$ .  
 c)  $s^2 = 109.60$  y  $c = 4$ . Varianza corregida =  $s^2 - c^2/12 = 109.60 - 4^2/12 = 108.27$ . Desviación estándar corregida =  $\sqrt{108.27} = 10.41$ .

- 4.22** Dada la segunda distribución de frecuencia del problema 2.8, encontrar: a) la media, b) la desviación estándar, c) la desviación estándar usando la corrección de Sheppard y d) la verdadera desviación estándar a partir de los datos no agrupados.

### SOLUCIÓN

Los cálculos se pueden organizar como en la tabla 4.10.

- a) 
$$\bar{X} = A + c\bar{u} = A + c \frac{\sum fu}{N} = 149 + 9 \left( \frac{-9}{40} \right) = 147.0 \text{ lb}$$
  
 b) 
$$s = c\sqrt{\bar{u}^2 - \bar{u}^2} = c\sqrt{\frac{\sum fu^2}{N} - \left( \frac{\sum fu}{N} \right)^2} = 9\sqrt{\frac{95}{40} - \left( \frac{-9}{40} \right)^2} = 9\sqrt{2.324375} = 13.7 \text{ lb}$$
  
 c) Varianza corregida =  $s^2 - c^2/12 = 188.27 - 9^2/12 = 181.52$ . Desviación estándar corregida = 13.5 lb.

Tabla 4.10

| $X$     | $u$ | $f$               | $fu$           | $fu^2$           |
|---------|-----|-------------------|----------------|------------------|
| A → 149 | -3  | 3                 | -9             | 27               |
|         | -2  | 5                 | -10            | 20               |
|         | -1  | 9                 | -9             | 9                |
|         | 0   | 12                | 0              | 0                |
|         | 1   | 5                 | 5              | 5                |
|         | 2   | 4                 | 8              | 16               |
|         | 3   | 2                 | 6              | 18               |
|         |     | $N = \sum f = 40$ | $\sum fu = -9$ | $\sum fu^2 = 95$ |

- d) Para calcular la desviación estándar a partir de los verdaderos pesos de los estudiantes, dados en el problema, conviene primero restarle a cada peso un número adecuado, por ejemplo,  $A = 150$  lb, y después usar el método del problema 4.15. Las desviaciones  $d = X - A = X - 150$  se dan en la tabla siguiente:

|     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| -12 | 14  | 0   | -18 | -6  | -25 | -1  | 7   |
| -4  | 8   | -10 | -3  | -14 | -2  | 2   | -6  |
| 18  | -24 | -12 | 26  | 13  | -31 | 4   | 15  |
| -4  | 23  | -8  | -3  | -15 | 3   | -10 | -15 |
| 11  | -5  | -15 | -8  | 0   | 6   | -5  | -22 |

a partir de las cuales se encuentra que  $\sum d = -128$  y  $\sum d^2 = 7\ 052$ . Entonces

$$s = \sqrt{\bar{d}^2 - \bar{d}^2} = \sqrt{\frac{\sum d^2}{N} - \left(\frac{\sum d}{N}\right)^2} = \sqrt{\frac{7\ 052}{40} - \left(\frac{-128}{40}\right)^2} = \sqrt{166.06} = 12.9 \text{ lb}$$

Por lo tanto, con la corrección de Sheppard, en este caso, se obtiene cierta mejora.

## RELACIONES EMPÍRICAS ENTRE LAS MEDIDAS DE DISPERSIÓN

- 4.23** Dada la distribución de las estaturas de los estudiantes de la universidad XYZ, comentar la validez de las fórmulas empíricas: a) desviación media  $= \frac{4}{5}$ (desviación estándar) y b) rango semiintercuartil  $= \frac{2}{3}$ (desviación estándar).

### SOLUCIÓN

- a) De acuerdo con los problemas 4.4 y 4.11, desviación media  $\div$  desviación estándar  $= 2.26/2.92 = 0.77$ , que es aproximadamente  $\frac{4}{5}$ .
- b) De acuerdo con los problemas 4.6 y 4.11, rango semiintercuartil  $\div$  desviación estándar  $= 1.98/2.92 = 0.68$ , que es aproximadamente  $\frac{2}{3}$ .

Por lo tanto, en este caso las fórmulas empíricas son válidas.

Obsérvese que no se usó la desviación estándar con corrección de Sheppard para agrupamiento, ya que no se hicieron las correcciones correspondientes a la desviación media ni al rango semiintercuartílico.

## PROPIEDADES DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR

- 4.24** En el problema 4.19 determinar el porcentaje de estudiantes cuyo CI cae dentro de los rangos: a)  $\bar{X} \pm s$ , b)  $\bar{X} \pm 2s$  y c)  $\bar{X} \pm 3s$ .

**SOLUCIÓN**

- a) El rango para los CI de 85.5 a 106.4 es  $\bar{X} \pm s = 95.97 \pm 10.47$ . La cantidad de CI en el rango  $\bar{X} \pm s$  es

$$\left(\frac{88 - 85.5}{4}\right)(45) + 66 + 85 + 72 + 54 + \left(\frac{106.4 - 104}{4}\right)(38) = 339$$

El porcentaje de CI en el rango  $\bar{X} \pm s$  es  $339/480 = 70.6\%$ .

- b) El rango de los CI de 75.0 a 116.9 es  $\bar{X} \pm 2s = 95.97 \pm 2(10.47)$ . La cantidad de CI en el rango  $\bar{X} \pm 2s$  es

$$\left(\frac{76 - 75.0}{4}\right)(9) + 16 + 28 + 45 + 66 + 85 + 72 + 54 + 38 + 27 + 18 + \left(\frac{116.9 - 116}{4}\right)(11) = 451$$

El porcentaje de CI en el rango  $\bar{X} \pm 2s$  es  $451/480 = 94.0\%$ .

- c) El rango de los CI de 64.6 a 127.4 es  $\bar{X} \pm 3s = 95.97 \pm 3(10.47)$ . La cantidad de CI en el rango  $\bar{X} \pm 3s$  es

$$480 - \left(\frac{128 - 127.4}{4}\right)(2) = 479.7 \quad \text{o} \quad 480$$

El porcentaje de CI en el rango  $\bar{X} \pm 3s$  es  $479.7/480 = 100\%$ .

Los porcentajes de los incisos a), b) y c) coinciden con los esperados en una distribución normal: 68.27%, 95.45% y 99.73%, respectivamente.

Obsérvese que no se ha usado la corrección de Sheppard para la desviación estándar. Si se usa esta corrección, los resultados, en este caso, coinciden estrechamente con los anteriores. Obsérvese que los resultados anteriores también pueden obtenerse usando la tabla 4.11 del problema 4.32.

- 4.25** Dados los conjuntos 2, 5, 8, 11, 14 y 2, 8, 14, encontrar: a) la media de cada conjunto, b) la varianza de cada conjunto, c) la media de los conjuntos combinados (o conjuntados) y d) la varianza de los conjuntos combinados.

**SOLUCIÓN**

- a) Media del primer conjunto  $= \frac{1}{5}(2 + 5 + 8 + 11 + 14) = 8$ . Media del segundo conjunto  $= \frac{1}{3}(2 + 8 + 14) = 8$ .  
b) Varianza del primer conjunto  $= s_1^2 = \frac{1}{5}[(2 - 8)^2 + (5 - 8)^2 + (8 - 8)^2 + (11 - 8)^2 + (14 - 8)^2] = 18$ . Varianza del segundo conjunto  $= s_2^2 = \frac{1}{3}[(2 - 8)^2 + (8 - 8)^2 + (14 - 8)^2] = 24$ .  
c) La media de los conjuntos combinados es

$$\frac{2 + 5 + 8 + 11 + 14 + 2 + 8 + 14}{5 + 3} = 8$$

- d) La varianza de los conjuntos combinados es

$$s^2 = \frac{(2 - 8)^2 + (5 - 8)^2 + (8 - 8)^2 + (11 - 8)^2 + (14 - 8)^2 + (2 - 8)^2 + (8 - 8)^2 + (14 - 8)^2}{5 + 3} = 20.25$$

**Otro método** (mediante fórmula)

$$s^2 = \frac{N_1 s_1^2 + N_2 s_2^2}{N_1 + N_2} = \frac{(5)(18) + (3)(24)}{5 + 3} = 20.25$$

- 4.26** Resolver el problema 4.25 con los conjuntos 2, 5, 8, 11, 14 y 10, 16, 22.

### SOLUCIÓN

Aquí las medias de los dos conjuntos son 8 y 16, respectivamente, en tanto que las varianzas son las *mismas* que las varianzas en el problema anterior, a saber:  $s_1^2 = 18$  y  $s_2^2 = 24$ .

$$\text{Media de los conjuntos combinados} = \frac{2 + 5 + 8 + 11 + 14 + 10 + 16 + 22}{5 + 3} = 11$$

$$s^2 = \frac{(2 - 11)^2 + (5 - 11)^2 + (8 - 11)^2 + (11 - 11)^2 + (14 - 11)^2 + (10 - 11)^2 + (16 - 11)^2 + (22 - 11)^2}{5 + 3} \\ = 35.25$$

Obsérvese que la fórmula

$$s^2 = \frac{N_1 s_1^2 + N_2 s_2^2}{N_1 + N_2}$$

con la que se obtiene el valor 20.25, *no* es aplicable en este caso, ya que las medias de los dos conjuntos *no* son iguales.

- 4.27** a) Probar que  $w^2 + pw + q$ , donde  $p$  y  $q$  son constantes dadas, es mínimo si y sólo si  $w = -\frac{1}{2}p$ .  
 b) Empleando el inciso a), probar que

$$\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - a)^2}{N} \quad \text{o brevemente} \quad \frac{\sum(X - a)^2}{N}$$

es mínimo si y sólo si  $a = \bar{X}$ .

### SOLUCIÓN

- a) Se tiene  $w^2 + pw + q = (w + \frac{1}{2}p)^2 + q - \frac{1}{4}p^2$ . Como  $(q - \frac{1}{4}p^2)$  es constante, esta expresión tiene su mínimo valor si y sólo si  $w + \frac{1}{2}p = 0$  (es decir,  $w = -\frac{1}{2}p$ ).

$$b) \quad \frac{\sum(X - a)^2}{N} = \frac{\sum(X^2 - 2aX + a^2)}{N} = \frac{\sum X^2 - 2a \sum X + Na^2}{N} = a^2 - 2a \frac{\sum X}{N} + \frac{\sum X^2}{N}$$

Comparando esta última expresión con  $(w^2 + pw + q)$ , se tiene

$$w = a \quad p = -2 \frac{\sum X}{N} \quad q = \frac{\sum X^2}{N}$$

Por lo tanto, la expresión tiene un mínimo en  $a = -\frac{1}{2}p = (\sum X)/N = \bar{X}$ , empleando el resultado del inciso a).

## DISPERSIÓN ABSOLUTA Y RELATIVA; COEFICIENTE DE VARIACIÓN

- 4.28** Un fabricante de cinescopios produce dos tipos de cinescopios, A y B. La vida media de los cinescopios es, respectivamente,  $\bar{X}_A = 1495$  horas y  $\bar{X}_B = 1875$  horas, y las desviaciones estándar son  $s_A = 280$  horas y  $s_B = 310$  horas. ¿Cuál de los cinescopios tiene: a) la mayor dispersión absoluta y b) la mayor dispersión relativa?

**SOLUCIÓN**

- a) La dispersión absoluta de  $A$  es  $s_A = 280$  horas y la de  $B$  es  $s_B = 310$  horas. Por lo tanto, en los cinescopios  $B$  hay mayor dispersión absoluta.  
b) Los coeficientes de variación son

$$A = \frac{s_A}{\bar{X}_A} = \frac{280}{1495} = 18.7\% \quad B = \frac{s_B}{\bar{X}_B} = \frac{310}{1875} = 16.5\%$$

Por lo tanto, los cinescopios  $A$  tienen mayor variación relativa o dispersión.

- 4.29** Encontrar el coeficiente de variación,  $V$ , de los datos: a) del problema 4.14 y b) del problema 4.18, empleando la desviación estándar corregida y la desviación estándar no corregida.

**SOLUCIÓN**

$$\begin{aligned} a) \quad V(\text{no corregida}) &= \frac{s(\text{no corregida})}{\bar{X}} = \frac{2.92}{67.45} = 0.0433 = 4.3\% \\ &V(\text{corregida}) = \frac{s(\text{corregida})}{\bar{X}} = \frac{2.79}{67.45} = 0.0413 = 4.1\% \quad \text{de acuerdo con el problema 4.21a)} \\ b) \quad V(\text{no corregida}) &= \frac{s(\text{no corregida})}{\bar{X}} = \frac{15.60}{79.77} = 0.196 = 19.6\% \\ &V(\text{corregida}) = \frac{s(\text{corregida})}{\bar{X}} = \frac{15.33}{79.77} = 0.192 = 19.2\% \quad \text{de acuerdo con el problema 4.21b)} \end{aligned}$$

- 4.30** a) Definir una medida de dispersión relativa que pueda emplearse para un conjunto de datos en el que se conocen los cuartiles.  
b) Ilustrar el cálculo de la medida definida en el inciso a) aplicándolo a los datos del problema 4.6.

**SOLUCIÓN**

- a) Si para un conjunto de datos, se dan los cuartiles  $Q_1$  y  $Q_3$ , entonces  $\frac{1}{2}(Q_3 - Q_1)$  es una medida de tendencia central de los datos o promedio, en tanto que  $Q = \frac{1}{2}(Q_3 - Q_1)$ , el rango semiintercuartil, es una medida de dispersión de los datos. De manera que una medida de dispersión relativa se puede definir de la siguiente manera.

$$V_Q = \frac{\frac{1}{2}(Q_3 - Q_1)}{\frac{1}{2}(Q_3 + Q_1)} = \frac{Q_3 - Q_1}{Q_3 + Q_1}$$

a la que se le llama *coeficiente de variación cuartil* o *coeficiente cuartil de dispersión relativa*.

$$b) \quad V_Q = \frac{Q_3 - Q_1}{Q_3 + Q_1} = \frac{69.61 - 65.64}{69.61 + 65.64} = \frac{3.97}{135.25} = 0.0293 = 2.9\%$$

**VARIABLES ESTANDARIZADAS; PUNTUACIONES ESTÁNDAR**

- 4.31** En el examen final de matemáticas en el que la media es 76 y la desviación estándar es 10, un alumno obtiene una calificación de 84. En el examen final de física, en el que la media es 82 y la desviación estándar es 16, el mismo alumno obtiene como puntuación 90. ¿En qué materia tiene una posición relativa más alta?

**SOLUCIÓN**

La variable estandarizada  $z = (X - \bar{X})/s$  mide la desviación de  $X$  respecto a la media  $\bar{X}$  en términos de desviaciones estándar  $s$ . En matemáticas,  $z = (84 - 76)/10 = 0.8$ , y en física  $z = (90 - 82)/16 = 0.5$ . Por lo tanto, la calificación de este estudiante en matemáticas se encuentra a 0.8 de una desviación estándar sobre la media, en cambio la puntuación en física se encuentra a sólo 0.5 de una desviación estándar sobre la media. Por lo tanto, en matemáticas obtuvo una posición relativa más alta.

La variable  $z = (X - \bar{X})/s$  suele emplearse para las calificaciones de los exámenes de conocimientos, en donde se denomina *calificación estándar*.

## SOFTWARE Y MEDIDAS DE DISPERSIÓN

**4.32** El análisis hecho con STATISTIX de los datos del ejemplo 3 de este capítulo da los resultados siguientes:

Statistix 8.0

### Descriptive Statistics

| Variable | SD     | Variance | C.V.   | MAD    |
|----------|--------|----------|--------|--------|
| e-mails  | 29.256 | 855.93   | 44.562 | 21.000 |

El valor MAD es la *desviación mediana absoluta*. Se trata del valor mediano de las diferencias absolutas entre cada uno de los valores y la mediana muestral. Verificar que el valor MAD de estos datos es 21.

## SOLUCIÓN

Los datos ordenados de menor a mayor son:

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 24  | 24  | 24  | 25  | 26  | 28  | 29  | 30  | 31  | 31  | 31  | 32  | 32  |
| 35  | 35  | 36  | 39  | 40  | 40  | 42  | 42  | 44  | 44  | 45  | 47  | 49  |
| 51  | 52  | 54  | 54  | 54  | 57  | 58  | 58  | 58  | 60  | 61  | 61  | 63  |
| 65  | 65  | 68  | 69  | 70  | 71  | 71  | 74  | 74  | 74  | 77  | 77  | 77  |
| 77  | 79  | 80  | 84  | 86  | 86  | 95  | 95  | 99  | 99  | 100 | 102 | 102 |
| 105 | 113 | 113 | 114 | 115 | 116 | 118 | 121 | 122 | 125 |     |     |     |

La mediana de los datos originales es 61.

Si a cada dato se le resta 61, se obtiene:

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| -37 | -37 | -37 | -36 | -35 | -33 | -32 | -31 | -30 | -30 | -30 | -29 | -29 |
| -26 | -26 | -25 | -22 | -21 | -21 | -19 | -19 | -17 | -17 | -16 | -14 | -12 |
| -10 | -9  | -7  | -7  | -7  | -4  | -3  | -3  | -3  | -1  | 0   | 0   | 2   |
| 4   | 4   | 7   | 8   | 9   | 10  | 10  | 13  | 13  | 13  | 16  | 16  | 16  |
| 16  | 18  | 19  | 23  | 25  | 25  | 34  | 34  | 38  | 38  | 39  | 41  | 41  |
| 44  | 52  | 52  | 53  | 54  | 55  | 57  | 60  | 61  | 64  |     |     |     |

Ahora se toma el valor absoluto de estos datos:

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 37 | 37 | 37 | 36 | 35 | 33 | 32 | 31 | 30 | 30 | 30 | 29 | 29 | 26 | 26 |
| 25 | 22 | 21 | 21 | 19 | 19 | 17 | 17 | 16 | 14 | 12 | 10 | 9  | 7  | 7  |
| 7  | 4  | 3  | 3  | 3  | 1  | 0  | 0  | 2  | 4  | 4  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| 10 | 13 | 13 | 13 | 16 | 16 | 16 | 16 | 18 | 19 | 23 | 25 | 25 | 34 | 34 |
| 38 | 38 | 39 | 41 | 41 | 44 | 52 | 52 | 53 | 54 | 55 | 57 | 60 | 61 | 64 |

La mediana de este último conjunto es 21. Por lo tanto,  $MAD = 21$ .

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### RANGO

- 4.33** Encontrar el rango de los conjuntos: *a)* 5, 3, 8, 4, 7, 6, 12, 4, 3 y *b)* 8.772, 6.453, 10.624, 8.628, 9.434, 6.351.
- 4.34** Encontrar el rango de las cargas máximas dadas en la tabla 3.8 del problema 3.59.
- 4.35** Encontrar el rango de los diámetros de remaches dados en la tabla 3.10 del problema 3.61.
- 4.36** En 50 medidas, la mayor es de 8.34 kilogramos (kg). Si el rango es 0.46 kg, encontrar la medida menor.
- 4.37** En la tabla siguiente se dan las semanas que necesitaron 25 trabajadores, que perdieron su trabajo por reducción de personal en sus empresas, para encontrar un nuevo empleo. Encontrar el rango de estos datos.

|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| 13 | 13 | 17 | 7  | 22 |
| 22 | 26 | 17 | 13 | 14 |
| 16 | 7  | 6  | 18 | 20 |
| 10 | 17 | 11 | 10 | 15 |
| 16 | 8  | 16 | 21 | 11 |

### DESVIACIÓN MEDIA

- 4.38** Encontrar el valor absoluto de: *a)*  $-18.2$ , *b)*  $+3.58$ , *c)*  $6.21$ , *d)*  $0$ , *e)*  $-\sqrt{2}$  y *f)*  $4.00 - 2.36 - 3.52$ .
- 4.39** Encontrar la desviación media de los conjuntos: *a)* 3, 7, 9, 5 y *b)* 2.4, 1.6, 3.8, 4.1, 3.4.
- 4.40** Encontrar a desviación media de los conjuntos de números del problema 4.33.
- 4.41** Encontrar la desviación media de las cargas máximas dadas en la tabla 3.8 del problema 3.59.
- 4.42** *a)* Encontrar la desviación media (DM) de los diámetros de los remaches de la tabla 3.10 del problema 3.61.  
*b)* ¿Qué porcentaje de los diámetros de los remaches está entre  $(\bar{X} \pm DM)$ ,  $(\bar{X} \pm 2 DM)$  y  $(\bar{X} = 3 DM)$ ?
- 4.43** En el conjunto 8, 10, 9, 12, 4, 8, 2, encontrar la desviación media: *a)* respecto a la media y *b)* respecto a la mediana. Verificar que la desviación media respecto a la mediana no es mayor que la desviación media respecto a la media.
- 4.44** En la distribución dada en la tabla 3.9 del problema 3.60, encontrar la desviación media: *a)* respecto a la media y *b)* respecto a la mediana. Emplear los resultados de los problemas 3.60 y 3.70.
- 4.45** En la distribución dada en la tabla 3.11 del problema 3.62, encontrar la desviación media: *a)* respecto a la media y *b)* respecto a la mediana. Emplear los resultados de los problemas 3.62 y 3.72.

- 4.46** Encontrar la desviación media de los datos dados en el problema 4.37.
- 4.47** Deducir fórmulas de compilación para el cálculo de la desviación media: *a)* respecto a la media y *b)* respecto a la mediana a partir de una distribución de frecuencias. Emplear estas fórmulas para verificar los resultados obtenidos en los problemas 4.44 y 4.45.

### EL RANGO SEMIINTERCUARTIL

- 4.48** Encontrar el rango semiintercuartil en las distribuciones: *a)* del problema 3.59, *b)* del problema 3.60 y *c)* del problema 3.107. En cada caso interpretar los resultados claramente.
- 4.49** Encontrar el rango semiintercuartil de los datos dados en el problema 4.37.
- 4.50** Probar que en cualquier distribución de frecuencias, el porcentaje de casos que cae en el intervalo  $\frac{1}{2}(Q_1 + Q_3) \pm \frac{1}{2}(Q_3 - Q_1)$  es el 50%. ¿Ocurre lo mismo en el intervalo  $Q_2 \pm \frac{1}{2}(Q_3 - Q_1)$ ? Explicar la respuesta.
- 4.51** *a)* ¿Cómo se graficaría el rango semiintercuartil correspondiente a una distribución de frecuencias dada?  
*b)* ¿Qué relación hay entre el rango semiintercuartil y la ojiva de una distribución?

### EL RANGO PERCENTIL 10-90

- 4.52** Encontrar el rango percentil 10-90 en las distribuciones: *a)* del problema 3.59 y *b)* del problema 3.107. En cada caso interpretar los resultados claramente.
- 4.53** El décimo percentil de los precios de venta de las casas en determinada ciudad es \$35 500 y el nonagésimo percentil de los precios de venta de las casas en la misma ciudad es \$225 000. Encontrar el rango percentil 10-90 y dar un rango en el que caiga el 80% de los precios de venta.
- 4.54** ¿Qué ventajas o desventajas tiene un rango percentil 20-80 en comparación con un rango percentil 10-90?
- 4.55** Contestar el problema 4.51 en relación: *a)* con el rango percentil 10-90, *b)* con el rango percentil 20-80 y *c)* el rango percentil 25-75. ¿Cuál es la relación entre *c)* y el rango semiintercuartil?

### LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR

- 4.56** Encontrar la desviación estándar de los conjuntos: *a)* 3, 6, 2, 1, 7, 5; *b)* 3.2, 4.6, 2.8, 5.2, 4.4, y *c)* 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1.
- 4.57** *a)* Sumando 5 a cada uno de los números del conjunto 3, 6, 2, 1, 7, 5 se obtiene el conjunto 8, 11, 7, 6, 12, 10. Mostrar que los dos conjuntos tienen la misma desviación estándar pero diferentes medias. ¿Qué relación hay entre las medias?  
*b)* Si cada uno de los números del conjunto 3, 6, 2, 1, 7 y 5 se multiplica por 2 y después se le suma 5, se obtiene el conjunto 11, 17, 9, 7, 19, 15. ¿Qué relación existe entre las medias y las desviaciones estándar de estos dos conjuntos?  
*c)* ¿Qué propiedades de la media y de la desviación estándar se ilustran mediante los conjuntos de números particulares de los incisos *a)* y *b)*?

- 4.58** Encontrar la desviación estándar del conjunto de números de la progresión aritmética 4, 10, 16, 22, ..., 154.
- 4.59** Encontrar la desviación estándar en las distribuciones: *a)* del problema 3.59, *b)* del problema 3.60 y *c)* del problema 3.107,
- 4.60** Ilustrar el uso de la comprobación de Charlier en cada inciso del problema 4.59.
- 4.61** Encontrar: *a)* la media y *b)* la desviación estándar en la distribución del problema 2.17 y explicar el significado de los resultados obtenidos.
- 4.62** Cuando los datos tienen una distribución en forma de campana, la desviación estándar se puede obtener de manera aproximada dividiendo el rango entre 4. Con los datos dados en el problema 4.37, calcular la desviación estándar y compararla con el rango dividido entre 4.
- 4.63** *a)* Encontrar la desviación estándar  $s$  de los diámetros de los remaches dados en la tabla 3.10 del problema 3.61.  
*b)* ¿Qué porcentaje de los diámetros de los remaches se encuentra entre  $\bar{X} \pm s$ ,  $\bar{X} \pm 2s$  y  $\bar{X} \pm 3s$ ?  
*c)* Comparar los porcentajes del inciso *b)* con los que teóricamente se esperan en una distribución normal y explicar cualquier diferencia observada.
- 4.64** Aplicar la corrección de Sheppard a las desviaciones estándar del problema 4.59. En cada caso, comentar si la aplicación de la corrección de Sheppard está o no justificada.
- 4.65** ¿Qué modificaciones ocurren en el problema 4.63 cuando se aplica la corrección de Sheppard?
- 4.66** *a)* Encontrar la media y la desviación estándar de los datos del problema 2.8.  
*b)* Construir una distribución de frecuencia para los datos y encontrar la desviación estándar.  
*c)* Comparar los resultados del inciso *b)* con los del inciso *a)*. Determinar si la aplicación de la corrección de Sheppard produce mejores resultados.
- 4.67** Repetir el problema 4.66 con los datos del problema 2.27.
- 4.68** *a)* De un total de  $N$  números, la fracción  $p$  es de unos y la fracción  $q = 1 - p$  es de ceros. Probar que la desviación estándar de este conjunto de números es  $\sqrt{pq}$ .  
*b)* Aplicar el resultado del inciso *a)* al problema 4.56c).
- 4.69** *a)* Probar que la varianza del conjunto de números  $a, a + d, a + 2d, \dots, a + (n - 1)d$  (es decir, de una progresión aritmética en la que el primer término es  $a$  y la diferencia común es  $d$ ) es  $\frac{1}{12}(n^2 - 1)d^2$ .  
*b)* Emplear el inciso *a)* para el problema 4.58. [Sugerencia: Usar  $1 + 2 + 3 + \dots + (n - 1) = \frac{1}{2}n(n - 1)$ ,  $1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + (n - 1)^2 = \frac{1}{6}n(n - 1)(2n - 1)$ ].
- 4.70** Generalizar y probar la propiedad 3 de este capítulo.

### RELACIONES EMPÍRICAS ENTRE LAS MEDIDAS DE DISPERSIÓN

- 4.71** Comparando las desviaciones estándar obtenidas en el problema 4.59 con las desviaciones medias correspondientes de los problemas 4.41, 4.42 y 4.44, determinar si se cumple la siguiente relación empírica: desviación media =  $\frac{4}{5}$ (desviación estándar). Explicar cualquier diferencia que se presente.

- 4.72** Comparando las desviaciones estándar obtenidas en el problema 4.59 con los correspondientes rangos semiintercuartiles del problema 4.48, determinar si se cumple la siguiente relación empírica: rango semiintercuartil =  $\frac{2}{3}$ (desviación estándar). Explicar cualquier diferencia que se presente.
- 4.73** ¿Qué relación empírica se espera que exista entre el rango semiintercuartil y la desviación media en distribuciones en forma de campana ligeramente sesgadas?
- 4.74** Una distribución de frecuencias que es aproximadamente normal tiene un rango semiintercuartil igual a 10. ¿Qué valor se espera que tenga: *a)* la desviación estándar y *b)* la desviación media?

### DISPERSIÓN ABSOLUTA Y RELATIVA; COEFICIENTE DE VARIACIÓN

- 4.75** En un examen final de estadística, la calificación media en un grupo de 150 alumnos es 78 y la desviación estándar 8.0. En álgebra, la puntuación media final del grupo es 73 y la desviación estándar 7.6. ¿En qué materia hay: *a)* mayor dispersión absoluta y *b)* mayor dispersión relativa?
- 4.76** Encontrar el coeficiente de variación de los datos: *a)* del problema 3.59 y *b)* del problema 3.107.
- 4.77** En las calificaciones obtenidas por los estudiantes en un examen de admisión, el primer cuartil es 825 y el segundo cuartil es 1 125. Calcular el coeficiente cuartil de variación en estas calificaciones del examen da admisión.
- 4.78** En el grupo de edad de 15 a 24 años, el primer cuartil de ingreso familiar es \$16 500 y el tercer cuartil de ingreso familiar, en este mismo grupo de edad, es \$25 000. Calcular el coeficiente cuartil de variación de la distribución de los ingresos en este grupo de edad.

### VARIABLES ESTANDARIZADAS; PUNTUACIONES ESTÁNDAR

- 4.79** En el examen del problema 4.75 la calificación de un estudiante en estadística es 75 y en álgebra 71. ¿En qué examen tiene una puntuación relativa más alta?
- 4.80** Convertir el conjunto 6, 2, 8, 7, 5 en puntuaciones estándar.
- 4.81** Probar que la media y la desviación estándar en un conjunto de puntuaciones estándar son iguales a 0 y 1, respectivamente. Emplear el problema 4.80 para ilustrar esto.
- 4.82** *a)* Convertir las calificaciones del problema 3.107 en puntuaciones estándar y *b)* construir una gráfica de frecuencias relativas contra puntuaciones estándar.

### SOFTWARE Y MEDIDAS DE DISPERSIÓN

- 4.83** En la tabla 4.11 se da el ingreso per cápita en los 50 estados de Estados Unidos, en 2005.

**Tabla 4.11 Ingreso per cápita en los 50 estados de Estados Unidos**

| Estado        | Ingreso per cápita | Estado         | Ingreso per cápita |
|---------------|--------------------|----------------|--------------------|
| Wyoming       | 36 778             | Pennsylvania   | 34 897             |
| Montana       | 29 387             | Wisconsin      | 33 565             |
| North Dakota  | 31 395             | Massachusetts  | 44 289             |
| New Mexico    | 27 664             | Missouri       | 31 899             |
| West Virginia | 27 215             | Idaho          | 28 158             |
| Rhode Island  | 36 153             | Kentucky       | 28 513             |
| Virginia      | 38 390             | Minnesota      | 37 373             |
| South Dakota  | 31 614             | Florida        | 33 219             |
| Alabama       | 29 136             | South Carolina | 28 352             |
| Arkansas      | 26 874             | New York       | 40 507             |
| Maryland      | 41 760             | Indiana        | 31 276             |
| Iowa          | 32 315             | Connecticut    | 47 819             |
| Nebraska      | 33 616             | Ohio           | 32 478             |
| Hawaii        | 34 539             | New Hampshire  | 38 408             |
| Mississippi   | 25 318             | Texas          | 32 462             |
| Vermont       | 33 327             | Oregon         | 32 103             |
| Maine         | 31 252             | New Jersey     | 43 771             |
| Oklahoma      | 29 330             | California     | 37 036             |
| Delaware      | 37 065             | Colorado       | 37 946             |
| Alaska        | 35 612             | North Carolina | 30 553             |
| Tennessee     | 31 107             | Illinois       | 36 120             |
| Kansas        | 32 836             | Michigan       | 33 116             |
| Arizona       | 30 267             | Washington     | 35 409             |
| Nevada        | 35 883             | Georgia        | 31 121             |
| Utah          | 28 061             | Louisiana      | 24 820             |

El análisis de estos datos obtenido con SPSS es el siguiente:

#### **Estadística descriptiva**

|            | N  | Rango     | Desviación estándar | Varianza |
|------------|----|-----------|---------------------|----------|
| Ingresos   | 50 | 22 999.00 | 4 893.54160         | 2E+007   |
| N validado | 50 |           |                     |          |

Verificar el rango, la desviación estándar y la varianza.

# MOMENTOS, SESGO Y CURTOSIS

# 5

## MOMENTOS

Dados  $N$  valores  $X_1, X_2, \dots, X_N$  que toma la variable  $X$ , se define la cantidad

$$\bar{X}^r = \frac{X_1^r + X_2^r + \cdots + X_N^r}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j^r}{N} = \frac{\sum X^r}{N} \quad (1)$$

a la que se le llama el  $r$ -ésimo *momento*. El primer momento, en el que  $r = 1$  es la media aritmética  $\bar{X}$ .

El  $r$ -ésimo *momento respecto a la media*  $\bar{X}$  se define como

$$m_r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^r}{N} = \frac{\sum (X - \bar{X})^r}{N} = \frac{\sum d^r}{N} = \frac{\sum (X - \bar{X})^r}{N} \quad (2)$$

Si  $r = 1$ , entonces  $m_1 = 0$  (ver el problema 3.16). Si  $r = 2$ , entonces  $m_2$  es la varianza.

El  $r$ -ésimo *momento respecto a cualquier origen A* se define de la manera siguiente

$$m'_r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - A)^r}{N} = \frac{\sum (X - A)^r}{N} = \frac{\sum d^r}{N} = \frac{\sum (X - A)^r}{N} \quad (3)$$

donde las  $d = X - A$  son las desviaciones de las  $X$  respecto de  $A$ . Si  $A = 0$ , la ecuación (3) se reduce a la ecuación (1). Debido a esto, a la ecuación (1) suele llamársele el  $r$ -ésimo *momento respecto de cero*.

## MOMENTOS PARA DATOS AGRUPADOS

Si  $X_1, X_2, \dots, X_K$  se presentan con frecuencias  $f_1, f_2, \dots, f_K$ , respectivamente, los momentos anteriores están dados por

$$\bar{X}^r = \frac{f_1 X_1^r + f_2 X_2^r + \cdots + f_K X_K^r}{N} = \frac{\sum_{j=1}^K f_j X_j^r}{N} = \frac{\sum f X^r}{N} \quad (4)$$

$$m_r = \frac{\sum_{j=1}^K f_j (X_j - \bar{X})^r}{N} = \frac{\sum f (X - \bar{X})^r}{N} = \overline{(X - \bar{X})^r} \quad (5)$$

$$m'_r = \frac{\sum_{j=1}^K f_j (X_j - A)^r}{N} = \frac{\sum f (X - A)^r}{N} = \overline{(X - A)^r} \quad (6)$$

donde  $N = \sum_{j=1}^K f_j = \sum f$ . Estas fórmulas se emplean para el cálculo de momentos de datos agrupados.

## RELACIONES ENTRE MOMENTOS

Entre los momentos respecto a la media  $m_r$  y los momentos respecto de un origen arbitrario  $m'_r$  existen las relaciones siguientes:

$$\begin{aligned} m_2 &= m'_2 - m'^2_1 \\ m_3 &= m'_3 - 3m'_1 m'_2 + 2m'^3_1 \\ m_4 &= m'_4 - 4m'_1 m'_3 + 6m'^2_1 m'_2 - 3m'^4_1 \end{aligned} \quad (7)$$

etcétera (ver problema 5.5). Obsérvese que  $m'_1 = \bar{X} - A$ .

## CÁLCULO DE MOMENTOS PARA DATOS AGRUPADOS

El método de compilación dado en capítulos anteriores para el cálculo de la media y de la desviación estándar también puede usarse para obtener un método abreviado para el cálculo de los momentos. Este método aprovecha el hecho de que  $X_j = A + cu_j$  (o brevemente,  $X = A + cu$ ), de manera que de acuerdo con la ecuación (6) se tiene

$$m'_r = c^r \frac{\sum f u^r}{N} = c^r \bar{u}^r \quad (8)$$

que puede usarse para hallar  $m_r$  empleando las ecuaciones (7).

## COMPROBACIÓN DE CHARLIER Y CORRECCIÓN DE SHEPPARD

La comprobación de Charlier al calcular momentos mediante el método de compilación emplea las identidades:

$$\begin{aligned} \sum f(u+1) &= \sum f u + N \\ \sum f(u+1)^2 &= \sum f u^2 + 2 \sum f u + N \\ \sum f(u+1)^3 &= \sum f u^3 + 3 \sum f u^2 + 3 \sum f u + N \\ \sum f(u+1)^4 &= \sum f u^4 + 4 \sum f u^3 + 6 \sum f u^2 + 4 \sum f u + N \end{aligned} \quad (9)$$

Las correcciones de Sheppard para momentos son las siguientes:

$$m_2 \text{ corregido} = m_2 - \frac{1}{12} c^2 \quad m_4 \text{ corregido} = m_4 - \frac{1}{2} c^2 m_2 + \frac{7}{240} c^4$$

Los momentos  $m_1$  y  $m_3$  no necesitan corrección.

## MOMENTOS EN FORMA ADIMENSIONAL

Para evitar usar unidades particulares, se definen *momentos adimensionales* respecto de la media:

$$a_r = \frac{m_r}{s^r} = \frac{m_r}{(\sqrt{m_2})^r} = \frac{m_r}{\sqrt{m_2^r}} \quad (10)$$

donde  $s = \sqrt{m_2}$  es la desviación estándar. Como  $m_1 = 0$  y  $m_2 = s^2$ , se tiene  $a_1 = 0$  y  $a_2 = 1$ .

## SESGO

El *sesgo* de una distribución es su grado de asimetría o el grado en el que se aleja de la simetría. Si una curva de frecuencias (polígono de frecuencias suavizado) de una distribución tiene una cola más larga hacia la derecha del máximo central que hacia la izquierda, se dice que la distribución es *sesgada a la derecha*, o que tiene un *sesgo positivo*. Si ocurre lo contrario, se dice que es *sesgada a la izquierda* o que tiene un *sesgo negativo*.

En las distribuciones sesgadas, la media tiende a encontrarse del mismo lado que la cola más larga opuesto al de la moda y que la cola más larga (ver figuras 3-1 y 3-2). Por lo tanto, una medida de la simetría (o sesgo) se obtiene mediante la diferencia: media – moda. Esta medida se puede hacer adimensional dividiendo entre una medida de dispersión, como la desviación estándar, lo que conduce a la definición:

$$\text{Sesgo} = \frac{\text{media} - \text{moda}}{\text{desviación estándar}} = \frac{\bar{X} - \text{moda}}{s} \quad (11)$$

Para evitar el uso de la moda se puede utilizar la fórmula empírica (10) del capítulo 3 y definir

$$\text{Sesgo} = \frac{3(\text{media} - \text{mediana})}{\text{desviación estándar}} = \frac{3(\bar{X} - \text{mediana})}{s} \quad (12)$$

A las ecuaciones (11) y (12) se les llama, respectivamente, *primer coeficiente de sesgo de Pearson* y *segundo coeficiente de sesgo de Pearson*.

Otras medidas del sesgo, que se definen en términos de cuartiles y percentiles, son las siguientes:

$$\text{Coeficiente cuartil de sesgo} = \frac{(Q_3 - Q_2) - (Q_2 - Q_1)}{Q_3 - Q_1} = \frac{Q_3 - 2Q_2 + Q_1}{Q_3 - Q_1} \quad (13)$$

$$\text{Coeficiente de sesgo percentil } 10-90 = \frac{(P_{90} - P_{50}) - (P_{50} - P_{10})}{P_{90} - P_{10}} = \frac{P_{90} - 2P_{50} + P_{10}}{P_{90} - P_{10}} \quad (14)$$

En una importante medida del sesgo se emplea el tercer momento respecto de la media, tal medida expresada en forma adimensional viene dada por:

$$\text{Coeficiente momento de sesgo} = a_3 = \frac{m_3}{s^3} = \frac{m_3}{(\sqrt{m_2})^3} = \frac{m_3}{\sqrt{m_2^3}} \quad (15)$$

Otra medida de sesgo suele darse mediante  $b_1 = a_3^2$ . En las curvas perfectamente simétricas, por ejemplo en la curva normal,  $a_3$  y  $b_1$  son cero.

## CURTOSIS

La *curtosis* indica qué tan puntiaguda es una distribución; esto por lo regular es en relación con la distribución normal. A una distribución que tiene un pico relativamente alto se le llama *leptocúrtica*, en tanto que si es relativamente aplastada se dice *plasticúrtica*. Una distribución normal, que no es ni puntiaguda ni muy aplastada se llama *mesocúrtica*.

En una medida de la curtosis se emplea el cuarto momento respecto de la media, expresada en forma adimensional, esta medida se encuentra dada por:

$$\text{Coeficiente momento de curtosis} = a_4 = \frac{m_4}{s^4} = \frac{m_4}{m_2^2} \quad (16)$$

el cual suele denominarse  $b_2$ . En las distribuciones normales  $b_2 = a_4 = 3$ . A esto se debe que la curtosis suela definirse mediante  $(b_2 - 3)$ , que tiene signo positivo en una distribución leptocúrtica, negativo en una distribución plasticúrtica y cero en las distribuciones normales.

Otra medida de la curtosis se basa tanto en los cuartiles como en los percentiles y está dada por

$$\kappa = \frac{Q}{P_{90} - P_{10}} \quad (17)$$

donde  $Q = \frac{1}{2}(Q_3 - Q_1)$  es el rango semiintercuartil. A  $\kappa$  (letra griega minúscula kappa) se le conoce como *coeficiente percentil de curtosis*; en las distribuciones normales, el valor de  $\kappa$  es 0.263.

## MOMENTOS, SESGO Y CURTOSIS POBLACIONALES

Cuando es necesario distinguir los momentos muestrales, las medidas de sesgo muestrales o las medidas de curtosis muestrales, de las correspondientes medidas de la población de la que es parte la muestra, se acostumbra usar letras del alfabeto latino para las primeras y letras del alfabeto griego para las últimas. Así, si los momentos muestrales se denotan  $m_r$  y  $m'_r$ , los correspondientes momentos poblacionales serán,  $\mu_r$  y  $\mu'_r$  ( $\mu$  es la letra *mu* del alfabeto griego). Como subíndices se emplean siempre letras del alfabeto latino.

De igual manera, si las medidas muestrales de sesgo y curtosis se denotan  $a_3$  y  $a_4$ , respectivamente, los sesgos y las curtosis poblacionales serán  $\alpha_3$  y  $\alpha_4$  ( $\alpha$  es la letra *alfa* del alfabeto griego).

Como ya se dijo en el capítulo 4, la desviación estándar de una muestra y la desviación estándar de una población se denotan  $s$  y  $\sigma$ , respectivamente.

## CÁLCULO DEL SESGO Y DE LA CURTOSIS EMPLEANDO SOFTWARE

El software visto en este libro puede usarse para calcular las medidas de curtosis y de sesgo de datos muestrales. Los datos que se presentan en la tabla 5.1 son muestras de 50 elementos (de tamaño 50) tomadas de distribuciones, una normal, otra sesgada a la derecha, otra sesgada a la izquierda y la última es una distribución uniforme.

Los datos normales son estaturas de mujeres, los datos sesgados a la derecha son edades de casamiento de mujeres, los datos sesgados a la izquierda son edades a las que fallecen las mujeres, y los datos uniformes son cantidades de

**Tabla 5.1**

| Normal |    | Sesgada a la derecha |    | Sesgada a la izquierda |     | Uniforme |      |
|--------|----|----------------------|----|------------------------|-----|----------|------|
| 67     | 69 | 31                   | 40 | 102                    | 87  | 12.1     | 11.6 |
| 70     | 62 | 43                   | 24 | 55                     | 104 | 12.1     | 11.6 |
| 63     | 67 | 30                   | 29 | 70                     | 75  | 12.4     | 12.0 |
| 65     | 59 | 30                   | 24 | 95                     | 80  | 12.1     | 11.6 |
| 68     | 66 | 38                   | 27 | 73                     | 66  | 12.1     | 11.6 |
| 60     | 65 | 26                   | 35 | 79                     | 93  | 12.2     | 11.7 |
| 70     | 63 | 29                   | 33 | 60                     | 90  | 12.2     | 12.3 |
| 64     | 65 | 55                   | 75 | 73                     | 84  | 12.2     | 11.7 |
| 69     | 60 | 46                   | 38 | 89                     | 73  | 11.9     | 11.7 |
| 61     | 67 | 26                   | 34 | 85                     | 98  | 12.2     | 11.7 |
| 66     | 64 | 29                   | 85 | 72                     | 79  | 12.3     | 11.8 |
| 65     | 68 | 57                   | 29 | 92                     | 35  | 12.3     | 12.5 |
| 71     | 61 | 34                   | 40 | 76                     | 71  | 11.7     | 11.8 |
| 62     | 69 | 34                   | 41 | 93                     | 90  | 12.3     | 11.8 |
| 66     | 65 | 36                   | 35 | 76                     | 71  | 12.3     | 11.8 |
| 68     | 62 | 40                   | 26 | 97                     | 63  | 12.4     | 11.9 |
| 64     | 67 | 28                   | 34 | 10                     | 58  | 12.4     | 11.9 |
| 67     | 70 | 26                   | 19 | 70                     | 82  | 12.1     | 11.9 |
| 62     | 64 | 66                   | 23 | 85                     | 72  | 12.4     | 12.2 |
| 66     | 63 | 63                   | 28 | 25                     | 93  | 12.4     | 11.9 |
| 65     | 68 | 30                   | 26 | 83                     | 44  | 12.5     | 12.0 |
| 63     | 64 | 33                   | 31 | 58                     | 65  | 11.8     | 11.9 |
| 66     | 65 | 24                   | 25 | 10                     | 77  | 12.5     | 12.0 |
| 65     | 61 | 35                   | 22 | 92                     | 81  | 12.5     | 12.0 |
| 63     | 66 | 34                   | 28 | 82                     | 77  | 12.5     | 12.0 |

refresco despachadas por una máquina en envases de 12 onzas. En la figura 5-1 se muestra la distribución de cada uno de estos conjuntos de datos muestrales. Las distribuciones de las cuatro muestras se ilustran mediante gráficas de puntos.

Gráficas de puntos de estaturas, edades de casamiento, edades de fallecimiento y llenado de refresco

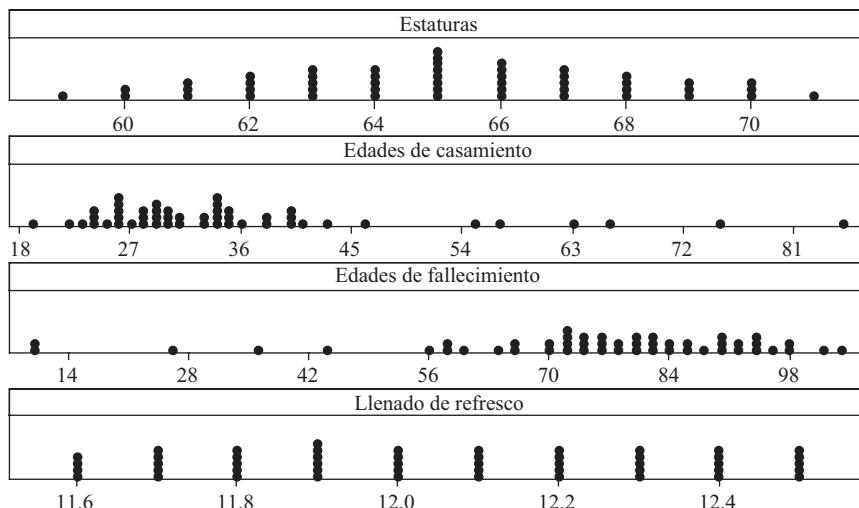


Figura 5-1 MINITAB, gráficas de cuatro distribuciones: normal, sesgada a la derecha, sesgada a la izquierda y uniforme.

En la variable estatura se da la estatura de 50 mujeres adultas, en la variable edad de casamiento se da la edad de casamiento de 50 mujeres, en la variable edad de fallecimiento se da la edad de fallecimiento de 50 mujeres y en la variable llenado de refresco se dan las cantidades de refresco despachadas en recipientes de 12 onzas. Cada muestra tiene 50 elementos (es de tamaño 50). Empleando la terminología aprendida en este capítulo: la distribución de las estaturas es mesocúrtica, la distribución del llenado de refresco es platicúrtica, la distribución de las edades de casamiento es sesgada a la derecha, y la distribución de las edades de fallecimiento es sesgada a la izquierda.

**EJEMPLO 1** Para hallar los valores correspondientes al sesgo y a la curtosis de las cuatro variables puede emplearse MINITAB. Seleccionando la secuencia “Stat ⇒ Basic statistics ⇒ Display descriptive statistics”, se obtiene el siguiente resultado:

Estadísticos descriptivos: estatura, edades de casamiento, edades de fallecimiento y llenado de refresco

| Variable  | N  | N* | Mean   | StDev | Skewness | Kurtosis |
|-----------|----|----|--------|-------|----------|----------|
| Height    | 50 | 0  | 65.120 | 2.911 | -0.02    | -0.61    |
| Wedage    | 50 | 0  | 35.48  | 13.51 | 1.98     | 4.10     |
| Obitage   | 50 | 0  | 74.20  | 20.70 | -1.50    | 2.64     |
| Cola-fill | 50 | 0  | 12.056 | 0.284 | 0.02     | -1.19    |

Como se ve, los valores dados para el sesgo de las distribuciones normal y uniforme son cercanos a 0; el sesgo es positivo para la distribución sesgada a la derecha y negativo para la distribución sesgada a la izquierda.

**EJEMPLO 2** Use EXCEL para hallar los valores de sesgo y curtosis correspondientes a los datos de la figura 5-1. Los nombres de las variables se ingresan en A1:D1, los datos muestrales se ingresan en A2:D51 y en cualquier celda vacía se ingresa =COEFICIENTE.ASIMETRIA(A2:A51) obteniéndose como resultado -0.0203. La función =COEFICIENTE.ASIMETRIA(B2:B51) da como resultado 1.9774, la función =COEFICIENTE.ASIMETRIA(C2:C51) da como resultado -1.4986 y la función =COEFICIENTE.ASIMETRIA(D2:D51) da como resultado 0.0156. Los valores de curtosis se obtienen mediante las funciones =CURTOSIS(A2:A51) que da como resultado -0.6083, =CURTOSIS(B2:B51) que da como resultado 4.0985, =CURTOSIS(C2:C51) que da como resultado 2.6368 y =CURTOSIS(D2:D51) que da como resultado -1.1889. Como puede observarse, EXCEL y MINITAB dan los mismos valores de curtosis y de sesgo.

**EJEMPLO 3** También se puede emplear STATISTIX para analizar los datos de la figura 5-1. Se selecciona la secuencia “Statistics ⇒ Summary Statistics ⇒ Descriptive Statistics” y se obtiene la ventana de diálogo que se muestra en la figura 5-2.

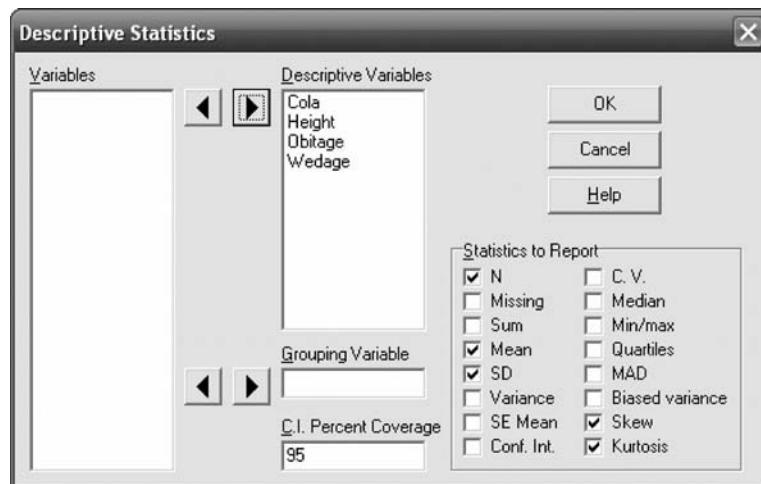


Figura 5-2 Ventana de diálogo de STATISTIX.

Obsérvese que N, Mean (media), SD (desviación estándar), Skew (sesgo) y Kurtosis (curtosis) fueron seleccionados como los estadísticos que se desean conocer. El resultado que se obtiene de STATISTIX es:

#### Estadísticos descriptivos

| Variable | N  | Mean   | SD     | Skew    | Kurtosis |
|----------|----|--------|--------|---------|----------|
| Cola     | 50 | 12.056 | 0.2837 | 0.0151  | -1.1910  |
| Height   | 50 | 65.120 | 2.9112 | -0.0197 | -0.6668  |
| Obitage  | 50 | 74.200 | 20.696 | -1.4533 | 2.2628   |
| Wedge    | 50 | 35.480 | 13.511 | 1.9176  | 3.5823   |

Como los valores numéricos difieren ligeramente de los obtenidos con EXCEL y MINITAB, es claro que este software emplea métodos ligeramente diferentes para medir la curtosis y el sesgo.

**EJEMPLO 4** En SPSS con la secuencia “Analyze ⇒ Descriptive Statistics ⇒ Descriptives” se obtiene la ventana de diálogo que se presenta en la figura 5-3, en la cual se selecciona Mean (media), Std. deviation (desviación estándar), Kurtosis (curtosis) y Skewness (sesgo). SPSS da las mismas medidas de sesgo y curtosis que EXCEL y MINITAB.



Figura 5-3 Ventana de diálogo de SPSS.

SPSS proporciona los siguientes resultados.

#### Estadísticos descriptivos

|             | N           | Media       | Desv. Estándar | Sesgo       |                | Curtosis    |                |
|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
|             | Estadístico | Estadístico | Estadístico    | Estadístico | Error estándar | Estadístico | Error estándar |
| Estatura    | 50          | 65.1200     | 2.91120        | -.020       | .337           | -.608       | .662           |
| Casamientos | 50          | 35.4800     | 13.51075       | 1.977       | .337           | 4.098       | .662           |
| Defunciones | 50          | 74.2000     | 20.69605       | -1.499      | .337           | 2.637       | .662           |
| Llenado     | 50          | 12.0560     | .28368         | .016        | .337           | -1.189      | .662           |
| N validada  | 50          |             |                |             |                |             |                |

**EJEMPLO 5** Si se usa SAS para calcular los valores del sesgo y de la curtosis, se obtienen los resultados que se muestran a continuación. Estos resultados son prácticamente los mismos que se obtienen con EXCEL, MINITAB y SPSS.

```
The MEANS Procedure
Variable      Mean        Std Dev       N      Skewness      Kurtosis
ffffffffff    Height     65.120000   2.9112029  50   -0.0203232  -0.6083437
ffffffffff    Wedage    35.4800000 13.5107516  50   1.9774237   4.0984607
ffffffffff    Obitage   74.2000000 20.6960511  50   -1.4986145   2.6368045
ffffffffff    Cola_fill 12.0560000 0.2836785  50   0.0156088  -1.1889600
ffffffffff
```

## PROBLEMAS RESUELTOS

### MOMENTOS

**5.1** Encontrar: *a)* el primero, *b)* el segundo, *c)* el tercero y *d)* el cuarto momentos del conjunto 2, 3, 7, 8, 10.

#### SOLUCIÓN

*a)* El primer momento o media aritmética es

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} = \frac{2 + 3 + 7 + 8 + 10}{5} = \frac{30}{5} = 6$$

*b)* El segundo momento es

$$\overline{X^2} = \frac{\sum X^2}{N} = \frac{2^2 + 3^2 + 7^2 + 8^2 + 10^2}{5} = \frac{226}{5} = 45.2$$

*c)* El tercer momento es

$$\overline{X^3} = \frac{\sum X^3}{N} = \frac{2^3 + 3^3 + 7^3 + 8^3 + 10^3}{5} = \frac{1890}{5} = 378$$

*d)* El cuarto momento es

$$\overline{X^4} = \frac{\sum X^4}{N} = \frac{2^4 + 3^4 + 7^4 + 8^4 + 10^4}{5} = \frac{16594}{5} = 3318.8$$

- 5.2** Dado el conjunto de números del problema 5.1, encontrar: *a)* el primero, *b)* el segundo, *c)* el tercero y *d)* el cuarto momentos respecto de la media.

### SOLUCIÓN

$$a) \quad m_1 = \overline{(X - \bar{X})} = \frac{\sum (X - \bar{X})}{N} = \frac{(2 - 6) + (3 - 6) + (7 - 6) + (8 - 6) + (10 - 6)}{5} = \frac{0}{5} = 0$$

$m_1$  siempre es igual a cero debido a que  $\overline{X - \bar{X}} = \bar{X} - \bar{X} = 0$  (ver problema 3.16).

$$b) \quad m_2 = \overline{(X - \bar{X})^2} = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N} = \frac{(2 - 6)^2 + (3 - 6)^2 + (7 - 6)^2 + (8 - 6)^2 + (10 - 6)^2}{6} = \frac{46}{5} = 9.2$$

Obsérvese que  $m_2$  es la varianza  $s^2$ .

$$c) \quad m_3 = \overline{(X - \bar{X})^3} = \frac{\sum (X - \bar{X})^3}{N} = \frac{(2 - 6)^3 + (3 - 6)^3 + (7 - 6)^3 + (8 - 6)^3 + (10 - 6)^3}{5} = \frac{-18}{5} = -3.6$$

$$d) \quad m_4 = \overline{(X - \bar{X})^4} = \frac{\sum (X - \bar{X})^4}{N} = \frac{(2 - 6)^4 + (3 - 6)^4 + (7 - 6)^4 + (8 - 6)^4 + (10 - 6)^4}{5} = \frac{610}{5} = 122$$

- 5.3** Para el conjunto de números del problema 5.1, encontrar: *a)* el primero, *b)* el segundo, *c)* el tercero y *d)* el cuarto momentos respecto del origen.

### SOLUCIÓN

$$a) \quad m'_1 = \overline{(X - 4)} = \frac{\sum (X - 4)}{N} = \frac{(2 - 4) + (3 - 4) + (7 - 4) + (8 - 4) + (10 - 4)}{5} = 2$$

$$b) \quad m'_2 = \overline{(X - 4)^2} = \frac{\sum (X - 4)^2}{N} = \frac{(2 - 4)^2 + (3 - 4)^2 + (7 - 4)^2 + (8 - 4)^2 + (10 - 4)^2}{5} = \frac{66}{5} = 13.2$$

$$c) \quad m'_3 = \overline{(X - 4)^3} = \frac{\sum (X - 4)^3}{N} = \frac{(2 - 4)^3 + (3 - 4)^3 + (7 - 4)^3 + (8 - 4)^3 + (10 - 4)^3}{5} = \frac{298}{5} = 59.6$$

$$d) \quad m'_4 = \overline{(X - 4)^4} = \frac{\sum (X - 4)^4}{N} = \frac{(2 - 4)^4 + (3 - 4)^4 + (7 - 4)^4 + (8 - 4)^4 + (10 - 4)^4}{5} = \frac{1\,650}{5} = 330$$

- 5.4** Empleando los resultados de los problemas 5.2 y 5.3, verificar las siguientes relaciones entre los momentos:  
*a)*  $m_2 = m'_2 - m'_1{}^2$ , *b)*  $m_3 = m'_3 - 3m'_1m'_2 + 2m'_1{}^3$  y *c)*  $m_4 = m'_4 - 4m'_1m'_3 + 6m'_1{}^2m'_2 - 3m'_1{}^4$ .

### SOLUCIÓN

De acuerdo con el problema 5.3 se tiene  $m'_1 = 2$ ,  $m'_2 = 13.2$ ,  $m'_3 = 59.6$  y  $m'_4 = 330$ . Por lo tanto:

$$a) \quad m_2 = m'_2 - m'_1{}^2 = 13.2 - (2)^2 = 13.2 - 4 = 9.2$$

$$b) \quad m_3 = m'_3 - 3m'_1m'_2 + 2m'_1{}^3 = 59.6 - (3)(2)(13.2) + 2(2)^3 = 59.6 - 79.2 + 16 = -3.6$$

$$c) \quad m_4 = m'_4 - 4m'_1m'_3 + 6m'_1{}^2m'_2 - 3m'_1{}^4 = 330 - 4(2)(59.6) + 6(2)^2(13.2) - 3(2)^4 = 122$$

lo que coincide con el problema 5.2.

- 5.5** Probar que: *a)*  $m_2 = m'_2 - m'_1{}^2$ , *b)*  $m_3 = m'_3 - 3m'_1m'_2 + 2m'_1{}^3$  y *c)*  $m_4 = m'_4 - 4m'_1m'_3 + 6m'_1{}^2m'_2 - 3m'_1{}^4$ .

### SOLUCIÓN

Si  $d = X - A$ , entonces  $X = A + d$ ,  $\bar{X} = A + \bar{d}$  y  $X - \bar{X} = d - \bar{d}$ , y por lo tanto:

$$a) \quad m_2 = \overline{(X - \bar{X})^2} = \overline{(d - \bar{d})^2} = \overline{d^2 - 2\bar{d}d + \bar{d}^2} \\ = \overline{d^2} - 2\bar{d}\overline{d} + \bar{d}^2 = \overline{d^2} - \bar{d}^2 = m'_2 - m'_1{}^2$$

$$b) \quad m_3 = \overline{(X - \bar{X})^3} = \overline{(d - \bar{d})^3} = \overline{(d^3 - 3d^2\bar{d} + 3d\bar{d}^2 - \bar{d}^3)} \\ = \overline{d^3} - 3\overline{d}\overline{d^2} + 3\overline{d^2}\overline{d} - \overline{d^3} = \overline{d^3} - 3\overline{d}\overline{d^2} + 2\overline{d^3} = m'_3 - 3m'_1m'_2 + 2m'_1{}^3$$

$$c) \quad m_4 = \overline{(X - \bar{X})^4} = \overline{(d - \bar{d})^4} = \overline{(d^4 - 4d^3\bar{d} + 6d^2\bar{d}^2 - 4d\bar{d}^3 + \bar{d}^4)} \\ = \overline{d^4} - 4\overline{d}\overline{d^3} + 6\overline{d^2}\overline{d^2} - 4\overline{d}^4 + \overline{d}^4 = \overline{d^4} - 4\overline{d}\overline{d^3} + 6\overline{d^2}\overline{d^2} - 3\overline{d}^4 \\ = m'_4 - 4m'_1m'_3 + 6m'_1{}^2m'_2 - 3m'_1{}^4$$

Por extensión de este método se pueden deducir fórmulas semejantes para  $m_5, m_6$ , etcétera.

## CÁLCULO DE MOMENTOS PARA DATOS AGRUPADOS

- 5.6** Encuentre los primeros cuatro momentos respecto de la media para la distribución de estaturas del problema 3.22.

### SOLUCIÓN

Para facilitar los cálculos se pueden disponer como en la tabla 5.2, a partir de la cual se tiene

$$m'_1 = c \frac{\sum fu}{N} = (3) \left( \frac{15}{100} \right) = 0.45 \quad m'_3 = c^3 \frac{\sum fu^3}{N} = (3)^3 \left( \frac{33}{100} \right) = 8.91$$

$$m'_2 = c^2 \frac{\sum fu^2}{N} = (3)^2 \left( \frac{97}{100} \right) = 8.73 \quad m'_4 = c^4 \frac{\sum fu^4}{N} = (3)^4 \left( \frac{253}{100} \right) = 204.93$$

Por lo tanto

$$\begin{aligned} m_1 &= 0 \\ m_2 &= m'_2 - m'_1{}^2 = 8.73 - (0.45)^2 = 8.5275 \\ m_3 &= m'_3 - 3m'_1m'_2 + m'_1{}^3 = 8.91 - 3(0.45)(8.73) + 2(0.45)^3 = -2.6932 \\ m_4 &= m'_4 - 4m'_1m'_3 + 6m'_1{}^2m'_2 - 3m'_1{}^4 \\ &= 204.93 - 4(0.45)(8.91) + 6(0.45)^2(8.73) - 3(0.45)^4 = 199.3759 \end{aligned}$$

Tabla 5.2

| X  | u  | f             | fu             | fu <sup>2</sup>  | fu <sup>3</sup>  | fu <sup>4</sup>   |
|----|----|---------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|
| 61 | -2 | 5             | -10            | 20               | -40              | 80                |
| 64 | -1 | 18            | -18            | 18               | -18              | 18                |
| 67 | 0  | 42            | 0              | 0                | 0                | 0                 |
| 70 | 1  | 27            | 27             | 27               | 27               | 27                |
| 73 | 2  | 8             | 16             | 32               | 64               | 128               |
|    |    | $\sum f = 10$ | $\sum fu = 15$ | $\sum fu^2 = 97$ | $\sum fu^3 = 33$ | $\sum fu^4 = 253$ |

- 5.7** Encontrar: a)  $m'_1$ , b)  $m'_2$ , c)  $m'_3$ , d)  $m'_4$ , e)  $m_1$ , f)  $m_2$ , g)  $m_3$ , h)  $m_4$ , i)  $\bar{X}$ , j)  $s$ , k)  $\bar{X}^2$  y l)  $\bar{X}^3$  para la distribución de la tabla 4.7 del problema 4.19.

### SOLUCIÓN

Para facilitar los cálculos, disponerlos como en la tabla 5.3.

Tabla 5.3

| $X$             | $u$ | $f$                | $fu$            | $fu^2$               | $fu^3$               | $fu^4$                |
|-----------------|-----|--------------------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| $A \rightarrow$ | 70  | -6                 | 4               | -24                  | 144                  | -864                  |
|                 | 74  | -5                 | 9               | -45                  | 225                  | -1 125                |
|                 | 78  | -4                 | 16              | -64                  | 256                  | -1 024                |
|                 | 82  | -3                 | 28              | -84                  | 252                  | -756                  |
|                 | 86  | -2                 | 45              | -90                  | 180                  | -360                  |
|                 | 90  | -1                 | 66              | -66                  | 66                   | -66                   |
|                 | 94  | 0                  | 85              | 0                    | 0                    | 0                     |
|                 | 98  | 1                  | 72              | 72                   | 72                   | 72                    |
|                 | 102 | 2                  | 54              | 108                  | 216                  | 432                   |
|                 | 106 | 3                  | 38              | 114                  | 342                  | 1 026                 |
|                 | 110 | 4                  | 27              | 108                  | 432                  | 1 728                 |
|                 | 114 | 5                  | 18              | 90                   | 450                  | 2 250                 |
|                 | 118 | 6                  | 11              | 66                   | 396                  | 2 376                 |
|                 | 122 | 7                  | 5               | 34                   | 245                  | 1 715                 |
|                 | 126 | 8                  | 2               | 16                   | 128                  | 1 024                 |
|                 |     | $N = \sum f = 480$ | $\sum fu = 236$ | $\sum fu^2 = 3\ 404$ | $\sum fu^3 = 6\ 428$ | $\sum fu^4 = 74\ 588$ |

$$a) \quad m'_1 = c \frac{\sum fu}{N} = (4) \left( \frac{236}{480} \right) = 1.9667$$

$$b) \quad m'_2 = c^2 \frac{\sum fu^2}{N} = (4)^2 \left( \frac{3\ 404}{480} \right) = 113.4667$$

$$c) \quad m'_3 = c^3 \frac{\sum fu^3}{N} = (4)^3 \left( \frac{6\ 428}{480} \right) = 857.0667$$

$$d) \quad m'_4 = c^4 \frac{\sum fu^4}{N} = (4)^4 \left( \frac{74\ 588}{480} \right) = 39\ 780.2667$$

$$e) \quad m_1 = 0$$

$$f) \quad m_2 = m'_2 - m'_1{}^2 = 113.4667 - (1.9667)^2 = 109.5988$$

$$g) \quad m_3 = m'_3 - 3m'_1m'_2 + 2m'_1{}^3 = 857.0667 - 3(1.9667)(113.4667) + 2(1.9667)^3 = 202.8158$$

$$h) \quad m_4 = m'_4 - 4m'_1m'_3 + 6m'_1{}^2m'_2 - 3m'_1{}^4 = 35\ 627.2853$$

$$i) \quad \bar{X} = \overline{(A + d)} = A + m'_1 = A + c \frac{\sum fu}{N} = 94 + 1.9667 = 95.97$$

$$j) \quad s = \sqrt{m_2} = \sqrt{109.5988} = 10.47$$

$$k) \quad \overline{X^2} = \overline{(A + d)^2} = \overline{(A^2 + 2Ad + d^2)} = A^2 + 2A\bar{d} + \overline{d^2} = A^2 + 2Am'_1 + m'_2 \\ = (94)^2 + 2(94)(1.9667) + 113.4667 = 9\ 319.2063 \text{ o } 9\ 319 \text{ a cuatro cifras significativas.}$$

$$l) \quad \overline{X^3} = \overline{(A + d)^3} = \overline{(A^3 + 3A^2d + 3Ad^2 + d^3)} = A^3 + 3A^2\bar{d} + 3A\overline{d^2} + \overline{d^3} \\ = A^3 + 3A^2m'_1 + 3Am'_2 + m'_3 = 915\ 571.9597 \text{ o } 915\ 600 \text{ a cuatro cifras significativas.}$$

## COMPROBACIÓN DE CHARLIER

- 5.8** Ilustrar el uso de la comprobación de Charlier en los cálculos del problema 5.7.

### SOLUCIÓN

Para proporcionar la comprobación deseada, a la tabla 5.3 se agregan las columnas de la tabla 5.4 (con excepción de la columna 2, que por comodidad se repite en la tabla 5.3).

En cada uno de los siguientes pares de fórmulas, los datos para la primera se toman de la tabla 5.4 y los datos para la segunda se toman de la tabla 5.2. La igualdad de los resultados en cada par proporciona la comprobación deseada.

**Tabla 5.4**

| $u + 1$ | $f$                | $f(u + 1)$            | $f(u + 1)^2$              | $f(u + 1)^3$               | $f(u + 1)^4$                |
|---------|--------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| -5      | 4                  | -20                   | 100                       | -500                       | 2 500                       |
| -4      | 9                  | -36                   | 144                       | -576                       | 2 304                       |
| -3      | 16                 | -48                   | 144                       | -432                       | 1 296                       |
| -2      | 28                 | -56                   | 112                       | -224                       | 448                         |
| -1      | 45                 | -45                   | 45                        | -45                        | 45                          |
| 0       | 66                 | 0                     | 0                         | 0                          | 0                           |
| 1       | 85                 | 85                    | 85                        | 85                         | 85                          |
| 2       | 72                 | 144                   | 288                       | 576                        | 1 152                       |
| 3       | 54                 | 162                   | 486                       | 1 458                      | 4 374                       |
| 4       | 38                 | 152                   | 608                       | 2 432                      | 9 728                       |
| 5       | 27                 | 135                   | 675                       | 3 375                      | 16 875                      |
| 6       | 18                 | 108                   | 648                       | 3 888                      | 23 328                      |
| 7       | 11                 | 77                    | 539                       | 3 773                      | 26 411                      |
| 8       | 5                  | 40                    | 320                       | 2 560                      | 20 480                      |
| 9       | 2                  | 18                    | 162                       | 1 458                      | 13 122                      |
|         | $N = \sum f = 480$ | $\sum f(u + 1) = 716$ | $\sum f(u + 1)^2 = 4 356$ | $\sum f(u + 1)^3 = 17 828$ | $\sum f(u + 1)^4 = 122 148$ |

$$\sum f(u + 1) = 716$$

$$\sum fu + N = 236 + 480 = 716$$

$$\sum f(u + 1)^2 = 4 356$$

$$\sum fu^2 + 2 \sum fu + N = 3 404 + 2(236) + 480 = 4 356$$

$$\sum f(u + 1)^3 = 17 828$$

$$\sum fu^3 + 3 \sum fu^2 + 3 \sum fu + N = 6 428 + 3(3 404) + 3(236) + 480 = 17 828$$

$$\sum f(u + 1)^4 = 122 148$$

$$\sum fu^4 + 4 \sum fu^3 + 6 \sum fu^2 + 4 \sum fu + N = 74 588 + 4(6 428) + 6(3 404) + 4(236) + 480 = 122 148$$

## CORRECCIONES DE SHEPPARD PARA LOS MOMENTOS

- 5.9** Emplear las correcciones de Sheppard para determinar los momentos respecto de la media para los datos:  
*a)* del problema 5.6 y *b)* del problema 5.7.

**SOLUCIÓN**

a)  $m_2 \text{ corregido} = m_2 - c^2/12 = 8.5275 - 3^2/12 = 7.7775$

$$\begin{aligned}m_4 \text{ corregido} &= m_4 - \frac{1}{2}c^2m_2 + \frac{7}{240}c^4 \\&= 199.3759 - \frac{1}{2}(3)^2(8.5275) + \frac{7}{240}(3)^4 \\&= 163.3646\end{aligned}$$

$m_1$  y  $m_3$  no necesitan correcciones.

b)  $m_2 \text{ corregido} = m_2 - c^2/12 = 109.5988 - 4^2/12 = 108.2655$

$$\begin{aligned}m_4 \text{ corregido} &= m_4 - \frac{1}{2}c^2m_2 + \frac{7}{240}c^4 \\&= 35.627.2853 - \frac{1}{2}(4)^2(109.5988) + \frac{7}{240}(4)^4 \\&= 34.757.9616\end{aligned}$$

**SESGO**

- 5.10** Encontrar: a) el primer coeficiente de sesgo de Pearson y b) el segundo coeficiente de sesgo de Pearson para la distribución de los salarios de los 65 empleados de la empresa P&R (ver los problemas 3.44 y 4.18).

**SOLUCIÓN**

Media = \$279.76, mediana = \$279.06, moda = \$277.50 y desviación estándar  $s = \$15.60$ . Por lo tanto:

a) Primer coeficiente de sesgo =  $\frac{\text{media} - \text{moda}}{s} = \frac{\$279.76 - \$277.50}{\$15.60} = 0.1448$ ; o bien 0.14

b) Segundo coeficiente de sesgo =  $\frac{3(\text{media} - \text{mediana})}{s} = \frac{3(\$279.76 - \$279.06)}{\$15.60} = 0.1346$ ; o bien 0.13

Si se emplea la desviación estándar corregida [ver problema 4.21b)], estos coeficientes se convierten, respectivamente, en:

a)  $\frac{\text{Media} - \text{moda}}{\text{s corregida}} = \frac{\$279.76 - \$277.50}{\$15.33} = 0.1474$ ; o bien 0.15

b)  $\frac{3(\text{media} - \text{mediana})}{\text{s corregida}} = \frac{3(\$279.76 - \$279.06)}{\$15.33} = 0.1370$ ; o bien 0.14

Como los coeficientes son positivos, la distribución tiene sesgo positivo (es decir, a la derecha).

- 5.11** Encontrar los coeficientes: a) cuartil y b) percentil de sesgo para la distribución del problema 5.10 (ver problema 3.44).

**SOLUCIÓN**

$Q_1 = \$268.25$ ,  $Q_2 = P_{50} = \$279.06$ ,  $Q_3 = \$290.75$ ,  $P_{10} = D_1 = \$258.12$ , y  $P_{90} = D_9 = \$301.00$ . Por lo tanto:

a) Coeficiente cuartil de sesgo =  $\frac{Q_3 - 2Q_2 + Q_1}{Q_3 - Q_1} = \frac{\$290.75 - 2(\$279.06) + \$268.25}{\$290.75 - \$268.25} = 0.0391$

b) Coeficiente percentil de sesgo =  $\frac{P_{90} - 2P_{50} + P_{10}}{P_{90} - P_{10}} = \frac{\$301.00 - 2(\$279.06) + \$258.12}{\$301.00 - \$258.12} = 0.0233$

- 5.12** Encontrar el coeficiente momento de sesgo,  $a_3$ , a) en la distribución de las estaturas de los estudiantes de la universidad XYZ (ver problema 5.6) y b) en los CI de los niños de primaria (ver problema 5.7).

**SOLUCIÓN**

a)  $m_2 = s^2 = 8.5275$  y  $m_3 = -2.6932$ . Por lo tanto:

$$a_3 = \frac{m_3}{s^3} = \frac{m_3}{(\sqrt{m_2})^3} = \frac{-2.6932}{(\sqrt{8.5275})^3} = -0.1081 \quad \text{o bien} \quad -0.11$$

Si se emplea la corrección de Sheppard para datos agrupados [ver problema 5.9a)], se tiene

$$a_3 \text{ corregido} = \frac{m_3}{(\sqrt{m_2 \text{ corregido}})^3} = \frac{-2.6932}{(\sqrt{7.7775})^3} = -0.1242 \quad \text{o bien} \quad -0.12$$

b)

$$a_3 = \frac{m_3}{s^3} = \frac{m_3}{(\sqrt{m_2})^3} = \frac{202.8158}{(\sqrt{109.5988})^3} = 0.1768 \quad \text{o bien} \quad 0.18$$

Si se emplea la corrección de Sheppard para datos agrupados [ver problema 5.9b)], se tiene

$$a_3 \text{ corregido} = \frac{m_3}{(\sqrt{m_2 \text{ corregido}})^3} = \frac{202.8158}{(\sqrt{108.2655})^3} = 0.1800 \quad \text{o} \quad 0.18$$

Obsérvese que ambas distribuciones son moderadamente sesgadas, la distribución a) a la izquierda (negativamente) y la distribución b) a la derecha (positivamente). La distribución b) es más sesgada que la distribución a); es decir, a) es más simétrica que b), lo que es evidente dado que el valor numérico (o el valor absoluto) del coeficiente de sesgo para b) es mayor que el valor del coeficiente de sesgo para a).

**CURTOSIS**

**5.13** Encontrar el coeficiente momento de curtosis,  $a_4$ , de los datos: a) del problema 5.6 y b) del problema 5.7.

**SOLUCIÓN**

a)

$$a_4 = \frac{m_4}{s^4} = \frac{m_4}{m_2^2} = \frac{199.3759}{(8.5275)^2} = 2.7418 \quad \text{o bien} \quad 2.74$$

Si se emplean las correcciones de Sheppard [ver problema 5.9a)], entonces

$$a_4 \text{ corregido} = \frac{m_4 \text{ corregido}}{(m_2 \text{ corregido})^2} = \frac{163.36346}{(7.7775)^2} = 2.7007 \quad \text{o bien} \quad 2.70$$

b)

$$a_4 = \frac{m_4}{s^4} = \frac{m_4}{m_2^2} = \frac{35\,627.2853}{(109.5988)^2} = 2.9660 \quad \text{o bien} \quad 2.97$$

Si se emplean las correcciones de Sheppard [ver problema 5.9b)], entonces

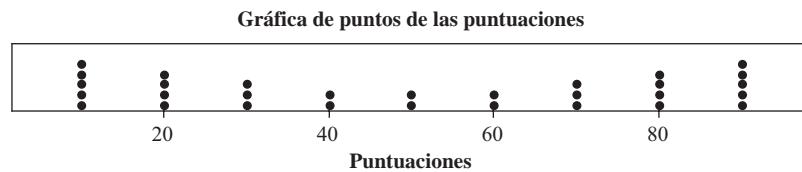
$$a_4 \text{ corregido} = \frac{m_4 \text{ corregido}}{(m_2 \text{ corregido})^2} = \frac{34\,757.9616}{(108.2655)^2} = 2.9653 \quad \text{o bien} \quad 2.97$$

Como en una distribución normal  $a_4 = 3$ , se sigue que ambas distribuciones, a) y b), son *platicúrticas* con respecto a la distribución normal (es decir, menos puntuagudas que la distribución normal).

En lo que se refiere a qué tan puntuagudas son, la distribución b) se aproxima a la distribución normal más que la distribución a). Sin embargo, de acuerdo con el problema 5.12, la distribución a) es más simétrica que la distribución b), de manera que en lo que se refiere a la simetría, a) se aproxima más a una distribución normal que b).

**CÁLCULO DEL SESGO Y DE LA CURTOSIS EMPLEANDO SOFTWARE**

**5.14** Algunas veces las puntuaciones de un examen no siguen una distribución normal, aunque generalmente lo hacen. Algunas veces se observa que los estudiantes obtienen puntuaciones altas o bajas y que hay pocas puntuaciones intermedias. La distribución que se muestra en la figura 5-4 es una de estas distribuciones. Este tipo de distribuciones se conocen como distribuciones en forma de U. Empleando EXCEL, encontrar la media, la desviación estándar, el sesgo y la curtosis de estos datos.



**Figura 5-4** MINITAB, gráfica de puntos con datos que siguen una distribución en forma de U.

## SOLUCIÓN

En una hoja de cálculo de EXCEL se ingresan los datos en A1:A30. El comando “=AVERAGE(A1:A30)” da como resultado 50. El comando “=STDEV(A1:A30)” da como resultado 29.94. El comando “=SKEW(A1:A30)” da como resultado 0. El comando “=KURT(A1:A30)” da como resultado -1.59.

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### MOMENTOS

- 5.15** Encontrar el: *a)* primero, *b)* segundo, *c)* tercero y *d)* cuarto momentos del conjunto 4, 7, 5, 9, 8, 3, 6.
- 5.16** Encontrar el: *a)* primero, *b)* segundo, *c)* tercero y *d)* cuarto momentos respecto de la media para el conjunto de datos del problema 5.15.
- 5.17** Encontrar el: *a)* primero, *b)* segundo, *c)* tercero y *d)* cuarto momentos respecto del número 7 para el conjunto de datos del problema 5.15.
- 5.18** Empleando los resultados de los problemas 5.15 y 5.17, verificar las siguientes relaciones entre los momentos:  
*a)*  $m_2 = m'_2 - m'_1{}^2$ , *b)*  $m_3 = m'_3 - 3m'_1m'_2 + 2m'_1{}^3$  y *c)*  $m_4 = m'_4 - 4m'_1m'_3 + 6m'_1{}^2m'_2 - 3m'_1{}^4$ .
- 5.19** En el conjunto de números de la progresión aritmética 2, 5, 8, 11, 14, 17, encontrar los primeros cuatro momentos respecto de la media.
- 5.20** Probar que: *a)*  $m'_2 = m_2 + h^2$ , *b)*  $m'_3 = m_3 + 3hm_2 + h^3$  y *c)*  $m'_4 = m_4 + 4hm_3 + 6h^2m_2 + h^4$ , donde  $h = m'_1$ .
- 5.21** Si el primer momento respecto del número 2 es igual a 5, ¿cuál es la media?
- 5.22** Si los primeros cuatro momentos respecto del número 3 son -2, 10, -25 y 50, determinar los momentos correspondientes: *a)* respecto de la media, *b)* respecto del número 5 y *c)* respecto del cero.
- 5.23** Para los números 0, 0, 0, 1, 1, 1 y 1, encontrar los primeros cuatro momentos respecto de la media.
- 5.24** *a)* Probar que  $m_5 = m'_5 - 5m'_1m'_4 + 10m'_1{}^2m'_3 - 10m'_1{}^3m'_2 + 4m'_1{}^5$ .  
*b)* Deducir una fórmula similar para  $m_6$ .
- 5.25** De un total de  $N$  números, la fracción  $p$  son unos y la fracción  $q = 1 - p$  son ceros. Encontrar: *a)*  $m_1$ , *b)*  $m_2$ , *c)*  $m_3$  y *d)*  $m_4$  para este conjunto de números. Comparar con el problema 5.23.
- 5.26** Probar que los primeros cuatro momentos respecto de la media en la progresión geométrica  $a, a+d, a+2d, \dots, a+(n-1)d$  son *a)*  $m_1 = 0$ , *b)*  $m_2 = \frac{1}{12}(n^2 - 1)d^2$ , *c)*  $m_3 = 0$  y *d)*  $m_4 = \frac{1}{240}(n^2 - 1)(3n^2 - 7)d^4$ . Comparar con el problema 5.19 (ver también el problema 4.69). [Sugerencia:  $1^4 + 2^4 + 3^4 + \dots + (n-1)^4 = \frac{1}{30}n(n-1)(2n-1)(3n^2 - 3n - 1)$ .]

**MOMENTOS PARA DATOS AGRUPADOS**

- 5.27** Dada la distribución de la tabla 5.5, calcular los cuatro momentos respecto de la media.

**Tabla 5.5**

| $X$ | $f$      |
|-----|----------|
| 12  | 1        |
| 14  | 4        |
| 16  | 6        |
| 18  | 10       |
| 20  | 7        |
| 22  | 2        |
|     | Total 30 |

- 5.28** Ilustrar el uso de la comprobación de Charlier para los cálculos del problema 5.27.
- 5.29** Aplicar las correcciones de Sheppard a los momentos obtenidos en el problema 5.27.
- 5.30** Dada la distribución del problema 3.59, calcular los primeros cuatro momentos respecto de la media: *a)* sin correcciones de Sheppard y *b)* con correcciones de Sheppard.
- 5.31** Dada la distribución del problema 3.62, encontrar *a)*  $m_1$ , *b)*  $m_2$ , *c)*  $m_3$ , *d)*  $m_4$ , *e)*  $\bar{X}$ , *f)*  $s$ , *g)*  $\bar{X^2}$ , *h)*  $\bar{X^3}$ , *i)*  $\bar{X^4}$  y *j)*  $\overline{(X+1)^3}$ .

**SESGO**

- 5.32** Encontrar el coeficiente momento de sesgo,  $a_3$ , para la distribución del problema 5.27: *a)* sin correcciones y *b)* con correcciones de Sheppard.
- 5.33** Encontrar el coeficiente momento de sesgo,  $a_3$ , para la distribución del problema 3.59 (ver problema 5.30).
- 5.34** Los segundos momentos respecto de la media de dos distribuciones son 9 y 16, en tanto que los terceros momentos respecto de la media son -8.1 y -12.8, respectivamente. ¿Qué distribución es más sesgada a la izquierda?
- 5.35** Encontrar los coeficientes de Pearson: *a)* primero y *b)* segundo para la distribución del problema 3.59 y explicar cualquier diferencia que se encuentre.
- 5.36** Encontrar los coeficientes de sesgo: *a)* cuartil y *b)* percentil para la distribución del problema 3.59. Comparar sus resultados con los del problema 5.35 y explicar.
- 5.37** En la tabla 5.6 se dan tres distribuciones diferentes de la variable  $X$ . Las frecuencias de cada una de las tres distribuciones están dadas por  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$ . Encontrar el primero y el segundo coeficientes de sesgo de Pearson de las tres distribuciones. Para calcular los coeficientes, emplear la desviación estándar corregida.

**Tabla 5.6**

| $X$ | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ |
|-----|-------|-------|-------|
| 0   | 10    | 1     | 1     |
| 1   | 5     | 2     | 2     |
| 2   | 2     | 14    | 2     |
| 3   | 2     | 2     | 5     |
| 4   | 1     | 1     | 10    |

## CURTOSIS

- 5.38** Encontrar el coeficiente momento de curtosis,  $a_4$ , para la distribución del problema 5.27: *a)* sin correcciones y *b)* con correcciones de Sheppard.
- 5.39** Encontrar el coeficiente momento de curtosis,  $a_4$ , de la distribución del problema 3.59: *a)* sin correcciones y *b)* con correcciones de Sheppard (ver problema 5.30).
- 5.40** Los cuartos momentos respecto de la media de las dos distribuciones del problema 5.34 son 230 y 780, respectivamente. ¿Qué distribución se aproxima más a una distribución normal desde el punto de vista: *a)* de aplastamiento y *b)* del sesgo?
- 5.41** ¿Cuál de las distribuciones del problema 5.40 es: *a)* leptocúrtica, *b)* mesocúrtica y *c)* platicúrtica?
- 5.42** La desviación estándar de una distribución simétrica es 5. ¿Cuál deberá ser el valor del cuarto momento respecto de la media para que la distribución sea: *a)* leptocúrtica, *b)* mesocúrtica y *c)* platicúrtica?
- 5.43**
- Calcular el coeficiente percentil de curtosis,  $\kappa$ , de la distribución del problema 3.59.
  - Comparar su resultado con el valor teórico 0.263 para una distribución normal, e interpretar.
  - ¿Cómo se puede reconciliar este resultado con el del problema 5.39?

## CÁLCULO DEL SESGO Y DE LA CURTOSIS EMPLEANDO SOFTWARE

- 5.44** Los datos de la figura 5-5 muestran un pronunciado pico en 50. Esto debe mostrarse en la medida de la curtosis de los datos. Empleando EXCEL, mostrar que el sesgo es prácticamente cero y que la curtosis es 2.0134.

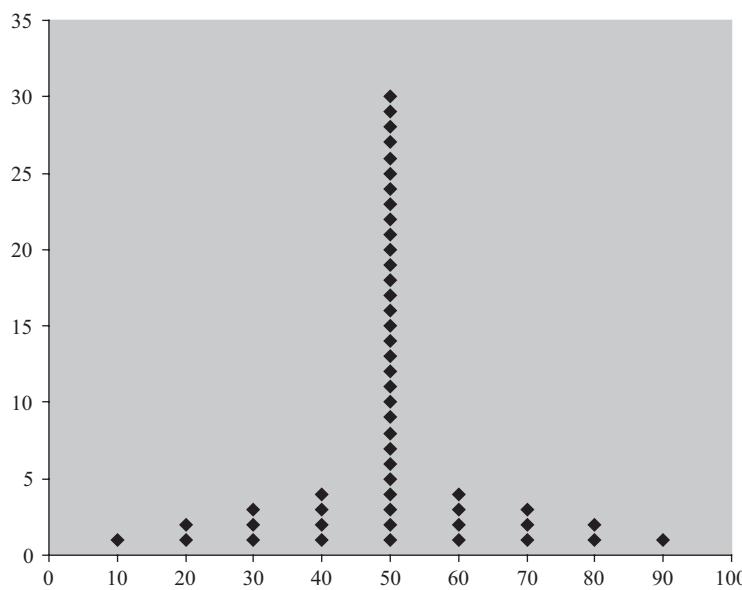


Figura 5-5 EXCEL, gráfica de los datos de puntuaciones de examen.

# TEORÍA ELEMENTAL DE LA PROBABILIDAD

# 6

## DEFINICIONES DE PROBABILIDAD

### Definición clásica

Suponga que un evento  $E$  puede ocurrir en  $h$  de  $n$  maneras igualmente posibles. Entonces la probabilidad de que ocurra el evento (a la que se le llama *éxito*) se denota como

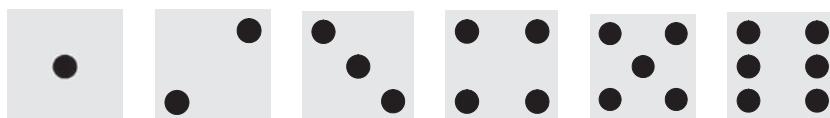
$$p = \Pr\{E\} = \frac{h}{n}$$

La probabilidad de que no ocurra el evento (a la que se le llama *fracaso*) se denota como

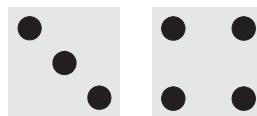
$$q = \Pr\{\text{no } E\} = \frac{n-h}{n} = 1 - \frac{h}{n} = 1 - p = 1 - \Pr\{E\}$$

Por lo tanto,  $p + q = 1$  o bien  $\Pr\{E\} + \Pr\{\text{no } E\} = 1$ . El evento “no  $E$ ” suele denominarse  $\bar{E}$ ,  $\tilde{E}$  o bien  $\sim E$ .

**EJEMPLO 1** Cuando se lanza un dado, éste puede caer de seis maneras distintas.



Un evento  $E$  de que caiga un 3 o un 4 es:



y la probabilidad de  $E$  es  $\Pr\{E\} = 2/6$  o bien  $1/3$ . La probabilidad de no obtener un 3 o un 4 (es decir, la probabilidad de obtener 1, 2, 5 o bien 6) es  $\Pr\{\bar{E}\} = 1 - \Pr\{E\} = 2/3$ .

Obsérvese que la probabilidad de un evento es un número entre 0 y 1. Si el evento no puede ocurrir, su probabilidad es 0. En cambio, si se trata de un evento que tiene que ocurrir (es decir, que es *seguro* que ocurra), su probabilidad es 1.

Si  $p$  es la probabilidad de que ocurra un evento, las *posibilidades u oportunidades* a favor de su ocurrencia son  $p : q$  (que se lee “ $p$  a  $q$ ”); las probabilidades en contra de que ocurra son  $q : p$ . Por lo tanto, las probabilidades en contra de que en un solo lanzamiento de un dado caiga un 3 o un 4 son  $q : p = \frac{2}{3} : \frac{1}{3} = 2 : 1$  (es decir, 2 a 1).

## Definición de frecuencia relativa

La definición clásica de probabilidad tiene la desventaja de que la expresión “igualmente posible” es vaga. Es más, como esta expresión parece ser sinónimo de “igualmente probable”, la definición es *circular*, ya que está definiendo probabilidad en términos de probabilidad. Debido a esto, algunas personas han abogado por una definición estadística de probabilidad. De acuerdo con esto, se considera que la probabilidad estimada o *probabilidad empírica* de un evento es la *frecuencia relativa* de ocurrencia del evento cuando la cantidad de observaciones es muy grande. La probabilidad misma es el *límite* de esta frecuencia relativa a medida que la cantidad de observaciones aumenta de manera indefinida.

**EJEMPLO 2** Si en 1 000 lanzamientos de una moneda se obtienen 529 caras, la frecuencia relativa con la que se obtienen caras es  $529/1\,000 = 0.529$ . Si en otros 1 000 lanzamientos se obtienen 493 caras, la frecuencia relativa en los 2 000 lanzamientos es  $(529 + 493)/2\,000 = 0.511$ . De acuerdo con la definición estadística, cada vez se estaría más cerca de un número que representa la probabilidad de que caiga cara en un lanzamiento de una sola moneda. Según los resultados presentados, este número sería 0.5 a una cifra significativa. Para obtener más cifras significativas se necesitan más observaciones.

La definición estadística, aunque útil en la práctica, tiene dificultades desde el punto de vista matemático, ya que puede ser que no exista un verdadero número límite. Debido a esto, la teoría de probabilidad moderna ha sido desarrollada en forma axiomática; es decir, el concepto de probabilidad se deja sin definir, que es lo mismo que ocurre en la geometría con los conceptos de *punto* y *línea*, que también se dejan sin definir.

## PROBABILIDAD CONDICIONAL; EVENTOS INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

Si  $E_1$  y  $E_2$  son dos eventos, la probabilidad de que ocurra  $E_2$ , dado que  $E_1$  ha ocurrido, se denota  $\Pr\{E_2|E_1\}$  o  $\Pr\{E_2 \text{ dado } E_1\}$  y se conoce como la *probabilidad condicional* de  $E_2$  dado que  $E_1$  ha ocurrido.

Si la ocurrencia o no ocurrencia de  $E_1$  no afecta la probabilidad de ocurrencia de  $E_2$ , entonces  $\Pr\{E_2|E_1\} = \Pr\{E_2\}$  y se dice que  $E_1$  y  $E_2$  son *eventos independientes*, de lo contrario se dice que son *eventos dependientes*.

Si se denota con  $E_1E_2$  el evento de que “tanto  $E_1$  como  $E_2$  ocurran”, evento al que suele llamarse *evento compuesto*, entonces

$$\Pr\{E_1E_2\} = \Pr\{E_1\} \Pr\{E_2|E_1\} \quad (1)$$

En particular,

$$\Pr\{E_1E_2\} = \Pr\{E_1\} \Pr\{E_2\} \quad \text{para eventos independientes} \quad (2)$$

Para tres eventos  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$ , tenemos

$$\Pr\{E_1E_2E_3\} = \Pr\{E_1\} \Pr\{E_2|E_1\} \Pr\{E_3|E_1E_2\} \quad (3)$$

Es decir, la probabilidad de que ocurra  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$  es igual a (la probabilidad de  $E_1$ )  $\times$  (la probabilidad de  $E_2$  dado que  $E_1$  ha ocurrido)  $\times$  (la probabilidad de  $E_3$  dado que  $E_1$  y  $E_2$  han ocurrido). En particular,

$$\Pr\{E_1E_2E_3\} = \Pr\{E_1\} \Pr\{E_2\} \Pr\{E_3\} \quad \text{para eventos independientes} \quad (4)$$

En general, si  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ , ...,  $E_n$  son  $n$  eventos independientes que tienen probabilidades  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ , ...,  $p_n$ , entonces la probabilidad de que ocurra  $E_1$  y  $E_2$  y  $E_3$  y ...  $E_n$  es  $p_1p_2p_3 \cdots p_n$ .

**EJEMPLO 3** Sean  $E_1$  y  $E_2$  los eventos “cae cara en el quinto lanzamiento” y “cae cara en el sexto lanzamiento” de una moneda, respectivamente. Entonces  $E_1$  y  $E_2$  son eventos independientes y, por lo tanto, la probabilidad de cara tanto en el quinto como en el sexto lanzamientos es (suponiendo que sea una moneda legal)

$$\Pr\{E_1E_2\} = \Pr\{E_1\} \Pr\{E_2\} = \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{4}$$

**EJEMPLO 4** Si la probabilidad de que  $A$  esté vivo en 20 años es 0.7 y la probabilidad de que  $B$  esté vivo en 20 años es 0.5, entonces la probabilidad de que ambos estén vivos en 20 años es  $(0.7)(0.5) = 0.35$ .

**EJEMPLO 5** Supóngase que una caja contiene 3 pelotas blancas y 2 pelotas negras. Sea  $E_1$  el evento “la primera pelota que se saca es negra” y  $E_2$  el evento “la segunda pelota que se saca es negra”, donde las pelotas no se vuelvan a colocar en la caja una vez sacadas. Aquí  $E_1$  y  $E_2$  son eventos dependientes.

La probabilidad de que la primera pelota que se extraiga sea negra es  $\Pr\{E_1\} = 2/(3+2) = \frac{2}{5}$ . La probabilidad de que la segunda pelota que se extraiga sea negra, dado que la primera pelota que se extrajo fue negra, es  $\Pr\{E_2|E_1\} = 1/(3+1) = \frac{1}{4}$ . Por lo tanto, la probabilidad de que las dos pelotas que se extraigan sean negras es

$$\Pr\{E_1E_2\} = \Pr\{E_1\} \Pr\{E_2|E_1\} = \frac{2}{5} \cdot \frac{1}{4} = \frac{1}{10}$$

## EVENTOS MUTUAMENTE EXCLUYENTES

Se dice que dos o más eventos son *mutuamente excluyentes* si la ocurrencia de uno cualquiera de ellos excluye la ocurrencia de los otros. Entonces, si  $E_1$  y  $E_2$  son eventos mutuamente excluyentes,  $\Pr\{E_1E_2\} = 0$ .

Si  $E_1 + E_2$  denotan el evento “ocurre  $E_1$  o  $E_2$  o ambos”, entonces

$$\Pr\{E_1 + E_2\} = \Pr\{E_1\} + \Pr\{E_2\} - \Pr\{E_1E_2\} \quad (5)$$

En particular,

$$\Pr\{E_1 + E_2\} = \Pr\{E_1\} + \Pr\{E_2\} \quad \text{si los eventos son mutuamente excluyentes} \quad (6)$$

Por extensión se tiene que si  $E_1, E_2, \dots, E_n$  son  $n$  eventos mutuamente excluyentes que tienen probabilidades  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , entonces la probabilidad de que ocurran  $E_1$  o  $E_2$  o  $\dots$   $E_n$  es  $p_1 + p_2 + \dots + p_n$ .

La fórmula (5) también puede generalizarse a tres o más eventos mutuamente excluyentes.

**EJEMPLO 6** Si  $E_1$  es el evento “de una baraja se extrae un as” y  $E_2$  es el evento “de una baraja se extrae un rey”, entonces  $\Pr\{E_1\} = \frac{4}{52} = \frac{1}{13}$  y  $\Pr\{E_2\} = \frac{4}{52} = \frac{1}{13}$ , y la probabilidad de en una sola extracción se extrae un as o un rey es

$$\Pr\{E_1 + E_2\} = \Pr\{E_1\} + \Pr\{E_2\} = \frac{1}{13} + \frac{1}{13} = \frac{2}{13}$$

ya que en una sola extracción o se extrae un as o se extrae un rey, y por lo tanto estos eventos son mutuamente excluyentes (figura 6-1).

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|
| A♣ | 2♣ | 3♣ | 4♣ | 5♣ | 6♣ | 7♣ | 8♣ | 9♣ | 10♣ | J♣ | Q♣ | K♣ |
| A♦ | 2♦ | 3♦ | 4♦ | 5♦ | 6♦ | 7♦ | 8♦ | 9♦ | 10♦ | J♦ | Q♦ | K♦ |
| A♥ | 2♥ | 3♥ | 4♥ | 5♥ | 6♥ | 7♥ | 8♥ | 9♥ | 10♥ | J♥ | Q♥ | K♥ |
| A♠ | 2♠ | 3♠ | 4♠ | 5♠ | 6♠ | 7♠ | 8♠ | 9♠ | 10♠ | J♠ | Q♠ | K♠ |

Figura 6-1  $E_1$  es el evento “extraer un as” y  $E_2$  es el evento “extraer un rey”.

Obsérvese que  $E_1$  y  $E_2$  no tienen resultados en común. Estos eventos son mutuamente excluyentes.

**EJEMPLO 7** Si  $E_1$  es el evento “extraer un as” y  $E_2$  es el evento “extraer una espada” de una baraja,  $E_1$  y  $E_2$  no son mutuamente excluyentes, pues se puede extraer el as de espadas (figura 6-2). Por lo tanto, la probabilidad de extraer un as o una espada o ambos es

$$\Pr\{E_1 + E_2\} = \Pr\{E_1\} + \Pr\{E_2\} - \Pr\{E_1E_2\} = \frac{4}{52} + \frac{13}{52} - \frac{1}{52} = \frac{16}{52} = \frac{4}{13}$$

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|
| A♣ | 2♣ | 3♣ | 4♣ | 5♣ | 6♣ | 7♣ | 8♣ | 9♣ | 10♣ | J♣ | Q♣ | K♣ |
| A♦ | 2♦ | 3♦ | 4♦ | 5♦ | 6♦ | 7♦ | 8♦ | 9♦ | 10♦ | J♦ | Q♦ | K♦ |
| A♥ | 2♥ | 3♥ | 4♥ | 5♥ | 6♥ | 7♥ | 8♥ | 9♥ | 10♥ | J♥ | Q♥ | K♥ |
| A♠ | 2♠ | 3♠ | 4♠ | 5♠ | 6♠ | 7♠ | 8♠ | 9♠ | 10♠ | J♠ | Q♠ | K♠ |

Figura 6-2  $E_1$  es el evento “extraer un as” y  $E_2$  es el evento “extraer una espada”.

Obsérvese que el evento “ $E_1$  y  $E_2$ ”, que consta de los resultados en los que se den los dos eventos, es el as de espadas.

## DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

### Discretas

Si una variable  $X$  toma un conjunto discreto de valores  $X_1, X_2, \dots, X_K$  con probabilidades respectivas  $p_1, p_2, \dots, p_K$ , donde  $p_1 + p_2 + \dots + p_K = 1$ , esto se define como una *distribución de probabilidad discreta* de  $X$ . La función  $p(X)$ , que tiene los valores  $p_1, p_2, \dots, p_K$  para  $X = X_1, X_2, \dots, X_K$ , respectivamente, se llama *función de probabilidad* o *función de frecuencia* de  $X$ . Como  $X$  puede tomar ciertos valores con determinadas probabilidades, suele llamársele *variable aleatoria discreta*. A las variables aleatorias también se les conoce como *variables estocásticas*.

**EJEMPLO 8** Se lanza un par de dados; sea  $X$  la suma de los puntos obtenidos en estos dos dados. La distribución de probabilidad es la que se muestra en la tabla 6.1. Por ejemplo, la probabilidad de que la suma sea 5 es  $\frac{4}{36} = \frac{1}{9}$ ; así que de 900 veces que se lancen los dos dados se espera que en 100 la suma de los puntos sea 5.

Obsérvese la analogía con las distribuciones de frecuencias relativas empleando probabilidades en lugar de frecuencias relativas. De manera que las distribuciones de probabilidad pueden considerarse como formas teóricas o formas límites ideales de las distribuciones de frecuencias relativas cuando la cantidad de observaciones es muy grande. A esto se debe que las distribuciones de probabilidad se consideren distribuciones de *poblaciones*, mientras que las distribuciones de frecuencias relativas son distribuciones de *muestras* obtenidas de estas poblaciones.

Tabla 6.1

| $X$    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $p(X)$ | 1/36 | 2/36 | 3/36 | 4/36 | 5/36 | 6/36 | 5/36 | 4/36 | 3/36 | 2/36 | 1/36 |

Una distribución de probabilidad se puede representar graficando  $p(X)$  contra  $X$ , como se hace con las distribuciones de frecuencias relativas (ver problema 6.11).

Con probabilidades acumuladas se obtienen *distribuciones de probabilidad acumulada*, que son análogas a las distribuciones de frecuencia relativa acumulada. A las funciones correspondientes a estas distribuciones se les suele llamar *funciones de distribución*.

La distribución de la tabla 6.1 puede obtenerse empleando EXCEL. La porción de una hoja de cálculo de EXCEL que se muestra a continuación se obtiene ingresando Dado 1 en A1, Dado 2 en B1 y Suma en C1. Los 36 resultados posibles al lanzar dos dados se ingresan en A2:B37. En C2 se ingresa =SUM(A2:B2), se da clic y se arrastra desde C2 hasta C37. Observando que la suma 2 se obtiene una vez; la suma 3, dos veces, etc., se forma la distribución de probabilidad de la tabla 6.1.

| Dado 1 | Dado 2 | Suma |
|--------|--------|------|
| 1      | 1      | 2    |
| 1      | 2      | 3    |
| 1      | 3      | 4    |
| 1      | 4      | 5    |
| 1      | 5      | 6    |
| 1      | 6      | 7    |
| 2      | 1      | 3    |
| 2      | 2      | 4    |
| 2      | 3      | 5    |
| 2      | 4      | 6    |
| 2      | 5      | 7    |

| Dado 1 | Dado 2 | Suma |
|--------|--------|------|
| 2      | 6      | 8    |
| 3      | 1      | 4    |
| 3      | 2      | 5    |
| 3      | 3      | 6    |
| 3      | 4      | 7    |
| 3      | 5      | 8    |
| 3      | 6      | 9    |
| 4      | 1      | 5    |
| 4      | 2      | 6    |
| 4      | 3      | 7    |
| 4      | 4      | 8    |
| 4      | 5      | 9    |
| 4      | 6      | 10   |
| 5      | 1      | 6    |
| 5      | 2      | 7    |
| 5      | 3      | 8    |
| 5      | 4      | 9    |
| 5      | 5      | 10   |
| 5      | 6      | 11   |
| 6      | 1      | 7    |
| 6      | 2      | 8    |
| 6      | 3      | 9    |
| 6      | 4      | 10   |
| 6      | 5      | 11   |
| 6      | 6      | 12   |

### Continua

Las ideas anteriores pueden extenderse al caso en el que la variable  $X$  puede tomar un conjunto continuo de valores. El polígono de frecuencias relativas de la muestra se convierte, en el caso teórico o límite de una población, en una curva continua (como la que se muestra en la figura 6-3) cuya ecuación es  $Y = p(X)$ . El área total limitada por el eje  $X$ , bajo esta curva, es igual a 1, y el área entre las rectas  $X = a$  y  $X = b$  (que aparece sombreada en la figura 6-3) corresponde a la probabilidad de que  $X$  se encuentre entre  $a$  y  $b$ , lo que se denota como  $\Pr\{a < X < b\}$ .

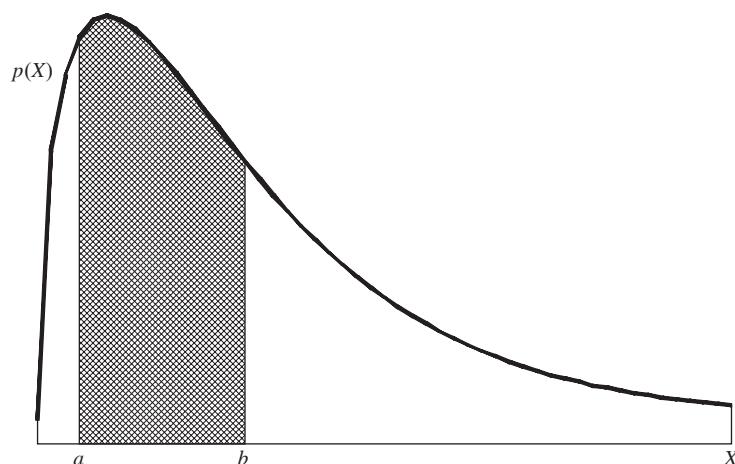


Figura 6-3  $\Pr\{a < X < b\}$  es el área sombreada bajo la función de densidad.

A  $p(X)$  se le conoce como *función de densidad de probabilidad* o brevemente *función de densidad*, y cuando se da una de estas funciones se dice que se define una *distribución de probabilidad continua* para  $X$ ; a la variable  $X$  suele llamársele *variable aleatoria continua*.

Como en el caso discreto, se pueden definir distribuciones de probabilidad acumulada y las funciones de distribución correspondientes.

## ESPERANZA MATEMÁTICA

Si  $p$  es la probabilidad de que una persona reciba una cantidad de dinero  $S$ ,  $pS$  define la *esperanza matemática* (o simplemente la *esperanza*).

**EJEMPLO 9** Encontrar  $E(X)$  para la distribución de la suma de los dos dados dada en la tabla 6.1. La distribución se presenta en los siguientes resultados de EXCEL. En A2:B12 se presenta la distribución en la que los valores  $p(X)$  se han convertido a la forma decimal. En C2 se ingresa la expresión =A2\*B2, se da clic y se arrastra desde C2 hasta C12. En C13 se ingresa la expresión =Sum(C2:C12) y se obtiene la esperanza matemática, que es 7.

| $X$ | $p(X)$   | $XP(X)$  |
|-----|----------|----------|
| 2   | 0.027778 | 0.055556 |
| 3   | 0.055556 | 0.166667 |
| 4   | 0.083333 | 0.333333 |
| 5   | 0.111111 | 0.555556 |
| 6   | 0.138889 | 0.833333 |
| 7   | 0.166667 | 1.166667 |
| 8   | 0.138889 | 1.111111 |
| 9   | 0.111111 | 1        |
| 10  | 0.083333 | 0.833333 |
| 11  | 0.055556 | 0.611111 |
| 12  | 0.027778 | 0.333333 |

7

El concepto de esperanza es fácil de extender. Si  $X$  denota una variable aleatoria discreta que puede tomar los valores  $X_1, X_2, \dots, X_K$  con probabilidades  $p_1, p_2, \dots, p_K$ , respectivamente, donde  $p_1 + p_2 + \dots + p_K = 1$ , la *esperanza matemática* de  $X$  (o simplemente la *esperanza* de  $X$ ), que se denota  $E(X)$ , se define de la manera siguiente:

$$E(X) = p_1X_1 + p_2X_2 + \dots + p_KX_K = \sum_{j=1}^K p_jX_j = \sum pX \quad (7)$$

Si en esta esperanza se sustituyen las probabilidades  $p_j$  por las frecuencias relativas  $f_j/N$ , donde  $N = \sum f_j$ , la esperanza se reduce a  $(\sum fX)/N$ , que es la media aritmética  $\bar{X}$  de una muestra de tamaño  $N$  en la que  $X_1, X_2, \dots, X_K$  se presentan con estas frecuencias relativas. A medida que  $N$  se vuelve cada vez más grande, las frecuencias relativas  $f_j/N$  se aproximan a las probabilidades  $p_j$ . Esto lleva a interpretar  $E(X)$  como la media de la población de la que ha sido tomada la muestra. Si se denota con  $m$  a la media muestral, a la media poblacional se le denota con la correspondiente letra griega,  $\mu$  (mu).

La esperanza también puede ser definida para variables aleatorias continuas, pero esta definición requiere el uso del cálculo.

## RELACIÓN ENTRE MEDIA Y VARIANZA POBLACIONALES Y MUESTRALES

Si de una población se toma en forma aleatoria una muestra de tamaño  $N$  (es decir, de manera que todas las muestras de tamaño  $N$  sean igualmente probables), se puede demostrar que el *valor esperado para la media muestral  $m$  es la media poblacional  $\mu$* .

Sin embargo, no se sigue que el valor esperado de cualquier cantidad calculada a partir de una muestra sea la cantidad poblacional correspondiente. Por ejemplo, el valor esperado de la varianza muestral, como se ha definido aquí, no es la varianza poblacional, sino  $(N - 1)/N$  veces esta varianza. A esto se debe que algunos especialistas en estadística prefieren definir la varianza muestral como la varianza aquí definida pero multiplicada por  $N/(N - 1)$ .

## ANÁLISIS COMBINATORIO

Para obtener probabilidades de eventos complejos, hacer una enumeración de los casos suele ser difícil, tedioso o ambas cosas. Para facilitar esta tarea se hace uso de los principios básicos de una materia llamada *análisis combinatorio*.

### Principio fundamental

Si un evento puede ocurrir de  $n_1$  maneras diferentes, y si una vez que ha ocurrido, otro evento puede ocurrir de  $n_2$  maneras diferentes, entonces la cantidad de maneras en que pueden ocurrir los dos eventos, en este orden específico, es  $n_1 n_2$ .

**EJEMPLO 10** En una hoja de cálculo de EXCEL se ingresan los números 0 a 5 en las casillas A1 a A6. En B1 se ingresa =FACT(A1), se hace clic y se arrastra desde B1 hasta B6. Después, para graficar los puntos, se emplea el asistente para gráficos de EXCEL. La función =FACT(n) es lo mismo que  $n!$ . Para  $n = 0, 1, 2, 3, 4$  y  $5$  =FACT(n) es igual a 1, 1, 2, 6, 24 y 120. La figura 6-4 se generó con el asistente para gráficos de EXCEL.

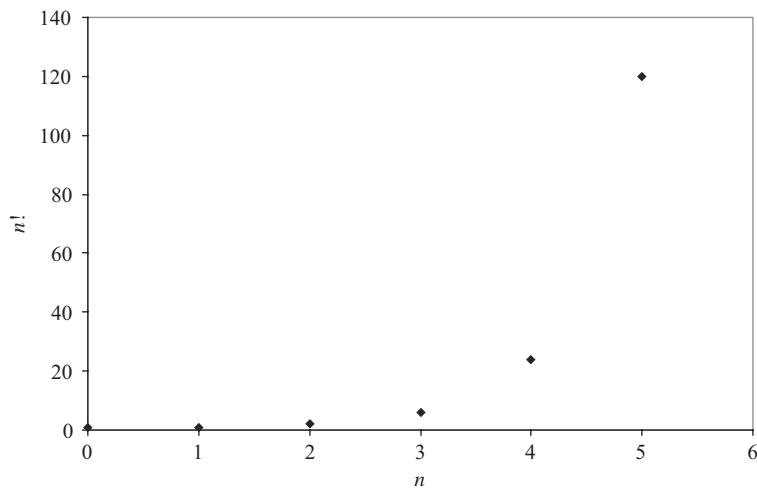


Figura 6-4 Gráfica de  $n!$  generada con EXCEL.

**EJEMPLO 11** La cantidad de permutaciones de las letras  $a, b$  y  $c$  tomadas de dos en dos es  ${}_3P_2 = 3 \cdot 2 = 6$ . Estas permutaciones son  $ab, ba, ac, ca, bc$  y  $cb$ .

El número de permutaciones de  $n$  objetos de los cuales  $n_1$  son iguales,  $n_2$  son iguales, ... es

$$\frac{n!}{n_1! n_2! \dots} \quad \text{donde } n = n_1 + n_2 + \dots \quad (10)$$

**EJEMPLO 12** El número de permutaciones de las letras en la palabra *statistics* es

$$\frac{10!}{3! 3! 1! 2! 1!} = 50\,400$$

ya que hay 3 *e*s, 3 *t*s, 1 *a*, 2 *i*s y 1 *c*.

## COMBINACIONES

Una combinación de  $n$  objetos diferentes tomados de  $r$  en  $r$  es una selección de  $r$  de los  $n$  objetos sin importar el orden. El número de combinaciones de  $n$  objetos tomados de  $r$  en  $r$  se denota mediante el símbolo  $\binom{n}{r}$  y está dado por

$$\binom{n}{r} = \frac{n(n-1)\cdots(n-r+1)}{r!} = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (II)$$

**EJEMPLO 13** El número de combinaciones que se pueden hacer con las letras  $a$ ,  $b$ , y  $c$ , tomadas de dos en dos, es

$$\binom{3}{2} = \frac{3 \cdot 2}{2!} = 3$$

Estas combinaciones son  $ab$ ,  $ac$  y  $bc$ . Obsérvese que  $ab$  es la misma combinación que  $ba$ , pero no la misma permutación.

Con EXCEL, las combinaciones de 3 objetos tomando 2 a la vez se obtienen con el comando =COMBIN(3,2), que da como resultado 3.

## APROXIMACIÓN DE STIRLING PARA $n!$

Cuando  $n$  es grande es poco práctico evaluar directamente  $n!$  En tales casos se hace uso de una fórmula de aproximación desarrollada por James Stirling:

$$n! \approx \sqrt{2\pi n} n^n e^{-n} \quad (12)$$

donde  $e = 2.71828\dots$  es la base del logaritmo natural (ver problema 6.31).

## RELACIÓN ENTRE LA PROBABILIDAD Y LA TEORÍA DE CONJUNTOS

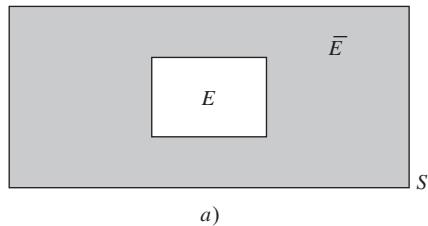
Como se ve en la figura 6-5, un *diagrama de Venn* representa, mediante un rectángulo, todos los resultados posibles de un *experimento*, a lo que se llama el *espacio muestral*  $S$ . Los eventos se representan como figuras tetraédricas o como círculos dentro del espacio muestral. Si  $S$  contiene únicamente una cantidad finita de puntos, entonces a cada punto se le puede asociar un número no negativo, llamado *probabilidad*, de manera que la suma de todos los números correspondientes a los puntos de  $S$  sea 1. Un evento es un conjunto (o una colección) de puntos en  $S$ , como los indicados en la figura 6-5 por  $E_1$  y  $E_2$ .

## DIAGRAMAS DE EULER O DE VENN Y PROBABILIDAD

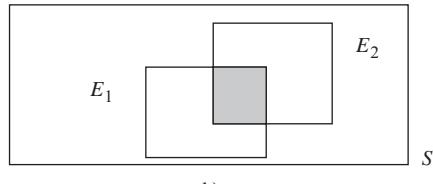
El evento  $E_1 + E_2$  es el conjunto de puntos que están *en*  $E_1$  *o* en  $E_2$  *o* en *ambos*, mientras que el evento  $E_1E_2$  es el conjunto de puntos que son *comunes a ambos*,  $E_1$  y  $E_2$ . La probabilidad de un evento por ejemplo el evento  $E_1$  es la suma de las probabilidades correspondientes a todos los puntos que están en el conjunto  $E_1$ . De igual manera, la probabilidad de  $E_1 + E_2$ , que se denota  $\Pr\{E_1 + E_2\}$ , es la suma de las probabilidades correspondientes a todos los puntos contenidos en el conjunto  $E_1 + E_2$ . Si  $E_1$  y  $E_2$  no tienen puntos en común (es decir, si los eventos son mutuamente excluyentes), entonces  $\Pr\{E_1 + E_2\} = \Pr\{E_1\} + \Pr\{E_2\}$ . Si tienen puntos en común, entonces  $\Pr\{E_1 + E_2\} = \Pr\{E_1\} + \Pr\{E_2\} - \Pr\{E_1E_2\}$ .

El conjunto  $E_1 + E_2$  también suele denominarse  $E_1 \cup E_2$  y se conoce como la *unión* de los dos conjuntos. El conjunto  $E_1E_2$  también suele denominarse  $E_1 \cap E_2$  y se conoce como la *intersección* de los dos conjuntos. Se pueden hacer extensiones a más de dos conjuntos; así, en lugar de  $E_1 + E_2 + E_3$  y  $E_1E_2E_3$ , se pueden emplear las notaciones  $E_1 \cup E_2 \cup E_3$  y  $E_1 \cap E_2 \cap E_3$ , respectivamente.

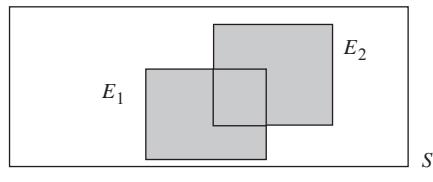
## DIAGRAMAS DE EULER O DE VENN Y PROBABILIDAD



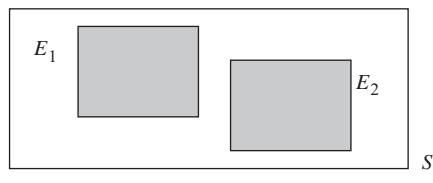
a)



b)



c)



d)

**Figura 6-5 Operaciones con eventos.** a) El complemento del evento  $E$  aparece sombreado y se denota  $\bar{E}$ ; b) la intersección de los eventos  $E_1$  y  $E_2$  aparece sombreada y se escribe  $E_1 \cap E_2$ ; c) la unión de los eventos  $E_1$  y  $E_2$  aparece sombreada y se denota  $E_1 \cup E_2$ ; d) los eventos  $E_1$  y  $E_2$  son mutuamente excluyentes, es decir,  $E_1 \cap E_2 = \phi$ .

El símbolo  $\phi$  (la letra *fi* del alfabeto griego) suele emplearse para denotar el conjunto que no tiene ningún punto, conjunto al que se le conoce como *conjunto vacío*. La probabilidad que se le asigna a un evento que corresponde a este conjunto es cero (es decir,  $\Pr\{\phi\} = 0$ ). Si  $E_1$  y  $E_2$  no tienen puntos en común, se escribe  $E_1 E_2 = \phi$ , lo que significa que los eventos correspondientes son mutuamente excluyentes, por lo que  $\Pr\{E_1 E_2\} = 0$ .

Con esta visión moderna, una variable aleatoria es una función definida en cada punto de un espacio muestral. Por ejemplo, en el problema 6.37, la variable aleatoria es la suma de las coordenadas de cada punto.

Empleando conceptos del cálculo pueden extenderse las ideas anteriores al caso en el que  $S$  tenga una cantidad infinita de puntos.

**EJEMPLO 14** Un experimento consiste en lanzar un par de dados. El evento  $E_1$  es que se obtenga un 7, es decir, que la suma de los puntos en los dados sea 7. El evento  $E_2$  es que en el dado 1 se obtenga un número non. A continuación se presenta el espacio muestral  $S$  y los eventos  $E_1$  y  $E_2$ . Encontrar  $\Pr\{E_1\}$ ,  $\Pr\{E_2\}$ ,  $\Pr\{E_1 \cap E_2\}$  y  $\Pr\{E_1 \cup E_2\}$ . En la figura 6.6 se presentan los resultados de MINITAB con  $E_1$ ,  $E_2$  y  $S$  en rectángulos separados.

$$\begin{aligned} P(E_1) &= 6/36 = 1/6 & P(E_2) &= 18/36 = 1/2 & P(E_1 \cap E_2) &= 3/36 = 1/12 \\ P(E_1 \cup E_2) &= 6/36 + 18/36 - 3/36 = 21/36. \end{aligned}$$

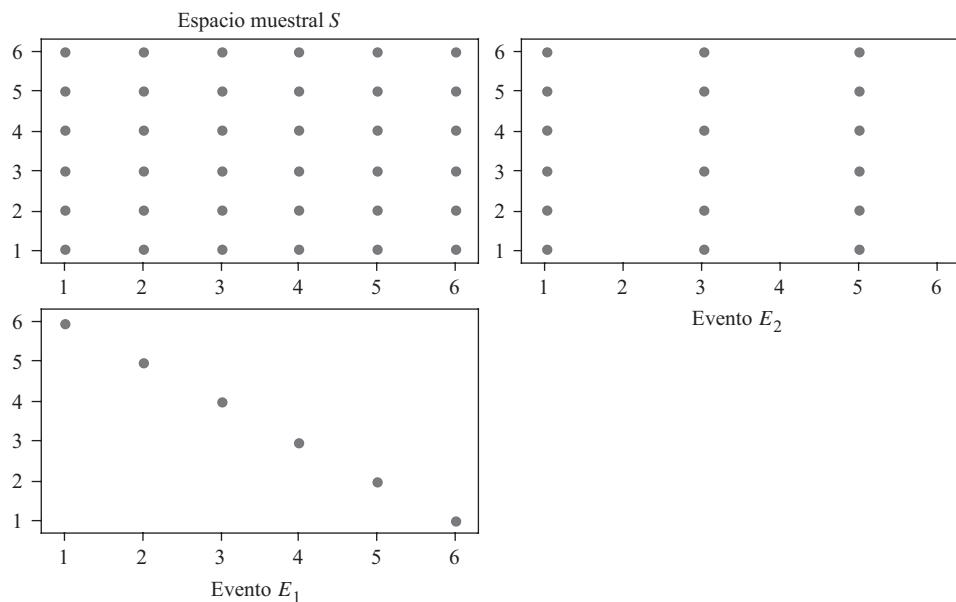


Figura 6-6 Resultados de MINITAB para el ejemplo 14.

## PROBLEMAS RESUELTOS

### REGLAS FUNDAMENTALES DE LA PROBABILIDAD

**6.1** Determinar o estimar la probabilidad  $p$  de cada uno de los eventos siguientes:

- Al lanzar una vez un dado obtener un número non.
- Al lanzar dos veces una moneda obtener por lo menos una cara.
- Al sacar una carta de una baraja, bien barajada, con 52 cartas obtener un as, un 10 de diamantes o un 2 de espadas.
- Al lanzar una vez un par de dados su suma sea siete.
- Si en 100 lanzamientos de una moneda se obtuvieron 56 caras, en el siguiente lanzamiento obtener una cruz.

### SOLUCIÓN

- De seis casos equiprobables posibles, tres casos (que caiga 1, 3 o 5) son favorables al evento. Por lo tanto,  $p = \frac{3}{6} = \frac{1}{2}$ .
- Si H denota "cara" y T denota "cruz", en los dos lanzamientos se pueden obtener los casos siguientes: HH, HT, TH, TT, todos igualmente posibles. De éstos, sólo los tres primeros son favorables al evento. Por lo tanto,  $p = \frac{3}{4}$ .
- Este evento puede darse de seis maneras (as de espadas, as de corazones, as de tréboles, as de diamantes, 10 de diamantes y 2 de espadas) en los 52 casos igualmente posibles. Por lo tanto,  $p = \frac{6}{52} = \frac{3}{26}$ .
- Cada una de las caras de un dado puede relacionarse con cada una de las seis caras del otro dado, de manera que la cantidad de casos que pueden presentarse, todos igualmente posibles, es  $6 \cdot 6 = 36$ . Estos casos se pueden denotar (1, 1), (2, 1), (3, 1), ..., (6, 6). Hay seis formas de obtener la suma de 7, denotada por (1, 6), (2, 5), (3, 4), (4, 3), (5, 2) y (6, 1). Por lo tanto,  $p = \frac{6}{36} = \frac{1}{6}$ .
- Como en 100 lanzamientos se obtuvieron  $100 - 56 = 44$  cruces, la *probabilidad estimada* (o *empírica*) de que caiga cruz es la frecuencia relativa  $44/100 = 0.44$ .

- 6.2** Un experimento consiste en lanzar una moneda y un dado. Si  $E_1$  es el evento en que se obtenga “cara” al lanzar la moneda y  $E_2$  es el evento en que se obtenga “3 o 6” al lanzar el dado, expresar en palabras cada uno de los eventos siguientes:

- a)  $\bar{E}_1$       c)  $E_1 E_2$       e)  $\Pr\{E_1 | E_2\}$   
 b)  $\bar{E}_2$       d)  $\Pr\{E_1 \bar{E}_2\}$       f)  $\Pr\{\bar{E}_1 + \bar{E}_2\}$

### SOLUCIÓN

- a) Cruz en la moneda y cualquier cosa en el dado.  
 b) 1, 2, 4 ó 5 en el dado y cualquier cosa en la moneda.  
 c) Cara en la moneda y 3 ó 6 en el dado.  
 d) Probabilidad de cara en la moneda y 1, 2, 4 ó 5 en el dado.  
 e) Probabilidad de cara en la moneda, dado que en el dado se obtuvo 3 ó 6.  
 f) Probabilidad de cruz en la moneda o 1, 2, 4 ó 5 en el dado o ambas cosas

- 6.3** De una caja que contiene 6 pelotas rojas, 4 pelotas blancas y 5 pelotas azules se extrae, de manera aleatoria, una pelota. Determinar la probabilidad de que la pelota extraída sea: a) roja, b) blanca, c) azul, d) no sea roja y e) sea roja o blanca.

### SOLUCIÓN

Con  $R$ ,  $W$  y  $B$  se denotan los eventos de que la pelota que se saque sea roja, blanca o azul, respectivamente. Entonces:

$$\begin{aligned} a) \quad \Pr\{R\} &= \frac{\text{maneras de sacar una pelota roja}}{\text{total de maneras de sacar una pelota}} = \frac{6}{6+4+5} = \frac{6}{15} = \frac{2}{5} \\ b) \quad \Pr\{W\} &= \frac{4}{6+4+5} = \frac{4}{15} \\ c) \quad \Pr\{B\} &= \frac{5}{6+4+5} = \frac{5}{15} = \frac{1}{3} \\ d) \quad \Pr\{\bar{R}\} &= 1 - \Pr\{R\} = 1 - \frac{2}{5} = \frac{3}{5} \quad \text{de acuerdo con el inciso } a) \\ e) \quad \Pr\{R+W\} &= \frac{\text{maneras de sacar una pelota roja o una pelota blanca}}{\text{total de maneras de sacar una pelota}} = \frac{6+4}{6+4+5} = \frac{10}{15} = \frac{2}{3} \end{aligned}$$

### Otro método

$$\Pr\{R+W\} = \Pr\{\bar{B}\} = 1 - \Pr\{B\} = 1 - \frac{1}{3} = \frac{2}{3} \quad \text{de acuerdo con el inciso } c)$$

Obsérvese que  $\Pr\{R+W\} = \Pr\{R\} + \Pr\{W\}$  (es decir,  $\frac{2}{3} = \frac{2}{5} + \frac{4}{15}$ ). Éste es un ejemplo de la regla general  $\Pr\{E_1 + E_2\} = \Pr\{E_1\} + \Pr\{E_2\}$  válida para eventos  $E_1$  y  $E_2$  mutuamente excluyentes.

- 6.4** Un dado se lanza dos veces. Encontrar la probabilidad de obtener un 4, un 5 o un 6 en el primer lanzamiento y un 1, 2, 3 ó 4 en el segundo lanzamiento.

### SOLUCIÓN

Sea  $E_1$  el evento “4, 5 ó 6” en el primer lanzamiento y  $E_2$  el evento “1, 2, 3 ó 4” en el segundo lanzamiento. A cada una de las seis maneras en que puede caer el dado en el primer lanzamiento se le asocia cada una de las seis maneras en que puede caer en el segundo lanzamiento, lo que hace un total de  $6 \cdot 6 = 36$  maneras, todas igualmente probables. A cada una de las tres maneras en que puede ocurrir  $E_1$  se le asocia cada una de las cuatro maneras en que puede ocurrir  $E_2$ , obteniéndose  $3 \cdot 4 = 12$  maneras en las que pueden ocurrir  $E_1$  y  $E_2$  o  $E_1 E_2$ . Por lo tanto,  $\Pr\{E_1 E_2\} = 12/36 = 1/3$ .

Obsérvese que  $\Pr\{E_1 E_2\} = \Pr\{E_1\} \Pr\{E_2\}$  (es decir,  $\frac{1}{3} = \frac{3}{6} \cdot \frac{4}{6}$ ) es válido para eventos independientes  $E_1$  y  $E_2$ .

- 6.5** De una baraja, bien barajada, con 52 cartas se extraen dos cartas. Encuentre la probabilidad de que las dos sean ases si la primera carta: *a)* se devuelve a la baraja y *b)* no se devuelve a la baraja.

### SOLUCIÓN

Sea  $E_1$  = evento “ases” en la primera extracción y sea  $E_2$  = evento “ases” en la segunda extracción.

- Si la primera carta se devuelve a la baraja,  $E_1$  y  $E_2$  son eventos independientes. Por lo tanto,  $\Pr\{\text{las dos cartas extraídas sean ases}\} = \Pr\{E_1 E_2\} = \Pr\{E_1\} \Pr\{E_2\} = \left(\frac{4}{52}\right)\left(\frac{4}{52}\right) = \frac{1}{169}$ .
- La primera carta se puede extraer de 52 maneras y la segunda puede extraerse de 51 maneras, ya que la primera carta no se devuelve a la baraja. Por lo tanto, las dos cartas se pueden extraer de  $52 \cdot 51$  maneras todas igualmente posibles.

Hay cuatro maneras en las que puede ocurrir  $E_1$  y tres maneras en las que  $E_2$  puede ocurrir, de manera que  $E_1$  y  $E_2$  o  $E_1 E_2$  puede ocurrir de  $4 \cdot 3$  maneras. Por lo tanto,  $\Pr\{E_1 E_2\} = (4 \cdot 3)/(52 \cdot 51) = \frac{1}{221}$ .

Obsérvese que  $\Pr\{E_2|E_1\} = \Pr\{\text{segunda carta sea un as dado que la primera carta es un as}\} = \frac{3}{51}$ . De manera que este resultado ilustra la regla general  $\Pr\{E_1 E_2\} = \Pr\{E_1\} \Pr\{E_2|E_1\}$  donde  $E_1$  y  $E_2$  son eventos dependientes.

- 6.6** De la caja del problema 6.3 se extraen, sucesivamente, tres pelotas. Encuéntrese la probabilidad de que se extraigan en el orden roja, blanca y azul: *a)* si cada pelota se devuelve a la caja y *b)* si no se devuelve.

### SOLUCIÓN

Sea  $R$  = evento “roja” en la primera extracción,  $W$  = evento “blanca” en la segunda extracción y  $B$  = evento “azul” en la tercera extracción. Lo que se busca es  $\Pr\{RWB\}$ .

- Si cada una de las pelotas se devuelve, entonces  $R$ ,  $W$  y  $B$  son eventos independientes y

$$\Pr\{RWB\} = \Pr\{R\} \Pr\{W\} \Pr\{B\} = \left(\frac{6}{6+4+5}\right) \left(\frac{4}{6+4+5}\right) \left(\frac{5}{6+4+5}\right) = \left(\frac{6}{15}\right) \left(\frac{4}{15}\right) \left(\frac{5}{15}\right) = \frac{8}{225}$$

- Si las pelotas no se devuelven, entonces  $R$ ,  $W$  y  $B$  son eventos dependientes y

$$\begin{aligned} \Pr\{RWB\} &= \Pr\{R\} \Pr\{W|R\} \Pr\{B|WR\} = \left(\frac{6}{6+4+5}\right) \left(\frac{4}{5+4+5}\right) \left(\frac{5}{5+3+5}\right) \\ &= \left(\frac{6}{15}\right) \left(\frac{4}{14}\right) \left(\frac{5}{13}\right) = \frac{4}{91} \end{aligned}$$

donde  $\Pr\{B|WR\}$  es la probabilidad condicional de extraer una pelota azul si se han extraído ya una roja y una blanca.

- 6.7** Encuéntrese la probabilidad de que en dos lanzamientos de un dado se obtenga por lo menos un 4.

### SOLUCIÓN

Sea  $E_1$  = el evento “4” en el primer lanzamiento,  $E_2$  = el evento “4” en el segundo lanzamiento y  $E_1 + E_2$  = el evento “4” en el primer lanzamiento o “4” en el segundo lanzamiento o ambos = el evento de obtener por lo menos un 4. Lo que se busca es  $\Pr\{E_1 + E_2\}$ .

#### Primer método

Los dos dados pueden caer en un total de  $6 \cdot 6 = 36$  maneras igualmente posibles. Además,

Cantidad de maneras en las que puede ocurrir  $E_1$  pero no  $E_2$  = 5

Cantidad de maneras en las que puede ocurrir  $E_2$  pero no  $E_1$  = 5

Cantidad de maneras en las que pueden ocurrir  $E_1$  y  $E_2$  = 1

Por lo tanto, la cantidad de maneras en las que puede ocurrir por lo menos uno de los eventos  $E_1$  o  $E_2$  es  $5 + 5 + 1 = 11$ , y por lo tanto,  $\Pr\{E_1 + E_2\} = \frac{11}{36}$ .

**Segundo método**

Como  $E_1$  y  $E_2$  no son mutuamente excluyentes,  $\Pr\{E_1 + E_2\} = \Pr\{E_1\} + \Pr\{E_2\} - \Pr\{E_1E_2\}$ . Además, como  $E_1$  y  $E_2$  son independientes,  $\Pr\{E_1E_2\} = \Pr\{E_1\}\Pr\{E_2\}$ . Por lo tanto,

$$\Pr\{E_1 + E_2\} = \Pr\{E_1\} + \Pr\{E_2\} - \Pr\{E_1\}\Pr\{E_2\} = \frac{1}{6} + \frac{1}{6} - \left(\frac{1}{6}\right)\left(\frac{1}{6}\right) = \frac{11}{36}.$$

**Tercer método**

$$\Pr\{\text{obtener por lo menos un } 4\} + \Pr\{\text{no obtener ning\'un } 4\} = 1.$$

$$\begin{aligned} \text{Por lo tanto, } \Pr\{\text{obtener por lo menos un } 4\} &= 1 - \Pr\{\text{no obtener ning\'un } 4\} \\ &= 1 - \Pr\{\text{no obtener un } 4 \text{ ni en el primero ni en el segundo lanzamiento}\} \\ &= 1 - \Pr\{\bar{E}_1\bar{E}_2\} = 1 - \Pr\{\bar{E}_1\}\Pr\{\bar{E}_2\} \\ &= 1 - \left(\frac{5}{6}\right)\left(\frac{5}{6}\right) = \frac{11}{36} \end{aligned}$$

- 6.8** Una bolsa contiene 4 pelotas blancas y 2 pelotas negras; otra contiene 3 pelotas blancas y 5 pelotas negras. Si se saca una pelota de cada bolsa, encontrar la probabilidad de que: *a)* ambas sean blancas, *b)* ambas sean negras y *c)* una sea blanca y la otra sea negra.

**SOLUCIÓN**

Sea  $W_1$  = el evento “blanca” de la primera bolsa y  $W_2$  = el evento “blanca” de la segunda bolsa.

$$a) \quad \Pr\{W_1W_2\} = \Pr\{W_1\}\Pr\{W_2\} = \left(\frac{4}{4+2}\right)\left(\frac{3}{3+5}\right) = \frac{1}{4}$$

$$b) \quad \Pr\{\bar{W}_1\bar{W}_2\} = \Pr\{\bar{W}_1\}\Pr\{\bar{W}_2\} = \left(\frac{2}{4+2}\right)\left(\frac{5}{3+5}\right) = \frac{5}{24}$$

- c) El evento “una es blanca y la otra es negra” es lo mismo que el evento “o la primera es blanca y la segunda es negra o la primera es negra y la segunda es blanca”; es decir,  $W_1\bar{W}_2 + \bar{W}_1W_2$ . Como los eventos  $W_1\bar{W}_2$  y  $\bar{W}_1W_2$  son mutuamente excluyentes, se tiene

$$\begin{aligned} \Pr\{W_1\bar{W}_2 + \bar{W}_1W_2\} &= \Pr\{W_1\bar{W}_2\} + \Pr\{\bar{W}_1W_2\} \\ &= \Pr\{W_1\}\Pr\{\bar{W}_2\} + \Pr\{\bar{W}_1\}\Pr\{W_2\} \\ &= \left(\frac{4}{4+2}\right)\left(\frac{5}{3+5}\right) + \left(\frac{2}{4+2}\right)\left(\frac{3}{3+5}\right) = \frac{13}{24} \end{aligned}$$

**Otro método**

$$\text{La probabilidad que se busca es } 1 - \Pr\{W_1W_2\} - \Pr\{\bar{W}_1\bar{W}_2\} = 1 - \frac{1}{4} - \frac{5}{24} = \frac{13}{24}.$$

- 6.9** *A* y *B* juegan 12 partidos de ajedrez, de los cuales, *A* gana 6, *B* gana 4 y en 2 terminan empatados. Se ponen de acuerdo para jugar otros 3 partidos. Encuéntrese la probabilidad de que: *a)* *A* gane los tres partidos, *b)* 2 partidos terminen empatados, *c)* *A* y *B* ganen alternadamente y *d)* *B* gane por lo menos un partido.

**SOLUCIÓN**

Sean  $A_1, A_2$  y  $A_3$  los eventos “*A* gana” en el primero, el segundo y el tercero partidos, respectivamente; sean  $B_1, B_2$  y  $B_3$  los eventos “*B* gana” el primero, el segundo y el tercero partidos, respectivamente, y  $D_1, D_2$  y  $D_3$  los eventos “terminan empatados” en el primero, el segundo y el tercero partidos, respectivamente.

Sobre la base de experiencias anteriores (probabilidad emp\'rica), asumir que  $\Pr\{A \text{ gana cualquiera de los partidos}\} = \frac{6}{12} = \frac{1}{2}$ , que  $\Pr\{B \text{ gana cualquiera de los partidos}\} = \frac{4}{12} = \frac{1}{3}$  y que  $\Pr\{\text{termina en empate en cualquier partido}\} = \frac{2}{12} = \frac{1}{6}$ .

$$a) \quad \Pr\{A \text{ gane los tres partidos}\} = \Pr\{A_1A_2A_3\} = \Pr\{A_1\}\Pr\{A_2\}\Pr\{A_3\} = \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{8}$$

suponiendo que el resultado de cada partido sea independiente de los resultados de los otros partidos, lo que parece razonable (a menos, por supuesto, que el jugador se vea *psicológicamente influenciado* por los otros partidos ganados o perdidos).

- b)  $\Pr\{2 \text{ partidos terminen empatados}\} = \Pr\{\text{el primero y el segundo } o \text{ el primero y el tercero } o \text{ el segundo y el tercero}\}$
- $$\begin{aligned} &= \Pr\{D_1 D_2 \bar{D}_3\} + \Pr\{D_1 \bar{D}_2 D_3\} + \Pr\{\bar{D}_1 D_2 D_3\} \\ &= \Pr\{D_1\} \Pr\{D_2\} \Pr\{\bar{D}_3\} + \Pr\{D_1\} \Pr\{\bar{D}_2\} \Pr\{D_3\} \\ &\quad + \Pr\{\bar{D}_1\} \Pr\{D_2\} \Pr\{D_3\} \\ &= \left(\frac{1}{6}\right) \left(\frac{1}{6}\right) \left(\frac{5}{6}\right) + \left(\frac{1}{6}\right) \left(\frac{5}{6}\right) \left(\frac{1}{6}\right) + \left(\frac{5}{6}\right) \left(\frac{1}{6}\right) \left(\frac{1}{6}\right) = \frac{15}{216} = \frac{5}{72} \end{aligned}$$
- c)  $\Pr\{A \text{ y } B \text{ ganen alternadamente}\} = \Pr\{A \text{ gane y después } B \text{ gane y después } A \text{ gane } o \text{ que } B \text{ gane y después } A \text{ gane y después } B \text{ gane}\}$
- $$\begin{aligned} &= \Pr\{A_1 B_2 A_3 + B_1 A_2 B_3\} = \Pr\{A_1 B_2 A_3\} + \Pr\{B_1 A_2 B_3\} \\ &= \Pr\{A_1\} \Pr\{B_2\} \Pr\{A_3\} + \Pr\{B_1\} \Pr\{A_2\} \Pr\{B_3\} \\ &= \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{3}\right) \left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{3}\right) \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{3}\right) = \frac{5}{36} \end{aligned}$$
- d)  $\Pr\{B \text{ gane por lo menos un partido}\} = 1 - \Pr\{B \text{ no gane ningún partido}\}$
- $$\begin{aligned} &= 1 - \Pr\{\bar{B}_1 \bar{B}_2 \bar{B}_3\} = 1 - \Pr\{\bar{B}_1\} \Pr\{\bar{B}_2\} \Pr\{\bar{B}_3\} \\ &= 1 - \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{2}{3}\right) = \frac{19}{27} \end{aligned}$$

## DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

- 6.10** Encontrar la probabilidad de que haya niños o niñas en familias con tres hijos, suponiendo probabilidades iguales para niños que para niñas.

### SOLUCIÓN

Sea  $B$  = el evento “niño en la familia” y  $G$  = el evento “niña en la familia”. De acuerdo con la suposición de probabilidades iguales,  $\Pr\{B\} = \Pr\{G\} = \frac{1}{2}$ . En las familias con tres hijos pueden presentarse los siguientes eventos mutuamente excluyentes con las probabilidades que se indican.

- a) Tres niños ( $BBB$ ):

$$\Pr\{BBB\} = \Pr\{B\} \Pr\{B\} \Pr\{B\} = \frac{1}{8}$$

Aquí se supone que el que nazca un niño no está influenciado de manera alguna porque el hijo anterior haya sido también niño, es decir, se supone que los eventos son independientes.

- b) Tres niñas ( $GGG$ ): Como en el inciso a) o por simetría,

$$\Pr\{GGG\} = \frac{1}{8}$$

- c) Dos niños y una niña ( $BBG + BGB + GBB$ ):

$$\begin{aligned} \Pr\{BBG + BGB + GBB\} &= \Pr\{BBG\} + \Pr\{BGB\} + \Pr\{GBB\} \\ &= \Pr\{B\} \Pr\{B\} \Pr\{G\} + \Pr\{B\} \Pr\{G\} \Pr\{B\} + \Pr\{G\} \Pr\{B\} \Pr\{B\} \\ &= \frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8} = \frac{3}{8} \end{aligned}$$

- d) Dos niñas y un niño ( $GGB + GBG + BGG$ ): como en el inciso c) o por simetría, la probabilidad es  $3/8$ .

Si  $X$  denota la *variable aleatoria* que indica la cantidad de niños en una familia con tres hijos, la distribución de probabilidad es la que se muestra en la tabla 6.2.

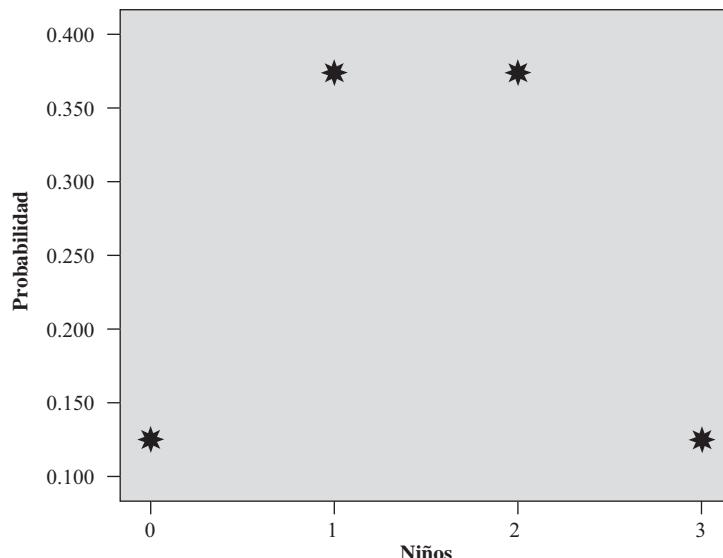
**Tabla 6.2**

|                                 |       |       |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Cantidad de niños (hombres) $X$ | 0     | 1     | 2     | 3     |
| Probabilidad $p(X)$             | $1/8$ | $3/8$ | $3/8$ | $1/8$ |

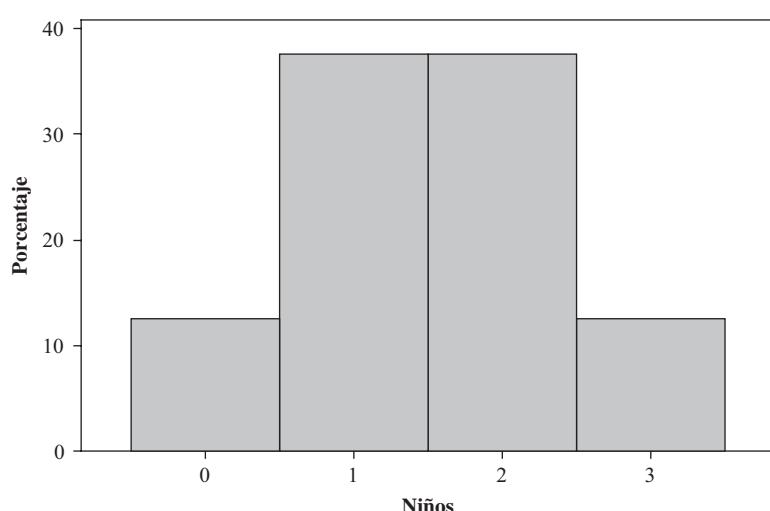
- 6.11** Graficar la distribución del problema 6.10.

### SOLUCIÓN

La gráfica puede representarse ya sea como en la figura 6.7 o como en la figura 6.8. Obsérvese que en la figura 6.8 la suma de las áreas de los rectángulos es 1; en esta figura llamada *histograma de probabilidad*,  $X$  es considerada como una variable continua, aunque en realidad sea discreta, procedimiento que suele resultar útil. Por otro lado, la figura 6.7 se emplea cuando no se desea considerar a la variable como variable continua.



**Figura 6-7** SPSS, gráfica de la distribución de probabilidad.



**Figura 6-8** MINITAB, histograma de probabilidad.

- 6.12 Una variable aleatoria continua  $X$ , que toma valores sólo entre 0 y 5, tiene una función de probabilidad dada por  $p(X) = \begin{cases} 0.2, & 0 < X < 5 \\ 0, & \text{si no es así} \end{cases}$ . La gráfica se muestra en la figura 6.9.
- a) Verificar que es una función de densidad.

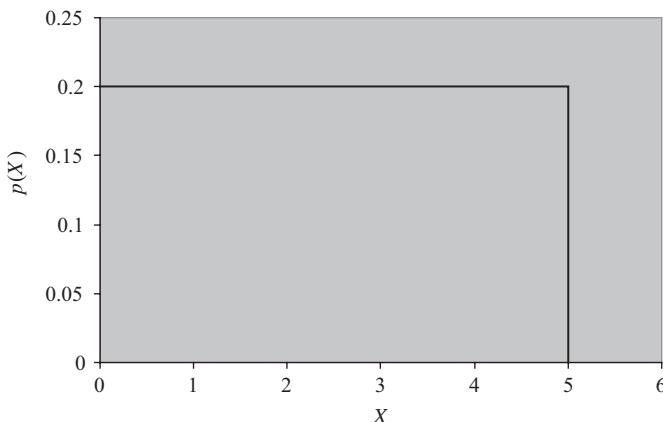


Figura 6-9 Función de densidad de probabilidad para la variable  $X$ .

- b) Encontrar y graficar  $\Pr\{2.5 < X < 4.0\}$ .

### SOLUCIÓN

- a) La función  $p(X)$  es siempre  $\geq 0$  y el área total bajo la gráfica de  $p(X)$  es  $5 \times 0.2 = 1$ , ya que tiene forma rectangular con 0.2 de ancho y 5 de largo (ver figura 6-9).
- b) La probabilidad  $\Pr\{2.5 < X < 4.0\}$  se muestra en la figura 6.10.

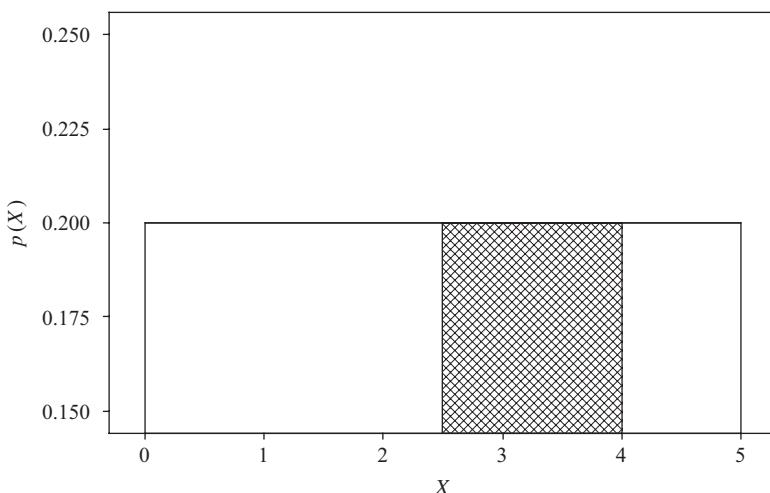


Figura 6-10 La probabilidad  $\Pr\{2.5 < X < 4.0\}$  aparece como un área sombreada.

El área rectangular,  $\Pr\{2.5 < X < 4.0\}$  es  $(4 - 2.5) \times 0.2 = 0.3$ .

## ESPERANZA MATEMÁTICA

- 6.13** Se compra un boleto para una rifa con el que se puede ganar \$5 000 como primer premio o \$2 000 como segundo premio, siendo las probabilidades 0.001 y 0.003, respectivamente. ¿Cuál sería el precio justo a pagar por un boleto?

### SOLUCIÓN

La esperanza es  $(\$5\,000)(0.001) + (\$2\,000)(0.003) = \$5 + \$6 = \$11$ , que es el precio justo a pagar.

- 6.14** En una inversión de negocios hay una probabilidad de 0.6 de obtener como ganancia \$300 y una probabilidad de 0.4 de perder \$100. Determinar la esperanza.

### SOLUCIÓN

La esperanza es  $(\$300)(0.6) + (-\$100)(0.4) = \$180 - \$40 = \$140$ .

- 6.15** Encontrar: a)  $E(X)$ , b)  $E(X^2)$  y c)  $E[(X - \bar{X})^2]$ , para la distribución de probabilidad que se muestra en la tabla 6.3.  
d) Emplear EXCEL para dar la solución de los incisos a), b) y c).

Tabla 6.3

|        |       |       |       |       |        |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| X      | 8     | 12    | 16    | 20    | 24     |
| $p(X)$ | $1/8$ | $1/6$ | $3/8$ | $1/4$ | $1/12$ |

### SOLUCIÓN

- a)  $E(X) = \sum Xp(X) = (8)\left(\frac{1}{8}\right) + (12)\left(\frac{1}{6}\right) + (16)\left(\frac{3}{8}\right) + (20)\left(\frac{1}{4}\right) + (24)\left(\frac{1}{12}\right) = 16$ ; lo que representa la *media* de la distribución.  
b)  $E(X^2) = \sum X^2 p(X) = (8)^2\left(\frac{1}{8}\right) + (12)^2\left(\frac{1}{6}\right) + (16)^2\left(\frac{3}{8}\right) + (20)^2\left(\frac{1}{4}\right) + (24)^2\left(\frac{1}{12}\right) = 276$ ; lo que representa el *segundo momento* respecto al origen cero.  
c)  $E[(X - \bar{X})^2] = \sum (X - \bar{X})^2 p(X) = (8 - 16)^2\left(\frac{1}{8}\right) + (12 - 16)^2\left(\frac{1}{6}\right) + (16 - 16)^2\left(\frac{3}{8}\right) + (20 - 16)^2\left(\frac{1}{4}\right) + (24 - 16)^2\left(\frac{1}{12}\right) = 20$ ; lo que representa la *varianza* de la distribución.  
d) En A1:E1 se ingresan los títulos, como se muestra. Los valores de X y los valores de probabilidad se ingresan en A2:B6. Los valores esperados de X se calculan en C2:C7. El valor esperado se da en C7. El segundo momento respecto al origen se calcula en D2:D7. El segundo momento aparece en D7. La varianza se calcula en E2:E7. La varianza se da en E7.

| A  | B        | C       | D          | E                     |
|----|----------|---------|------------|-----------------------|
| X  | $P(X)$   | $Xp(X)$ | $X^2 p(X)$ | $(X - E(X))^2 * p(X)$ |
| 8  | 0.125    | 1       | 8          | 8                     |
| 12 | 0.166667 | 2       | 24         | 2.666666667           |
| 16 | 0.375    | 6       | 96         | 0                     |
| 20 | 0.25     | 5       | 100        | 4                     |
| 24 | 0.083333 | 2       | 48         | 5.333333333           |
|    |          | 16      | 276        | 20                    |

- 6.16** Una bolsa contiene 2 pelotas blancas y 3 pelotas negras. Cada una de cuatro personas, *A*, *B*, *C* y *D*, en este orden, extrae una pelota y no la devuelve a la bolsa. La primera que extraiga una pelota blanca recibirá \$10. Determinar las esperanzas de *A*, *B*, *C* y *D*.

**SOLUCIÓN**

Como sólo hay 3 pelotas negras, alguna de las personas deberá ganar en el primer intento. Sean  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  los eventos “ $A$  gana”, “ $B$  gana”, “ $C$  gana” y “ $D$  gana”, respectivamente.

$$\Pr\{A \text{ gane}\} = \Pr\{A\} = \frac{2}{3+2} = \frac{2}{5}$$

Por lo tanto, la esperanza de  $A = \frac{2}{5} (\$10) = \$4$ .

$$\Pr\{A \text{ pierda y } B \text{ gane}\} = \Pr\{\bar{A}B\} = \Pr\{\bar{A}\} \Pr\{B|\bar{A}\} = \left(\frac{3}{5}\right)\left(\frac{2}{4}\right) = \frac{3}{10}$$

Por lo tanto, la esperanza de  $B = \$3$ .

$$\Pr\{A \text{ y } B \text{ pierdan y } C \text{ gane}\} = \Pr\{\bar{A}\bar{B}C\} = \Pr\{\bar{A}\} \Pr\{\bar{B}|\bar{A}\} \Pr\{C|\bar{A}\bar{B}\} = \left(\frac{3}{5}\right)\left(\frac{2}{4}\right)\left(\frac{2}{3}\right) = \frac{1}{5}$$

Por lo tanto, la esperanza de  $C = \$2$ .

$$\begin{aligned} \Pr\{A, B \text{ y } C \text{ pierdan y } D \text{ gane}\} &= \Pr\{\bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}\} \\ &= \Pr\{\bar{A}\} \Pr\{\bar{B}|\bar{A}\} \Pr\{\bar{C}|\bar{A}\bar{B}\} \Pr\{\bar{D}|\bar{A}\bar{B}\bar{C}\} \\ &= \left(\frac{3}{5}\right)\left(\frac{2}{4}\right)\left(\frac{1}{3}\right)\left(\frac{1}{1}\right) = \frac{1}{10} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la esperanza de  $D = \$1$ .

*Comprobación:*  $\$4 + \$3 + \$2 + \$1 = \$10$  y  $\frac{2}{5} + \frac{3}{10} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10} = 1$ .

**PERMUTACIONES**

- 6.17** ¿De cuántas maneras se pueden acomodar en línea 5 canicas de colores diferentes?

**SOLUCIÓN**

Hay que ordenar las cinco canicas en cinco posiciones: — — — — —. La primera posición puede ser ocupada por cualquiera de las 5 canicas (es decir, hay 5 maneras de ocupar la primera posición). Hecho esto, hay 4 maneras de ocupar la segunda posición; a continuación hay 3 maneras de ocupar la tercera posición; 2 maneras de ocupar la cuarta posición y, por último, sólo una manera de ocupar la última posición. Por lo tanto:

Número de maneras en que se pueden colocar las cinco canicas en línea  $= 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 = 5! = 120$

En general,

Número de maneras en las que se pueden colocar  $n$  objetos diferentes en línea  $= n(n - 1)(n - 2) \cdots 1 = n!$

A esto se le conoce como el número de *permutaciones* de  $n$  objetos diferentes tomados de  $n$  en  $n$  y se denota  $_nP_n$ .

- 6.18** ¿De cuántas maneras se pueden sentar 10 personas en una banca en la que sólo hay 4 asientos disponibles?

**SOLUCIÓN**

Hay 10 maneras de ocupar el primer asiento; hecho esto, hay 9 maneras de ocupar el segundo asiento; 8 maneras de ocupar el tercer asiento, y 7 maneras de ocupar el cuarto asiento. Por lo tanto:

Número de ordenaciones de 10 personas tomadas de 4 en 4  $= 10 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 7 = 5\,040$

En general,

Número de ordenaciones de  $n$  objetos diferentes tomados de  $r$  en  $r = n(n - 1) \cdots (n - r + 1)$

A esto también se le conoce como el número de *permutaciones* de  $n$  objetos diferentes tomados de  $r$  en  $r$  y se denota  ${}_nP_r$ ,  $P(n, r)$  o  $P_{n,r}$ . Obsérvese que cuando  $r = n$ ,  ${}_nP_n = n!$ , como en el problema 6.17.

- 6.19** Evaluar: a)  ${}_8P_3$ , b)  ${}_6P_4$ , c)  ${}_{15}P_1$  y  ${}_3P_3$ , y e) los incisos del a) al d) empleando EXCEL.

#### SOLUCIÓN

$$\begin{aligned} a) \quad {}_8P_3 &= 8 \cdot 7 \cdot 6 = 336, \\ b) \quad {}_6P_4 &= 6 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3 = 360, \\ c) \quad {}_{15}P_1 &= 15, \text{ y } d) \quad {}_3P_3 = 3 \cdot 2 \cdot 1 = 6 \\ e) \quad =\text{PERMUTACIONES}(8, 3) &= 336 \quad =\text{PERMUTACIONES}(6, 4) = 360 \\ &=\text{PERMUTACIONES}(15, 1) = 15 \quad =\text{PERMUTACIONES}(3, 3) = 6 \end{aligned}$$

- 6.20** Se desea sentar en hilera a 5 hombres y 4 mujeres de manera que las mujeres ocupen los lugares pares. ¿De cuántas maneras es posible hacer esto?

#### SOLUCIÓN

Los hombres se pueden sentar de  ${}_5P_5$  maneras y las mujeres de  ${}_4P_4$  maneras. A cada acomodo de los hombres se le puede hacer corresponder un acomodo de las mujeres. Por lo tanto, la cantidad de acomodos es  ${}_5P_5 \cdot {}_4P_4 = 5!4! = (120)(24) = 2\,880$ .

- 6.21** ¿Cuántos números de cuatro dígitos se pueden formar con los 10 dígitos 0, 1, 2, 3, ..., 9, si: a) puede haber repeticiones, b) no puede haber repeticiones y c) no puede haber repeticiones y el último dígito debe ser cero?

#### SOLUCIÓN

- El primer dígito puede ser cualquiera de 9 dígitos (ya que no puede ser 0). El segundo, tercero y cuarto dígitos pueden ser uno cualquiera de 10. Entonces, se pueden formar  $9 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 = 9\,000$  números.
- El primer dígito puede ser cualquiera de 9 dígitos (cualquiera menos el 0).  
El segundo dígito puede ser cualquiera de 9 dígitos (cualquiera menos el usado como primer dígito).  
El tercer dígito puede ser cualquiera de 8 dígitos (cualquiera menos los usados como los dos primeros dígitos).  
El cuarto dígito puede ser cualquiera de 7 dígitos (cualquiera menos los usados como los primeros tres dígitos).  
De manera que se pueden formar  $9 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 7 = 4\,536$  números.

#### Otro método

El primer dígito puede ser uno cualquiera de 9 dígitos y los tres restantes se pueden escoger de  ${}_9P_3$  maneras. Por lo tanto, se pueden formar  $9 \cdot {}_9P_3 = 9 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 7 = 4\,536$  números.

- El primer dígito se puede formar de 9 maneras, el segundo de 8 maneras y el tercero de 7 maneras. Por lo tanto, se pueden formar  $9 \cdot 8 \cdot 7 = 504$  números.

#### Otro método

El primer dígito se puede formar de 9 maneras y los siguientes dos dígitos en  ${}_9P_2$  maneras. Por lo tanto, se pueden encontrar  $9 \cdot {}_8P_2 = 9 \cdot 8 \cdot 7 = 504$  números.

- 6.22** En un librero se van a acomodar cuatro libros diferentes de matemáticas, 6 libros diferentes de física y 2 libros diferentes de química. ¿Cuántos son los acomodos posibles si: a) los libros de cada materia tienen que estar juntos y b) sólo los libros de matemáticas tienen que estar juntos?

#### SOLUCIÓN

- Los libros de matemáticas se pueden ordenar entre ellos de  ${}_4P_4 = 4!$  maneras, los libros de física de  ${}_6P_6 = 6!$  maneras, los libros de química de  ${}_2P_2 = 2!$  maneras y los tres grupos de  ${}_3P_3 = 3!$  maneras. Por lo tanto, el número de acomodos que se busca es  $= 4! 6! 2! 3! = 207\,360$ .

- b) Considere a los 4 libros de matemáticas como un solo libro. Entonces se tienen 9 libros que se pueden acomodar de  ${}_9P_9 = 9!$  maneras. En todas estas maneras, los libros de matemáticas están juntos. Pero los libros de matemáticas, entre ellos, se pueden acomodar de  ${}_4P_4 = 4!$  maneras. Por lo tanto, el número de acomodos buscado es  $= 9! \cdot 4! = 8\,709\,120$ .
- 6.23** Cinco canicas rojas, 2 canicas blancas y 3 azules están ordenadas en línea. Si las canicas de un mismo color no se distinguen unas de otras, ¿cuántas ordenaciones distintas se pueden tener? Para evaluar esta expresión usar la función de EXCEL definida como =MULTINOMIAL.

### SOLUCIÓN

Supóngase que existen  $P$  ordenaciones diferentes. Multiplicando  $P$  por el número de maneras en las que se pueden ordenar: a) las 5 canicas rojas entre sí, b) las 2 canicas blancas entre sí y c) las 3 canicas azules entre sí (es decir, multiplicando  $P$  por  $5! \cdot 2! \cdot 3!$ ), se obtiene el número de maneras en que se pueden ordenar las 10 canicas si son distinguibles (es decir,  $10!$ ). Por lo tanto,

$$(5!2!3!)P = 10! \quad \text{y} \quad P = \frac{10!}{5!2!3!}$$

En general, el número de ordenaciones de  $n$  objetos de los cuales  $n_1$  son iguales,  $n_2$  son iguales, ...,  $n_k$  son iguales es

$$\frac{n!}{n_1!n_2!\cdots n_k!}$$

donde  $n_1 + n_2 + \cdots + n_k = n$ .

Con la función de EXCEL definida como =MULTINOMIAL(5,2,3) se obtiene 2 520.

- 6.24** ¿De cuántas maneras pueden sentarse 7 personas a una mesa redonda si: a) las 7 se pueden sentar en cualquier lugar y b) 2 determinadas personas no pueden sentarse juntas?

### SOLUCIÓN

- a) Se escoge una de las personas para sentarla en cualquier lugar. Entonces, las 6 personas restantes se pueden sentar de  $6! = 720$  maneras, que es el total de maneras de acomodar a 7 personas en una mesa redonda.
- b) Considérese como una sola persona a las dos personas que no se pueden sentar juntas. Entonces, quedan 6 personas en total que se pueden acomodar de  $5!$  maneras. Pero las dos personas consideradas como una sola, entre ellas, se pueden acomodar de  $2!$  maneras. Por lo tanto, la cantidad de maneras en que se pueden acomodar 6 personas en una mesa redonda sentando 2 personas juntas es  $5!2! = 240$ .

Entonces, empleando el inciso a), el total de maneras en las que 7 personas se pueden sentar a una mesa redonda, de manera que 2 determinadas personas no se sienten juntas  $= 720 - 240 = 480$  maneras.

## COMBINACIONES

- 6.25** ¿De cuántas maneras pueden colocarse 10 objetos en dos grupos, uno de 4 y otro de 6 objetos?

### SOLUCIÓN

Esto es lo mismo que el número de ordenaciones de 10 objetos de los cuales 4 son iguales entre sí y 6 son iguales entre sí. De acuerdo con el problema 6.23, esto es

$$\frac{10!}{4!6!} = \frac{10 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 7}{4!} = 210$$

Este problema es equivalente a hallar de cuántas maneras se pueden tomar 4 de 10 objetos (o bien 6 de 10 objetos) sin importar el orden.

En general, el número de maneras en que se pueden seleccionar  $r$  de  $n$  objetos, a lo que se le llama el número de *combinaciones* de  $n$  cosas tomadas de  $r$  en  $r$ , se denota  $\binom{n}{r}$  y está dado por

$$\binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!} = \frac{n(n-1)\cdots(n-r+1)}{r!} = \frac{{}_nP_r}{r!}$$

- 6.26** Evaluar: a)  $\binom{7}{4}$ , b)  $\binom{6}{5}$ , c)  $\binom{4}{4}$  y d) evaluar los incisos del a) al c) empleando EXCEL.

**SOLUCIÓN**

$$a) \quad \binom{7}{4} = \frac{7!}{4! 3!} = \frac{7 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 4}{4!} = \frac{7 \cdot 6 \cdot 5}{3 \cdot 2 \cdot 1} = 35$$

$$b) \quad \binom{6}{5} = \frac{6!}{5! 1!} = \frac{6 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2}{5!} = 6 \quad \text{o bien} \quad \binom{6}{5} = \binom{6}{1} = 6$$

- c)  $\binom{4}{4}$  es el número de maneras en que se pueden tomar todos los cuatro objetos, y sólo hay una manera, por lo que  $\binom{4}{4} = 1$ . Obsérvese que formalmente

$$\binom{4}{4} = \frac{4!}{4! 0!} = 1$$

si definimos  $0! = 1$ .

- d) =COMBIN(7, 4) da 35, =COMBIN(6, 5) da 6 y =COMBIN(4, 4) da 1.

- 6.27** ¿De cuántas maneras puede formarse de un grupo de 9 personas un comité de 5 personas?

**SOLUCIÓN**

$$\binom{9}{5} = \frac{9!}{5! 4!} = \frac{9 \cdot 8 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 5}{5!} = 126$$

- 6.28** Con 5 matemáticos y 7 físicos hay que formar un comité que conste de 2 matemáticos y 3 físicos. ¿De cuántas maneras se puede formar este comité si: a) puede incluirse a cualquiera de los matemáticos y a cualquiera de los físicos, b) hay uno de los físicos que tiene que formar parte del comité y c) hay dos de los matemáticos que no pueden formar parte del comité?

**SOLUCIÓN**

- a) Dos matemáticos de 5 se pueden seleccionar de  $\binom{5}{2}$  formas y 3 físicos de 7 se pueden seleccionar de  $\binom{7}{3}$  formas. Así que las maneras en que se puede seleccionar el comité son

$$\binom{5}{2} \cdot \binom{7}{3} = 10 \cdot 35 = 350$$

- b) Dos matemáticos de 5 se pueden seleccionar de  $\binom{5}{2}$  maneras y 2 físicos de 6 se pueden seleccionar de  $\binom{6}{2}$  maneras. Así que las maneras en que se puede seleccionar el comité son

$$\binom{5}{2} \cdot \binom{6}{2} = 10 \cdot 15 = 150$$

- c) Dos matemáticos de 3 se pueden seleccionar de  $\binom{3}{2}$  maneras y 3 físicos de 7 se pueden seleccionar de  $\binom{7}{3}$  maneras. Así que las maneras en que se puede seleccionar el comité son

$$\binom{3}{2} \cdot \binom{7}{3} = 3 \cdot 35 = 105$$

- 6.29** Una niña tiene 5 flores que son todas distintas. ¿Cuántos ramos puede formar?

**SOLUCIÓN**

Cada flor puede tratarse de dos maneras; puede ser elegida para el ramo o puede no ser elegida para el ramo. Como a cada una de estas dos maneras de tratar a la flor le corresponden 2 maneras de tratar a cada una de las otras flores, el número de maneras en que se puede tratar a las 5 flores es  $= 2^5$ . Pero estas  $2^5$  maneras comprenden el caso en que no se elija ninguna de las flores. Por lo tanto, la cantidad de ramos que pueden formarse es  $= 2^5 - 1 = 31$ .

**Otro método**

La niña puede elegir 1 de 5 flores, 2 de 5 flores, ..., 5 de 5 flores. Por lo tanto, el número de ramos que puede formar es

$$\binom{5}{1} + \binom{5}{2} + \binom{5}{3} + \binom{5}{4} + \binom{5}{5} = 5 + 10 + 10 + 5 + 1 = 31$$

En general, para todo número entero positivo  $n$ ,

$$\binom{n}{1} + \binom{n}{2} + \binom{n}{3} + \cdots + \binom{n}{n} = 2^n - 1$$

- 6.30** Con 7 consonantes y 5 vocales ¿cuántas palabras con 4 consonantes distintas y 3 vocales distintas pueden formarse? No importa que las palabras no tengan significado.

**SOLUCIÓN**

Las cuatro consonantes distintas pueden elegirse de  $\binom{7}{4}$  maneras, las tres vocales distintas pueden elegirse de  $\binom{5}{3}$  maneras, y estas 7 letras (4 consonantes y 3 vocales) pueden ordenarse de  ${}_7P_7 = 7!$  maneras. Por lo tanto, el número de palabras es

$$\binom{7}{4} \cdot \binom{5}{3} \cdot 7! = 35 \cdot 10 \cdot 5\,040 = 1\,764\,000$$

**APROXIMACIÓN DE STIRLING PARA  $n!$** 

- 6.31** Evaluar  $50!$

**SOLUCIÓN**

Cuando  $n$  es grande se tiene  $n! \approx \sqrt{2\pi n} n^n e^{-n}$ ; por lo tanto,

$$50! \approx \sqrt{2\pi(50)} 50^{50} e^{-50} = S$$

Para evaluar  $S$  se usan logaritmos base 10. Por lo tanto,

$$\begin{aligned} \log S &= \log(\sqrt{100\pi} 50^{50} e^{-50}) = \frac{1}{2} \log 100 + \frac{1}{2} \log \pi + 50 \log 50 - 50 \log e \\ &= \frac{1}{2} \log 100 + \frac{1}{2} \log 3.142 + 50 \log 50 - 50 \log 2.718 \\ &= \frac{1}{2}(2) + \frac{1}{2}(0.4972) + 50(1.6990) - 50(0.4343) = 64.4846 \end{aligned}$$

de lo que se encuentra que  $S = 3.05 \times 10^{64}$ , número que tiene 65 dígitos.

**PROBABILIDAD Y ANÁLISIS COMBINATORIO**

- 6.32** Una caja contiene 8 pelotas rojas, 3 blancas y 9 azules. Si se extraen 3 pelotas en forma aleatoria, determinar la probabilidad de que: *a)* las 3 sean rojas, *b)* las 3 sean blancas, *c)* 2 sean rojas y 1 sea blanca, *d)* por lo menos 1 sea blanca, *e)* se extraiga una de cada color y *f)* se extraigan en el orden roja, blanca, azul.

**SOLUCIÓN**

- a) Primer método*

Sean  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  los eventos “pelota roja en la primera extracción”, “pelota roja en la segunda extracción”, “pelota roja en la tercera extracción”, respectivamente. Entonces  $R_1R_2R_3$  denota el evento de que las tres pelotas extraídas sean rojas.

$$\Pr\{R_1R_2R_3\} = \Pr\{R_1\} \Pr\{R_2|R_1\} \Pr\{R_3|R_1R_2\} = \left(\frac{8}{20}\right)\left(\frac{7}{19}\right)\left(\frac{6}{18}\right) = \frac{14}{285}$$

**Segundo método**

$$\text{Probabilidad buscada} = \frac{\text{maneras de seleccionar 3 de 8 pelotas rojas}}{\text{maneras de seleccionar 3 de 20 pelotas}} = \frac{\binom{8}{3}}{\binom{20}{3}} = \frac{14}{285}$$

b) Empleando el segundo método del inciso a),

$$\Pr\{\text{las 3 sean blancas}\} = \frac{\binom{3}{3}}{\binom{20}{3}} = \frac{1}{1\,140}$$

También se puede usar el primer método del inciso a)

$$c) \quad \Pr\{\text{2 sean rojas y 1 sea blanca}\} = \frac{\binom{\text{maneras de seleccionar}}{2 \text{ de 8 pelotas rojas}} \binom{\text{maneras de seleccionar}}{1 \text{ de 3 pelotas blancas}}}{\text{maneras de seleccionar 3 de 20 pelotas}} = \frac{\binom{8}{2} \binom{3}{1}}{\binom{20}{3}} = \frac{7}{95}$$

$$d) \quad \Pr\{\text{ninguna sea blanca}\} = \frac{\binom{17}{3}}{\binom{20}{3}} = \frac{34}{57} \quad \text{de manera que} \quad \Pr\{\text{por lo menos 1 sea blanca}\} = 1 - \frac{34}{57} = \frac{23}{57}$$

$$e) \quad \Pr\{\text{1 de cada color}\} = \frac{\binom{8}{1} \binom{3}{1} \binom{9}{1}}{\binom{20}{3}} = \frac{18}{95}$$

f) Empleando el inciso e),

$$\Pr\{\text{extraer las pelotas en el orden rojo, blanco, azul}\} = \frac{1}{3!} \Pr\{\text{1 de cada color}\} = \frac{1}{6} \left( \frac{18}{95} \right) = \frac{3}{95}$$

**Otro método**

$$\Pr\{R_1 W_2 B_2\} = \Pr\{R_1\} \Pr\{W_2|R_1\} \Pr\{B_2|R_1 W_2\} = \left(\frac{8}{20}\right) \left(\frac{3}{19}\right) \left(\frac{9}{18}\right) = \frac{3}{95}$$

- 6.33** De una baraja de 52 cartas bien barajadas se extraen 5 cartas. Encontrar la probabilidad de que: a) 4 sean ases; b) 4 sean ases y 1 sea rey; c) 3 sean dieces y 2 sean sotas; d) sean 9, 10, sota, reina y rey en cualquier orden; e) 3 sean de un palo y 2 de otro palo, y f) se obtenga por lo menos 1 as.

**SOLUCIÓN**

$$a) \quad \Pr\{4 \text{ ases}\} = \binom{4}{4} \cdot \frac{\binom{48}{1}}{\binom{52}{5}} = \frac{1}{54\,145}$$

$$b) \quad \Pr\{4 \text{ ases y 1 rey}\} = \binom{4}{4} \cdot \frac{\binom{4}{1}}{\binom{52}{5}} = \frac{1}{649\,740}$$

c)  $\Pr \{3 \text{ sean díces y 2 sean sotas}\} = \binom{4}{3} \cdot \frac{\binom{4}{2}}{\binom{52}{5}} = \frac{1}{108\,290}$

d)  $\Pr \{\text{sean } 9, 10, \text{sota, reina y rey en cualquier orden}\} = \frac{\binom{4}{1} \cdot \binom{4}{1} \cdot \binom{4}{1} \cdot \binom{4}{1} \cdot \binom{4}{1}}{\binom{52}{5}} = \frac{64}{162\,435}$

e) Como hay 4 maneras de elegir el primer palo y 3 maneras de elegir el segundo palo,

$$\Pr \{3 \text{ sean de un palo y 2 de otro palo}\} = \frac{4 \binom{13}{3} \cdot 3 \binom{13}{2}}{\binom{52}{5}} = \frac{429}{4\,165}$$

f)  $\Pr \{\text{ningún as}\} = \frac{\binom{48}{5}}{\binom{52}{5}} = \frac{35\,673}{54\,145} \quad \text{y} \quad \Pr \{\text{por lo menos 1 as}\} = 1 - \frac{35\,673}{54\,145} = \frac{18\,482}{54\,145}$

**6.34** Determinar la probabilidad de tener 3 seises en cinco lanzamientos de un dado.

### SOLUCIÓN

Los lanzamientos del dado se representarán por 5 espacios: — — — — . En cada espacio se tendrá el evento 6 o el evento no-6 ( $\bar{6}$ ); por ejemplo se pueden tener tres 6 y dos no-6 en esta forma  $6\ 6\ \bar{6}\ 6\ \bar{6}$  o en esta forma  $6\ \bar{6}\ 6\ \bar{6}\ 6$ , etcétera.

Ahora la probabilidad de un evento, como, por ejemplo,  $6\ 6\ \bar{6}\ 6\ \bar{6}$  es

$$\Pr \{6\ 6\ \bar{6}\ 6\ \bar{6}\} = \Pr \{6\} \Pr \{6\} \Pr \{\bar{6}\} \Pr \{6\} \Pr \{\bar{6}\} = \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{5}{6} = \left(\frac{1}{6}\right)^3 \left(\frac{5}{6}\right)^2$$

De igual manera,  $\Pr \{6\ \bar{6}\ 6\ \bar{6}\ 6\} = \left(\frac{1}{6}\right)^3 \left(\frac{5}{6}\right)^2$ , etc., para todos los eventos en los que hay tres 6 y dos no-6. Pero de estos eventos hay  $\binom{5}{3} = 10$  y estos eventos son mutuamente excluyentes; por lo tanto, la probabilidad buscada es

$$\Pr \{6\ 6\ \bar{6}\ 6\ \bar{6} \text{ o } 6\ \bar{6}\ 6\ \bar{6}\ 6 \text{ o etc.}\} = \binom{5}{3} \left(\frac{1}{6}\right)^3 \left(\frac{5}{6}\right)^2 = \frac{125}{3\,888}$$

En general si  $q = \Pr \{E\}$  y  $q = \Pr \{\bar{E}\}$ , entonces empleando el razonamiento anterior, la probabilidad de en  $N$  ensayos obtener exactamente  $X$  veces  $E$  es  $\binom{N}{X} p^X q^{N-X}$ .

**6.35** En una fábrica se encuentra que en promedio 20% de los tornillos producidos con una máquina están defectuosos. Si se toman aleatoriamente 10 tornillos producidos con esta máquina en un día, encontrar la probabilidad de que: a) exactamente 2 estén defectuosos, b) 2 o más estén defectuosos y c) más de 5 estén defectuosos.

### SOLUCIÓN

a) Empleando un razonamiento similar al empleado en el problema 6.34,

$$\Pr \{2 \text{ tornillos defectuosos}\} = \binom{10}{2} (0.2)^2 (0.8)^8 = 45(0.04)(0.1678) = 0.3020$$

b)  $\Pr \{2 \text{ o más tornillos defectuosos}\} = 1 - \Pr \{0 \text{ tornillos defectuosos}\} - \Pr \{1 \text{ tornillo defectuoso}\}$

$$\begin{aligned} &= 1 - \binom{10}{0} (0.2)^0 (0.8)^{10} - \binom{10}{1} (0.2)^1 (0.8)^9 \\ &= 1 - (0.8)^{10} - 10(0.2)(0.8)^9 \\ &= 1 - 0.1074 - 0.2684 = 0.6242 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c) \quad \Pr\{\text{más de 5 tornillos defectuosos}\} &= \Pr\{\text{6 tornillos defectuosos}\} + \Pr\{\text{7 tornillos defectuosos}\} \\
 &\quad + \Pr\{\text{8 tornillos defectuosos}\} + \Pr\{\text{9 tornillos defectuosos}\} \\
 &\quad + \Pr\{\text{10 tornillos defectuosos}\} \\
 &= \binom{10}{6}(0.2)^6(0.8)^4 + \binom{10}{7}(0.2)^7(0.8)^3 + \binom{10}{8}(0.2)^8(0.8)^2 \\
 &\quad + \binom{10}{9}(0.2)^9(0.8) + \binom{10}{10}(0.2)^{10} \\
 &= 0.00637
 \end{aligned}$$

- 6.36** Si en el problema 6.35 se tomaron 1 000 muestras de 10 tornillos cada una, ¿en cuántas de estas muestras se espera encontrar: a) exactamente 2 tornillos defectuosos, b) 2 o más tornillos defectuosos y c) más de 5 tornillos defectuosos?

### SOLUCIÓN

- a) La cantidad esperada es  $(1\ 000)(0.3020) = 302$ , de acuerdo con el problema 6.35a).
- b) La cantidad esperada es  $(1\ 000)(0.6242) = 624$ , de acuerdo con el problema 6.35b).
- c) La cantidad esperada es  $(1\ 000)(0.00637) = 6$ , de acuerdo con el problema 6.35c).

### DIAGRAMAS DE EULER O DE VENN Y PROBABILIDAD

- 6.37** En la figura 6.11 se muestra cómo representar el espacio muestral de cuatro lanzamientos de una moneda y los eventos  $E_1$ , obtener exactamente dos caras y dos cruces, y  $E_2$ , obtener lo mismo en el primero y en el último lanzamiento. Ésta es una manera de representar diagramas de Venn y eventos en una hoja de cálculo.

| espacio | muestras | evento $E_1$ | evento $E_2$ |
|---------|----------|--------------|--------------|
| h       | h        | h            | Y            |
| h       | h        | h            | Y            |
| h       | h        | t            |              |
| h       | h        | t            | X            |
| h       | t        | h            | Y            |
| h       | t        | t            | X            |
| h       | t        | t            | Y            |
| h       | t        | t            |              |
| t       | h        | h            |              |
| t       | h        | h            | X            |
| t       | h        | t            | Y            |
| t       | h        | t            | X            |
| t       | t        | h            |              |
| t       | t        | h            | X            |
| t       | t        | t            | Y            |
| t       | t        | t            |              |

Figura 6-11 EXCEL, representación del espacio muestral y de los eventos  $E_1$  y  $E_2$ .

Debajo de  $E_1$  se han marcado con una X los casos en los que se da el evento  $E_1$  y debajo de  $E_2$  se han marcado con una Y los casos en los que se da el evento  $E_2$ .

- a) Dar los casos que pertenecen a  $E_1 \cap E_2$  y  $E_1 \cup E_2$ .
- b) Dar las probabilidades  $\Pr\{E_1 \cap E_2\}$  y  $\Pr\{E_1 \cup E_2\}$ .

### SOLUCIÓN

- a) Los casos que pertenecen a  $E_1 \cap E_2$  son los que tienen X y Y. Por lo tanto,  $E_1 \cap E_2$  consta de los casos htth y thht. Los casos que pertenecen a  $E_1 \cup E_2$  son los que tienen X, Y o X y Y. Los casos que pertenecen a  $E_1 \cup E_2$  son: hhhh, hhth, hhtt, hthh, htth, htth, thht, thth, tthh, ttth y tttt.
- b)  $\Pr\{E_1 \cap E_2\} = 2/16 = 1/8$  o 0.125.  $\Pr\{E_1 \cup E_2\} = 12/16 = 3/4$  o 0.75.

**6.38** Usando un espacio muestral y diagramas de Venn, mostrar que

- $\Pr\{A \cup B\} = \Pr\{A\} + \Pr\{B\} - \Pr\{A \cap B\}$
- $\Pr\{A \cup B \cup C\} = \Pr\{A\} + \Pr\{B\} + \Pr\{C\} - \Pr\{A \cap B\} - \Pr\{B \cap C\} - \Pr\{A \cap C\} + \Pr\{A \cap B \cap C\}$

### SOLUCIÓN

- La unión no mutuamente excluyente  $A \cup B$  se puede expresar como la unión mutuamente excluyente de  $A \cap \bar{B}$ ,  $B \cap \bar{A}$ , y  $A \cap B$ .

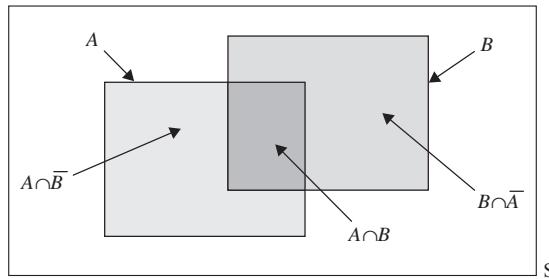


Figura 6-12 Una unión expresada como unión disyunta.

$$\Pr\{A \cup B\} = \Pr\{A \cap \bar{B}\} + \Pr\{B \cap \bar{A}\} + \Pr\{A \cap B\}$$

Ahora en el lado derecho de la ecuación se suma y se resta  $\Pr\{A \cap B\}$ .

$$\Pr\{A \cup B\} = \Pr\{A \cap \bar{B}\} + \Pr\{B \cap \bar{A}\} + \Pr\{A \cap B\} + [\Pr\{A \cap B\} - \Pr\{A \cap B\}]$$

Reordenando esta ecuación de la manera siguiente:

$$\Pr\{A \cup B\} = [\Pr\{A \cap \bar{B}\} + \Pr\{A \cap B\}] + [\Pr\{B \cap \bar{A}\} + \Pr\{A \cap B\}] - \Pr\{A \cap B\}$$

$$\Pr\{A \cup B\} = \Pr\{A\} + \Pr\{B\} - \Pr\{A \cap B\}$$

- En la figura 6-13, el evento A está compuesto por las regiones 1, 2, 3 y 6, el evento B está compuesto por las regiones 1, 3, 4 y 7, y el evento C está compuesto por las regiones 1, 2, 4 y 5.

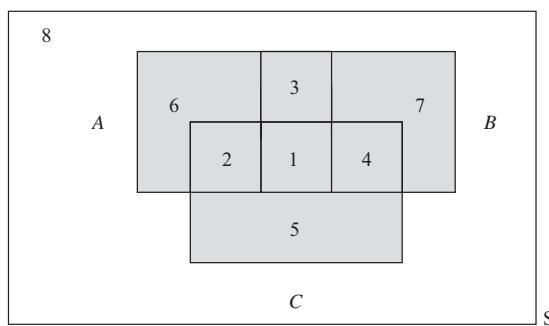


Figura 6-13 La unión no mutuamente excluyente de tres eventos,  $A \cup B \cup C$ .

El espacio muestral de la figura 6-13 está formado por 8 regiones mutuamente excluyentes. Estas 8 regiones se describen como sigue: la región 1 es  $A \cap B \cap C$ , la región 2 es  $A \cap C \cap \bar{B}$ , la región 3 es  $A \cap B \cap \bar{C}$ , la región 4 es  $\bar{A} \cap C \cap B$ , la región 5 es  $\bar{A} \cap C \cap \bar{B}$ , la región 6 es  $A \cap \bar{C} \cap \bar{B}$ , la región 7 es  $\bar{A} \cap \bar{C} \cap B$  y la región 8 es  $\bar{A} \cap \bar{C} \cap \bar{B}$ .

La probabilidad  $\Pr\{A \cup B \cup C\}$  se expresa como la probabilidad de las 7 regiones mutuamente excluyentes que forman  $A \cup B \cup C$ , como sigue:

$$\begin{aligned} & \Pr\{A \cap B \cap C\} + \Pr\{A \cap C \cap \bar{B}\} + \Pr\{A \cap B \cap \bar{C}\} + \Pr\{\bar{A} \cap C \cap B\} \\ & + \Pr\{\bar{A} \cap C \cap \bar{B}\} + \Pr\{A \cap \bar{C} \cap \bar{B}\} + \Pr\{\bar{A} \cap \bar{C} \cap B\} \end{aligned}$$

Cada parte de esta ecuación puede reescribirse y toda completa simplificarse para obtener:

$$\Pr\{A \cup B \cup C\} = \Pr\{A\} + \Pr\{B\} + \Pr\{C\} - \Pr\{A \cap B\} - \Pr\{B \cap C\} - \Pr\{A \cap C\} + \Pr\{A \cap B \cap C\}$$

Por ejemplo,  $\Pr\{\bar{A} \cap C \cap \bar{B}\}$  puede expresarse como

$$\Pr\{C\} - \Pr\{A \cap C\} - \Pr\{B \cap C\} + \Pr\{A \cap B \cap C\}$$

- 6.39** En una entrevista a 500 adultos se les hizo una pregunta que constaba de tres partes: 1) ¿Tiene usted teléfono celular? 2) ¿Tiene un ipod? 3) ¿Tiene conexión a Internet? Los resultados se presentan a continuación (ninguno contestó que no a todas las preguntas).

|                     |     |  |     |
|---------------------|-----|--|-----|
| Teléfono celular    | 329 | teléfono celular e ipod                | 83  |
| ipod                | 186 | teléfono celular y conexión a Internet | 217 |
| conexión a Internet | 295 | ipod y conexión a Internet             | 63  |

Dar la probabilidad de los eventos siguientes:

- a) que conteste sí a todas las preguntas, b) que tenga teléfono celular, pero no conexión a Internet, c) que tenga ipod, pero no teléfono celular, d) que tenga conexión a Internet, pero no ipod e) que tenga teléfono celular o conexión a Internet pero no ipod y g) que tenga teléfono celular, pero no ipod o conexión a Internet.

### SOLUCIÓN

El evento  $A$  es que el entrevistado tenga teléfono celular, el evento  $B$  es que el entrevistado tenga ipod y el evento  $C$  es que el entrevistado tenga conexión a Internet.

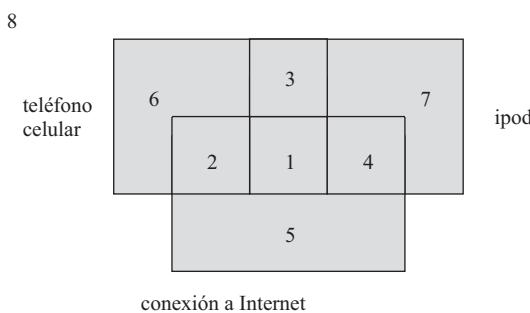


Figura. 6-14 Diagrama de Ven para el problema 6.39.

- a) La probabilidad de que todos estén en la unión es 1, ya que ninguno respondió no a las tres partes.  $\Pr\{A \cup B \cup C\}$  está dada por la expresión siguiente:

$$\Pr\{A\} + \Pr\{B\} + \Pr\{C\} - \Pr\{A \cap B\} - \Pr\{B \cap C\} - \Pr\{A \cap C\} + \Pr\{A \cap B \cap C\}$$

$$1 = 329/500 + 186/500 + 295/500 - 83/500 - 63/500 - 217/500 + \Pr\{A \cap B \cap C\}$$

Despejando  $\Pr\{A \cap B \cap C\}$ , se obtiene  $1 - 447/500$  o bien  $53/500 = 0.106$ .

Antes de responder los demás incisos conviene llenar las regiones de la figura 6-14, como se muestra en la figura 6-15. La cantidad correspondiente a la región 2 es la cantidad en la región  $A \cap C$  menos la cantidad en la región 1 o bien  $217 - 53 = 164$ . La cantidad correspondiente a la región 3 es la cantidad en la región  $A \cap B$  menos la cantidad en la región 1 o bien  $83 - 53 = 30$ . La cantidad en la región 4 es la cantidad correspondiente a la región  $B \cap C$  menos el número en la región 1 o bien  $63 - 53 = 10$ . La cantidad correspondiente a la región 5 es la cantidad en la región  $C$  menos la cantidad en las regiones 1, 2 y 4 o bien  $295 - 53 - 164 - 10 = 68$ . La cantidad correspondiente a la región 6 es la cantidad en la región  $A$  menos la cantidad en las regiones 1, 2 y 3 o bien  $329 - 53 - 164 - 30 = 82$ . La cantidad correspondiente a la región 7 es  $186 - 53 - 30 - 10 = 93$ .

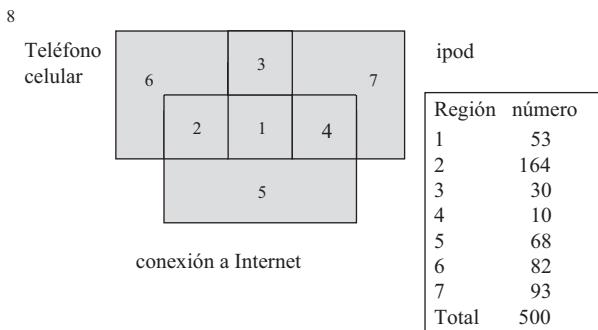


Figura 6-15 A, B y C divididas en regiones mutuamente excluyentes.

- b) regiones 3 y 6 o bien  $30 + 82 = 112$  y la probabilidad es  $112/500 = 0.224$ .
- c) regiones 4 y 7 o bien  $10 + 93 = 103$  y la probabilidad es  $103/500 = 0.206$ .
- d) regiones 2 y 5 o bien  $164 + 68 = 232$  y la probabilidad es  $232/500 = 0.464$ .
- e) regiones 2, 5 o bien  $60 + 82 = 314$  y la probabilidad es  $314/500 = 0.628$ .
- f) región 6 u 82 y la probabilidad es  $82/500 = 0.164$ .

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### REGLAS FUNDAMENTALES DE LA PROBABILIDAD

- 6.40** Determinar o estimar la probabilidad  $p$  de cada uno de los eventos siguientes:
- a) Al extraer de una baraja bien barajada una sola carta, obtener rey, as, sota de tréboles o rey de diamantes.
  - b) Se lanzan dos dados, una sola vez, y la suma de los puntos que aparecen en ellos resulte 8.
  - c) Encontrar un tornillo que no esté defectuoso si de 600 tornillos examinados, 12 estuvieron defectuosos.
  - d) Se lanzan dos dados una vez y la suma de los puntos resulte 7 u 11.
  - e) Al lanzar tres veces una moneda obtener cara por lo menos una vez.
- 6.41** Un experimento consiste en extraer sucesivamente tres cartas de una baraja bien barajada. Sea  $E_1$  el evento “rey” en la primera extracción,  $E_2$  el evento “rey” en la segunda extracción y  $E_3$  el evento “rey” en la tercera extracción. Exprese en palabras el significado de:
- a)  $\Pr\{E_1 \bar{E}_2\}$
  - c)  $\bar{E}_1 + \bar{E}_2$
  - e)  $\bar{E}_1 \bar{E}_2 \bar{E}_3$
  - b)  $\Pr\{E_1 + E_2\}$
  - d)  $\Pr\{E_3 | E_1 \bar{E}_2\}$
  - f)  $\Pr\{E_1 E_2 + \bar{E}_2 E_3\}$
- 6.42** De una caja que contiene 10 canicas rojas, 30 blancas, 20 azules y 15 anaranjadas, se extrae una canica. Hallar la probabilidad de que la canica extraída sea: a) anaranjada o roja, b) ni azul ni roja, c) no azul, d) blanca y e) roja, blanca o azul.
- 6.43** De la caja del problema 6.42 se extraen sucesivamente dos canicas, devolviendo a la caja cada canica después de extraída. Encontrar la probabilidad de que: a) las dos sean blancas, b) la primera sea roja y la segunda sea blanca, c) ninguna sea anaranjada, d) sean rojas o blancas o las dos cosas (roja y blanca), e) la segunda no sea azul, f) la primera sea anaranjada, g) por lo menos una sea azul, h) cuando mucho una sea roja, i) la primera sea blanca, pero la segunda no, y f) sólo una sea roja.

- 6.44** Repetir el problema 6.43, pero suponiendo que una vez extraídas las canicas no se devuelven a la caja.
- 6.45** Encontrar la probabilidad de que al lanzar dos veces dos dados los puntos que se obtengan sumen 7: *a)* en el primer lanzamiento, *b)* en uno de los dos lanzamientos y *c)* en los dos lanzamientos.
- 6.46** De una baraja de 52 cartas, bien barajada, se extraen sucesivamente dos cartas. Encontrar la probabilidad de que: *a)* la primera carta extraída no sea un 10 de tréboles o un as, *b)* la primera carta sea un as, pero la segunda no, *c)* por lo menos una de las cartas sea un diamante, *d)* las cartas no sean de un mismo palo, *e)* no más de una de las cartas sea una figura (sota, reina o rey), *f)* la segunda carta no sea una figura, y *g)* la segunda carta no sea una figura dado que la primera sí fue una figura, *h)* las cartas sean figuras o espadas o ambas.
- 6.47** Una caja contiene papelillos numerados del 1 al 9. Si se extraen 3 papelillos de uno en uno, encontrar la probabilidad de que tengan números: 1) non, par, non o 2) par, non, par.
- 6.48** Las oportunidades de que *A* gane un partido de ajedrez contra *B* son 3:2. Si se van a jugar 3 partidos, ¿cuáles son las posibilidades: *a)* a favor de que *A* gane por lo menos dos de los tres partidos y *b)* en contra de que *A* pierda los dos primeros partidos contra *B*?
- 6.49** En un monedero hay dos monedas de plata y dos monedas de cobre, en otro monedero hay cuatro monedas de plata y 3 monedas de cobre. Si se toma al azar una moneda de uno de los dos monederos, ¿cuál es la probabilidad de que sea una moneda de plata?
- 6.50** La probabilidad de que en 25 años un hombre esté vivo es  $\frac{3}{5}$  y la probabilidad de que en 25 años su esposa esté viva es  $\frac{2}{3}$ . Encontrar la probabilidad de que en 25 años: *a)* ambos estén vivos, *b)* sólo el hombre esté vivo, *c)* sólo la esposa esté viva y *d)* por lo menos uno esté vivo.
- 6.51** De 800 familias con cuatro hijos cada una, ¿qué porcentaje se espera que tenga: *a)* 2 niños y 2 niñas, *b)* por lo menos 1 niño, *c)* ninguna niña y *d)* cuando mucho 2 niñas? Supóngase que la probabilidad de niño y de niña es la misma.

### DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

- 6.52** Si  $X$  es la variable aleatoria que indica la cantidad de niños en una familia con 4 hijos (ver problema 6.51): *a)* construir una tabla que dé la distribución de probabilidad de  $X$  y *b)* representar gráficamente la distribución de probabilidad del inciso *a*.
- 6.53** Una variable aleatoria continua que toma valores sólo entre  $X = 2$  y  $X = 8$ , inclusive, tiene una función de densidad dada por  $a(X + 3)$ , donde  $a$  es una constante. *a)* Calcular  $a$ . Hallar *b)*  $\Pr\{3 < X < 5\}$ , *c)*  $\Pr\{X \geq 4\}$  y *d)*  $\Pr\{|X - 5| < 0.5\}$ .
- 6.54** De una urna que contiene 4 canicas rojas y 6 blancas se extraen 3 canicas sin reemplazo. Si  $X$  es la variable aleatoria que indica la cantidad de canicas rojas extraídas: *a)* construir una tabla que muestre la distribución de probabilidad de  $X$ , y *b)* graficar la distribución.
- 6.55** *a)* Se lanzan 3 dados y  $X =$  la suma de las tres caras que caen hacia arriba. Dar la distribución de probabilidad de  $X$ . *b)* Encontrar  $\Pr\{7 \leq X \leq 11\}$ .

### ESPERANZA MATEMÁTICA

- 6.56** ¿Cuál es el precio justo a pagar en un juego en el que se pueden ganar \$25 con probabilidad 0.2 y \$10 con probabilidad 0.4?

- 6.57** Si llueve, un vendedor de paraguas gana \$30 diarios. Si no, pierde \$6 diarios. ¿Cuál es la esperanza si la probabilidad de que llueva es 0.3?
- 6.58** A y B juegan un partido en el que lanzan una moneda 3 veces. El primero que obtiene cara, gana el partido. Si A lanza primero la moneda y si el valor total de las apuestas es \$20, ¿con cuánto deberá contribuir cada uno para que el juego sea justo?
- 6.59** Dada la distribución de probabilidad de la tabla 6.4, hallar: a)  $E(X)$ , b)  $E(X^2)$ , c)  $E[(X - \bar{X})^2]$ , d)  $E(X^3)$ .

**Tabla 6.4**

|        |     |      |     |
|--------|-----|------|-----|
| $X$    | -10 | -20  | 30  |
| $p(X)$ | 1/5 | 3/10 | 1/2 |

- 6.60** Dados los datos del problema 6.54, encontrar: a) la media, b) la varianza y c) la desviación estándar de la distribución de  $X$  e interpretar los resultados.
- 6.61** Una variable aleatoria toma el valor 1 con probabilidad  $p$  y el valor 0 con probabilidad  $q = 1 - p$ . Probar que: a)  $E(X) = p$  y b)  $E[(X - \bar{X})^2] = pq$ .
- 6.62** Probar que: a)  $E(2X + 3) = 2E(X) + 3$  y b)  $E[(X - \bar{X})^2] = E(X^2) - [E(X)]^2$ .
- 6.63** En el problema 6.55, encontrar el valor esperado de  $X$ .

## PERMUTACIONES

- 6.64** Evaluar: a)  ${}_4P_2$ , b)  ${}_7P_5$ , y c)  ${}_{10}P_3$ . Dar la función de EXCEL para evaluar los incisos a), b) y c).
- 6.65** ¿Para qué valores de  $n$  es  ${}_{n+1}P_3 = {}_nP_4$ ?
- 6.66** ¿De cuántas maneras se pueden sentar 5 personas en un sofá si el sofá sólo tiene 3 asientos?
- 6.67** ¿De cuántas maneras pueden ordenarse 7 libros en un librero si: a) pueden ordenarse como se deseé, b) hay 3 libros que deben estar juntos y c) hay 2 libros que deben estar al final?
- 6.68** ¿Cuántos números de cinco dígitos diferentes pueden formarse con los dígitos 1, 2, 3, ..., 9 si: a) el número debe ser non y b) si los dos primeros dígitos de cada número tienen que ser pares?
- 6.69** Resolver el problema 6.68 si se permiten dígitos repetidos.
- 6.70** ¿Cuántos números de tres dígitos pueden formarse con tres 4, cuatro 2 y dos 3?
- 6.71** ¿De cuántas maneras pueden sentarse a una mesa redonda 3 hombres y 3 mujeres si: a) sin ninguna restricción, b) hay dos mujeres que no pueden sentarse juntas y c) cada mujer debe estar entre dos hombres?

**COMBINACIONES**

**6.72** Evaluar: *a)*  $\binom{7}{3}$ , *b)*  $\binom{8}{4}$  y *c)*  $\binom{10}{8}$ . Dar la función de EXCEL para evaluar los incisos *a), b) y c)*.

**6.73** ¿Para qué valores de  $n$  se cumple que:  $3\binom{n+1}{3} = 7\binom{n}{2}$ ?

**6.74** ¿De cuántas maneras se pueden seleccionar 6 de 10 preguntas?

**6.75** ¿Cuántos comités de 3 hombres y 4 mujeres pueden formarse a partir de un grupo de 8 hombres y 6 mujeres?

**6.76** ¿De cuántas maneras pueden seleccionarse 2 hombres, 4 mujeres, 3 niños y 3 niñas de un grupo de 6 hombres, 8 mujeres, 4 niños y 5 niñas si: *a)* no hay ninguna restricción y *b)* hay un hombre y una mujer que tienen que seleccionarse?

**6.77** ¿De cuántas maneras puede dividirse un grupo de 10 personas en: *a)* dos grupos de 7 y 3 personas y *b)* tres grupos de 4, 3, y 2 personas?

**6.78** A partir de 5 profesionales de la estadística y 6 economistas, se va a formar un grupo que conste de 3 profesionales de la estadística y 2 economistas. ¿Cuántos comités diferentes pueden formarse si: *a)* no hay restricción alguna, *b)* hay 2 profesionales de la estadística que deben estar en el comité y *c)* hay un economista que no puede formar parte del comité?

**6.79** Encontrar la cantidad de: *a)* combinaciones y *b)* permutaciones de cuatro letras que pueden formarse con las letras de la palabra *Tennessee*.

**6.80** Probar que  $1 - \binom{n}{1} + \binom{n}{2} - \binom{n}{3} + \cdots + (-1)^n \binom{n}{n} = 0$ .

**APROXIMACIÓN DE STIRLING PARA  $n!$** 

**6.81** ¿De cuántas maneras se pueden seleccionar 30 individuos de un grupo de 100 individuos?

**6.82** Mostrar que para valores grandes de  $n$   $\binom{2n}{n} = 2^{2n}/\sqrt{\pi n}$ , aproximadamente.

**PROBLEMAS MISCELÁNEOS**

**6.83** De una baraja de 52 cartas se extraen tres cartas. Encontrar la probabilidad de que: *a)* dos sean sotas y una sea rey, *b)* todas sean de un mismo palo, *c)* todas sean de palos diferentes y *d)* por lo menos dos sean ases.

**6.84** Encontrar la probabilidad de que de cuatro lanzamientos de un par de dados, por lo menos en dos se obtenga como suma 7.

**6.85** Si 10% de los remaches que produce una máquina están defectuosos, ¿cuál es la probabilidad de que de 5 remaches tomados al azar: *a)* ninguno esté defectuoso, *b)* 1 esté defectuoso y *c)* por lo menos 2 estén defectuosos?

- 6.86**
  - a)* Dar un espacio muestral para los resultados de 2 lanzamientos de una moneda empleando 1 para representar “cara” y 0 para representar “cruz”.
  - b)* A partir de este espacio muestral, determinar la probabilidad de por lo menos una cara.
  - c)* ¿Se puede dar el espacio muestral para los resultados de tres lanzamientos de una moneda? Determinar con ayuda de este espacio muestral la probabilidad de cuando mucho dos caras.

- 6.87** En una encuesta realizada con 200 votantes, se obtuvo la información siguiente acerca de tres candidatos ( $A$ ,  $B$  y  $C$ ) de un partido que competían por tres puestos diferentes:

|  |   |
|--|---|
| 28 a favor de $A$ y $B$                  | 122 a favor de $B$ o $C$ , pero no de $A$ |
| 98 a favor de $A$ o $B$ , pero no de $C$ | 64 a favor de $C$ , pero no de $A$ o $B$  |
| 42 a favor de $B$ , pero no de $A$ o $C$ | 14 a favor de $A$ y $C$ , pero no de $B$  |

¿Cuántos de los votantes estuvieron a favor de: *a)* los tres candidatos, *b)*  $A$  sin tener en cuenta a  $B$  o  $C$ , *c)*  $B$  sin tener en cuenta a  $A$  o  $C$ , *d)*  $C$  sin tener en cuenta a  $A$  o  $B$ , *e)*  $A$  y  $B$ , pero no de  $C$ , y *f)* sólo uno de los candidatos?

- 6.88** *a)* Probar que para dos eventos  $E_1$  y  $E_2$  cualquiera,  $\Pr\{E_1 + E_2\} \leq \Pr\{E_1\} + \Pr\{E_2\}$ .  
*b)* Generalizar los resultados del inciso *a*).
- 6.89** Sean  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$  tres eventos diferentes y se sabe que por lo menos uno de ellos ha ocurrido. Supóngase que cualquiera de estos eventos tiene como resultado otro evento  $A$ , que también se sabe que ya ha ocurrido. Si todas las probabilidades  $\Pr\{E_1\}$ ,  $\Pr\{E_2\}$ ,  $\Pr\{E_3\}$  y  $\Pr\{A|E_1\}$ ,  $\Pr\{A|E_2\}$ ,  $\Pr\{A|E_3\}$  se suponen conocidas, probar que

$$\Pr\{E_1|A\} = \frac{\Pr\{E_1\} \Pr\{A|E_1\}}{\Pr\{E_1\} \Pr\{A|E_1\} + \Pr\{E_2\} \Pr\{A|E_2\} + \Pr\{E_3\} \Pr\{A|E_3\}}$$

existiendo resultados similares para  $\Pr\{E_2|A\}$  y  $\Pr\{E_3|A\}$ . Esto se conoce como *regla o teorema de Bayes*, y es útil para calcular las probabilidades de diversos  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$  hipotéticos que han dado como resultado un evento  $A$ . Este resultado puede generalizarse.

- 6.90** Se tienen tres joyeros idénticos con dos cajones cada uno. En cada cajón del primer joyero hay un reloj de oro. En cada cajón del segundo joyero hay un reloj de plata. En un cajón del tercer joyero hay un reloj de oro, y en el otro cajón hay un reloj de plata. Si se toma al azar uno de los joyeros, se abre uno de los cajones y se encuentra que contiene un reloj de plata, ¿cuál es la probabilidad de que en el otro cajón se encuentre un reloj de oro? [Sugerencia: Emplear el problema 6.89.]
- 6.91** Encontrar la probabilidad de ganar en un sorteo en el que hay que elegir seis números, en cualquier orden, de entre los números 1, 2, 3, ..., 40.
- 6.92** Repetir el problema 6.91 si hay que escoger: *a)* cinco, *b)* cuatro y *c)* tres números.
- 6.93** En un juego de póquer, a cada jugador se le dan cinco cartas de un juego de 52 naipes. Determinar las posibilidades en contra de que a un jugador le toque:
- a)* Una flor imperial (as, rey, reina, sota y 10 de un mismo palo).
  - b)* Una corrida (5 cartas consecutivas y del mismo palo; por ejemplo, 3, 4, 5, 6 y 7 de espadas).
  - c)* Un póquer (por ejemplo 4 sietes).
  - d)* Un full (3 de un tipo y 2 de otro; por ejemplo, 3 reyes y 2 dieces).
- 6.94**  $A$  y  $B$  acuerdan encontrarse entre 3 y 4 de la tarde y también acuerdan que no esperarán al otro más de 10 minutos. Determinar la probabilidad de que se encuentren.
- 6.95** En un segmento de recta de longitud  $a > 0$  se seleccionan en forma aleatoria dos puntos. Encontrar la probabilidad de que los tres segmentos de recta que se forman puedan ser los lados de un triángulo.
- 6.96** Un tetraedro regular consta de cuatro lados. Cada lado tiene la misma posibilidad de caer hacia abajo cuando el tetraedro es lanzado y vuelve al reposo. En cada uno de los lados hay uno de los números 1, 2, 3 o 4. Sobre una mesa se lanzan tres tetraedros regulares. Sea  $X$  la suma de las caras que caen hacia abajo. Dar la distribución de probabilidad de  $X$ .
- 6.97** En el problema 6.96, encontrar el valor esperado de  $X$ .

- 6.98** En una encuesta realizada a un grupo de personas se encontró que 25% eran fumadoras y bebedoras, 10% eran fumadoras pero no bebedoras, y 33% eran bebedoras pero no fumadoras. ¿Qué porcentaje eran fumadoras o bebedoras o ambas cosas?
- 6.99** Acme electronics fabrica MP3 en tres lugares. La fábrica situada en Omaha fabrica el 50% de los MP3, 1% de los cuales tienen algún defecto. La fábrica en Memphis fabrica el 30%, el 2% de éstos tienen algún defecto. La fábrica en Fort Meyers fabrica el 20% y el 3% de éstos tienen algún defecto. Si se toma al azar un MP3, ¿cuál es la probabilidad de que tenga algún defecto?
- 6.100** Con respecto al problema 6.99: se encuentra un MP3 que tiene algún defecto, ¿cuál es la probabilidad de que haya sido fabricado en Fort Meyers?

# LAS DISTRIBUCIONES BINOMIAL, NORMAL Y DE POISSON

7

## LA DISTRIBUCIÓN BINOMIAL

Si  $p$  es la probabilidad de que en un solo ensayo ocurra un evento (llamada la probabilidad de *éxito*) y  $q = 1 - p$  es la probabilidad de que este evento no ocurra en un solo ensayo (llamada probabilidad de *fracaso*), entonces la probabilidad de que el evento ocurra exactamente  $X$  veces en  $N$  ensayos (es decir, que ocurran  $X$  éxitos y  $N - X$  fracasos) está dada por

$$p(X) = \binom{N}{X} p^X q^{N-X} = \frac{N!}{X!(N-X)!} p^X q^{N-X} \quad (I)$$

donde  $X = 0, 1, 2, \dots, N$ ;  $N! = N(N-1)(N-2)\cdots 1$ ; y  $0! = 1$  por definición (ver problema 6.34).

**EJEMPLO 1** La probabilidad de obtener exactamente dos caras en seis lanzamientos de una moneda es

$$\binom{6}{2} \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{2}\right)^{6-2} = \frac{6}{2!4!} \left(\frac{1}{2}\right)^6 = \frac{15}{64}$$

empleando la fórmula (I) con  $N = 6$ ,  $X = 2$  y  $p = q = \frac{1}{2}$ .

Usando EXCEL, la evaluación de la probabilidad de 2 caras en 6 lanzamientos se obtiene de la siguiente manera: =BINOMDIST(2,6,0.5,0), donde la función BINOMDIST tiene 4 parámetros.

El primer parámetro es el número de éxitos, el segundo es el número de ensayos, el tercero es la probabilidad de éxito y el cuarto es 0 o 1. Cero da la probabilidad del número de éxitos y uno da la probabilidad acumulada. La función =BINOMDIST(2,6,0.5,0) da 0.234375 que es lo mismo que  $15/64$ .

**EJEMPLO 2** La probabilidad de obtener por lo menos 4 caras en 6 lanzamientos de una moneda es

$$\binom{6}{4} \left(\frac{1}{2}\right)^4 \left(\frac{1}{2}\right)^{6-4} + \binom{6}{5} \left(\frac{1}{2}\right)^5 \left(\frac{1}{2}\right)^{6-5} + \binom{6}{6} \left(\frac{1}{2}\right)^6 \left(\frac{1}{2}\right)^{6-6} = \frac{15}{64} + \frac{6}{64} + \frac{1}{64} = \frac{11}{32}$$

A la distribución de probabilidad discreta (1) suele llamársele *distribución binomial*, debido a que a  $X = 0, 1, 2, \dots, N$  le corresponden los términos sucesivos de la *fórmula binomial* o *expansión binomial*,

$$(q+p)^N = q^N + \binom{N}{1} q^{N-1} p + \binom{N}{2} q^{N-2} p^2 + \dots + p^N \quad (2)$$

donde  $1, \binom{N}{1}, \binom{N}{2}, \dots$  se conocen como *coeficientes binomiales*.

Empleando EXCEL, la solución es  $=1\text{-BINOMDIST}(3,6,0.5,1)$  o 0.34375 que es lo mismo que  $11/32$ . Como  $\Pr\{X \geq 4\} = 1 - \Pr\{X \leq 3\}$  y  $\text{BINOMDIST}(3,6,0.5,1) = \Pr\{X \leq 3\}$ , este cálculo da la probabilidad de obtener por lo menos 4 caras.

**EJEMPLO 3**

$$\begin{aligned} (q+p)^4 &= q^4 + \binom{4}{1} q^3 p + \binom{4}{2} q^2 p^2 + \binom{4}{3} q p^3 + p^4 \\ &= q^4 + 4q^3 p + 6q^2 p^2 + 4q p^3 + p^4 \end{aligned}$$

En la tabla 7.1 se enumeran algunas de las propiedades de las distribuciones binomiales.

**Tabla 7.1 Distribución binomial**

|                                 |                                     |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| Media                           | $\mu = Np$                          |
| Varianza                        | $\sigma^2 = Npq$                    |
| Desviación estándar             | $\sigma = \sqrt{Npq}$               |
| Coeficiente momento de sesgo    | $\alpha_3 = \frac{q-p}{\sqrt{Npq}}$ |
| Coeficiente momento de curtosis | $\alpha_4 = 3 + \frac{1-6pq}{Npq}$  |

**EJEMPLO 4** En 100 lanzamientos de una moneda, el número medio de caras es  $\mu = Np = (100)(\frac{1}{2}) = 50$ ; éste es el número *esperado* de caras en 100 lanzamientos de una moneda. La desviación estándar es  $\sigma = \sqrt{Npq} = \sqrt{(100)(\frac{1}{2})(\frac{1}{2})} = 5$ .

## LA DISTRIBUCIÓN NORMAL

Uno de los ejemplos más importantes de distribución de probabilidad continua es la *distribución normal, curva normal* o *distribución gaussiana*, que se define mediante la ecuación

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-1/2(X-\mu)^2/\sigma^2} \quad (3)$$

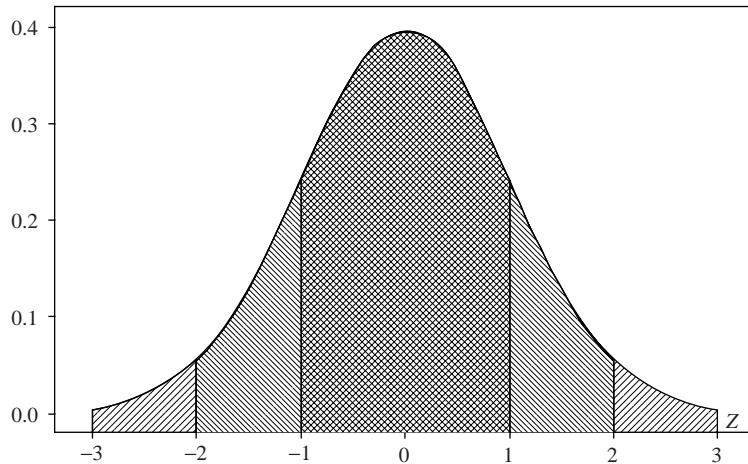
donde  $\mu$  = media,  $\sigma$  = desviación estándar,  $\pi = 3.14159\dots$  y  $e = 2.71828\dots$ . El total del área, que está limitada por la curva (3) y por el eje  $X$  es 1; por lo tanto, el área bajo la curva comprendida entre  $X = a$  y  $X = b$ , donde  $a < b$  representa la probabilidad de que  $X$  se encuentre entre  $a$  y  $b$ . Esta probabilidad se denota por  $\Pr\{a < X < b\}$ .

Si la variable  $X$  se expresa en términos de unidades estándar [ $z = (X - \mu)/\sigma$ ], en lugar de la ecuación (3) se tiene la llamada *forma estándar*:

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-1/2z^2} \quad (4)$$

En estos casos se dice que  $z$  está *distribuida normalmente y que tiene media 0 y varianza 1*. En la figura 7-1 se presenta la gráfica de esta curva normal estandarizada; también se muestra que las áreas comprendidas entre  $z = -1$  y  $z = +1$ ,  $z = -2$  y  $z = +2$ , y  $z = -3$  y  $z = +3$  son iguales, respectivamente, a 68.27%, 95.45% y 99.73% del área total, que es 1. En la tabla que se presenta en el apéndice II se dan las áreas bajo esta curva entre  $z = 0$  y cualquier valor positivo de  $z$ . Con ayuda de esta tabla se encuentra el área entre dos valores de  $z$  cualesquiera, empleando la simetría de la curva respecto a  $z = 0$ .

En la tabla 7.2 se enumeran algunas propiedades de la distribución normal dada por la ecuación (3).



**Figura 7-1** Curva normal estandarizada: 68.27% del área está entre  $z = -1$  y  $z = 1$ , 95.45% del área está entre  $z = -2$  y  $z = 2$  y 99.73% del área está entre  $z = -3$  y  $z = 3$ .

**Tabla 7.2 Distribución normal**

|                                 |                                     |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| Media                           | $\mu$                               |
| Varianza                        | $\sigma^2$                          |
| Desviación estandar             | $\sigma$                            |
| Coeficiente momento de sesgo    | $\alpha_3 = 0$                      |
| Coeficiente momento de curtosis | $\alpha_4 = 3$                      |
| Desviación media                | $\sigma\sqrt{2/\pi} = 0.7979\sigma$ |

## RELACIÓN ENTRE LAS DISTRIBUCIONES BINOMIAL Y NORMAL

Si  $N$  es grande y si ni  $p$  ni  $q$  tienen valores muy cercanos a cero, la distribución binomial puede ser aproximada por una distribución normal con la variable estandarizada dada por

$$z = \frac{X - Np}{\sqrt{Npq}}$$

A medida que crece  $N$ , la aproximación mejora y en el caso límite es exacta; esto se muestra en las tablas 7.1 y 7.2, de donde es claro que a medida que  $N$  aumenta, el sesgo y la curtosis de la distribución binomial se aproximan al sesgo y a la curtosis de la distribución normal. En la práctica, la aproximación es muy buena si tanto  $Np$  como  $Nq$  son mayores a 5.

**EJEMPLO 5** En la figura 7-2 se muestra la distribución binomial correspondiente a  $N = 16$  y  $p = 0.5$ , ilustrando las probabilidades de obtener  $X$  caras en 16 lanzamientos de una moneda, así como la distribución normal con media 8 y desviación estándar 2. Obsérvese lo semejante que son ambas distribuciones.  $X$  es binomial, con media =  $Np = 16(0.5) = 8$  y desviación estándar  $\sqrt{Npq} = \sqrt{16(0.5)(0.5)} = 2$ .  $Y$  es una curva normal con media = 8 y desviación estándar 2.

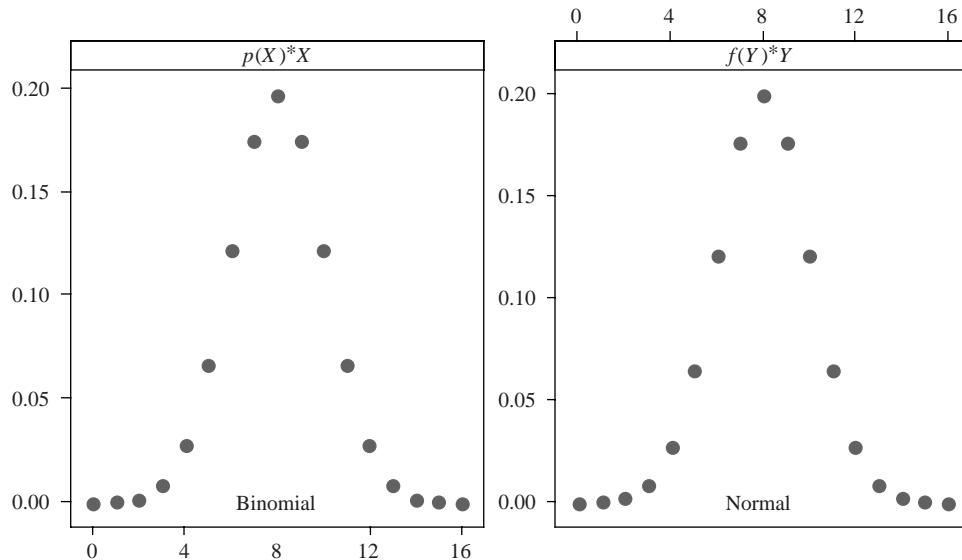


Figura 7-2 Gráfica de una curva binomial correspondiente a  $N = 16$  y  $p = 0.5$  y una curva normal con media = 8 y desviación estándar = 2.

## LA DISTRIBUCIÓN DE POISSON

La distribución de probabilidad discreta

$$p(X) = \frac{\lambda^X e^{-\lambda}}{X!} \quad X = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

donde  $e = 2.71828\dots$  y  $\lambda$  es una constante dada, se conoce como *distribución de Poisson* en honor a Siméon-Denis Poisson, quien la descubrió a comienzos del siglo XIX. Los valores de  $p(X)$  pueden calcularse empleando la tabla del apéndice VIII (la cual da los valores de  $e^{-\lambda}$  para diversos valores de  $\lambda$ ) o usando logaritmos.

**EJEMPLO 6** El número de personas por día que llegan a una sala de urgencias tiene una distribución de Poisson con media 5. Hallar la probabilidad de que cuando mucho lleguen tres personas por día y la probabilidad de que por lo menos lleguen 8 personas por día. La probabilidad de que cuando mucho lleguen 3 personas es  $\Pr\{X \leq 3\} = e^{-5}\{5^0/0! + 5^1/1! + 5^2/2! + 5^3/3!\}$ . De acuerdo con el apéndice VIII,  $e^{-5} = 0.006738$  y  $\Pr\{X \leq 3\} = 0.006738\{1 + 5 + 12.5 + 20.8333\} = 0.265$ . Empleando MINITAB, la secuencia “Calc ⇒ Probability distribution ⇒ Poisson” da la caja de diálogo de la distribución de Poisson que se llena como se muestra en la figura 7-3.

El resultado que se obtiene es el siguiente:

Función de distribución acumulada

Poisson with mean = 5

|   |                 |
|---|-----------------|
| x | $\Pr(X \leq x)$ |
| 3 | 0.265026        |

El resultado es el mismo que el hallado usando el apéndice VIII.

La probabilidad de que lleguen por lo menos 8 personas por día es  $\Pr\{X \geq 8\} = 1 - \Pr\{X \leq 7\}$ . Empleando MINITAB se encuentra:

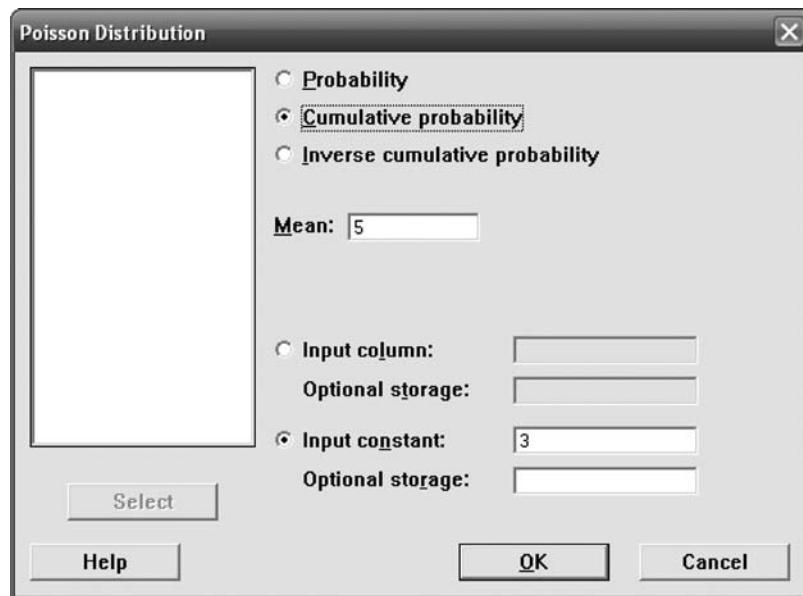


Figura 7-3 MINITAB, cuadro de diálogo para la distribución de Poisson.

#### Función de distribución acumulada

```
Poisson with mean = 5
x      P(X <= x)
7      0.866628
```

$$\Pr\{X \geq 8\} = 1 - 0.867 = 0.133.$$

En la tabla 7.3 se enumeran algunas de las propiedades de la distribución de Poisson.

Tabla 7.3 Distribución de Poisson

|                                 |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Media                           | $\mu = \lambda$               |
| Varianza                        | $\sigma^2 = \lambda$          |
| Desviación estándar             | $\sigma = \sqrt{\lambda}$     |
| Coeficiente momento de sesgo    | $\alpha_3 = 1/\sqrt{\lambda}$ |
| Coeficiente momento de curtosis | $\alpha_4 = 3 + 1/\lambda$    |

## RELACIÓN ENTRE LAS DISTRIBUCIONES BINOMIAL Y DE POISSON

En la distribución binomial ( $I$ ), si  $N$  es grande, pero la probabilidad  $p$  de la ocurrencia de un evento es cercana a 0, con lo que  $q = 1 - p$  es cercana 1, al evento se le llama *evento raro*. En la práctica se considera que un evento es raro si el número de ensayos es por lo menos 50 ( $N \geq 50$ ) mientras que  $Np$  es menor a cinco. En tales casos la distribución binomial ( $I$ ) se aproxima con la distribución de Poisson ( $S$ ) con  $\lambda = Np$ . Esto se comprueba comparando las tablas 7.1 y 7.3, ya que sustituyendo  $\lambda = Np$ ,  $q \approx 1$  y  $p \approx 0$  en la tabla 7.1 se obtienen los resultados de la tabla 7.3.

Como existe una relación entre las distribuciones binomial y normal, también existe una relación entre las distribuciones de Poisson y normal. En efecto, se puede demostrar que a medida que  $\lambda$  aumenta indefinidamente, la distribución de Poisson se aproxima a la distribución normal con variable estandarizada  $(X - \lambda)/\sqrt{\lambda}$ .

## LA DISTRIBUCIÓN MULTINOMIAL

Si los eventos  $E_1, E_2, \dots, E_K$  pueden ocurrir con probabilidades  $p_1, p_2, \dots, p_K$ , respectivamente, entonces la probabilidad de que  $E_1, E_2, \dots, E_K$  ocurran  $X_1, X_2, \dots, X_K$  veces, respectivamente, es

$$\frac{N!}{X_1!X_2!\cdots X_K!} p_1^{X_1} p_2^{X_2} \cdots p_K^{X_K} \quad (6)$$

donde  $X_1 + X_2 + \cdots + X_K = N$ . A esta distribución, que es una generalización de la distribución binomial, se le llama *distribución multinomial* debido a que la ecuación (6) es el término general en la *expansión multinomial*  $(p_1 + p_2 + \cdots + p_K)^N$ .

**EJEMPLO 7** Si un dado se lanza 12 veces, la probabilidad de obtener cada uno de los números 1, 2, 3, 4, 5 y 6 exactamente dos veces es

$$\frac{12!}{2!2!2!2!2!} \left(\frac{1}{6}\right)^2 \left(\frac{1}{6}\right)^2 \left(\frac{1}{6}\right)^2 \left(\frac{1}{6}\right)^2 \left(\frac{1}{6}\right)^2 \left(\frac{1}{6}\right)^2 = \frac{1\,925}{559\,872} = 0.00344$$

Los números *esperados* de veces que ocurrirán  $E_1, E_2, \dots, E_K$  en  $N$  ensayos son  $Np_1, Np_2, \dots, Np_K$ , respectivamente.

Para obtener este resultado se puede emplear EXCEL de la manera siguiente: se usan =MULTINOMIAL(2,2,2,2,2,2) para evaluar  $\frac{12!}{2!2!2!2!2!2!}$ , con lo que se obtiene 7 484 400. Esto se divide después entre  $6^{12}$ , que es 2 176 782 336. El cociente es 0.00344.

## AJUSTE DE DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIAS MUESTRALES MEDIANTE DISTRIBUCIONES TEÓRICAS

Cuando por medio de un razonamiento probabilístico, o de alguna otra manera, se tiene idea de la distribución de una población, tal distribución teórica (también llamada distribución *modelo* o *esperada*) puede ajustarse a distribuciones de frecuencias de una muestra obtenidas de una población. El método utilizado consiste, por lo general, en emplear la media y la desviación estándar de la muestra para estimar la media y la desviación estándar de la población (ver problemas 7.31, 7.33 y 7.34).

Para probar la *bondad de ajuste* de las distribuciones teóricas se usa la prueba *ji-cuadrada* (que se presenta en el capítulo 12). Cuando se quiere determinar si una distribución normal representa un buen ajuste para datos dados es conveniente emplear *papel gráfico de curva normal*, o *papel gráfico de probabilidad*, como se le suele llamar (ver problema 7.32).

## PROBLEMAS RESUELTOS

### LA DISTRIBUCIÓN BINOMIAL

**7.1** Evaluar las expresiones siguientes:

a)  $5!$       c)  $\binom{8}{3}$       e)  $\binom{4}{4}$

b)  $\frac{6!}{2!4!}$       d)  $\binom{7}{5}$       f)  $\binom{4}{0}$

### SOLUCIÓN

a)  $5! = 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 = 120$

b)  $\frac{6!}{2!4!} = \frac{6 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1}{(2 \cdot 1)(4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1)} = \frac{6 \cdot 5}{2 \cdot 1} = 15$

c)  $\binom{8}{3} = \frac{8!}{3!(8-3)!} = \frac{8!}{3!5!} = \frac{8 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1}{(3 \cdot 2 \cdot 1)(5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1)} = \frac{8 \cdot 7 \cdot 6}{3 \cdot 2 \cdot 1} = 56$

$$d) \quad \binom{7}{5} = \frac{7!}{5!2!} = \frac{7 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1}{(5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1)(2 \cdot 1)} = \frac{7 \cdot 6}{2 \cdot 1} = 21$$

$$e) \quad \binom{4}{4} = \frac{4!}{4!0!} = 1 \quad \text{ya que por definición, } 0! = 1$$

$$f) \quad \binom{4}{0} = \frac{4!}{0!4!} = 1$$

- 7.2** Supóngase que 15% de la población es zurda. Encontrar la probabilidad de que en un grupo de 50 individuos haya: *a)* cuando mucho 10 zurdos, *b)* por lo menos 5 zurdos, *c)* entre 3 y 6 zurdos y *d)* exactamente 5 zurdos. Usar EXCEL para hallar las soluciones.

### SOLUCIÓN

- a)* La expresión de EXCEL =BINOMDIST(10,50,0.15,1) da  $\Pr\{X \leq 10\}$  que es 0.8801.
  - b)* Se pide hallar  $\Pr\{X \geq 5\}$  que es igual a  $1 - \Pr\{X \leq 4\}$ , ya que  $X \geq 5$  y  $X \leq 4$  son eventos complementarios. La expresión de EXCEL para obtener el resultado buscado es =1-BINOMDIST(4,50,0.15,1), que da 0.8879.
  - c)* Se pide hallar  $\Pr\{3 \leq X \leq 6\}$  que es igual a  $\Pr\{X \leq 6\} - \Pr\{X \leq 2\}$ . La expresión de EXCEL para obtener el resultado buscado es =BINOMDIST(6,50,0.15,1)-BINOMDIST(2,50,0.15,1) que proporciona 0.3471.
  - d)* La expresión de EXCEL =BINOMDIST(5,50,0.15,0) da  $\Pr\{X = 5\}$  que da 0.1072.
- 7.3** Hallar la probabilidad de que en cinco lanzamientos de un dado aparezca un 3: *a)* ninguna vez, *b)* una vez, *c)* dos veces, *d)* tres veces, *e)* cuatro veces, *f)* cinco veces y *g)* dar la solución empleando MINITAB.

### SOLUCIÓN

La probabilidad de obtener un 3 en un solo lanzamiento =  $p = \frac{1}{6}$  y la probabilidad de no obtener un 3 en un solo lanzamiento =  $q = 1 - p = \frac{5}{6}$ ; por lo tanto:

$$a) \quad \Pr\{\text{aparezca un 3 cero veces}\} = \binom{5}{0} \left(\frac{1}{6}\right)^0 \left(\frac{5}{6}\right)^5 = (1)(1) \left(\frac{5}{6}\right)^5 = \frac{3125}{7776}$$

$$b) \quad \Pr\{\text{aparezca un 3 una vez}\} = \binom{5}{1} \left(\frac{1}{6}\right)^1 \left(\frac{5}{6}\right)^4 = (5) \left(\frac{1}{6}\right) \left(\frac{5}{6}\right)^4 = \frac{3125}{7776}$$

$$c) \quad \Pr\{\text{aparezca un 3 dos veces}\} = \binom{5}{2} \left(\frac{1}{6}\right)^2 \left(\frac{5}{6}\right)^3 = (10) \left(\frac{1}{36}\right) \left(\frac{125}{216}\right) = \frac{625}{3888}$$

$$d) \quad \Pr\{\text{aparezca un 3 tres veces}\} = \binom{5}{3} \left(\frac{1}{6}\right)^3 \left(\frac{5}{6}\right)^2 = (10) \left(\frac{1}{216}\right) \left(\frac{25}{36}\right) = \frac{125}{3888}$$

$$e) \quad \Pr\{\text{aparezca un 3 cuatro veces}\} = \binom{5}{4} \left(\frac{1}{6}\right)^4 \left(\frac{5}{6}\right)^1 = (5) \left(\frac{1}{1296}\right) \left(\frac{5}{6}\right) = \frac{25}{7776}$$

$$f) \quad \Pr\{\text{aparezca un 3 cinco veces}\} = \binom{5}{5} \left(\frac{1}{6}\right)^5 \left(\frac{5}{6}\right)^0 = (1) \left(\frac{1}{7776}\right) (1) = \frac{1}{7776}$$

Obsérvese que estas probabilidades corresponden a los términos de la expansión binomial

$$\left(\frac{5}{6} + \frac{1}{6}\right)^5 = \left(\frac{5}{6}\right)^5 + \binom{5}{1} \left(\frac{5}{6}\right)^4 \left(\frac{1}{6}\right) + \binom{5}{2} \left(\frac{5}{6}\right)^3 \left(\frac{1}{6}\right)^2 + \binom{5}{3} \left(\frac{5}{6}\right)^2 \left(\frac{1}{6}\right)^3 + \binom{5}{4} \left(\frac{5}{6}\right) \left(\frac{1}{6}\right)^4 + \left(\frac{1}{6}\right)^5 = 1$$

- g)* En la columna C1 se ingresan los enterados 0 a 5 y después se llena el cuadro de diálogo para la distribución binomial como se indica en la figura 7-4.

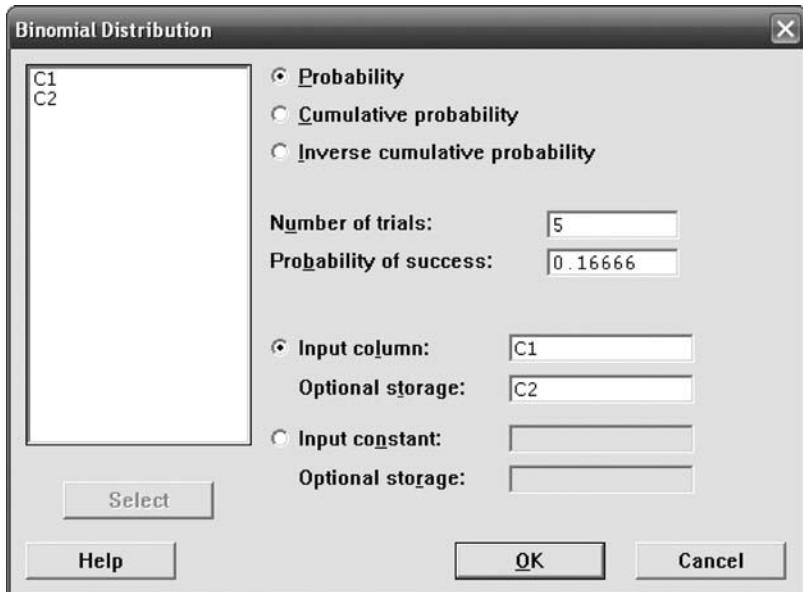


Figura 7-4 MINITAB, cuadro de diálogo para el problema 7.3g).

En la hoja de cálculo se obtiene el siguiente resultado:

| C1 | C2       |
|----|----------|
| 0  | 0.401894 |
| 1  | 0.401874 |
| 2  | 0.160742 |
| 3  | 0.032147 |
| 4  | 0.003215 |
| 5  | 0.000129 |

Mostrar que las fracciones dadas en los incisos a) a f) se transforman en los decimales que se obtienen con MINITAB.

- 7.4 Escribir la expansión binomial de a)  $(q + p)^4$  y de b)  $(q + p)^6$ .

### SOLUCIÓN

$$\begin{aligned} a) \quad (q + p)^4 &= q^4 + \binom{4}{1} q^3 p + \binom{4}{2} q^2 p^2 + \binom{4}{3} q p^3 + p^4 \\ &= q^4 + 4q^3 p + 6q^2 p^2 + 4q p^3 + p^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b) \quad (q + p)^6 &= q^6 + \binom{6}{1} q^5 p + \binom{6}{2} q^4 p^2 + \binom{6}{3} q^3 p^3 + \binom{6}{4} q^2 p^4 + \binom{6}{5} q p^5 + p^6 \\ &= q^6 + 6q^5 p + 15q^4 p^2 + 20q^3 p^3 + 15q^2 p^4 + 6q p^5 + p^6 \end{aligned}$$

Los coeficientes 1, 4, 6, 4, 1 y 1, 6, 15, 20, 15, 6, 1 son los *coeficientes binomiales* correspondientes a  $N = 4$  y  $N = 6$ , respectivamente. Si se escriben estos coeficientes para  $N = 0, 1, 2, 3, \dots$ , como se muestra en la figura siguiente, se obtiene el llamado *triángulo de Pascal*. Obsérvese que en cada renglón el primero y el último número es un 1, y que cada número se obtiene sumando los números que se encuentran a la izquierda y a la derecha en el renglón superior.

|  |  |  |   |   |    |    |    |
|--|--|--|---|---|----|----|----|
|  |  |  | 1 |   |    |    |    |
|  |  |  | 1 | 1 |    |    |    |
|  |  |  | 1 | 2 | 1  |    |    |
|  |  |  | 1 | 3 | 3  | 1  |    |
|  |  |  | 1 | 4 | 6  | 4  | 1  |
|  |  |  | 1 | 5 | 10 | 10 | 5  |
|  |  |  | 1 | 6 | 15 | 20 | 15 |
|  |  |  | 1 | 6 | 15 | 20 | 15 |

- 7.5 Encontrar la probabilidad de que en una familia con cuatro hijos haya: *a)* por lo menos un niño y *b)* por lo menos un niño y una niña. Supóngase que la probabilidad de que nazca un niño varón es  $\frac{1}{2}$ .

### SOLUCIÓN

$$a) \quad \Pr\{1 \text{ niño}\} = \binom{4}{1} \left(\frac{1}{2}\right)^1 \left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{4} \quad \Pr\{3 \text{ niños}\} = \binom{4}{3} \left(\frac{1}{2}\right)^3 \left(\frac{1}{2}\right)^1 = \frac{1}{4}$$

$$\Pr\{2 \text{ niños}\} = \binom{4}{2} \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{3}{8} \quad \Pr\{4 \text{ niños}\} = \binom{4}{4} \left(\frac{1}{2}\right)^4 \left(\frac{1}{2}\right)^0 = \frac{1}{16}$$

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} \Pr\{\text{por lo menos } 1 \text{ niño}\} &= \Pr\{1 \text{ niño}\} + \Pr\{2 \text{ niños}\} + \Pr\{3 \text{ niños}\} + \Pr\{4 \text{ niños}\} \\ &= \frac{1}{4} + \frac{3}{8} + \frac{1}{4} + \frac{1}{16} = \frac{15}{16} \end{aligned}$$

### Otro método

$$\Pr\{\text{por lo menos } 1 \text{ niño}\} = 1 - \Pr\{\text{ningún niño}\} = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^4 = 1 - \frac{1}{16} = \frac{15}{16}$$

$$b) \quad \Pr\{\text{por lo menos } 1 \text{ niño y } 1 \text{ niña}\} = 1 - \Pr\{\text{ningún niño}\} - \Pr\{\text{ninguna niña}\} = 1 - \frac{1}{16} - \frac{1}{16} = \frac{7}{8}$$

- 7.6 De 2 000 familias con cuatro hijos cada una, ¿cuántas se esperaría que tuvieran: *a)* por lo menos un niño, *b)* dos niños, *c)* 1 o 2 niñas y *d)* ninguna niña? Consultar el problema 7.5a).

### SOLUCIÓN

- Número esperado de familias por lo menos con 1 niño =  $2\ 000 \cdot \frac{15}{16} = 1\ 875$
- Número esperado de familias con 2 niños =  $2\ 000 \cdot \Pr\{2 \text{ niños}\} = 2\ 000 \cdot \frac{3}{8} = 750$
- $\Pr\{1 \text{ o } 2 \text{ niñas}\} = \Pr\{1 \text{ niña}\} + \Pr\{2 \text{ niñas}\} = \Pr\{1 \text{ niño}\} + \Pr\{2 \text{ niños}\} = \frac{1}{4} + \frac{3}{8} = \frac{5}{8}$ . Número esperado de familias con 1 o 2 niñas =  $2\ 000 \cdot \frac{5}{8} = 1\ 250$
- Número esperado de familias sin ninguna niña =  $2\ 000 \cdot \frac{1}{16} = 125$

- 7.7 Si el 20% de los tornillos que se fabrican con una máquina están defectuosos, determinar la probabilidad de que de 4 tornillos elegidos al azar: *a)* 1 tornillo esté defectuoso, *b)* 0 tornillos estén defectuosos y *c)* cuando mucho 2 tornillos estén defectuosos.

### SOLUCIÓN

La probabilidad de que un tornillo esté defectuoso es  $p = 0.2$  y la probabilidad de que no esté defectuoso es  $q = 1 - p = 0.8$ .

$$a) \quad \Pr\{1 \text{ de } 4 \text{ tornillos esté defectuoso}\} = \binom{4}{1} (0.2)^1 (0.8)^3 = 0.4096$$

b)  $\Pr\{0 \text{ tornillos estén defectuosos}\} = \binom{4}{0}(0.2)^0(0.8)^4 = 0.4096$

c)  $\Pr\{2 \text{ tornillos estén defectuosos}\} = \binom{4}{2}(0.2)^2(0.8)^2 = 0.1536$

Por lo tanto

$$\begin{aligned}\Pr\{\text{cuando mucho } 2 \text{ tornillos estén defectuosos}\} &= \Pr\{0 \text{ tornillos estén defectuosos}\} + \Pr\{1 \text{ tornillo esté defectuoso}\} \\ &\quad + \Pr\{2 \text{ tornillos estén defectuosos}\} \\ &= 0.4096 + 0.4096 + 0.1536 = 0.9728\end{aligned}$$

- 7.8** La probabilidad de que un estudiante que entra a la universidad se titule es 0.4. Determinar la probabilidad de que de 5 estudiantes elegidos al azar: a) ninguno se titule, b) 1 se titule, c) por lo menos 1 se titule, d) todos se titulen y e) emplear STATISTIX para responder los incisos a) a d).

### SOLUCIÓN

a)  $\Pr\{\text{ninguno se titule}\} = \binom{5}{0}(0.4)^0(0.6)^5 = 0.07776 \quad \text{o aproximadamente 0.08}$

b)  $\Pr\{1 \text{ se titule}\} = \binom{5}{1}(0.4)^1(0.6)^4 = 0.2592 \quad \text{o aproximadamente 0.26}$

c)  $\Pr\{\text{por lo menos } 1 \text{ se titule}\} = 1 - \Pr\{\text{ninguno se titule}\} = 0.92224 \quad \text{o aproximadamente 0.92}$

d)  $\Pr\{\text{todos se titulen}\} = \binom{5}{5}(0.4)^5(0.6)^0 = 0.01024 \quad \text{o aproximadamente 0.01}$

- e) STATISTIX sólo evalúa probabilidades binomiales acumuladas. Con el cuadro de diálogo de la figura 7-5 se obtiene la distribución de probabilidad binomial acumulada para  $N = 5$ ,  $p = 0.4$ ,  $q = 0.6$  y  $x = 0, 1, 4$  y  $5$ .

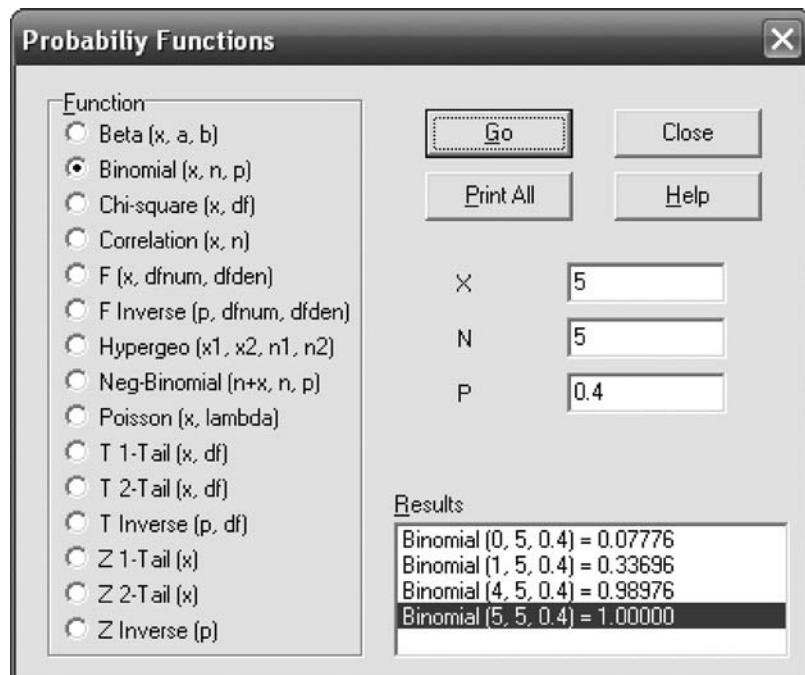


Figura 7-5 STATISTIX, cuadro de diálogo para el problema 7.8e).

Mediante la información obtenida en el último cuadro de diálogo, se tiene que: la probabilidad de que ninguno se titule es  $\Pr\{X = 0\} = \text{Binomial}(0.5, 0.4) = 0.07776$ . La probabilidad de que 1 se titule es  $\Pr\{X = 1\} = \Pr\{X \leq 1\} - \Pr\{X \leq 0\} = \text{Binomial}(1.5, 0.4) - \text{Binomial}(0.5, 0.4) = 0.33696 - 0.07776 = 0.2592$ . La probabilidad de que por lo menos 1 se titule es  $\Pr\{X \geq 1\} = 1 - \Pr\{X = 0\} = 1 - \text{Binomial}(0.5, 0.4) = 0.92224$ . La probabilidad de que todos se titulen es  $\Pr\{X = 5\} = \Pr\{X \leq 5\} - \Pr\{X \leq 4\} = \text{Binomial}(5.5, 0.4) - \text{Binomial}(4.5, 0.4) = 1.00000 - 0.98976 = 0.01024$ . Obsérvese que STATISTIX únicamente da la probabilidad binomial acumulada y también algunas de las tablas que aparecen en los libros de texto dan únicamente probabilidades binomiales acumuladas.

- 7.9** ¿Cuál es la probabilidad de que en 6 lanzamientos de un par de dados se obtenga como suma 9: a) dos veces y b) por lo menos 2 veces?

### SOLUCIÓN

Cada una de las 6 maneras en que puede caer el primer dado se asocia con cada una de las 6 maneras en que puede caer el segundo dado; por lo tanto, hay  $6 \cdot 6 = 36$  maneras en que pueden caer los dos dados. Se puede tener: 1 en el primer dado y 1 en el segundo dado, 1 en el primer dado y 2 en el segundo dado, etc., lo que se denota  $(1, 1)$ ,  $(1, 2)$ , etcétera.

De estas 36 maneras (todas igualmente probables), la suma 9 se obtiene en 4 casos:  $(3, 6)$ ,  $(4, 5)$ ,  $(5, 4)$  y  $(6, 3)$ . Por lo tanto, la probabilidad de que en un lanzamiento de los dos dados la suma sea 9 es  $p = \frac{4}{36} = \frac{1}{9}$  y la probabilidad de que en un lanzamiento la suma de los dos dados no sea 9 es  $q = 1 - p = \frac{8}{9}$ .

$$\begin{aligned} a) \quad \Pr\{2 nueves en 6 lanzamientos\} &= \binom{6}{2} \left(\frac{1}{9}\right)^2 \left(\frac{8}{9}\right)^{6-2} = \frac{61\,440}{531\,441} \\ b) \quad \Pr\{\text{por lo menos } 2 \text{ nueves}\} &= \Pr\{2 \text{ nueves}\} + \Pr\{3 \text{ nueves}\} + \Pr\{4 \text{ nueves}\} + \Pr\{5 \text{ nueves}\} + \Pr\{6 \text{ nueves}\} \\ &= \binom{6}{2} \left(\frac{1}{9}\right)^2 \left(\frac{8}{9}\right)^4 + \binom{6}{3} \left(\frac{1}{9}\right)^3 \left(\frac{8}{9}\right)^3 + \binom{6}{4} \left(\frac{1}{9}\right)^4 \left(\frac{8}{9}\right)^2 + \binom{6}{5} \left(\frac{1}{9}\right)^5 \left(\frac{8}{9}\right)^1 + \binom{6}{6} \left(\frac{1}{9}\right)^6 \left(\frac{8}{9}\right)^0 \\ &= \frac{61\,440}{531\,441} + \frac{10\,240}{531\,441} + \frac{960}{531\,441} + \frac{48}{531\,441} = \frac{1}{531\,441} = \frac{72\,689}{531\,441} \end{aligned}$$

### Otro método

$$\begin{aligned} \Pr\{\text{por lo menos } 2 \text{ nueves}\} &= 1 - \Pr\{0 \text{ nueves}\} - \Pr\{1 \text{ nueve}\} \\ &= 1 - \binom{6}{0} \left(\frac{1}{9}\right)^0 \left(\frac{8}{9}\right)^6 - \binom{6}{1} \left(\frac{1}{9}\right)^1 \left(\frac{8}{9}\right)^5 = \frac{72\,689}{531\,441} \end{aligned}$$

- 7.10** Evaluar: a)  $\sum_{X=0}^N Xp(X)$  y b)  $\sum_{X=0}^N X^2 p(X)$ , donde  $p(X) = \binom{N}{X} p^x q^{N-X}$ .

### SOLUCIÓN

a) Como  $q + p = 1$ ,

$$\begin{aligned} \sum_{X=0}^N Xp(X) &= \sum_{X=1}^N X \frac{N!}{X!(N-X)!} p^X q^{N-X} = Np \sum_{X=1}^N \frac{(N-1)!}{(X-1)!(N-X)!} p^{X-1} q^{N-X} \\ &= Np(q+p)^{N-1} = Np \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b) \quad \sum_{X=0}^N X^2 p(X) &= \sum_{X=1}^N X^2 \frac{N!}{X!(N-X)!} p^X q^{N-X} = \sum_{X=1}^N [X(X-1) + X] \frac{N!}{X!(N-X)!} p^X q^{N-X} \\ &= \sum_{X=2}^N X(X-1) \frac{N!}{X!(N-X)!} p^X q^{N-X} + \sum_{X=1}^N X \frac{N!}{X!(N-X)!} p^X q^{N-X} \\ &= N(N-1)p^2 \sum_{X=2}^N \frac{(N-2)!}{(X-2)!(N-X)!} p^{X-2} q^{N-X} + Np = N(N-1)p^2(q+p)^{N-2} + Np \\ &= N(N-1)p^2 + Np \end{aligned}$$

*Nota:* Los resultados de los incisos *a*) y *b*) son las *esperanzas* de  $X$  y de  $X^2$ , que se denotan  $E(X)$  y  $E(X^2)$ , respectivamente (ver capítulo 6).

- 7.11** Si la variable está distribuida binomialmente, determinar: *a*) su media  $\mu$  y *b*) su varianza  $\sigma^2$ .

### SOLUCIÓN

- a)* De acuerdo con el problema 7.10*a*),

$$\mu = \text{esperanza de la variable} = \sum_{X=0}^N X p(X) = Np$$

- b)* Empleando  $\mu = Np$  y los resultados del problema 7.10,

$$\begin{aligned}\sigma^2 &= \sum_{X=0}^N (X - \mu)^2 p(X) = \sum_{X=0}^N (X^2 - 2\mu X + \mu^2) p(X) = \sum_{X=0}^N X^2 p(X) - 2\mu \sum_{X=0}^N X p(X) + \mu^2 \sum_{X=0}^N p(X) \\ &= N(N-1)p^2 + Np - 2(Np)(Np) + (Np)^2(1) = Np - Np^2 = Np(1-p) = Npq\end{aligned}$$

Se sigue que la desviación estándar de una variable distribuida en forma binomial es  $\sigma = \sqrt{Npq}$ .

### Otro método

- De acuerdo con el problema 6.62*b*),

$$E[(X - \bar{X})^2] = E(X^2) - [E(X)]^2 = N(N-1)p^2 + Np - N^2p^2 = Np - Np^2 = Npq$$

- 7.12** Si la probabilidad de que un tornillo esté defectuoso es 0.1, encontrar: *a*) la media y *b*) la desviación estándar de la distribución de los tornillos defectuosos en un total de 400 tornillos.

### SOLUCIÓN

- a)* La media es  $Np = 400(0.1) = 40$ ; es decir, se puede *esperar* que haya 40 tornillos defectuosos.  
*b)* La varianza es  $Npq = 400(0.1)(0.9) = 36$ . Por lo tanto, la desviación estándar es  $\sqrt{36} = 6$ .

- 7.13** Encontrar el coeficiente momento de: *a*) sesgo y *b*) curtosis, de la distribución del problema 7.12.

### SOLUCIÓN

$$\text{i)} \quad \text{Coeficiente momento de sesgo} = \frac{q-p}{\sqrt{Npq}} = \frac{0.9-0.1}{6} = 0.133$$

Como este coeficiente es positivo, la distribución es sesgada a la derecha.

$$\text{ii)} \quad \text{Coeficiente momento de curtosis} = 3 + \frac{1-6pq}{Npq} = 3 + \frac{1-6(0.1)(0.9)}{36} = 3.01$$

Esta distribución es ligeramente *leptocúrtica* con respecto a la distribución normal (es decir, ligeramente más puntiaguda; ver capítulo 5).

## LA DISTRIBUCIÓN NORMAL

- 7.14** En un examen final de matemáticas la media fue 72 y la desviación estándar fue 15. Determinar las puntuaciones estándar (es decir, las calificaciones en unidades de desviaciones estándar) de los estudiantes que obtuvieron: *a*) 60, *b*) 93 y *c*) 72 puntos.

### SOLUCIÓN

$$\text{i)} \quad z = \frac{X - \bar{X}}{s} = \frac{60 - 72}{15} = -0.8 \quad \text{iii)} \quad z = \frac{X - \bar{X}}{s} = \frac{72 - 72}{15} = 0$$

$$\text{ii)} \quad z = \frac{X - \bar{X}}{s} = \frac{93 - 72}{15} = 1.4$$

- 7.15** Con los datos del problema 7.14, encontrar las calificaciones que corresponden a las siguientes puntuaciones estándar: a) -1 y b) 1.6.

### SOLUCIÓN

$$a) \quad X = \bar{X} + zs = 72 + (-1)(15) = 57 \quad b) \quad X = \bar{X} + zs = 72 + (1.6)(15) = 96$$

- 7.16** Supóngase que la cantidad de juegos en que participan los beisbolistas de la liga mayor durante su carrera se distribuye normalmente con media 1 500 juegos y desviación estándar 350 juegos. Emplear EXCEL para responder las preguntas siguientes. a) ¿Qué porcentaje participa en menos de 750 juegos? b) Qué porcentaje participa en más de 2 000 juegos? y c) Encontrar el percentil 90 de la cantidad de juegos en los que participan durante su carrera.

### SOLUCIÓN

- a) La expresión de EXCEL =NORMDIST(750,1 500, 350, 1) busca el área a la izquierda de 750 en una curva normal con media igual a 1 500 y desviación estándar igual a 350. La respuesta es  $\Pr\{X < 750\} = 0.0161$  o bien 1.61% participa en menos de 750 juegos.
- b) La expresión de EXCEL =1-NORMDIST(2 000,1 500, 350, 1) busca el área a la derecha de 2 000 en una curva normal con media igual a 1 500 y desviación estándar igual a 350. La respuesta es  $\Pr\{X > 2 000\} = 0.0766$  o bien 7.66% participa en más de 2 000 juegos.
- c) La expresión de EXCEL =NORMINV(0.9,1 500, 350) busca en el eje horizontal el valor tal que a su izquierda se encuentra 90% del área bajo la curva normal con media 1 500 y desviación estándar 350. Empleando la notación del capítulo 3,  $P_{90} = 1 948.5$ .

- 7.17** Encontrar el área bajo la curva normal en los casos siguientes.

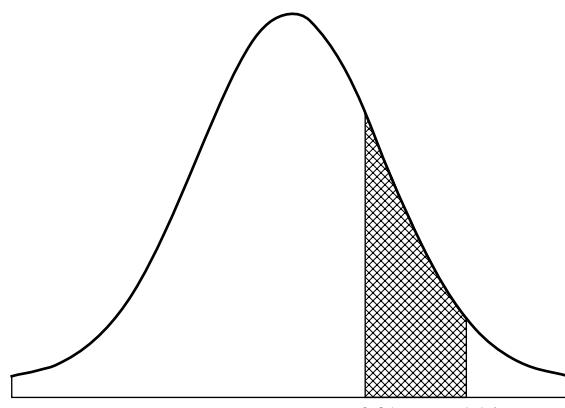
- a) Entre  $z = 0.81$  y  $z = 1.94$ .
- b) A la derecha de  $z = -1.28$ .
- c) A la derecha de  $z = 2.05$  o a la izquierda de  $z = -1.44$ .

Para resolver los incisos a) a c) emplear el apéndice II y EXCEL [ver la figura 7-6, incisos a), b) y c)].

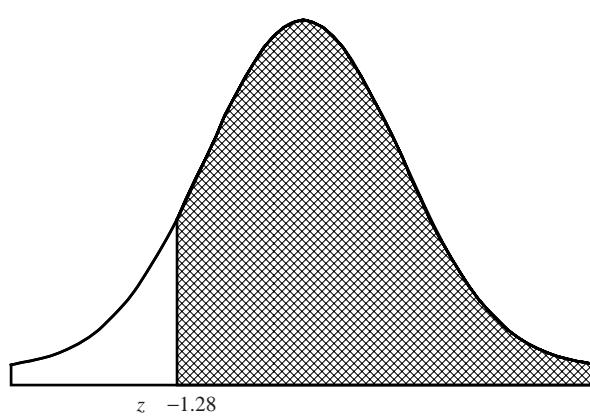
### SOLUCIÓN

- a) En el apéndice II, bajar por la columna  $z$  hasta llegar a 1.9; después avanzar a la derecha hasta la columna marcada con 4. El resultado 0.4738 es  $\Pr\{0 \leq z \leq 1.94\}$ . A continuación bajar por la columna  $z$  hasta llegar a 0.8; después avanzar a la derecha hasta la columna marcada con 1. El resultado 0.2910 es  $\Pr\{0 \leq z \leq 0.81\}$ . El área correspondiente a  $\Pr\{0.81 \leq z \leq 1.94\}$  es la diferencia de ambos,  $\Pr\{0 \leq z \leq 1.94\} - \Pr\{0 \leq z \leq 0.81\} = 0.4738 - 0.2910 = 0.1828$ . Empleando EXCEL, la respuesta se obtiene con =NORMSDIST(1.94)-NORMSDIST(0.81) = 0.1828. Empleando EXCEL, el área  $\Pr\{0.81 \leq z \leq 1.94\}$  es la diferencia  $\Pr\{-\text{infinito} \leq z \leq 1.94\} - \Pr\{-\text{infinito} \leq z \leq 0.81\}$ . Obsérvese que la tabla del apéndice II da áreas desde 0 hasta un valor positivo de  $z$ , en tanto que EXCEL da áreas desde -infinito hasta el mismo valor de  $z$ .
- b) El área a la derecha de  $z = -1.28$  es la misma área que a la izquierda de  $z = 1.28$ . Empleando el apéndice II, el área a la izquierda de  $z = 1.28$  es  $\Pr\{z \leq 0\} + \Pr\{0 \leq z \leq 1.28\}$  o bien  $0.5 + 0.3997 = 0.8997$ . Usando EXCEL,  $\Pr\{z \geq -1.28\} = \Pr\{z \leq 1.28\}$  y  $\Pr\{z \leq 1.28\}$  se obtiene mediante =NORMSDIST(1.28), que da 0.8997.
- c) Empleando el apéndice II, el área a la derecha de 2.05 es  $0.5 - \Pr\{z \leq 2.05\}$  o bien  $0.5 - 0.4798 = 0.0202$ . El área a la izquierda de -1.44 es la misma que el área a la derecha de 1.44. El área a la derecha de 1.44 es  $0.5 - \Pr\{z \leq 1.44\} = 0.5 - 0.4251 = 0.0749$ . La suma de estas dos áreas en las colas es  $0.0202 + 0.0749 = 0.0951$ . Usando EXCEL, esta área se obtiene como sigue: =NORMSDIST(-1.44) + (1 - NORMSDIST(2.05)), que da 0.0951.

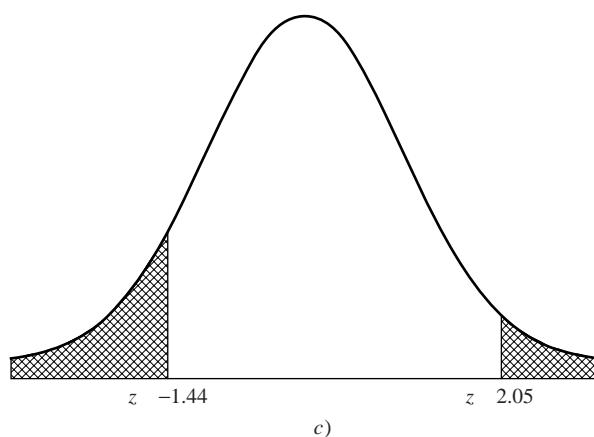
Obsérvese que en EXCEL =NORMSDIST( $z$ ) da el área a la izquierda de  $z$  bajo la curva normal estándar, en tanto que =NORMDIST( $z, \mu, \sigma, 1$ ) da el área a la izquierda de  $z$  bajo la curva normal cuya media es  $\mu$  y cuya desviación estándar de  $\sigma$ .



a)



b)



c)

Figura 7-6 Áreas bajo la curva normal estándar. a) Área entre  $z = 0.81$  y  $z = 1.94$ ; b) área a la derecha de  $z = -1.28$ ; c) área a la izquierda de  $z = -1.44$  más área a la derecha de  $z = 2.05$ .

- 7.18 La cantidad de horas, por semana, que los estudiantes de educación media ven televisión tiene una distribución normal cuya media es 20.5 horas y cuya desviación estándar es 5.5 horas. Emplear MINITAB para hallar el porcentaje que ve televisión menos de 25 horas por semana. Usar MINITAB para hallar el porcentaje que ve televisión más de 30 horas por semana. Trazar una curva que represente estos dos grupos.

### SOLUCIÓN

La solución se ilustra en la figura 7-7.

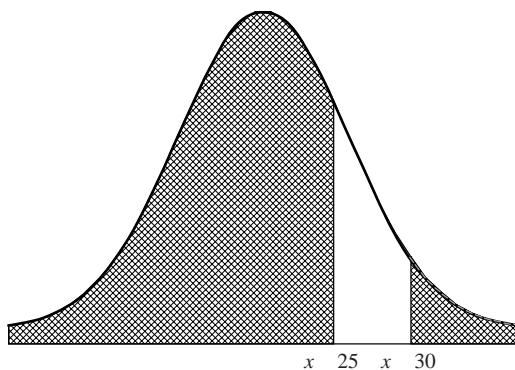


Figura 7-7 MINITAB, gráfica que muestra el grupo que ve televisión menos de 25 horas por semana y el grupo que ve televisión más de 30 horas por semana.

La secuencia “**Calc  $\Rightarrow$  Probability distributions  $\Rightarrow$  Normal**” abre el cuadro de diálogo de la distribución normal que se presenta en la figura 7-8.

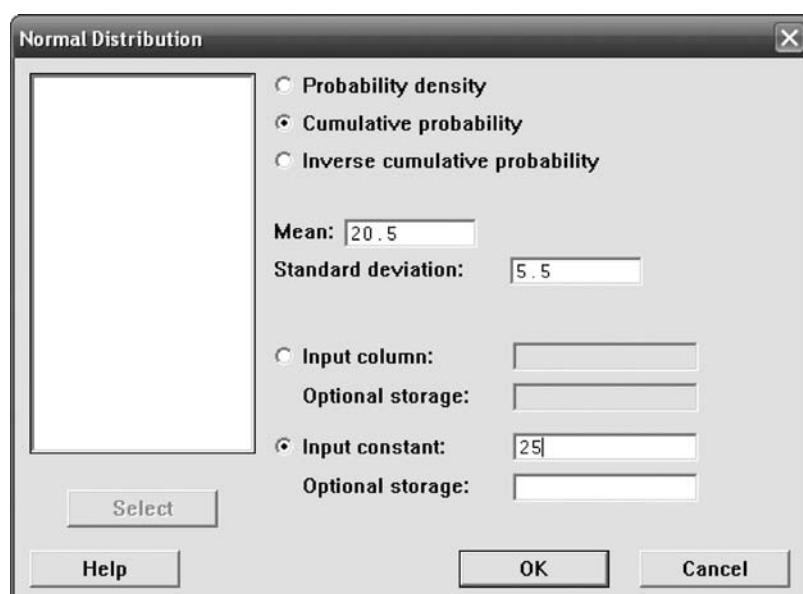


Figura 7-8 MINITAB, cuadro de diálogo para la distribución normal.

Llenando el cuadro de diálogo como se muestra en la figura 7-8 y ejecutándolo, se obtiene el siguiente resultado:

#### Función de distribución acumulada

Normal con media = 20.5 y desviación estándar = 5.5

x P(X<=x)

25 0.793373

79.3% de los estudiantes de educación media ven 25 horas o menos de televisión por semana.

Si se ingresa 30 como la constante de entrada, se obtiene el resultado siguiente:

#### Función de distribución acumulada

Normal con media = 20.5 y desviación estándar = 5.5

x P(X<=x)

30 0.957941

El porcentaje que ve más de 30 horas de televisión por semana es  $1 - 0.958 = 0.042$  o 4.2%.

- 7.19** Hallar la ordenada correspondiente a la curva normal en: a)  $z = 0.84$ , b)  $z = -1.27$  y c)  $z = -0.05$ .

#### SOLUCIÓN

- En el apéndice I, bajar por la columna que tiene como encabezado  $z$  hasta llegar a la entrada 0.8; después avanzar hacia la derecha hasta la columna que tiene como encabezado 4. La entrada 0.2803 es la ordenada buscada.
- Por simetría: (ordenada correspondiente a  $z = -1.27$ ) = (ordenada correspondiente a  $z = 1.27$ ) = 0.1781.
- (La ordenada correspondiente  $z = -0.05$ ) = (la ordenada correspondiente a  $z = 0.05$ ) = 0.3984.

- 7.20** Emplear EXCEL para evaluar algunas ordenadas correspondientes a la curva normal cuya media es 13.5 y cuya desviación estándar es 2.5. Después, empleando el asistente para gráficos, graficar los puntos obtenidos. Estas gráficas representan la distribución normal de la variable  $X$ , donde  $X$  representa las horas, por semana, que los estudiantes universitarios pasan en Internet.

#### SOLUCIÓN

Las abscisas elegidas que van desde 6 hasta 21, a intervalos de 0.5, se ingresan en la hoja de cálculo de EXCEL en las celdas A1:A31. En la celda B1 se ingresa la expresión =NORMDIST(A1,13.5,3.5,0), se hace clic y se arrastra. Estos puntos son de la curva normal cuya media es 13.5 y cuya desviación estándar es 3.5:

|      |          |
|------|----------|
| 6    | 0.001773 |
| 6.5  | 0.003166 |
| 7    | 0.005433 |
| 7.5  | 0.008958 |
| 8    | 0.01419  |
| 8.5  | 0.021596 |
| 9    | 0.03158  |
| 9.5  | 0.044368 |
| 10   | 0.059891 |
| 10.5 | 0.077674 |
| 11   | 0.096788 |
| 11.5 | 0.115877 |
| 12   | 0.13329  |
| 12.5 | 0.147308 |
| 13   | 0.156417 |
| 13.5 | 0.159577 |

|      |          |
|------|----------|
| 14   | 0.156417 |
| 14.5 | 0.147308 |
| 15   | 0.13329  |
| 15.5 | 0.115877 |
| 16   | 0.096788 |
| 16.5 | 0.077674 |
| 17   | 0.059891 |
| 17.5 | 0.044368 |
| 18   | 0.03158  |
| 18.5 | 0.021596 |
| 19   | 0.01419  |
| 19.5 | 0.008958 |
| 20   | 0.005433 |
| 20.5 | 0.003166 |
| 21   | 0.001773 |

Para graficar estos puntos se emplea el asistente para gráficos. El resultado se muestra en la figura 7-9.

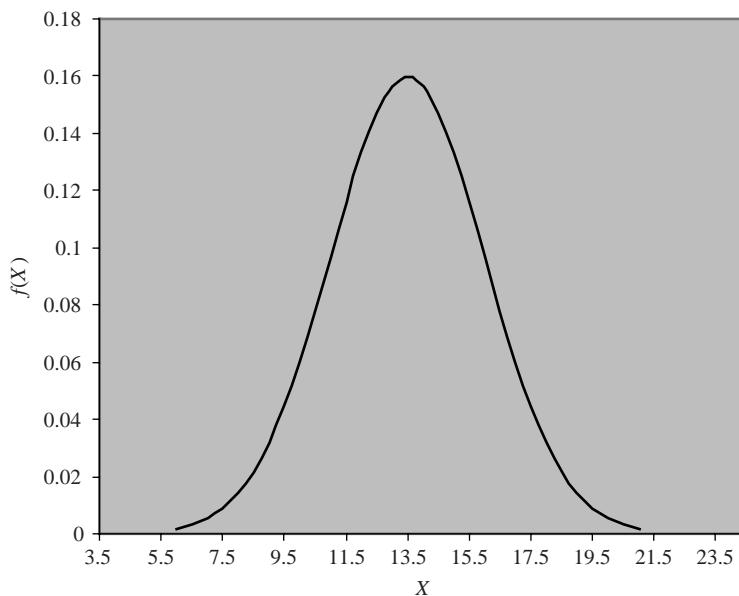


Figura 7-9 EXCEL, gráfica de la curva normal cuya media es = 13.5 y cuya desviación estándar es = 2.5.

- 7.21** Determinar el segundo cuartil ( $Q_2$ ), el tercer cuartil ( $Q_3$ ) y el percentil 90 ( $P_{90}$ ) de las horas, por semana, que los estudiantes universitarios pasan en Internet. Emplear la distribución normal dada en el problema 7.20.

### SOLUCIÓN

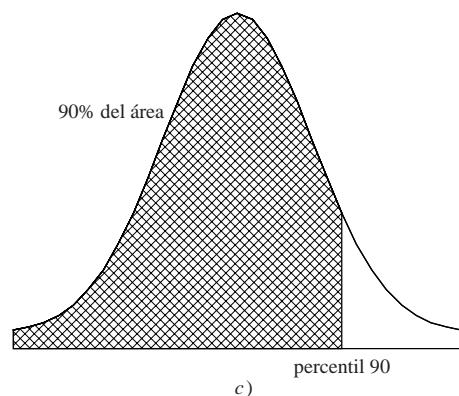
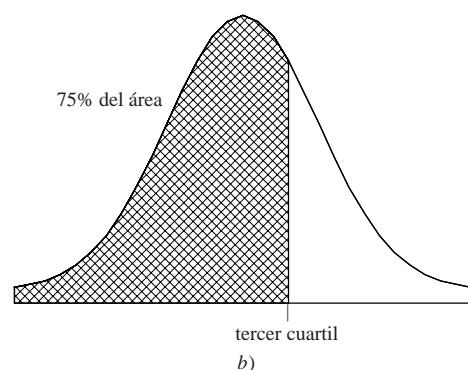
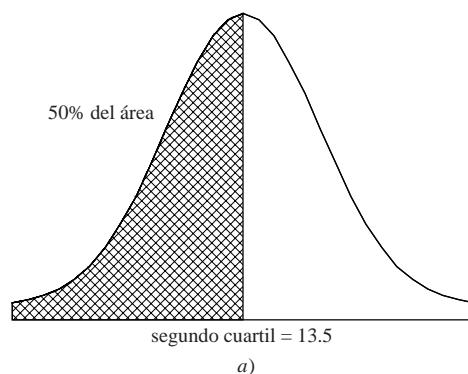
El segundo cuartil o percentil 50 de una distribución normal corresponde al centro de la curva. Debido a la simetría de esta distribución, coincide con el punto en el que se encuentra la media. En el caso del uso de Internet, éste será 13.5 horas por semana. Para hallar el percentil 50, se usa la función de EXCEL =NORMINV(0.5,13.5,2.5). El percentil 50 significa que 0.5 del área se encuentra a la izquierda del segundo cuartil y que la media es 13.5 y la desviación estándar es 2.5. El resultado que da EXCEL es 13.5. Usando MINITAB se obtiene:

### Función de distribución acumulada inversa

Normal con media = 13.5 y desviación estándar = 2.5

$$\begin{array}{ll} p(X \leq x) & x \\ 0.5 & 13.5 \end{array}$$

Esto se ilustra en la figura 7-10 a). En la figura 7-10b) se nota que el 75% del área bajo la curva está a la izquierda de  $Q_3$ . Empleando EXCEL, la función =NORMINV(0.75,13.5,2.5) da  $Q_3 = 15.19$ .



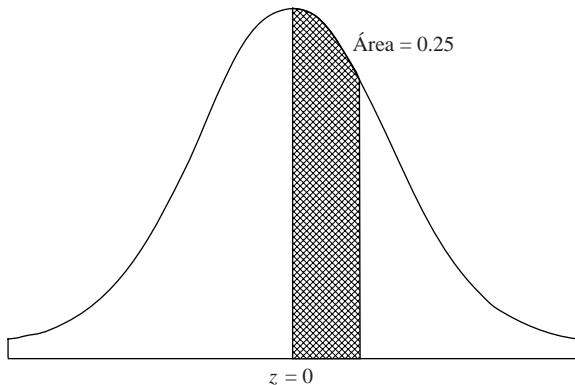
**Figura 7-10** Se hallan percentiles y cuartiles usando MINITAB y EXCEL. a)  $Q_2$  es el valor tal que 50% de los tiempos son menores que ese valor; b)  $Q_3$  es el valor tal que 75% de los tiempos son menores que ese valor; c)  $P_{90}$  es el valor tal que 90% de los tiempos son menores que ese valor.

En la figura 7-10c) se muestra que 90% del área está a la izquierda de  $P_{90}$ . La función de EXCEL =NORMINV(0.90,13.5,2.5) da  $P_{90} = 16.70$ .

- 7.22** Usando el apéndice II, encontrar  $Q_3$  para los datos del problema 7.21.

### SOLUCIÓN

Si no se dispone de un software como EXCEL o MINITAB, es necesario trabajar con las tablas de la distribución normal estándar como único recurso.



**Figura 7-11** Curva normal estándar.

Usando el apéndice II en forma inversa, se ve que el área que va desde  $z = 0$  hasta  $z = 0.67$  es 0.2486, y el área que va desde  $z = 0$  hasta  $z = 0.68$  es 0.2518 (ver figura 7-11). El área desde  $-\infty$  hasta  $z = 0.675$  es aproximadamente 0.75, ya que el área desde  $-\infty$  a 0 es 0.5, y el área desde 0 hasta  $z = 0.675$  es 0.25. Por lo tanto, en la curva normal estándar el tercer cuartil es aproximadamente 0.675. Sea  $Q_3$  el tercer cuartil en la curva normal cuya media es 13.5 y cuya desviación estándar es 2.5 [ver figura 7-10b)]. Cuando  $Q_3$  se transforma en un valor  $z$ , se tiene  $0.675 = (Q_3 - 13.5)/2.5$ . Despejando en esta ecuación  $Q_3$ , se tiene  $Q_3 = 2.5(0.675) + 13.5 = 15.19$ , que es la misma respuesta que se obtuvo con EXCEL en el problema 7.21.

- 7.23** Se producen arandelas cuyo diámetro interno está distribuido normalmente con media 0.500 pulgadas (in) y desviación estándar 0.005 in. Las arandelas se consideran defectuosas si su diámetro interno es de menos de 0.490 in o si es de más de 0.510 in. Empleando tanto el apéndice II como EXCEL, hallar el porcentaje de arandelas defectuosas.

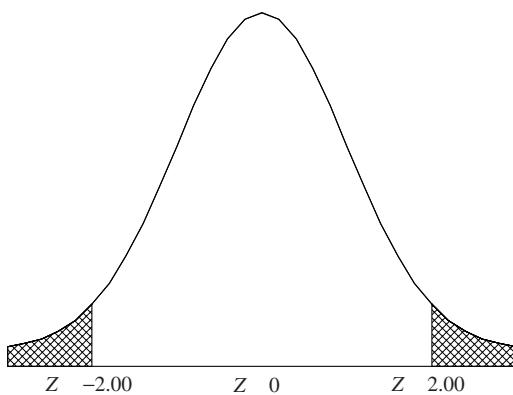
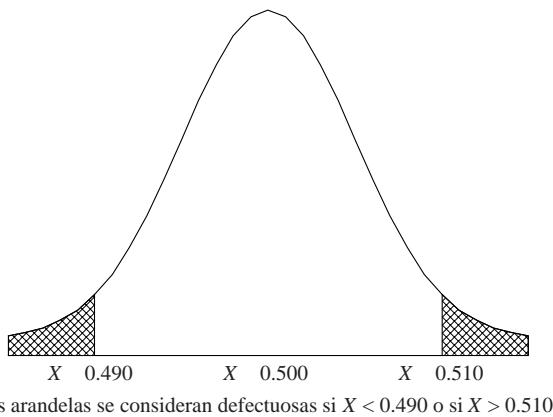
### SOLUCIÓN

$$0.490 \text{ en unidades estándar es } \frac{0.490 - 0.500}{0.005} = -2.00$$

$$0.510 \text{ en unidades estándar es } \frac{0.510 - 0.500}{0.005} = 2.00$$

De acuerdo con el apéndice II, el área a la derecha de  $Z = 2.00$  es 0.5 – 0.4772, o bien 0.0228. El área a la izquierda de  $Z = -2.00$  es 0.0228. El porcentaje de defectuosos es  $(0.0228 + 0.0228) \times 100 = 4.56\%$ . Para hallar áreas bajo una curva normal empleando el apéndice II hay que convertir los datos a la curva normal estándar para encontrar las respuestas.

Empleando EXCEL, la respuesta es = 2\*NORMDIST(0.490, 0.500, 0.005, 1), que da también 4.56%.



**Figura 7-12** El área a la derecha de  $X = 0.510$  es igual al área a la derecha de  $Z = 2.000$  y el área a la izquierda de  $X = 0.490$  es igual al área a la izquierda de  $Z = -2.00$ .

### APROXIMACIÓN NORMAL A LA DISTRIBUCIÓN BINOMIAL

- 7.24** Empleando: a) la distribución binomial y b) la aproximación normal a la distribución binomial, encontrar la probabilidad de que en 10 lanzamientos de una moneda se obtengan 3 a 6 caras inclusive.

#### SOLUCIÓN

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad \Pr\{3 \text{ caras}\} &= \binom{10}{3} \left(\frac{1}{2}\right)^3 \left(\frac{1}{2}\right)^7 = \frac{15}{128} & \Pr\{5 \text{ caras}\} &= \binom{10}{5} \left(\frac{1}{2}\right)^5 \left(\frac{1}{2}\right)^5 = \frac{63}{256} \\ \Pr\{4 \text{ caras}\} &= \binom{10}{4} \left(\frac{1}{2}\right)^4 \left(\frac{1}{2}\right)^6 = \frac{105}{512} & \Pr\{6 \text{ caras}\} &= \binom{10}{6} \left(\frac{1}{2}\right)^6 \left(\frac{1}{2}\right)^4 = \frac{105}{512} \end{aligned}$$

Por lo tanto

$$\{\text{de entre 3 a 6 caras inclusive}\} = \frac{15}{128} + \frac{105}{512} + \frac{63}{256} + \frac{105}{512} + \frac{99}{128} = 0.7734$$

- b) En la figura 7-13 se presenta la gráfica que se obtiene con EXCEL para la distribución binomial con  $N = 10$  lanzamientos de una moneda.

Obsérvese que aunque la distribución binomial es una distribución discreta, esta gráfica tiene la forma de una distribución normal, que es continua. Para aproximar la probabilidad binomial de 3, 4, 5 y 6 caras mediante el área bajo la curva normal, se busca el área bajo la curva normal desde  $X = 2.5$  hasta  $X = 6.5$ . El 0.5 que se agrega a cada lado de  $X = 3$  y  $X = 6$  se le llama *corrección por continuidad*. A continuación se dan los pasos a seguir para aproximar la distribución binomial mediante la distribución normal. Se elige la curva normal con media  $Np = 10(0.5) = 5$  y desviación estándar  $= \sqrt{Npq} = \sqrt{10(0.5)(0.5)} = 1.58$ . De esta manera se elige la curva normal que tiene el mismo centro y la misma variación que la distribución binomial. Despues se busca el área bajo la curva desde 2.5 hasta 6.5, como se muestra en la figura 7-14. Ésta es la aproximación normal a la distribución binomial.

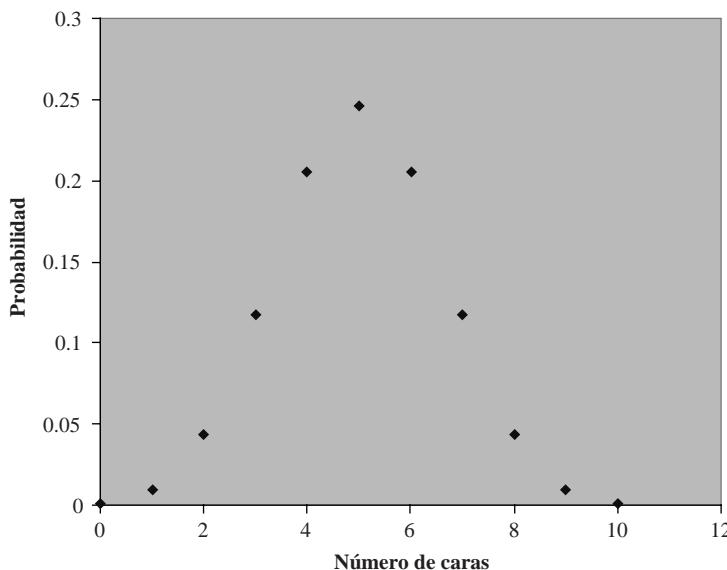
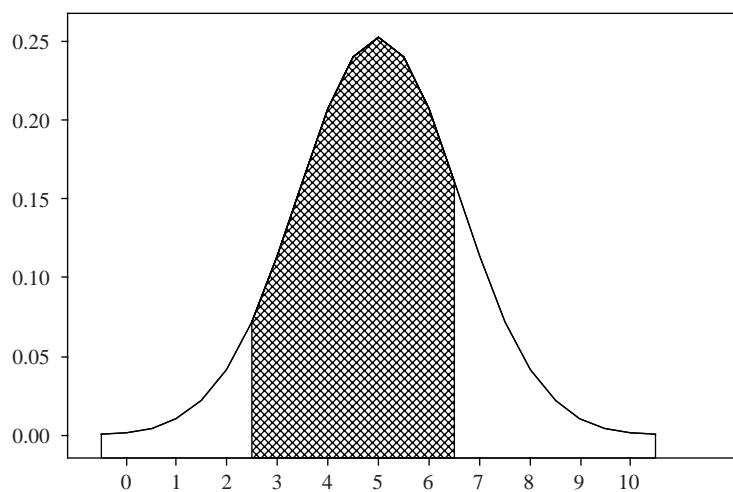
Figura 7-13 EXCEL, gráfica de la distribución binomial con  $N = 10$  y  $p = 0.5$ .

Figura 7-14 Aproximación normal para 3, 4, 5 o 6 caras cuando se lanza una moneda 10 veces.

Usando una hoja de cálculo de EXCEL, la solución se obtiene empleando  $=NORMDIST(6.5, 5, 1.58, 1) - NORMDIST(2.5, 5, 1.58, 1)$ , con lo que se obtiene 0.7720.

Empleando la técnica del apéndice II, los valores normales 6.5 y 2.5 se convierten primero a valores normales estándar. (En unidades estándar 2.5 es  $-1.58$ , y 6.5 en unidades estándar es  $0.95$ .) De acuerdo con el apéndice II el área entre  $-1.58$  y  $0.95$  es 0.7718. Cualquiera que sea el método que se use, el resultado es muy semejante al obtenido con la distribución binomial, 0.7734.

- 7.25** Se lanza una moneda 500 veces. Hallar la probabilidad de que el número de caras no sea diferente de 250:  
*a)* en más de 10 y *b)* en más de 30.

### SOLUCIÓN

$$\mu = Np = (500)\left(\frac{1}{2}\right) = 250 \quad \sigma = \sqrt{Npq} = \sqrt{(500)\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)} = 11.18$$

- a) Se busca la probabilidad de que la cantidad de caras esté entre 240 y 260 o, considerando los datos como datos continuos, entre 239.5 y 260.5. Como 239.5 en unidades estándar es  $(239.5 - 250)/11.18 = -0.94$  y 260.5 en unidades estándar es 0.94, se tiene

$$\begin{aligned}\text{Probabilidad buscada} &= (\text{área bajo la curva normal entre } z = -0.94 \text{ y } z = 0.94) \\ &= (\text{dos veces el área entre } z = 0 \text{ y } z = 0.94) = 2(0.3264) = 0.6528\end{aligned}$$

- b) Se busca la probabilidad de que la cantidad de caras esté entre 220 y 280 o, considerando los datos como datos continuos, entre 219.5 y 280.5. Como 219.5 en unidades estándar es  $(219.5 - 250)/11.18 = -2.73$  y 280.5 en unidades estándar es 2.73, se tiene

$$\begin{aligned}\text{Probabilidad buscada} &= (\text{dos veces el área entre } z = 0 \text{ y } z = -2.73) \\ &= 2(0.4968) = 0.9936\end{aligned}$$

Por lo tanto, se puede confiar en que el número de caras no diferirá de lo esperado (250) en más de 30. De manera que si resulta que el número de caras que *realmente* se encuentra es 280, habrá razón para creer que la moneda está cargada.

- 7.26** Supóngase que en el grupo de edad de 1 a 4 años, el 75% usa el cinturón de seguridad de manera habitual. Hallar la probabilidad de que si se detienen, al azar, algunos automóviles que transporten pasajeros de 1 a 4 años, 70 o menos estén usando el cinturón de seguridad. Dar la solución empleando la distribución binomial así como la aproximación normal a la distribución binomial. Usar MINITAB para hallar la solución.

### SOLUCIÓN

El resultado de MINITAB dado adelante muestra que la probabilidad de que 70 o menos estén usando el cinturón de seguridad es igual a 0.1495.

```
MTB > cdf 70;
SUBC> binomial 100.75.
```

#### Función de distribución acumulada

```
Binomial con n = 100 y p = 0.750000
      x      P( X ≤ x)
70.00      0.1495
```

Empleando la aproximación normal a la distribución binomial, la solución se encuentra como sigue: la media de la distribución binomial es  $\mu = Np = 100(0.75) = 75$  y la desviación estándar es  $\sigma = \sqrt{Npq} = \sqrt{100(0.75)(0.25)} = 4.33$ . El resultado de MINITAB dado adelante muestra que la aproximación normal es igual a 0.1493. Esta aproximación es muy semejante al verdadero valor.

```
MTB > cdf 70.5;
SUBC> media normal = 75 sd = 4.33
```

#### Función de distribución acumulada

```
Normal con media = 75.0000 y desviación estándar = 4.33000
      x      P( X ≤ x)
70.5000      0.1493
```

## LA DISTRIBUCIÓN DE POISSON

- 7.27** De las herramientas que se producen con determinado proceso de fabricación, 10% resultan defectuosas. Empleando: a) la distribución binomial y b) la aproximación de Poisson a la distribución binomial, hallar la probabilidad de que en una muestra de 10 herramientas elegidas al azar exactamente 2 estén defectuosas.

**SOLUCIÓN**

La probabilidad de que una herramienta esté defectuosa es  $p = 0.1$ .

a)  $\Pr\{2 \text{ de } 10 \text{ herramientas defectuosas}\} = \binom{10}{2}(0.1)^2(0.9)^8 = 0.1937 \quad \text{o bien} \quad 0.19$

b) Con  $\lambda = Np = 10(0.1) = 1$  y usando  $e = 2.718$ ,

$$\Pr\{2 \text{ de } 10 \text{ herramientas defectuosas}\} = \frac{\lambda^X e^{-\lambda}}{X!} = \frac{(1)^2 e^{-1}}{2!} = \frac{e^{-1}}{2} = \frac{1}{2e} = 0.1839 \quad \text{o bien} \quad 0.18$$

En general, esta aproximación es buena si  $p \leq 0.1$  y  $\lambda = Np \leq 5$ .

- 7.28** Si la probabilidad de que un individuo tenga una reacción adversa por la inyección de determinado suero es 0.001, determinar la probabilidad de que de 2 000 individuos: a) exactamente 3 y b) más de 2, sufran una reacción adversa. Usar MINITAB y hallar la respuesta empleando tanto Poisson como distribuciones binomiales.

**SOLUCIÓN**

- a) En el siguiente resultado de MINITAB se da primero la probabilidad binomial de que exactamente 3 individuos tengan una reacción adversa. Después de la probabilidad binomial se da la probabilidad de Poisson empleando  $\lambda = Np = (2000)(0.001) = 2$ . La aproximación de Poisson al parecer es en extremo cercana a la probabilidad binomial.

```
MTB > pdf 3;
SUBC> binomial 2000.001.
```

**Función de probabilidad de densidad**

```
Binomial con n = 2000 y p = 0.001
  x      P( X = x)
  3.0    0.1805
```

```
MTB > pdf 3;
SUBC> poisson 2.
```

**Función de probabilidad de densidad**

```
Poisson con mu = 2
  x      P( X = x)
  3.0    0.1804
```

- b) La probabilidad de que más de dos individuos tengan una reacción adversa se obtiene de  $1 - P(X \leq 2)$ . El siguiente resultado de MINITAB da como probabilidad de que  $X \leq 2$  el resultado 0.6767 usando tanto la distribución binomial como la distribución de Poisson. La probabilidad de que más de 2 tengan una reacción adversa es  $1 - 0.6767 = 0.3233$ .

```
MTB > cdf 2;
SUBC> binomial 2000.001.
```

**Función de distribución acumulada**

```
Binomial con n = 2000 y p = 0.001
  x      P( X ≤ x)
  2.0    0.6767
MTB > cdf 2;
SUBC> poisson 2.
```

**Función de distribución acumulada**

```
Poisson con mu = 2
  x      P( X ≤ x)
  2.0    0.6767
```

- 7.29** Una distribución de Poisson está dada por

$$p(X) = \frac{(0.72)^X e^{-0.72}}{X!}$$

Hallar: a)  $p(0)$ , b)  $p(1)$ , c)  $p(2)$  y d)  $p(3)$ .

### SOLUCIÓN

$$a) p(0) = \frac{(0.72)^0 e^{-0.72}}{0!} = \frac{(1)e^{-0.72}}{1} = e^{-0.72} = 0.4868 \quad \text{usando el apéndice VIII}$$

$$b) p(1) = \frac{(0.72)^1 e^{-0.72}}{1!} = (0.72)e^{-0.72} = (0.72)(0.4868) = 0.3505$$

$$c) p(2) = \frac{(0.72)^2 e^{-0.72}}{2!} = \frac{(0.5184)e^{-0.72}}{2} = (0.2592)(0.4868) = 0.1262$$

### Otro método

$$p(2) = \frac{0.72}{2} p(1) = (0.36)(0.3505) = 0.1262$$

$$d) p(3) = \frac{(0.72)^3 e^{-0.72}}{3!} = \frac{0.72}{3} p(2) = (0.24)(0.1262) = 0.0303$$

## LA DISTRIBUCIÓN MULTINOMIAL

- 7.30** Una caja contiene 5 pelotas rojas, 4 pelotas blancas y 3 pelotas azules. De la caja se extrae al azar una pelota, se anota su color y se devuelve a la caja. Hallar la probabilidad de que de 6 pelotas extraídas de esta manera, 3 sean rojas, 2 sean blancas y 1 sea azul.

### SOLUCIÓN

$\Pr\{\text{roja en cualquier extracción}\} = \frac{5}{12}$ ,  $\Pr\{\text{blanca en cualquier extracción}\} = \frac{4}{12}$ , y  $\Pr\{\text{azul en cualquier extracción}\} = \frac{3}{12}$ ; por lo tanto,

$$\Pr\{3 \text{ sean rojas, } 2 \text{ sean blancas, } 1 \text{ sea azul}\} = \frac{6!}{3!2!1!} \left(\frac{5}{12}\right)^3 \left(\frac{4}{12}\right)^2 \left(\frac{3}{12}\right)^1 = \frac{625}{5184}$$

## AJUSTE DE DATOS MEDIANTE DISTRIBUCIONES TEÓRICAS

- 7.31** Ajustar una distribución binomial a los datos del problema 2.17.

### SOLUCIÓN

Se tiene  $\Pr\{X \text{ caras en un lanzamiento de cinco monedas}\} = p(X) = \binom{5}{X} p^X q^{5-X}$ , donde  $p$  y  $q$  son las probabilidades respectivas de cara y de cruz en un lanzamiento de una moneda. De acuerdo con el problema 7.11a), el número medio de caras es  $\mu = Np = 5p$ . En la distribución de frecuencias reales (u observadas), la cantidad media de caras es

$$\frac{\sum fX}{\sum f} = \frac{(38)(0) + (144)(1) + (342)(2) + (287)(3) + (164)(4) + (25)(5)}{1\,000} = \frac{2\,470}{1\,000} = 2.47$$

Igualando las medias teórica y real,  $5p = 2.47$ , o bien  $p = 0.494$ . Por lo tanto, la distribución binomial ajustada está dada por  $p(X) = \binom{5}{X} (0.494)^X (0.506)^{5-X}$ .

En la tabla 7.4 se enumeran estas probabilidades así como las frecuencias esperadas (teóricas) y las frecuencias reales. El ajuste parece ser bueno.

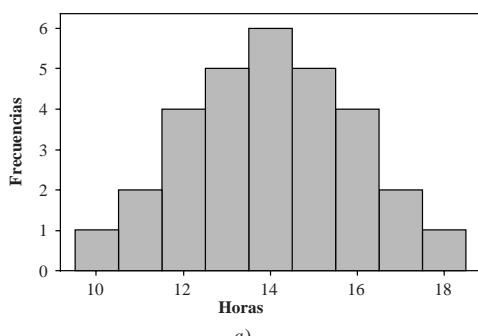
Tabla 7.4

| Número de caras ( $X$ ) | $\Pr\{X \text{ caras}\}$ | Frecuencias esperadas | Frecuencias observadas |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0                       | 0.0332                   | 33.2 o bien 33        | 38                     |
| 1                       | 0.1619                   | 161.9 o bien 162      | 144                    |
| 2                       | 0.3162                   | 316.2 o bien 316      | 342                    |
| 3                       | 0.3087                   | 308.7 o bien 309      | 287                    |
| 4                       | 0.1507                   | 150.7 o bien 151      | 164                    |
| 5                       | 0.0294                   | 29.4 o bien 29        | 25                     |

- 7.32 Usar la prueba de Kolmogorov-Smirnov de MINITAB para probar la normalidad de los datos de la tabla 7.5. Los datos representan el tiempo en horas por semana que 30 estudiantes universitarios usan su teléfono celular.

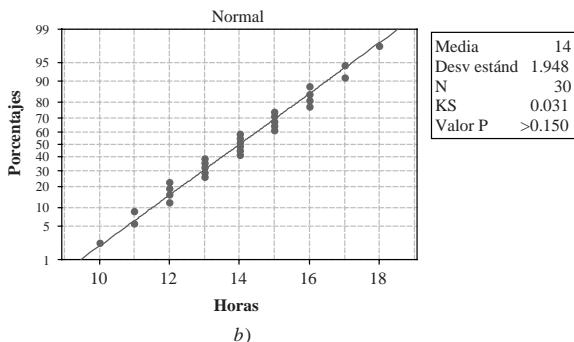
Tabla 7.5

|    |    |    |
|----|----|----|
| 16 | 17 | 15 |
| 14 | 14 | 16 |
| 12 | 16 | 12 |
| 13 | 11 | 14 |
| 10 | 15 | 14 |
| 13 | 15 | 16 |
| 17 | 13 | 15 |
| 14 | 18 | 14 |
| 11 | 12 | 13 |
| 13 | 15 | 12 |

**SOLUCIÓN**

a)

Gráfica de probabilidad de horas



b)

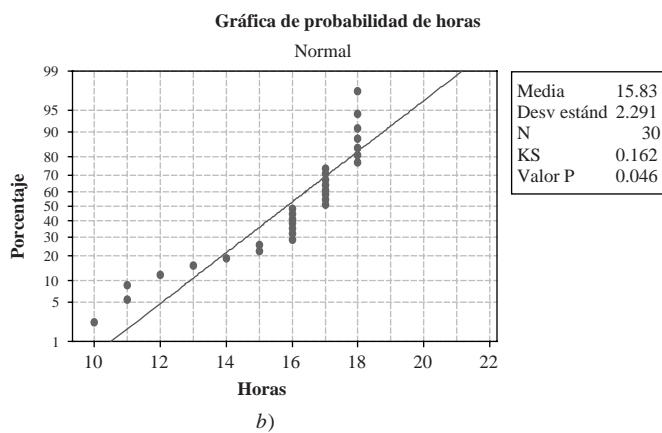
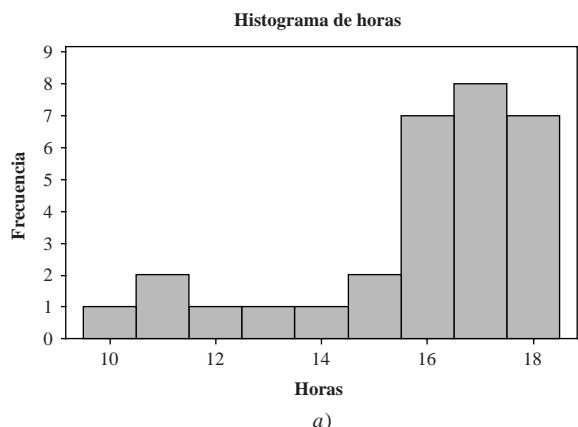
Figura 7-15 Prueba de Kolmogorov-Smirnov para normalidad: datos normales. a) Histograma que muestra un conjunto de datos distribuidos normalmente; b) la prueba de Kolmogorov-Smirnov para normalidad indica un valor  $p > 0.150$  para normalidad.

El histograma de la figura 7-15a) indica que los datos de esta encuesta están distribuidos normalmente. La prueba de Kolgomorov-Smirnov también indica que los datos muestrales provienen de una población distribuida normalmente. La mayoría de los especialistas en estadística recomiendan que si el valor  $p$  es menor que 0.05, entonces se rechace la hipótesis de normalidad. Aquí el valor  $p$  es  $> 0.15$ .

- 7.33** Usar la prueba de Kolgomorov-Smirnov de MINITAB para probar la normalidad de los datos presentados en la tabla 7.6. Estos datos son el tiempo en horas, por semana, que emplean su teléfono celular 30 estudiantes universitarios.

**Tabla 7.6**

|    |    |    |
|----|----|----|
| 18 | 16 | 11 |
| 17 | 12 | 13 |
| 17 | 17 | 17 |
| 16 | 18 | 17 |
| 16 | 17 | 17 |
| 16 | 18 | 15 |
| 18 | 18 | 16 |
| 16 | 16 | 17 |
| 14 | 18 | 15 |
| 11 | 18 | 10 |



**Figura 7-16** Prueba de Kolgomorov-Smirnov para normalidad; valor  $p = 0.046$ , datos no normales.

- a) El histograma muestra un conjunto de datos sesgado a la izquierda; b) la prueba de Kolgomorov-Smirnov para normalidad indica carencia de normalidad.

La mayoría de los especialistas en estadística recomienda que si el valor  $p$  es menor que 0.05 se rechace la hipótesis de normalidad. En este caso el valor  $p$  es menor a 0.05.

- 7.34 En la tabla 7.7 se presenta el número de días,  $f$ , en el que ocurrieron  $X$  accidentes automovilísticos en una ciudad durante un periodo de 50 días. Ajustar a estos datos una distribución de Poisson.

**Tabla 7.7**

| Cantidad de accidentes ( $X$ ) | Cantidad de días ( $f$ ) |
|--------------------------------|--------------------------|
| 0                              | 21                       |
| 1                              | 18                       |
| 2                              | 7                        |
| 3                              | 3                        |
| 4                              | 1                        |
|                                | Total 50                 |

### SOLUCIÓN

La cantidad media de accidentes es

$$\lambda = \frac{\sum fX}{\sum f} = \frac{(21)(0) + (18)(1) + (7)(2) + (3)(3) + (1)(4)}{50} = \frac{45}{50} = 0.90$$

Por lo tanto, de acuerdo con la distribución de Poisson,

$$\Pr\{X \text{ accidentes}\} = \frac{(0.90)^X e^{-0.90}}{X!}$$

En la tabla 7.8 se dan las probabilidades, de 0, 1, 2, 3 y 4 accidentes, obtenidas con esta distribución de probabilidad de Poisson, así como las cantidades teóricas o esperadas de días con  $X$  accidentes (obtenidas multiplicando las probabilidades respectivas por 50). Para facilitar la comparación, en la columna 4 se dan nuevamente las cantidades de días de la tabla 7.7.

Obsérvese que el ajuste de la distribución de Poisson a los datos dados es bueno.

**Tabla 7.8**

| Cantidad de accidentes ( $X$ ) | $\Pr\{X \text{ accidentes}\}$ | Cantidad esperada de días | Cantidad real de días |
|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 0                              | 0.4066                        | 23.33 o bien 20           | 21                    |
| 1                              | 0.3659                        | 18.30 o bien 18           | 18                    |
| 2                              | 0.1647                        | 8.24 o bien 8             | 7                     |
| 3                              | 0.0494                        | 2.47 o bien 2             | 3                     |
| 4                              | 0.0111                        | 0.56 o bien 1             | 1                     |

En una distribución de Poisson, la varianza es  $\sigma^2 = \lambda$ . Calculando la varianza a partir de la distribución dada se obtiene 0.97, lo cual al compararlo con el valor 0.90 de  $\lambda$  resulta favorable, y esto puede tomarse como una evidencia más de que la distribución de Poisson es adecuada para aproximar los datos muestrales.

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### LA DISTRIBUCIÓN BINOMIAL

- 7.35** Evaluar *a)*  $7!$ , *b)*  $10!/(6!4!)$ , *c)*,  $\binom{9}{5}$  *d)*  $\binom{11}{8}$  y *e)*  $\binom{6}{1}$ .
- 7.36** Expandir: *a)*  $(q+p)^7$  y *b)*  $(q+p)^{10}$ .
- 7.37** Hallar la probabilidad de que al lanzar una moneda seis veces se obtengan: *a)* 0, *b)* 1, *c)* 2, *d)* 3, *e)* 4, *f)* 5 y *g)* 6 caras. *h)* Emplear MINITAB para construir una distribución de probabilidad para  $X$  = número de caras en seis lanzamientos de una moneda.
- 7.38** Hallar la probabilidad de que en un solo lanzamiento de seis monedas se obtengan: *a)* 2 o más caras y *b)* menos de 4 caras. *c)* Usar EXCEL para hallar las respuestas de los incisos *a)* y *b)*.
- 7.39** Si  $X$  denota el número de caras en un solo lanzamiento de cuatro monedas, encontrar: *a)*  $\Pr\{X = 3\}$ , *b)*  $\Pr\{X < 2\}$ , *c)*  $\Pr\{X \leq 2\}$  y *d)*  $\Pr\{1 < X \leq 3\}$ .
- 7.40** De 800 familias con 5 hijos cada una, ¿cuántas se esperaría que tuvieran: *a)* 3 niños, *b)* 5 niñas y *c)* 2 o 3 niños? Supónganse iguales probabilidades para niños y niñas.
- 7.41** Encontrar la probabilidad de obtener, en dos lanzamientos de un par de dados, la suma 11: *a)* una vez y *b)* dos veces.
- 7.42** ¿Cuál es la probabilidad de obtener 9 una sola vez en tres lanzamientos de un par de dados?
- 7.43** Hallar la probabilidad de adivinar, correctamente, por lo menos 6 de 10 respuestas en un examen de verdadero y falso.
- 7.44** Un vendedor de seguros vende pólizas a 5 hombres, todos de la misma edad y con buena salud. De acuerdo con las tablas actuariales, la probabilidad de que un hombre de esta edad esté vivo en 30 años es  $\frac{2}{3}$ . Encontrar la probabilidad de que en 30 años estén vivos: *a)* los 5 hombres, *b)* por lo menos 3 de estos hombres, *c)* sólo 2 de estos hombres y *d)* por lo menos 1 de ellos. *e)* Usar EXCEL para responder los incisos del *a)* al *d)*.
- 7.45** Calcular: *a)* la media, *b)* la desviación estándar, *c)* el coeficiente momento de sesgo y *d)* el coeficiente momento de curtosis de la distribución binomial en la que  $p = 0.7$  y  $N = 60$ . Interpretar los resultados.
- 7.46** Mostrar que si una distribución binomial en la que  $N = 100$  es simétrica, su coeficiente momento de curtosis es 2.98.
- 7.47** Evaluar: *a)*  $\sum (X - \mu)^3 p(X)$  y *b)*  $\sum (X - \mu)^4 p(X)$  para una distribución binomial.
- 7.48** Probar las fórmulas (1) y (2) al principio de este capítulo respecto a los coeficientes momento de sesgo y de curtosis.

### LA DISTRIBUCIÓN NORMAL

- 7.49** En un examen de estadística, la puntuación media es 78 y la desviación estándar es 10.
- Determinar las puntuaciones estándar de dos estudiantes cuyas calificaciones fueron 93 y 62, respectivamente.
  - Determinar las calificaciones de dos estudiantes cuyas puntuaciones estándar fueron  $-0.6$  y  $1.2$ , respectivamente.
- 7.50** Encontrar: *a)* la media y *b)* la desviación estándar de las calificaciones obtenidas en un examen en el que 70 y 88 corresponden a las puntuaciones estándar  $-0.6$  y  $1.4$ , respectivamente.
- 7.51** Hallar el área bajo la curva normal entre: *a)*  $z = -1.20$  y  $z = 2.40$ ; *b)*  $z = 1.23$  y  $z = 1.87$ , y *c)*  $z = -2.35$  y  $z = -0.50$ . *d)* Resolver los incisos del *a)* al *c)* empleando EXCEL.
- 7.52** Hallar el área bajo la curva normal: *a)* a la izquierda de  $z = -1.78$ , *b)* a la izquierda de  $z = 0.56$ , *c)* a la derecha de  $z = -1.45$ , *d)* correspondiente a  $z \geq 2.16$ , *e)* correspondiente a  $-0.80 \leq z \leq 1.53$  y *f)* a la izquierda de  $z = -2.52$  y a la derecha de  $z = 1.83$ . *g)* Resolver los incisos del *a)* al *f)* usando EXCEL.

- 7.53** Si  $z$  está distribuida normalmente con media 0 y varianza 1, hallar: a)  $\Pr\{z \geq -1.64\}$ , b)  $\Pr\{-1.96 \leq z \leq 1.96\}$  y c)  $\Pr\{|z| \geq 1\}$ .
- 7.54** Hallar el valor de  $z$  tal que: a) el área a la derecha de  $z$  sea 0.2266, b) el área a la izquierda de  $z$  sea 0.0314, c) el área entre  $-0.23$  y  $z$  sea 0.5722, d) el área entre  $1.15$  y  $z$  sea 0.0730 y e) el área entre  $-z$  y  $z$  sea 0.9000.
- 7.55** Encontrar  $z_1$  si  $\Pr\{z \geq z_1\} = 0.84$ , donde  $z$  está distribuida normalmente con media 0 y varianza 1.
- 7.56** Empleando el apéndice I, encontrar las ordenadas en la curva normal correspondientes a: a)  $z = 2.25$ , b)  $z = -0.32$  y c)  $z = -1.18$ . d) Resolver los incisos del a) al c) empleando EXCEL.
- 7.57** Las estaturas de hombres adultos tienen una distribución normal cuya media es 70 in y cuya desviación estándar es 3 in. a) ¿Qué porcentaje mide menos de 65 in? b) ¿Qué porcentaje mide más de 72 in? c) ¿Qué porcentaje está entre 68 y 73 in?
- 7.58** Las cantidades gastadas, por determinado grupo de edad, en la compra de artículos en línea tienen una distribución normal cuya media es \$125 y cuya desviación estándar es \$25. a) ¿Qué porcentaje gasta más de \$175? b) ¿Qué porcentaje gasta entre \$100 y \$150? c) ¿Qué porcentaje gasta menos de \$50?
- 7.59** En un examen final la calificación media es 72 y la desviación estándar es 9. Los estudiantes que forman parte del 10% superior obtienen A como nota. ¿Cuál es la calificación mínima para obtener A?
- 7.60** Si un conjunto de medidas tiene una distribución normal, ¿qué porcentaje de las medidas difiere de la media en: a) más de media desviación estándar y b) menos de tres cuartos de desviación estándar?
- 7.61** Si  $\bar{X}$  es la media y  $s$  es la desviación estándar de un conjunto de mediciones distribuidas normalmente, ¿qué porcentaje de las mediciones: a) está dentro del rango  $\bar{X} \pm 2s$ , b) están fuera del rango  $\bar{X} \pm 1.2s$  y c) son mayores que  $\bar{X} - 1.5s$ ?
- 7.62** En el problema 7.61 encontrar la constante  $a$  tal que el porcentaje de casos: a) dentro del rango  $\bar{X} \pm as$  sea 75% y b) menores que  $\bar{X} - as$  sea 22%.

### APROXIMACIÓN NORMAL A LA DISTRIBUCIÓN BINOMIAL

- 7.63** Encontrar la probabilidad de que en 200 lanzamientos de una moneda se obtengan: a) entre 80 y 120 caras inclusive, b) menos de 90 caras, c) menos de 85 o más de 115 caras y d) exactamente 100 caras.
- 7.64** Encontrar la probabilidad de que en un examen de verdadero o falso un estudiante adivine correctamente las respuestas de: a) 12 de 20 preguntas o más y b) 24 de 40 preguntas o más.
- 7.65** De los tornillos que se producen con una máquina, 10% está defectuoso. Encontrar la probabilidad de que en una muestra aleatoria de 400 tornillos producidos con esta máquina: a) cuando mucho 30, b) entre 30 y 50, c) entre 35 y 45 y d) 55 o más de los tornillos estén defectuosos.
- 7.66** Encontrar la probabilidad de obtener más de 25 sietes en 100 lanzamientos de un par de dados.

### DISTRIBUCIÓN DE POISSON

- 7.67** Si 3% de los bulbos eléctricos fabricados por una empresa están defectuosos, encontrar la probabilidad de que en una muestra de 100 bulbos: a) 0, b) 1, c) 2, d) 3, e) 4 y f) 5 bulbos estén defectuosos.
- 7.68** En el problema 7.67, hallar la probabilidad de que: a) más de 5, b) entre 1 y 3 y c) 2 o menos bulbos estén defectuosos.

- 7.69** Una bolsa contiene 1 canica roja y 7 canicas blancas. De la bolsa se extrae una canica y se observa su color. Despues se regresa la canica a la bolsa y el contenido de la bolsa se mezcla bien. Usando: *a)* la distribución binomial y *b)* la aproximación de Poisson a la distribución binomial, encontrar la probabilidad de que en 8 extracciones se extraiga exactamente 3 veces una canica roja.
- 7.70** Según la oficina de estadística del Departamento de Salud de Estados Unidos, en ese país la cantidad anual de ahogados accidentalmente es 3 por 100 000 habitantes. Encontrar la probabilidad de que en una ciudad en que la población es de 200 000 habitantes haya anualmente: *a)* 0, *b)* 2, *c)* 6, *d)* 8, *e)* entre 4 y 8, y *f)* menos de 3 ahogados en forma accidental.
- 7.71** En una empresa, la cantidad promedio de llamadas que llegan al conmutador entre las 2 y las 4 de la tarde es 2.5 por minuto. Encontrar la probabilidad de que en determinado minuto haya: *a)* 0, *b)* 1, *c)* 2, *d)* 3, *e)* 4 o menos, y *f)* más de 6 llamadas.

### LA DISTRIBUCIÓN MULTINOMIAL

- 7.72** Un dado se lanza seis veces. Hallar la probabilidad de que se obtengan: *a)* un 1, dos 2 y tres 3, y *b)* una vez cada lado.
- 7.73** Una caja contiene una gran cantidad de canicas rojas, blancas, azules y amarillas en la proporción 4:3:2:1, respectivamente. Encontrar la probabilidad de que en diez extracciones los colores de las canicas sean: *a)* 4 rojas, 3 blancas, 2 azules y una amarilla y *b)* 8 rojas y 2 amarillas.
- 7.74** Encontrar la probabilidad de que en cuatro lanzamientos de un dado no se obtengan 1, 2 ni 3.

### AJUSTE DE DATOS A DISTRIBUCIONES TEÓRICAS

- 7.75** Ajustar la distribución binomial a los datos de la tabla 7.9.

Tabla 7.9

| X | 0  | 1  | 2  | 3  | 4 |
|---|----|----|----|----|---|
| f | 30 | 62 | 46 | 10 | 2 |

- 7.76** En una encuesta realizada a estudiantes de educación media se determinaron las horas de ejercicio que practican por semana. Usando STATISTIX, construir un histograma con los datos. Empleando la prueba de Shapiro-Wilk de STATISTIX, determinar si los datos provienen de una distribución normal. Los datos aparecen en la tabla 7.10.

Tabla 7.10

|   |    |    |   |    |
|---|----|----|---|----|
| 5 | 10 | 2  | 3 | 2  |
| 5 | 5  | 1  | 3 | 15 |
| 1 | 2  | 20 | 3 | 1  |
| 4 | 4  | 4  | 3 | 5  |

- 7.77** Con los datos de la tabla 7.5 del problema 7.32, construir un histograma empleando STATISTIX. Empleando la prueba de Shapiro-Wilk de STATISTIX, determinar si los datos provienen de una distribución normal.
- 7.78** Las puntuaciones de examen de la tabla 7.11 siguen una distribución en forma de U, que es exactamente lo opuesto a una distribución normal. Con estos datos, construir un histograma empleando STATISTIX. Usando la prueba de Shapiro-Wilk de STATISTIX, determinar si los datos provienen de una distribución normal.

**Tabla 7.11**

|    |    |    |
|----|----|----|
| 20 | 90 | 10 |
| 40 | 90 | 20 |
| 80 | 70 | 50 |
| 70 | 40 | 90 |
| 90 | 70 | 10 |
| 60 | 30 | 80 |
| 10 | 20 | 30 |
| 30 | 10 | 20 |
| 10 | 80 | 90 |
| 60 | 50 | 80 |

- 7.79** Emplee los datos de la tabla 7.11. Usando la prueba de Anderson-Darling y la de Ryan-Joiner de MINITAB, determinar si los datos provienen de una distribución normal.
- 7.80** Los datos de la tabla 7.12 provienen de 10 cuerpos de la armada prusiana y corresponden a un periodo de 20 años (1875 a 1894). Estos datos muestran la cantidad de muertes, por año, debidas a patadas de caballo. Ajustar una distribución de Poisson a los datos.

**Tabla 7.12**

| X | 0   | 1  | 2  | 3 | 4 |
|---|-----|----|----|---|---|
| f | 109 | 65 | 22 | 3 | 1 |

# TEORÍA ELEMENTAL DEL MUESTREO

8

## TEORÍA DEL MUESTREO

La *teoría del muestreo* es el estudio de la relación que existe entre una población y las muestras que se obtienen de esa población. La teoría del muestreo se emplea en muchos contextos. Por ejemplo, en la *estimación* de cantidades poblacionales desconocidas (como la media y la varianza poblacionales), a las que se les conoce como *parámetros poblacionales* o simplemente *parámetros*, a partir de las correspondientes cantidades muestrales (como la media y la varianza muestrales), a menudo conocidas como *estadísticos muestrales* o simplemente *estadísticos*. El problema de la estimación se estudia en el capítulo 9.

La teoría del muestreo también sirve para determinar si las diferencias que se observan entre dos muestras se deben a variaciones casuales o si son diferencias realmente significativas. Tales preguntas surgen, por ejemplo, al probar un nuevo suero para el tratamiento de una enfermedad o cuando se tiene que decidir si un proceso de producción es mejor que otro. Para responder a estas preguntas se usan las llamadas *pruebas de significancia o de hipótesis*, fundamentales en la *teoría de decisiones*. Estos temas se tratan en el capítulo 10.

En general, al estudio de las inferencias que se hacen acerca de una población, empleando muestras obtenidas de ella, y de las indicaciones de la exactitud de tales inferencias, mediante el uso de la teoría de la probabilidad, es a lo que se le llama *inferencia estadística*.

## MUESTRAS ALEATORIAS Y NÚMEROS ALEATORIOS

Para que las conclusiones que se obtienen empleando la teoría del muestreo y la inferencia estadística sean válidas, las muestras deben elegirse de manera que sean *representativas* de la población. Al estudio de los métodos de muestreo y de los problemas relacionados con ellos se le conoce como *diseño de experimentos*.

Una manera de obtener una muestra representativa es mediante un proceso llamado *muestreo aleatorio*, mediante el cual cada uno de los miembros de la población tiene la misma posibilidad de ser incluido en la muestra. Una técnica para obtener una muestra aleatoria consiste en asignarle, a cada miembro de la población, un número, escribir estos números en pedazos pequeños de papel, colocarlos en una urna y después extraer los números de la urna, teniendo cuidado de mezclar muy bien antes de cada extracción. Una alternativa a este método es usar una tabla de *números aleatorios* (ver el apéndice IX), la cual se construye especialmente para este fin. Ver el problema 8.6.

## MUESTREO CON REPOSICIÓN Y SIN ELLA

Si se extrae un número de una urna, antes de extraer otro, el número puede ser devuelto a la urna (ser repuesto) o no. En el primer caso, el número puede ser extraído varias veces, en tanto que en el segundo caso sólo puede ser extraído una vez. A un muestreo en el que cada miembro de la población puede ser elegido más de una vez se le llama *muestreo con reposición*; en cambio, si sólo puede ser elegido una vez se llama *muestreo sin reposición*.

Una población puede ser finita o infinita. Por ejemplo, si de una urna que contiene 100 canicas se extraen sucesivamente 10 canicas sin reposición, se está muestreando una población finita; en cambio, si se lanza una moneda 50 veces y se cuenta la cantidad de caras, se está muestreando de una población infinita.

Una población finita que se muestrea con reposición puede considerarse teóricamente infinita, ya que se puede extraer cualquier cantidad de muestras sin agotar la población. Para fines prácticos, cuando se muestrea de una población finita pero muy grande, se puede considerar que el muestreo se hace de una población infinita.

## DISTRIBUCIONES MUESTRALES

Considérense todas las muestras de tamaño  $N$  que pueden extraerse de determinada población (ya sea con reposición o sin ella). Para cada muestra se pueden calcular diversos estadísticos (como media o desviación estándar), los cuales variarán de una muestra a otra. De esta manera se obtiene una distribución del estadístico de que se trate, a la que se le llama *distribución muestral*.

Por ejemplo, si el estadístico de que se trata es la media muestral, a la distribución que se obtiene se le llama *distribución muestral de las medias* o *distribución muestral de la media*. De igual manera se pueden obtener distribuciones muestrales de las desviaciones estándar, de las varianzas, de las medianas, de las proporciones, etcétera.

A cada distribución muestral se le puede calcular su media, su desviación estándar, etc. Así, se puede hablar de la media, de la desviación estándar, de la distribución muestral de las medias, etcétera.

## DISTRIBUCIONES MUESTRALES DE MEDIAS

Supóngase que de una población finita de tamaño  $N_p > N$  se extraen, sin reposición, todas las muestras posibles de tamaño  $N$ . Si se denota con  $\mu_{\bar{X}}$  y  $\sigma_{\bar{X}}$  respectivamente, a la media y a la desviación estándar de una distribución muestral de las medias, y con  $\mu$  y  $\sigma$ , respectivamente, a la media y la desviación estándar poblacionales, entonces

$$\mu_{\bar{X}} = \mu \quad \text{y} \quad \sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{N_p - N}{N_p - 1}} \quad (I)$$

Si la población es infinita, o si el muestreo se hace con reposición, las fórmulas anteriores se reducen a

$$\mu_{\bar{X}} = \mu \quad \text{y} \quad \sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

Si el valor de  $N$  es grande ( $N \geq 30$ ), la distribución muestral de las medias es aproximadamente normal con media  $\mu_{\bar{X}}$  y desviación estándar  $\sigma_{\bar{X}}$ , independientemente de la población (siempre y cuando la media y la varianza poblacionales sean finitas y el tamaño de la población sea por lo menos el doble del tamaño de la muestra). Si la población es infinita, este resultado es un caso especial del *teorema del límite central* de la teoría avanzada de la probabilidad, el cual muestra que la exactitud de la aproximación aumenta a medida que  $N$  aumenta. Esto suele indicarse diciendo que la distribución muestral es *asintóticamente normal*.

Si la población está distribuida normalmente, la distribución muestral de las medias también es normal aun cuando el valor de  $N$  sea pequeño (es decir,  $N < 30$ ).

## DISTRIBUCIONES MUESTRALES DE PROPORCIONES

Supóngase que una población sea infinita y que la probabilidad de ocurrencia de un evento (llamada éxito) es  $p$ , y que la probabilidad de no ocurrencia del evento es  $q = 1 - p$ . La población puede ser, por ejemplo, la de los lanzamientos de una moneda, en los que la probabilidad del evento “cara” es  $p = \frac{1}{2}$ . Considerense todas las posibles muestras de tamaño  $N$  extraídas de esta población, y para cada muestra determíñese la proporción  $P$  de éxitos. En el caso de una moneda,  $P$  es la proporción de caras en  $N$  lanzamientos. De esta manera se obtiene una *distribución muestral de las proporciones* cuya media  $\mu_P$  y cuya desviación estándar  $\sigma_P$  están dadas por

$$\mu_P = p \quad \text{y} \quad \sigma_P = \sqrt{\frac{pq}{N}} = \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}} \quad (3)$$

que se pueden obtener de la ecuación (2) sustituyendo  $\mu = p$  y  $\sigma = \sqrt{pq}$ . Si el valor de  $N$  es grande ( $N \geq 30$ ), esta distribución muestral es aproximadamente normal. Obsérvese que la población está *distribuida en forma binomial*.

Las ecuaciones (3) también son válidas para poblaciones finitas si el muestreo se hace con reposición. En el caso de poblaciones finitas en las que el muestreo se hace sin reposición, las ecuaciones (3) se sustituyen por las ecuaciones (1) con  $\mu = p$  y  $\sigma = \sqrt{pq}$ .

Obsérvese que las ecuaciones (3) pueden obtenerse más fácilmente dividiendo entre  $N$ , la media y la desviación estándar ( $Np$  y  $\sqrt{Npq}$ ) de la distribución binomial (ver capítulo 7).

## DISTRIBUCIONES MUESTRALES DE DIFERENCIAS Y SUMAS

Se supone que se tienen dos poblaciones. Para cada muestra de tamaño  $N_1$  tomada de la primera población se calcula un estadístico  $S_1$ , con lo que se obtiene una distribución muestral de este estadístico  $S_1$ , cuya media y desviación estándar se denotan  $\mu_{S1}$  y  $\sigma_{S1}$ , respectivamente. De igual manera, para cada muestra de tamaño  $N_2$  tomada de la segunda población se calcula un estadístico  $S_2$ , con lo que se obtiene una distribución muestral de este estadístico  $S_2$ , cuya media y desviación estándar se denotan  $\mu_{S2}$  y  $\sigma_{S2}$ , respectivamente. Con todas las posibles combinaciones de estas muestras de las dos poblaciones se obtiene una distribución de las diferencias,  $S_1 - S_2$ , a la que se le llama *distribución muestral de las diferencias de los estadísticos*. La media y la desviación estándar de esta distribución muestral se denotan, respectivamente,  $\mu_{S1-S2}$  y  $\sigma_{S1-S2}$ , y están dadas por

$$\mu_{S1-S2} = \mu_{S1} - \mu_{S2} \quad \text{y} \quad \sigma_{S1-S2} = \sqrt{\sigma_{S1}^2 + \sigma_{S2}^2} \quad (4)$$

siempre y cuando las muestras elegidas no dependan, de manera alguna, una de la otra (es decir, las muestras sean *independientes*).

Si  $S_1$  y  $S_2$  son las medias muestrales de las dos poblaciones, a las que se les denota  $\bar{X}_1$  y  $\bar{X}_2$ , respectivamente, entonces la distribución muestral de las diferencias de las medias está dada para poblaciones infinitas con media y desviación estándar ( $\mu_1$  y  $\sigma_1$ ) y ( $\mu_2$  y  $\sigma_2$ ), respectivamente, por

$$\mu_{\bar{X}1-\bar{X}2} = \mu_{\bar{X}1} - \mu_{\bar{X}2} = \mu_1 - \mu_2 \quad \text{y} \quad \sigma_{\bar{X}1-\bar{X}2} = \sqrt{\sigma_{\bar{X}1}^2 + \sigma_{\bar{X}2}^2} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}} \quad (5)$$

usando las ecuaciones (2). Estas ecuaciones también son válidas para poblaciones finitas si el muestreo se hace con reposición. Para poblaciones finitas en las que el muestreo se haga sin reposición, se obtienen ecuaciones similares empleando las ecuaciones (1).

**Tabla 8.1** Error estándar de distribuciones muestrales

| Distribución muestral       | Error estándar   | Observaciones  |
|-----------------------------|--|--|
| Media                       | $\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$   | Esta fórmula es válida tanto para muestras grandes como para muestras pequeñas. La distribución muestral de las medias se aproxima a una distribución normal cuando $N \geq 30$ , aun cuando la población no sea normal.<br>$\mu_{\bar{X}} = \mu$ , la media poblacional, en todos los casos.  |
| Proporciones                | $\sigma_p = \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}} = \sqrt{\frac{pq}{N}}$   | La observación hecha para las medias también es válida en este caso.<br>$\mu_p = p$ , en todos los casos.  |
| Desviaciones estándar       | (1) $\sigma_s = \frac{\sigma}{\sqrt{2N}}$<br>(2) $\sigma_s = \sqrt{\frac{\mu_4 - \mu_2^2}{4N\mu_2}}$   | Cuando $N \geq 100$ , la distribución muestral de $s$ es casi normal.<br>$\sigma_s$ está dada por (1) sólo si la población es normal (o aproximadamente normal). Si la población no es normal, se puede usar (2).<br>Obsérvese que (2) se reduce a (1) cuando $\mu_2 = \sigma^2$ y $\mu_4 = 3\sigma^4$ , lo que ocurre en poblaciones normales.<br>Cuando $N \geq 100$ , $\mu_s = \sigma$ muy aproximadamente. |
| Medianas                    | $\sigma_{\text{med}} = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2N}} = \frac{1.2533\sigma}{\sqrt{N}}$   | Cuando $N \geq 30$ , la distribución muestral de la mediana es casi normal. La fórmula dada es válida sólo si la población es normal (o aproximadamente normal).<br>$\mu_{\text{med}} = \mu$   |
| Primero y tercer cuartiles  | $\sigma_{Q1} = \sigma_{Q3} = \frac{1.3626\sigma}{\sqrt{N}}$  | La observación hecha para las medianas también es válida aquí.<br>$\mu_{Q1}$ y $\mu_{Q3}$ son casi iguales al primero y tercer cuartiles de la población.<br>Obsérvese que $\sigma_{Q2} = \sigma_{\text{med}}$   |
| Deciles                     | $\sigma_{D1} = \sigma_{D9} = \frac{1.7094\sigma}{\sqrt{N}}$<br>$\sigma_{D2} = \sigma_{D8} = \frac{1.4288\sigma}{\sqrt{N}}$<br>$\sigma_{D3} = \sigma_{D7} = \frac{1.3180\sigma}{\sqrt{N}}$<br>$\sigma_{D4} = \sigma_{D6} = \frac{1.2680\sigma}{\sqrt{N}}$ | Las observaciones hechas para las medianas también son válidas aquí.<br>$\mu_{D1}, \mu_{D2}, \dots$ son casi iguales al primero, segundo, ... deciles de la población.<br>Obsérvese que $\sigma_{D5} = \sigma_{\text{med}}$ .  |
| Rangos semiintercuartílicos | $\sigma_Q = \frac{0.7867\sigma}{\sqrt{N}}$   | Las observaciones hechas para las medianas también son válidas aquí.<br>$\mu_Q$ es casi igual al rango semiintercuartil poblacional.   |
| Varianzas                   | (1) $\sigma_{S^2} = \sigma^2 \sqrt{\frac{2}{N}}$<br>(2) $\sigma_{S^2} = \sqrt{\frac{\mu_4 - \frac{N-3}{N-1}\mu_2^2}{N}}$   | Las observaciones hechas para la desviación estándar también son válidas aquí. Obsérvese que si la población es normal (2) da (1).<br>$\mu_{S^2} = \sigma^2(N-1)/N$ , que es casi igual a $\sigma^2$ cuando $N$ es grande.   |
| Coeficiente de variación    | $\sigma_V = \frac{v}{\sqrt{2N}} \sqrt{1 + 2v^2}$   | Aquí $v = \sigma/\mu$ es el coeficiente de variación poblacional. La fórmula dada es válida para poblaciones normales (o casi normales) y $N \geq 100$ .   |

Pueden obtenerse resultados semejantes para las distribuciones muestrales de las diferencias entre las proporciones de dos poblaciones distribuidas en forma binomial con parámetros  $(p_1, q_1)$  y  $(p_2, q_2)$ , respectivamente. En este caso,  $S_1$  y  $S_2$  son proporción de éxitos,  $P_1$  y  $P_2$ , y las ecuaciones (4) se transforman en

$$\mu_{P_1-P_2} = \mu_{P_1} - \mu_{P_2} = p_1 - p_2 \quad \text{y} \quad \sigma_{P_1-P_2} = \sqrt{\sigma_{P_1}^2 + \sigma_{P_2}^2} = \sqrt{\frac{p_1 q_1}{N_1} + \frac{p_2 q_2}{N_2}} \quad (6)$$

Si  $N_1$  y  $N_2$  son grandes ( $N_1, N_2 \geq 30$ ), la distribución muestral de diferencias entre medias o proporciones se aproximan mucho a una distribución normal.

Algunas veces se necesita la *distribución muestral de la suma de estadísticos*. La media y la desviación estándar de estas distribuciones están dadas por

$$\mu_{S_1+S_2} = \mu_{S_1} + \mu_{S_2} \quad \text{y} \quad \sigma_{S_1+S_2} = \sqrt{\sigma_{S_1}^2 + \sigma_{S_2}^2} \quad (7)$$

suponiendo que las muestras sean *independientes*.

## ERRORES ESTÁNDAR

A la desviación estándar de la distribución muestral de un estadístico suele conocérsele como su *error estándar*. En la tabla 8.1 se enumeran los errores estándar de distribuciones muestrales de varios estadísticos, suponiendo que el muestreo es un muestreo aleatorio de una población infinita (o muy grande) o de una población finita pero hecho el muestreo con reposición. Se presentan también algunas observaciones especiales en las que se dan las condiciones bajo las cuales son válidas las fórmulas, así como otras observaciones pertinentes.

Las cantidades  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $p$ ,  $\mu_r$  y  $\bar{X}$ ,  $s$ ,  $P$ ,  $m_r$  denotan media, desviación estándar, proporción y el  $r$ -ésimo momento respecto a la media, poblacionales y muestrales, respectivamente.

Se hace notar que si el tamaño  $N$  de la muestra es suficientemente grande, la distribución muestral es normal o casi normal. A esto se debe que estos métodos se conozcan como *métodos para muestras grandes*. Cuando  $N < 30$ , a las muestras se les llama *pequeñas*. La teoría de las muestras *pequeñas* o *teoría del muestreo exacto*, como se le llama algunas veces, se estudia en el capítulo 11.

Cuando los parámetros poblacionales, por ejemplo,  $\sigma$ ,  $p$  o bien  $\mu_r$  no se conocen, pueden estimarse con bastante exactitud a partir de sus estadísticos muestrales,  $s$  (o bien  $\hat{s} = \sqrt{N/(N-1)s}$ ),  $P$  y  $m_r$ , siempre y cuando las muestras sean suficientemente grandes.

## DEMOSTRACIONES DE LA TEORÍA ELEMENTAL DEL MUESTREO EMPLEANDO SOFTWARE

### EJEMPLO 1

En una población grande se define la siguiente variable aleatoria.  $X$  es la cantidad de computadoras por hogar;  $X$  está distribuida de manera uniforme, es decir,  $p(x) = 0.25$  para  $x = 1, 2, 3$  y  $4$ . En otras palabras, 25% de los hogares tiene 1 computadora; 25% tiene 2 computadoras; 25% tiene tres computadoras y 25% tiene 4 computadoras. La media de  $X$  es  $\mu = \sum x p(x) = 0.25 + 0.5 + 0.75 + 1 = 2.5$ . La varianza de  $X$  es  $\sigma^2 = \sum x^2 p(x) - \mu^2 = 0.25 + 1 + 2.25 + 4 - 6.25 = 1.25$ . Entonces, la cantidad media de computadoras por hogar es 2.5 y la varianza de la cantidad de computadoras por hogar es 1.25.

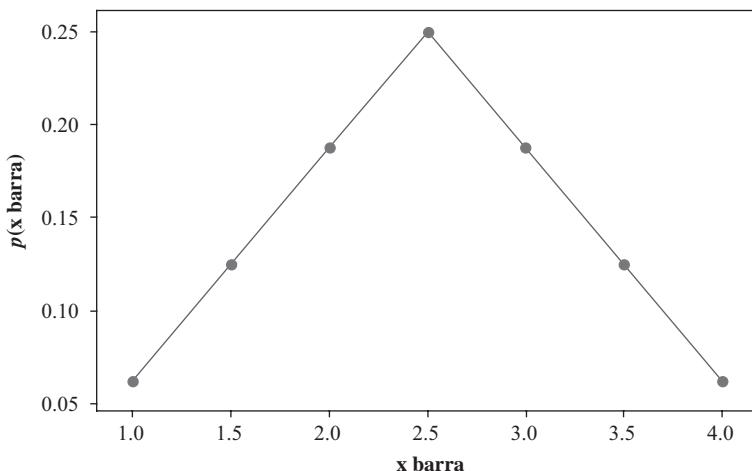
### EJEMPLO 2

Para enumerar todas las muestras, tomadas con reposición, de dos hogares puede usarse MINITAB. La hoja de cálculo se verá como la que se presenta en la tabla 8.2. Las 16 muestras aparecen en C1 y C2, y la media de cada una de ellas en C3. Como la población está distribuida de manera uniforme, la probabilidad de cada media muestral es 1/16. Resumiendo, en las columnas C4 y C5 se da la distribución de probabilidad.

Obsérvese que  $\mu_{\bar{x}} = \sum \bar{x} p(\bar{x}) = 1(0.0625) + 1.5(0.1250) + \dots + 4(0.0625) = 2.5$ . Como se ve  $\mu_{\bar{x}} = \mu$ . Además,  $\sigma_{\bar{x}}^2 = \sum \bar{x}^2 p(\bar{x}) - \mu_{\bar{x}}^2 = 1(0.0625) + 2.25(0.1250) + \dots + 16(0.0625) - 6.25 = 0.625$  con lo que  $\sigma_{\bar{x}} = (\sigma^2/2)$ . Empleando MINITAB para dibujar la gráfica de la distribución de probabilidad de  $\bar{x}$  barra se obtiene el resultado que se muestra en la figura 8-1. (Obsérvese que  $\bar{X}$  y  $x$  barra se usan indistintamente.)

Tabla 8.2

| C1<br>hogar 1 | C2<br>hogar 2 | C3<br>media | C4<br>x barra | C5<br>$p(x \text{ barra})$ |
|---------------|---------------|-------------|---------------|----------------------------|
| 1             | 1             | 1.0         | 1.0           | 0.0625                     |
| 1             | 2             | 1.5         | 1.5           | 0.1250                     |
| 1             | 3             | 2.0         | 2.0           | 0.1875                     |
| 1             | 4             | 2.5         | 2.5           | 0.2500                     |
| 2             | 1             | 1.5         | 3.0           | 0.1875                     |
| 2             | 2             | 2.0         | 3.5           | 0.1250                     |
| 2             | 3             | 2.5         | 4.0           | 0.0625                     |
| 2             | 4             | 3.0         |               |                            |
| 3             | 1             | 2.0         |               |                            |
| 3             | 2             | 2.5         |               |                            |
| 3             | 3             | 3.0         |               |                            |
| 3             | 4             | 3.5         |               |                            |
| 4             | 1             | 2.5         |               |                            |
| 4             | 2             | 3.0         |               |                            |
| 4             | 3             | 3.5         |               |                            |
| 4             | 4             | 4.0         |               |                            |

Figura 8-1 Gráfica de  $p(x \text{ barra})$  vs.  $x \text{ barra}$ .

## PROBLEMAS RESUELTOS

### DISTRIBUCIÓN MUESTRAL DE LAS MEDIAS

- 8.1** Una población consta de los cinco números 2, 3, 6, 8 y 11. Considerar todas las muestras de tamaño 2 que pueden extraerse de esta población con reposición. Encontrar: *a*) la media de la población, *b*) la desviación estándar de la población, *c*) la media de la distribución muestral de las medias y *d*) la desviación estándar de la distribución muestral de las medias (es decir, el error estándar de las medias).

**SOLUCIÓN**

a)  $\mu = \frac{2 + 3 + 6 + 8 + 11}{5} = \frac{30}{5} = 6.0$

b)  $\sigma^2 = \frac{(2 - 6)^2 + (3 - 6)^2 + (6 - 6)^2 + (8 - 6)^2 + (11 - 6)^2}{5} = \frac{16 + 9 + 0 + 4 + 25}{5} = 10.8$

y  $\sigma = 3.29$ .

- c) Existen  $5(5) = 25$  muestras de tamaño 2 que pueden extraerse con reposición (ya que a cada uno de los cinco números de la primera extracción le corresponden cada uno de los cinco números de la segunda extracción). Así, se tiene

|         |         |         |         |          |
|---------|---------|---------|---------|----------|
| (2, 2)  | (2, 3)  | (2, 6)  | (2, 8)  | (2, 11)  |
| (3, 2)  | (3, 3)  | (3, 6)  | (3, 8)  | (3, 11)  |
| (6, 2)  | (6, 3)  | (6, 6)  | (6, 8)  | (6, 11)  |
| (8, 2)  | (8, 3)  | (8, 6)  | (8, 8)  | (8, 11)  |
| (11, 2) | (11, 3) | (11, 6) | (11, 8) | (11, 11) |

Las medias muestrales correspondientes son

|     |     |     |     |      |
|-----|-----|-----|-----|------|
| 2.0 | 2.5 | 4.0 | 5.0 | 6.5  |
| 2.5 | 3.0 | 4.5 | 5.5 | 7.0  |
| 4.0 | 4.5 | 6.0 | 7.0 | 8.5  |
| 5.0 | 5.5 | 7.0 | 8.0 | 9.5  |
| 6.5 | 7.0 | 8.5 | 9.5 | 11.0 |

(8)

y la media de la distribución muestral de las medias es

$$\mu_{\bar{X}} = \frac{\text{suma de todas las medias muestrales de (8)}}{25} = \frac{150}{25} = 6.0$$

lo que ilustra que  $\mu_{\bar{X}} = \mu$ .

- d) La varianza  $\sigma_{\bar{X}}^2$  de la distribución muestral de las medias se obtiene restándole 6 a cada una de las medias en (8), elevando cada resultado al cuadrado, sumando los 25 resultados obtenidos y dividiendo esta suma entre el 25. El resultado final es  $\sigma_{\bar{X}}^2 = 135/25 = 5.40$  y por lo tanto  $\sigma_{\bar{X}} = \sqrt{5.40} = 2.32$ . Esto ilustra que en una población finita en la que se muestrea con reposición (o en una población infinita),  $\sigma_{\bar{X}}^2 = \sigma^2/N$ , ya que el lado derecho es  $10.8/2 = 5.40$ , que coincide con el valor anterior.

- 8.2** Resolver el problema 8.1 considerando que el muestreo se hace sin reposición.

**SOLUCIÓN**

Como en los incisos a) y b) del problema 8.1,  $\mu = 6$  y  $\sigma = 3.29$ .

- c) Existen  $\binom{5}{2} = 10$  muestras de tamaño 2 que pueden ser extraídas sin reposición (esto significa que se extrae un número y después otro diferente al primero) de la población: (2, 3), (2, 6), (2, 8), (2, 11), (3, 6), (3, 8), (3, 11), (6, 8), (6, 11) y (8, 11). La extracción (2, 3) se considera igual a la (3, 2).

Las medias muestrales correspondientes son 2.5, 4.0, 5.0, 6.5, 4.5, 5.5, 7.0, 7.0, 8.5 y 9.5, y la media de la distribución muestral de las medias es

$$\mu_{\bar{X}} = \frac{2.5 + 4.0 + 5.0 + 6.5 + 4.5 + 5.5 + 7.0 + 7.0 + 8.5 + 9.5}{10} = 6.0$$

lo que ilustra que  $\mu_{\bar{X}} = \mu$ .

- d) La varianza de la distribución muestral de las medias es

$$\sigma_{\bar{X}}^2 = \frac{(2.5 - 6.0)^2 + (4.0 - 6.0)^2 + (5.0 - 6.0)^2 + \cdots + (9.5 - 6.0)^2}{10} = 4.05$$

y  $\sigma_{\bar{X}} = 2.01$ . Esto ilustra que

$$\sigma_{\bar{X}}^2 = \frac{\sigma^2}{N} \left( \frac{N_p - N}{N_p - 1} \right)$$

ya que el lado derecho es igual a

$$\frac{10.8}{2} \left( \frac{5 - 2}{5 - 1} \right) = 4.05$$

que es lo que se obtuvo antes.

- 8.3** Supóngase que las estaturas de 3 000 estudiantes del sexo masculino de una universidad tienen una distribución normal con media 68.0 pulgadas (in) y desviación estándar 3.0 in. Si se obtienen 80 muestras, cada una de 25 estudiantes, ¿cuáles serán la media y la desviación estándar esperadas de la distribución muestral de las medias si el muestreo se hace: a) con reposición y b) sin reposición?

### SOLUCIÓN

El número de muestras de tamaño 25 que teóricamente pueden obtenerse de un grupo de 3 000 estudiantes, con reposición y sin ésta son, respectivamente  $(3\ 000)^{25}$  y  $\binom{3000}{25}$ , que son mucho más que 80. De manera que no se obtendrá una verdadera distribución muestral de las medias, sino únicamente una distribución muestral *experimental*. De cualquier manera, dado que el número de muestras es grande, habrá una estrecha coincidencia entre las dos distribuciones muestrales. Por lo tanto, la media y la desviación estándar esperadas serán muy semejantes a las de la distribución teórica. Se tiene:

$$a) \quad \mu_{\bar{X}} = \mu = 68.0 \text{ in} \quad \text{y} \quad \sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \frac{3}{\sqrt{25}} = 0.6 \text{ in}$$

$$b) \quad \mu_{\bar{X}} = 68.0 \text{ in} \quad \text{y} \quad \sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{N_p - N}{N_p - 1}} = \frac{3}{\sqrt{25}} \sqrt{\frac{3\ 000 - 25}{3\ 000 - 1}}$$

que es apenas ligeramente menor a 0.6 in y por lo tanto, para fines prácticos, puede considerarse igual a la del muestreo con reposición.

De esta manera, se espera que la distribución muestral experimental de las medias esté distribuida de manera aproximadamente normal con media 68.0 in y desviación estándar 0.6 in.

- 8.4** ¿En cuántas de las muestras del problema 8.3 se esperaría encontrar que la media: a) estuviera entre 66.8 y 68.3 in y b) fuera menor a 66.4 in?

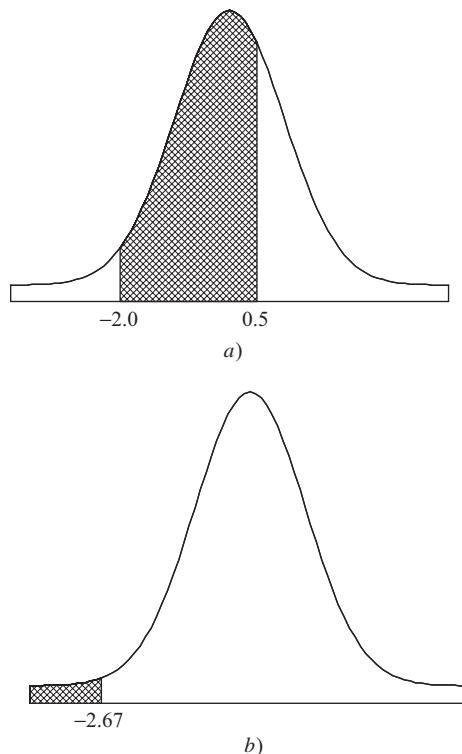
### SOLUCIÓN

La media  $\bar{X}$  de una muestra, en unidades estándar, está dada por

$$z = \frac{\bar{X} - \mu_{\bar{X}}}{\sigma_{\bar{X}}} = \frac{\bar{X} - 68.0}{0.6}$$

$$a) \quad 66.8 \text{ en unidades estándar} = \frac{66.8 - 68.0}{0.6} = -2.0$$

$$68.3 \text{ en unidades estándar} = \frac{68.3 - 68.0}{0.6} = 0.5$$



**Figura 8-2 Áreas bajo la curva normal estándar.** a) En esta curva normal estándar se muestra el área entre  $z = -2$  y  $z = 0.5$ . b) En esta curva normal estándar se muestra el área a la izquierda de  $z = -2.67$ .

Como se muestra en la figura 8-2a).

La proporción de muestras cuya media está entre 66.8 y 68.3 in

$$\begin{aligned} &= (\text{área bajo la curva normal entre } z = -2.0 \text{ y } z = 0.5) \\ &= (\text{área entre } z = -2 \text{ y } z = 0) + (\text{área entre } z = 0 \text{ y } z = 0.5) \\ &= 0.4772 + 0.1915 = 0.6687 \end{aligned}$$

Por lo tanto, la cantidad esperada de muestras es  $(80)(0.6687) = 56.496$ , o 53.

b)

$$66.4 \text{ en unidades estándar} = \frac{66.4 - 68.0}{0.6} = -2.67$$

Como se muestra en la figura 8-2b).

Proporción de las muestras que tienen una media

$$\begin{aligned} \text{menor que } 66.4 \text{ in} &= (\text{área bajo la curva normal a la izquierda de } z = -2.67) \\ &= (\text{área a la izquierda de } z = 0) \\ &\quad - (\text{área entre } z = -2.67 \text{ y } z = 0) \\ &= 0.5 - 0.4962 = 0.0038 \end{aligned}$$

Por lo tanto, el número de muestras esperada es  $(80)(0.0038) = 0.304$  o cero.

- 8.5** Se tienen 500 balines cuyo peso medio es 5.02 gramos (g) y cuya desviación estándar es 0.30 g. Encontrar la probabilidad de que todos los balines de una muestra aleatoria de 100 balines, tomada de estos balines, pese:
- a) entre 496 y 500 g y b) más de 510 g.

**SOLUCIÓN**

Para la distribución muestral de las medias,  $\mu_{\bar{X}} = \mu = 5.02$  g, y

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{N_p - N}{N_p - 1}} = \frac{0.30}{\sqrt{100}} \sqrt{\frac{500 - 100}{500 - 1}} = 0.027 \text{ g}$$

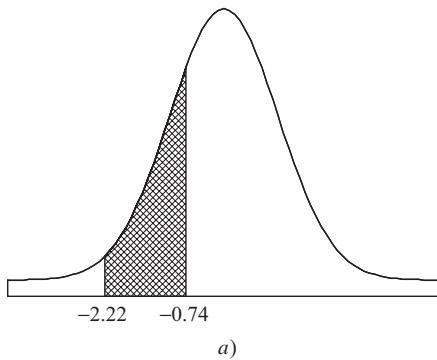
- a) El peso de los 100 balines, juntos, estará entre 496 y 500 g, si el peso medio de los balines se encuentra entre 4.96 y 5.00 g.

$$4.96 \text{ en unidades estándar} = \frac{4.96 - 5.02}{0.0027} = -2.22$$

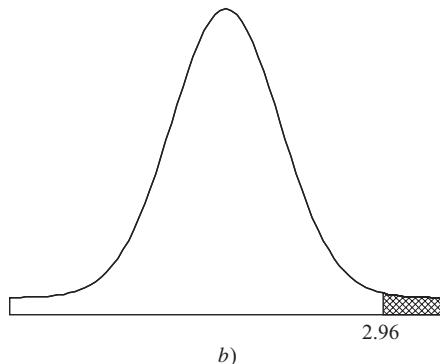
$$5.00 \text{ en unidades estándar} = \frac{5.00 - 5.02}{0.027} = -0.74$$

Como se muestra en la figura 8-3a),

$$\begin{aligned}\text{Probabilidad buscada} &= (\text{área entre } z = -2.22 \text{ y } z = -0.74) \\ &= (\text{área entre } z = -2.22 \text{ y } z = 0) - (\text{área entre } z = -0.74 \text{ y } z = 0) \\ &= 0.4868 - 0.2704 = 0.2164\end{aligned}$$



a)



b)

**Figura 8-3** Las probabilidades muestrales se encuentran como áreas bajo la curva normal estándar.

- a) Curva normal estándar en la que se muestra el área entre  $z = -2.22$  y  $z = -0.74$ ; b) curva normal estándar en la que se muestra el área a la derecha de  $z = 2.96$ .

- b) El peso de los 100 balines juntos será mayor a 510 g si el peso medio de los balines es mayor a 5.10 g.

$$5.10 \text{ en unidades estándar} = \frac{5.10 - 5.02}{0.027} = 2.96$$

Como se muestra la figura 8-3b),

$$\begin{aligned}\text{Probabilidad buscada} &= (\text{área a la derecha de } z = 2.96) \\ &= (\text{área a la derecha de } z = 0) - (\text{área entre } z = 0 \text{ y } z = 2.96) \\ &= 0.5 - 0.4985 = 0.0015\end{aligned}$$

Por lo tanto, sólo hay 3 posibilidades en 2 000 de obtener una muestra de 100 balines que juntos pesen más de 510 g.

- 8.6**
- a) Mostrar la manera de tomar, de la tabla 2.1, 30 muestras aleatorias (con reposición) de 4 estudiantes cada una, empleando números aleatorios.
  - b) Encontrar la media y la desviación estándar de la distribución muestral de las medias del inciso a).
  - c) Comparar los resultados del inciso b) con los valores teóricos y explicar cualquier discrepancia.

### SOLUCIÓN

- a) Para enumerar cada uno de los 100 estudiantes se emplean los dígitos: 00, 01, 02, ..., 99 (ver la tabla 8.3). Por lo tanto, los 5 estudiantes cuya estatura está en el intervalo 60-62 están numerados 00-04; los dieciocho estudiantes cuya estatura está en el intervalo 63-65 están numerados 05-22, etc. Al número de cada estudiante se le llama *número de muestreo*.

**Tabla 8.3**

| Estatura (in) | Frecuencias | Número de muestreo |
|---------------|-------------|--------------------|
| 60-62         | 5           | 00-04              |
| 63-65         | 18          | 05-22              |
| 66-68         | 42          | 23-64              |
| 69-71         | 27          | 65-91              |
| 72-74         | 8           | 92-99              |

Después, se extraen números de muestreo de una tabla de números aleatorios (apéndice IX). En el primer renglón se encuentra la secuencia 51, 77, 27, 46, 40, etc., la que será considerada como los números del muestreo aleatorios, cada uno de los cuales dará la estatura de determinado estudiante. Así, 51 corresponde a un estudiante cuya estatura está en el intervalo 66-68 in, estatura que se toma como 67 in (la marca de clase). De igual manera, 77, 27 y 46 dan las estaturas 70, 67 y 67 in, respectivamente.

Mediante este proceso se obtiene la tabla 8.4, en la que se muestra el número de muestreo extraído, la estatura correspondiente y la estatura promedio de cada una de las 30 muestras. Es necesario decir que aunque se han tomado los números aleatorios del primer renglón de la tabla, igualmente podría haberse partido de cualquier otro lugar de la tabla y elegir cualquier otro patrón específico.

- b) En la tabla 8.5 se da la distribución de frecuencias de las medias muestrales de las estaturas obtenidas en el inciso a). Ésta es una *distribución muestral de las medias*. La media y la desviación estándar se obtienen, como de costumbre, empleando un método de compilación de los capítulos 3 y 4:

$$\text{Media} = A + c\bar{u} = A + \frac{c \sum fu}{N} = 67.00 + \frac{(0.75)(23)}{30} = 67.58 \text{ in}$$

$$\text{Desviación estándar} = c\sqrt{\bar{u}^2 - \bar{u}^2} = c\sqrt{\frac{\sum fu^2}{N} - \left(\frac{\sum fu}{N}\right)^2} = 0.75\sqrt{\frac{123}{30} - \left(\frac{23}{30}\right)^2} = 1.41 \text{ in}$$

- c) La media teórica de la distribución muestral de las medias, dada por  $\mu_{\bar{X}}$ , debe ser igual a la media poblacional  $\mu$ , que es 67.45 in (ver problema 3.22), lo que coincide con el valor 67.58 del inciso b).

La desviación estándar teórica (error estándar) de la distribución muestral de las medias, dada por  $\sigma_{\bar{X}}$ , debe ser igual a  $\sigma/\sqrt{N}$ , donde la desviación estándar poblacional es  $\sigma = 2.92$  in (ver problema 4.17) y el tamaño de la muestra es  $N = 4$ . Como  $\sigma/\sqrt{N} = 2.92/\sqrt{4} = 1.46$  in, esto coincide con el valor 1.41 in del inciso b). Las ligeras discrepancias resultan de que sólo se tomaron 30 muestras y de que el tamaño de la muestra es pequeño.

Tabla 8.4

| Números muestrales extraídos | Estaturas correspondientes | Estatura media | Números muestrales extraídos | Estaturas correspondientes | Estatura media |
|------------------------------|----------------------------|----------------|------------------------------|----------------------------|----------------|
| 1. 51, 77, 27, 46            | 67, 70, 67, 67             | 67.75          | 16. 11, 64, 55, 58           | 64, 67, 67, 67             | 66.25          |
| 2. 40, 42, 33, 12            | 67, 67, 67, 64             | 66.25          | 17. 70, 56, 97, 43           | 70, 67, 73, 67             | 69.25          |
| 3. 90, 44, 46, 62            | 70, 67, 67, 67             | 67.75          | 18. 74, 28, 93, 50           | 70, 67, 73, 67             | 69.25          |
| 4. 16, 28, 98, 93            | 64, 67, 73, 73             | 69.25          | 19. 79, 42, 71, 30           | 70, 67, 70, 67             | 68.50          |
| 5. 58, 20, 41, 86            | 67, 64, 67, 70             | 67.00          | 20. 58, 60, 21, 33           | 67, 67, 64, 67             | 66.25          |
| 6. 19, 64, 08, 70            | 64, 67, 64, 70             | 66.25          | 21. 75, 79, 74, 54           | 70, 70, 70, 67             | 69.25          |
| 7. 56, 24, 03, 32            | 67, 67, 61, 67             | 65.50          | 22. 06, 31, 04, 18           | 64, 67, 61, 64             | 64.00          |
| 8. 34, 91, 83, 58            | 67, 70, 70, 67             | 68.50          | 23. 67, 07, 12, 97           | 70, 64, 64, 73             | 67.75          |
| 9. 70, 65, 68, 21            | 70, 70, 70, 64             | 68.50          | 24. 31, 71, 69, 88           | 67, 70, 70, 70             | 69.25          |
| 10. 96, 02, 13, 87           | 73, 61, 64, 70             | 67.00          | 25. 11, 64, 21, 87           | 64, 67, 64, 70             | 66.25          |
| 11. 76, 10, 51, 08           | 70, 64, 67, 64             | 66.25          | 26. 03, 58, 57, 93           | 61, 67, 67, 73             | 67.00          |
| 12. 63, 97, 45, 39           | 67, 73, 67, 67             | 68.50          | 27. 53, 81, 93, 88           | 67, 70, 73, 70             | 70.00          |
| 13. 05, 81, 45, 93           | 64, 70, 67, 73             | 68.50          | 28. 23, 22, 96, 79           | 67, 64, 73, 70             | 68.50          |
| 14. 96, 01, 73, 52           | 73, 61, 70, 67             | 67.75          | 29. 98, 56, 59, 36           | 73, 67, 67, 67             | 68.50          |
| 15. 07, 82, 54, 24           | 64, 70, 67, 67             | 67.00          | 30. 08, 15, 08, 84           | 64, 64, 64, 70             | 65.50          |

Tabla 8.5

| Media muestral | Cuenta | f                 | u  | fu             | fu <sup>2</sup>   |
|----------------|--------|-------------------|----|----------------|-------------------|
| 64.00          | /      | 1                 | -4 | -4             | 16                |
| 64.75          |        | 0                 | -3 | 0              | 0                 |
| 65.50          | //     | 2                 | -2 | -4             | 8                 |
| 66.25          | ////   | 6                 | -1 | -6             | 6                 |
| A → 67.00      | ///    | 4                 | 0  | 0              | 0                 |
| 67.75          | ///    | 4                 | 1  | 4              | 4                 |
| 68.50          | /////  | 7                 | 2  | 14             | 28                |
| 69.25          | ///    | 5                 | 3  | 15             | 45                |
| 70.00          | /      | 1                 | 4  | 4              | 16                |
|                |        | $\sum f = N = 30$ |    | $\sum fu = 23$ | $\sum fu^2 = 123$ |

## DISTRIBUCIÓN MUESTRAL DE PROPORCIONES

- 8.7 Encontrar la probabilidad de que en 120 lanzamientos de una moneda: a) menos del 40% o más del 60% sean cara y b)  $\frac{5}{8}$  o más sean cara.

### SOLUCIÓN

#### Primer método

Los 120 lanzamientos de la moneda se consideran una muestra de la población infinita de todos los posibles lanzamientos de una moneda. En esta población la probabilidad de obtener cara es  $p = \frac{1}{2}$  y la probabilidad de obtener cruz es  $q = 1 - p = \frac{1}{2}$ .

- a) La probabilidad que se busca es que en 120 lanzamientos, la cantidad de caras sea menor a 48 o mayor a 72. Se procederá, como en el capítulo 7, empleando la aproximación normal a la binomial. Como el número de caras es una variable discreta, se busca la probabilidad de que el número de caras sea menor a 47.5 o mayor a 72.5.

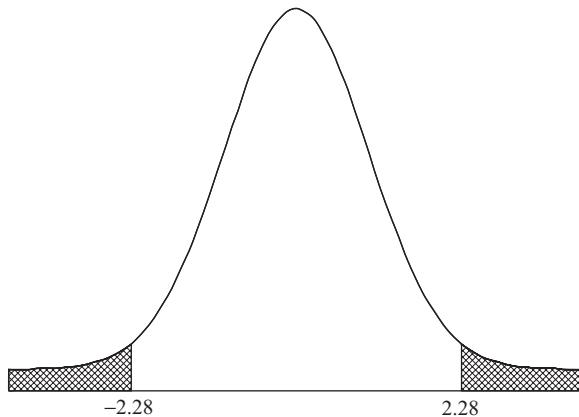
$$\mu = \text{número esperado de caras} = Np = 120\left(\frac{1}{2}\right) = 60 \quad \text{y} \quad \sigma = \sqrt{Npq} = \sqrt{(120)\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)} = 5.48$$

$$47.5 \text{ en unidades estándar} = \frac{47.5 - 60}{5.48} = -2.28$$

$$72.5 \text{ en unidades estándar} = \frac{72.5 - 60}{5.48} = 2.28$$

Como se muestra en la figura 8-4,

$$\begin{aligned} \text{Probabilidad buscada} &= (\text{área a la izquierda de } -2.28 \text{ más área a la derecha de } 2.28) \\ &= (2(0.0113)) = 0.0226 \end{aligned}$$



**Figura 8-4** En la aproximación normal a la binomial se usa la curva normal estándar.

### Segundo método

$$\mu_P = p = \frac{1}{2} = 0.50 \quad \sigma_P = \sqrt{\frac{pq}{N}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)}{120}} = 0.0456$$

$$40\% \text{ en unidades estándar} = \frac{0.40 - 0.50}{0.0456} = -2.19$$

$$60\% \text{ en unidades estándar} = \frac{0.60 - 0.50}{0.0456} = 2.19$$

$$\begin{aligned} \text{Probabilidad buscada} &= (\text{área a la izquierda de } -2.19 \text{ más área a la derecha de } 2.19) \\ &= (2(0.0143)) = 0.0286 \end{aligned}$$

Aunque este resultado es exacto a dos cifras significativas, no hay una coincidencia exacta debido a que no se usó el hecho de que una proporción es en realidad una variable discreta. Para tomar en cuenta esto, a 0.40 se le resta

$1/2N = 1/2(120)$  y a 0.60 se le suma  $1/2N = 1/2(120)$ ; como  $1/240 = 0.00417$ , las proporciones buscadas son, en unidades estándar,

$$\frac{0.40 - 0.00417 - 0.50}{0.0456} = -2.28 \quad \text{y} \quad \frac{0.60 + 0.00417 - 0.50}{0.0456} = 2.28$$

con lo que se obtiene coincidencia con el primer método.

Obsérvese que  $(0.40 - 0.00417)$  y  $(0.60 + 0.00417)$  corresponden a las proporciones  $47.5/120$  y  $72.5/120$  usadas en el primer método.

- b) Usando el segundo método del inciso a) se encuentra que como  $\frac{s}{\sigma} = 0.6250$ ,

$$(0.6250 - 0.00417) \text{ en unidades estándar} = \frac{0.6250 - 0.00417 - 0.50}{0.0456} = 2.65$$

$$\begin{aligned}\text{Probabilidad buscada} &= (\text{área bajo la curva normal a la derecha de } z = 2.65) \\ &= (\text{área a la derecha de } z = 0) - (\text{área entre } z = 0 \text{ y } z = 2.65) \\ &= 0.5 - 0.4960 = 0.0040\end{aligned}$$

- 8.8** Cada una de las 500 personas de un grupo lanza una moneda 120 veces. ¿Cuántas personas pueden esperar: a) que entre el 40% y el 60% de sus lanzamientos sean cara y b) en  $\frac{5}{8}$ , o más, de sus lanzamientos obtener cara?

### SOLUCIÓN

Este problema está estrechamente relacionado con el problema 8.7. Aquí se consideran 500 muestras, cada una de tamaño 120, tomadas de la población infinita de todos los posibles lanzamientos de una moneda.

- a) En el inciso a) del problema 8.7 se establece que de todas las muestras posibles, cada una consistente en 120 lanzamientos de una moneda, se puede esperar que en el 97.74% de las mismas se tenga entre 40% y 60% de caras. Entonces, en 500 muestras se puede esperar que aproximadamente  $(97.74\% \text{ de } 500) = 489$  muestras tengan esta propiedad. Se concluye que alrededor de 489 personas pueden esperar que en su experimento entre 40% y 60% sean caras.

Es interesante observar que hay  $500 - 489 = 11$  personas para las que se espera que el porcentaje de caras que obtengan no esté entre el 40% y el 60%. Estas personas pueden concluir, con razón, que su moneda esté cargada. Este tipo de error es un *riesgo* siempre presente cuando se trata con probabilidad.

- b) Razonando como en el inciso a) se concluye que aproximadamente  $(500)(0.0040) = 2$  personas obtendrán caras en  $\frac{5}{8}$ , o más, de sus lanzamientos.

- 8.9** Se encuentra que el 2% de las herramientas producidas con determinada máquina están defectuosas. ¿Cuál es la probabilidad de que en un pedido de 400 de estas herramientas: a) 3% o más y b) 2% o menos resulten defectuosas?

### SOLUCIÓN

$$\mu_P = p = 0.02 \quad \text{y} \quad \sigma_P = \sqrt{\frac{pq}{N}} = \sqrt{\frac{(0.02)(0.98)}{400}} = \frac{0.14}{20} = 0.007$$

- a) **Primer método**

Empleando la corrección para variables discretas,  $1/2N = 1/800 = 0.00125$ , se tiene

$$(0.03 - 0.00125) \text{ en unidades estándar} = \frac{0.03 - 0.00125 - 0.02}{0.007} = 1.25$$

Probabilidad buscada = (área bajo la curva normal a la derecha de  $z = 1.25$ ) = 0.1056

Si no se usa la corrección, se obtiene 0.0764.

**Otro método**

(3% de 400) = 12 herramientas defectuosas. Considerando la variable como una variable continua, 12 o más herramientas significa 11.5 o más.

$$\bar{X} = (2\% \text{ de } 400) = 8 \quad \text{y} \quad \sigma = \sqrt{Npq} = \sqrt{(400)(0.02)(0.98)} = 2.8$$

Entonces, 11.5 en unidades estándar =  $(11.5 - 8)/2.8 = 1.25$ , y como se encontró antes, la probabilidad buscada es 0.1056.

$$b) \quad (0.02 + 0.00125) \text{ en unidades estándar} = \frac{0.02 + 0.00125 - 0.02}{0.007} = 0.18$$

$$\begin{aligned} \text{Probabilidad buscada} &= (\text{área bajo la curva normal a la izquierda de } z = 0.18) \\ &= 0.5000 + 0.0714 = 0.5714 \end{aligned}$$

Si no se usa la corrección, se obtiene 0.5000. También se puede usar el segundo método del inciso a).

- 8.10** Como resultado de una elección se observa que determinado candidato obtuvo 46% de los votos. Determinar la probabilidad de que en una encuesta realizada a: a) 200 y b) 1 000 personas elegidas al azar de la población de votantes se hubiera obtenido una mayoría de votos a favor de este candidato.

**SOLUCIÓN**

$$a) \quad \mu_p = p = 0.46 \quad \text{y} \quad \sigma_p = \sqrt{\frac{pq}{N}} = \sqrt{\frac{(0.46)(0.54)}{200}} = 0.0352$$

Como  $1/2N = 1/400 = 0.0025$ , se tiene una mayoría en la muestra si la proporción a favor de este candidato es  $0.50 + 0.0025 = 0.5025$  o más. (Esta proporción puede obtenerse también observando que una mayoría es 101 o más, pero considerada como variable continua esto corresponde a 100.5, con lo que la proporción es  $100.5/200 = 0.5025$ .)

$$0.5025 \text{ en unidades estándar} = \frac{0.5025 - 0.46}{0.0352} = 1.21$$

$$\begin{aligned} \text{Probabilidad buscada} &= (\text{área bajo la curva normal a la derecha de } z = 1.21) \\ &= 0.5000 - 0.3869 = 0.1131 \end{aligned}$$

$$b) \quad \mu_p = p = 0.46 \quad \text{y} \quad \sigma_p = \sqrt{\frac{pq}{N}} = \sqrt{\frac{(0.46)(0.54)}{1\,000}} = 0.0158$$

$$0.5025 \text{ en unidades estándar} = \frac{0.5025 - 0.46}{0.0158} = 2.69$$

$$\begin{aligned} \text{Probabilidad buscada} &= (\text{área bajo la curva normal a la derecha de } z = 2.69) \\ &= 0.5000 - 0.4964 = 0.0036 \end{aligned}$$

**DISTRIBUCIÓN MUESTRAL DE DIFERENCIAS Y DE SUMAS**

- 8.11** Sea  $U_1$  una variable que representa los elementos de la población 3, 7, 8 y  $U_2$  una variable que representa los elementos de la población 2, 4. Calcular: a)  $\mu_{U1}$ , b)  $\mu_{U2}$ , c)  $\mu_{U1-U2}$ , d)  $\sigma_{U1}$ , e)  $\sigma_{U2}$  y f)  $\sigma_{U1-U2}$ .

**SOLUCIÓN**

$$a) \quad \mu_{U1} = \text{media de la población } U_1 = \frac{1}{3}(3 + 7 + 8) = 6$$

$$b) \quad \mu_{U2} = \text{media de la población } U_2 = \frac{1}{2}(2 + 4) = 3$$

c) Esta población consta de todas las diferencias entre los miembros de  $U_1$  y  $U_2$ , que es

$$\begin{array}{ccccccc} 3 - 2 & 7 - 2 & 8 - 2 & \text{o} & 1 & 5 & 6 \\ 3 - 4 & 7 - 4 & 8 - 4 & & -1 & 3 & 4 \end{array}$$

Por lo tanto,  $\mu_{U_1-U_2} = \text{media de } (U_1 - U_2) = \frac{1 + 5 + 6 + (-1) + 3 + 4}{6} = 3$

Esto ilustra que  $\mu_{U_1-U_2} = \mu_{U_1} - \mu_{U_2}$ , como se ve en los incisos a) y b).

d)  $\sigma_{U_1}^2 = \text{varianza de la población } U_1 = \frac{(3-6)^2 + (7-6)^2 + (8-6)^2}{3} = \frac{14}{3}$

o bien  $\sigma_{U_1} = \sqrt{\frac{14}{3}}$

e)  $\sigma_{U_2}^2 = \text{varianza de la población } U_2 = \frac{(2-3)^2 + (4-3)^2}{2} = 1 \quad \text{o bien} \quad \sigma_{U_2} = 1$

f)  $\sigma_{U_1-U_2}^2 = \text{varianza de la población } (U_1 - U_2)$   
 $= \frac{(1-3)^2 + (5-3)^2 + (6-3)^2 + (-1-3)^2 + (3-3)^2 + (4-3)^2}{6} = \frac{17}{3}$

o  $\sigma_{U_1-U_2} = \sqrt{\frac{17}{3}}$

Esto ilustra que para muestras independientes  $\sigma_{U_1-U_2} = \sqrt{\sigma_{U_1}^2 + \sigma_{U_2}^2}$ , como se ve en los incisos d) y e).

- 8.12 El tiempo medio de vida de los focos del fabricante A es 1 400 horas (h) y su desviación estándar es 200 h, en tanto que el tiempo medio de vida de los focos del fabricante B es 1 200 h y su desviación estándar es 100 h. Si se prueban muestras aleatorias de 125 focos de cada fabricante, ¿cuál es la probabilidad de que el tiempo medio de vida de los focos del fabricante A sea por lo menos: a) 160 h y b) 250 h mayor que el del fabricante B?

### SOLUCIÓN

Sean  $\bar{X}_A$  y  $\bar{X}_B$  los tiempos medios de vida en las muestras de A y de B, respectivamente. Entonces

$$\mu_{\bar{X}_A - \bar{X}_B} = \mu_{\bar{X}_A} - \mu_{\bar{X}_B} = 1400 - 1200 = 200 \text{ h}$$

y  $\sigma_{\bar{X}_A - \bar{X}_B} = \sqrt{\frac{\sigma_A^2}{N_A} + \frac{\sigma_B^2}{N_B}} = \sqrt{\frac{(100)^2}{125} + \frac{(200)^2}{125}} = 20 \text{ h}$

La variable estandarizada que corresponde a la diferencia entre las medias es

$$z = \frac{(\bar{X}_A - \bar{X}_B) - (\mu_{\bar{X}_A - \bar{X}_B})}{\sigma_{\bar{X}_A - \bar{X}_B}} = \frac{(\bar{X}_A - \bar{X}_B) - 200}{20}$$

que está distribuida casi normalmente.

- a) La diferencia de 160 h en unidades estándar es  $(160 - 200)/20 = -2$ . Por lo tanto

$$\begin{aligned} \text{Probabilidad buscada} &= (\text{área bajo la curva normal a la derecha de } z = -2) \\ &= 0.5000 + 0.4772 = 0.9772 \end{aligned}$$

- b) La diferencia de 250 h en unidades estándar es  $(250 - 200)/20 = 2.50$ . Por lo tanto

$$\begin{aligned} \text{Probabilidad buscada} &= (\text{área bajo la curva normal a la derecha de } z = 2.50) \\ &= 0.5000 - 0.4938 = 0.0062 \end{aligned}$$

- 8.13** Los balines de determinada marca tienen un peso promedio de 0.50 g y su desviación estándar es 0.02 g. ¿Cuál es la probabilidad de que entre dos lotes, cada uno de 1 000 balines, haya una diferencia de peso de más de 2 g?

### SOLUCIÓN

Sean  $\bar{X}_1$  y  $\bar{X}_2$  las medias de los pesos de los dos lotes. Entonces

$$\mu_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \mu_{\bar{X}_1} - \mu_{\bar{X}_2} = 0.50 - 0.50 = 0$$

$$\text{y } \sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}} = \sqrt{\frac{(0.02)^2}{1\,000} + \frac{(0.02)^2}{1\,000}} = 0.000895$$

La variable estandarizada correspondiente a la diferencia entre las medias es

$$z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - 0}{0.000895}$$

que está distribuida en forma aproximadamente normal.

Una diferencia de 2 g entre los lotes es equivalente a una diferencia de  $2/1\,000 = 0.002$  g entre las medias. Esto puede ocurrir si  $\bar{X}_1 - \bar{X}_2 \geq 0.002$  o si  $\bar{X}_1 - \bar{X}_2 \leq -0.002$ ; es decir,

$$z \geq \frac{0.002 - 0}{0.000895} = 2.23 \quad \text{o} \quad z \leq \frac{-0.002 - 0}{0.000895} = -2.23$$

Entonces  $\Pr\{z \geq 2.23 \text{ o } z \leq -2.23\} = \Pr\{z \geq 2.23\} + \Pr\{z \leq -2.23\} = 2(0.5000 - 0.4871) = 0.0258$ .

- 8.14** A y B juegan un partido que consiste en que cada uno lanza 50 monedas. A gana el partido si obtiene 5 o más caras que B; si no, B lo gana. Determinar las posibilidades en contra de que A gane un juego.

### SOLUCIÓN

Sean  $P_A$  y  $P_B$  las proporciones de caras obtenidas por A y por B, respectivamente. Si se supone que las monedas no están cargadas, la probabilidad  $p$  de obtener una cara es  $\frac{1}{2}$ . Entonces

$$\mu_{P_A - P_B} = \mu_{P_A} - \mu_{P_B} = 0$$

y

$$\sigma_{P_A - P_B} = \sqrt{\sigma_{P_A}^2 + \sigma_{P_B}^2} = \sqrt{\frac{pq}{N_A} + \frac{pq}{N_B}} = \sqrt{\frac{2(\frac{1}{2})(\frac{1}{2})}{50}} = 0.10$$

La variable estandarizada correspondiente a esta diferencia entre las proporciones es  $z = (P_A - P_B - 0)/0.10$ .

Considerando la variable como variable continua, 5 o más caras corresponde a 4.5 o más caras, de manera que la diferencia entre las proporciones debe ser de  $4.5/50 = 0.09$  o más; es decir,  $z$  es mayor o igual a  $(0.09 - 0)/0.10 = 0.9$  (o bien  $z \geq 0.9$ ). La probabilidad de esto es el área bajo la curva normal a la derecha de  $z = 0.9$ , la cual es  $(0.5000 - 0.3159) = 0.1841$ .

De manera que las posibilidades en contra de que A gane son  $(1 - 0.1841):0.1841 = 0.8159:0.1841$ , o 4.43 a 1.

- 8.15** Dos distancias se miden como 27.3 centímetros (cm) y 15.6 cm con desviaciones estándar (errores estándar) de 0.16 y 0.08 cm, respectivamente. Determinar la media y la desviación estándar de: a) la suma y b) la diferencia de estas distancias.

### SOLUCIÓN

Si las distancias se denotan  $D_1$  y  $D_2$ , entonces:

a)  $\mu_{D_1+D_2} = \mu_{D_1} + \mu_{D_2} = 27.3 + 15.6 = 42.9 \text{ cm}$

$$\sigma_{D_1+D_2} = \sqrt{\sigma_{D_1}^2 + \sigma_{D_2}^2} = \sqrt{(0.16)^2 + (0.08)^2} = 0.18 \text{ cm}$$

b)  $\mu_{D_1-D_2} = \mu_{D_1} - \mu_{D_2} = 27.3 - 15.6 = 11.7 \text{ cm}$

$$\sigma_{D_1-D_2} = \sqrt{\sigma_{D_1}^2 + \sigma_{D_2}^2} = \sqrt{(0.16)^2 + (0.08)^2} = 0.18 \text{ cm}$$

- 8.16** La media del tiempo de vida de determinado tipo de foco es 1 500 h y la desviación estándar es 150 h. Se conectan tres de estos focos de manera que cuando uno se funda, otro empieza a funcionar. Suponiendo que los tiempos de vida estén distribuidos normalmente, ¿cuál es la probabilidad de que la iluminación dure: a) por lo menos 5 000 h y b) a lo mucho 4 200 h?

### SOLUCIÓN

Suponga que los tiempos de vida son  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ . Entonces

$$\mu_{L1+L2+L3} = \mu_{L1} + \mu_{L2} + \mu_{L3} = 1\,500 + 1\,500 + 1\,500 = 4\,500 \text{ h}$$

$$\sigma_{L1+L2+L3} = \sqrt{\sigma_{L1}^2 + \sigma_{L2}^2 + \sigma_{L3}^2} = \sqrt{3(150)^2} = 260 \text{ h}$$

$$a) \quad 50\,000 \text{ h en unidades estándar} = \frac{5\,000 - 4\,500}{260} = 1.92$$

$$\begin{aligned} \text{Probabilidad buscada} &= (\text{área bajo la curva normal a la derecha de } z = 1.92) \\ &= 0.5000 - 0.4726 = 0.0274 \end{aligned}$$

$$b) \quad 4\,200 \text{ h en unidades estándar} = \frac{4\,200 - 4\,500}{260} = -1.15$$

$$\begin{aligned} \text{Probabilidad buscada} &= (\text{área bajo la curva normal a la izquierda de } z = -1.15) \\ &= 0.5000 - 0.3749 = 0.1251 \end{aligned}$$

## DEMOSTRACIONES DE LA TEORÍA ELEMENTAL DEL MUESTREO EMPLEANDO SOFTWARE

- 8.17** En una universidad, 1/3 de los estudiantes toma 9 horas de crédito, 1/3 toma 12 horas de crédito y 1/3 toma 15 horas de crédito. Si  $X$  representa las horas de crédito que toma un estudiante, la distribución de  $X$  es  $p(x) = 1/3$  para  $x = 9, 12$  y  $15$ . Encontrar la media y la varianza de  $X$ . ¿Qué tipo de distribución tiene  $X$ ?

### SOLUCIÓN

La media de  $X$  es  $\mu = \sum xp(x) = 9(1/3) + 12(1/3) + 15(1/3) = 12$ . La varianza de  $X$  es  $\sigma^2 = \sum x^2 p(x) - \mu^2 = 81(1/3) + 144(1/3) + 225(1/3) - 144 = 150 - 144 = 6$ . La distribución de  $X$  es uniforme.

- 8.18** Enumerar todas las muestras de tamaño  $n = 2$  que pueden tomarse (con reposición) de la población del problema 8.17. Usar el asistente para gráficos de EXCEL para graficar la distribución muestral de la media y mostrar que  $\mu_{\bar{x}} = \mu$  y que  $\sigma_{\bar{x}}^2 = \sigma^2/2$ .

### SOLUCIÓN

| A  | B  | C     | D       | E          | F                    | G   |
|----|----|-------|---------|------------|----------------------|---|
|    |    | media | x barra | p(x barra) | x barra × p(x barra) | $x \text{ barra}^2 \times p(x \text{ barra})$ |
| 9  | 9  | 9     | 9       | 0.111111   | 1                    | 9   |
| 9  | 12 | 10.5  | 10.5    | 0.222222   | 2.333333333          | 24.5  |
| 9  | 15 | 12    | 12      | 0.333333   | 4                    | 48  |
| 12 | 9  | 10.5  | 13.5    | 0.222222   | 3                    | 40.5  |
| 12 | 12 | 12    | 15      | 0.111111   | 1.666666667          | 25  |
| 12 | 15 | 13.5  |         |            | 12                   | 147   |
| 15 | 9  | 12    |         |            |                      |   |
| 15 | 12 | 13.5  |         |            |                      |   |
| 15 | 15 | 15    |         |            |                      |   |

La hoja de cálculo de EXCEL muestra en A y en B los valores muestrales posibles y en C las medias. La distribución muestral de  $x$  barra se construye y se da en D y E. En C2 se ingresa la función =AVERAGE(A2:B2), se hace clic y se arrastra de C2 a C10. Como la población es uniforme, cada muestra tiene probabilidad 1/9 de ser elegida. La media muestral se representa por  $\bar{x}$  barra. La media de las medias muestrales es  $\mu_{\bar{x}} = \sum \bar{x} p(\bar{x})$  y se calcula de F2 a F6. La función =SUM(F2:F6) se ingresa en F7 y se obtiene 12, mostrando que  $\mu_{\bar{x}} = \mu$ . La varianza de las medias muestrales es  $\sigma_{\bar{x}}^2 = \sum \bar{x}^2 p(\bar{x}) - \mu_{\bar{x}}^2$  y se calcula como sigue. De G2 a G6 se calcula  $\sum \bar{x}^2 p(\bar{x})$ . En G7 se ingresa la función =SUM(G2:G6), que es igual a 147. Restando 12<sup>2</sup> o bien 144 de 147, se obtiene 3, que es  $\sigma_{\bar{x}}^2 = \sigma^2/2$ . En la figura 8-5 se muestra que con un tamaño de muestra 2, la distribución muestral de  $\bar{x}$  es un poco parecida a una distribución normal. Las probabilidades mayores se encuentran cerca de 12 y éstas disminuyen hacia la derecha y hacia la izquierda de 12.

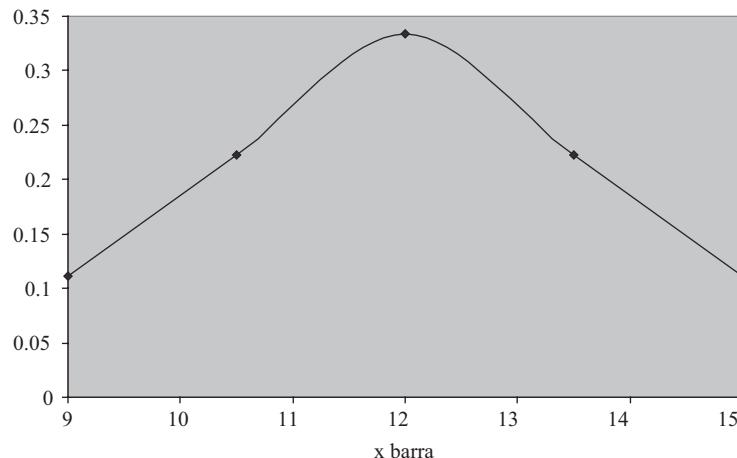


Figura 8-5 Distribución de  $x$  barra para  $n = 2$ .

- 8.19** Enlistar todas las muestras de tamaño  $n = 3$  que se pueden obtener con reposición de la población del problema 8.17. Usar EXCEL para construir la distribución muestral de la media. Para graficar la distribución muestral de la media se usa el asistente para gráficos de EXCEL. Mostrar que  $\mu_{\bar{x}} = \mu$  y que  $\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma^2}{3}$ .

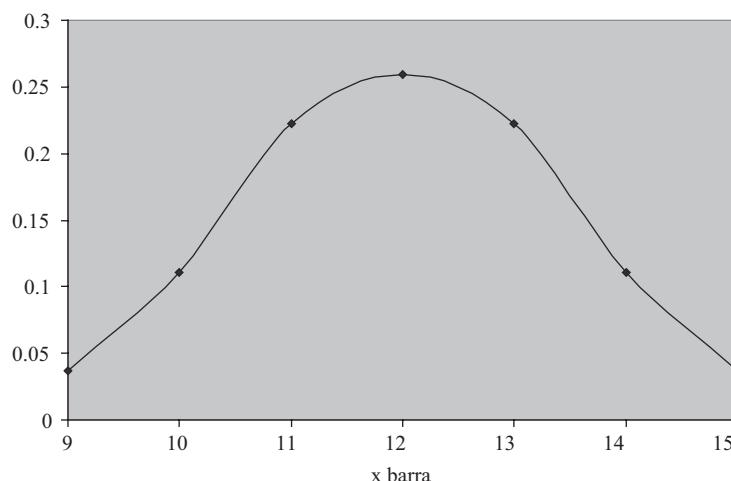
### SOLUCIÓN

| A  | B  | C  | D     | E       | F           | G                  | H                   |
|----|----|----|-------|---------|-------------|--------------------|---------------------|
|    |    |    | media | x barra | p(x barra)  | x barra*p(x barra) | x barra^2p(x barra) |
| 9  | 9  | 9  | 9     | 9       | 0.037037037 | 0.333333333        | 3                   |
| 9  | 9  | 12 | 10    | 10      | 0.111111111 | 1.111111111        | 11.11111111         |
| 9  | 9  | 15 | 11    | 11      | 0.222222222 | 2.444444444        | 26.888888889        |
| 9  | 12 | 9  | 10    | 12      | 0.259259259 | 3.111111111        | 37.333333333        |
| 9  | 12 | 12 | 11    | 13      | 0.222222222 | 2.888888889        | 37.555555556        |
| 9  | 12 | 15 | 12    | 14      | 0.111111111 | 1.555555556        | 21.777777778        |
| 9  | 15 | 9  | 11    | 15      | 0.037037037 | 0.555555556        | 8.333333333         |
| 9  | 15 | 12 | 12    |         |             | 12                 | 146                 |
| 9  | 15 | 15 | 13    |         |             |                    |                     |
| 12 | 9  | 9  | 10    |         |             |                    |                     |

Continuación

| A  | B  | C  | D<br>media | E<br>x barra | F<br>p(x barra) | G<br>x barra*p(x barra) | H<br>x barra^2p(x barra) |
|----|----|----|------------|--------------|-----------------|-------------------------|--------------------------|
| 12 | 9  | 12 | 11         |              |                 |                         |                          |
| 12 | 9  | 15 | 12         |              |                 |                         |                          |
| 12 | 12 | 9  | 11         |              |                 |                         |                          |
| 12 | 12 | 12 | 12         |              |                 |                         |                          |
| 12 | 12 | 15 | 13         |              |                 |                         |                          |
| 12 | 15 | 9  | 12         |              |                 |                         |                          |
| 12 | 15 | 12 | 13         |              |                 |                         |                          |
| 12 | 15 | 15 | 14         |              |                 |                         |                          |
| 15 | 9  | 9  | 11         |              |                 |                         |                          |
| 15 | 9  | 12 | 12         |              |                 |                         |                          |
| 15 | 9  | 15 | 13         |              |                 |                         |                          |
| 15 | 12 | 9  | 12         |              |                 |                         |                          |
| 15 | 12 | 12 | 13         |              |                 |                         |                          |
| 15 | 12 | 15 | 14         |              |                 |                         |                          |
| 15 | 15 | 9  | 13         |              |                 |                         |                          |
| 15 | 15 | 12 | 14         |              |                 |                         |                          |
| 15 | 15 | 15 | 15         |              |                 |                         |                          |

En la hoja de cálculo de EXCEL se muestran en A, B y C todos los valores muestrales, las medias se dan en D y la distribución muestral de  $x$  barra se calcula y se da en E y F. En D2 se ingresa la función =AVERAGE(A2:C2), se hace clic y se arrastra desde D2 hasta D28. Como esta población es uniforme, cada muestra tiene la probabilidad 1/27 de ser elegida. La media muestral se representa por  $x$  barra. La media de las medias muestrales es  $\mu_{\bar{x}} = \sum \bar{x} p(\bar{x})$  y se calcula desde G2 hasta G8. La función =SUM(G2:G8) se ingresa en G9 y da como resultado 12, lo que demuestra que con muestras de tamaño  $n = 3$   $\mu_{\bar{x}} = \mu$ . La varianza de las medias muestrales es  $\sigma_{\bar{x}}^2 = \sum \bar{x}^2 p(\bar{x}) - \mu_{\bar{x}}^2$  y se calcula como sigue. Desde H2 hasta H8 se calcula  $\sum \bar{x}^2 p(\bar{x})$ . En H9 se ingresa la función =SUM(H2:H8), que da como resultado 146. Restando  $12^2$ , que es 144, de 146, se obtiene 2. Obsérvese que  $\sigma_{\bar{x}}^2 = \sigma^2 / 3$ . En la figura 8-6 se observa la tendencia de la distribución  $x$  barra a una distribución normal.

Figura 8-6 Distribución de  $x$  barra para  $n = 3$ .

- 8.20** Enlistar las 81 muestras de tamaño  $n = 4$  (con reposición) que se pueden obtener de la población del problema 8.17. Usar EXCEL para construir la distribución muestral de las medias. Con el asistente para gráficos de EXCEL, graficar la distribución muestral de las medias, y mostrar que  $\mu_{\bar{x}} = \mu$  y que  $\sigma_{\bar{x}}^2 = \sigma^2/4$ .

### SOLUCIÓN

El método empleado en los problemas 8.18 y 8.19 se extiende a muestras de tamaño 4. En la hoja de cálculo de EXCEL se obtiene la siguiente distribución para  $x$  barra. Además, se puede demostrar que  $\mu_{\bar{x}} = \mu$  y que  $\sigma_{\bar{x}}^2 = \sigma^2/4$ .

| x barra | p(x barra)  | x barra*p(x barra) | x barra^2p(x barra) |
|---------|-------------|--------------------|---------------------|
| 9       | 0.012345679 | 0.111111111        | 1                   |
| 9.75    | 0.049382716 | 0.481481481        | 4.694444444         |
| 10.5    | 0.12345679  | 1.296296296        | 13.61111111         |
| 11.25   | 0.197530864 | 2.222222222        | 25                  |
| 12      | 0.234567901 | 2.814814815        | 33.777777778        |
| 12.75   | 0.197530864 | 2.518518519        | 32.11111111         |
| 13.5    | 0.12345679  | 1.666666667        | 22.5                |
| 14.25   | 0.049382716 | 0.703703704        | 10.027777778        |
| 15      | 0.012345679 | 0.185185185        | 2.777777778         |
|         | 1           | 12                 | 145.5               |

En la figura 8-7 se muestra la gráfica de EXCEL de la distribución de  $x$  barra para muestras de tamaño 4.

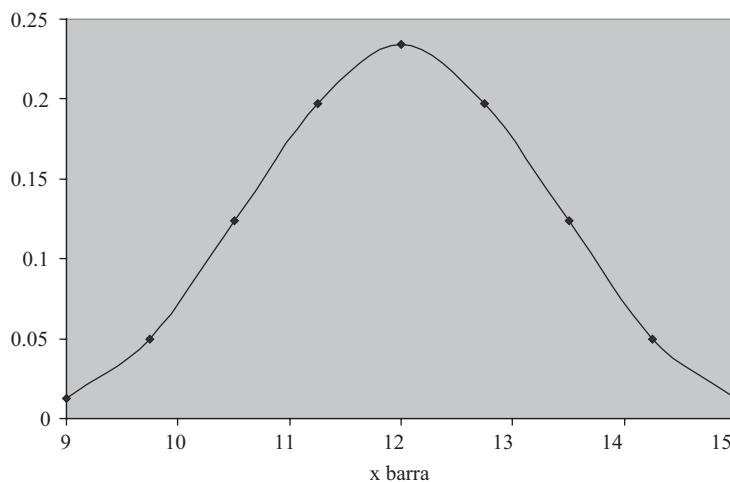


Figura 8-7 Distribución de  $x$  barra para muestras de  $n = 4$ .

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### DISTRIBUCIÓN MUESTRAL DE LAS MEDIAS

- 8.21** Una población consta de los cuatro números 3, 7, 11 y 15. Considerar todas las posibles muestras con reposición de tamaño 2 que pueden obtenerse de esta población. Encontrar: *a)* la media poblacional, *b)* la desviación estándar poblacional,

c) la media de la distribución muestral de las medias y d) la desviación estándar de la distribución muestral de las medias. Verificar los incisos c) y d) directamente a partir de los incisos a) y b) empleando las fórmulas adecuadas.

- 8.22** Resolver el problema 8.21 si el muestreo se hace sin reposición.
- 8.23** Las masas de 1 500 balines están distribuidas de manera normal, siendo su media 22.40 g y su desviación estándar 0.048 g. Si de esta población se toman 300 muestras aleatorias de tamaño 36, determinar la media y la desviación estándar esperadas en la distribución muestral de las medias si el muestreo se hace: a) con reposición y b) sin reposición.
- 8.24** Resolver el problema 8.23 si la población consta de 72 balines.
- 8.25** ¿En cuántas de las muestras aleatorias del problema 8.23 la media: a) estará entre 22.39 y 22.41 g, b) será mayor a 22.42 g, c) será menor a 22.37 g y d) será menor a 22.38 g o mayor a 22.41 g?
- 8.26** La media de la vida útil de ciertos cinescopios fabricados por una empresa es 800 h y la desviación estándar es 60 h. Encontrar la probabilidad de que en una muestra aleatoria de 16 cinescopios la media del tiempo de vida: a) esté entre 790 y 810 h, b) sea menor a 785 h, c) sea mayor a 820 h y d) esté entre 770 y 830 h.
- 8.27** Repetir el problema 8.26 con una muestra aleatoria de 64 cinescopios. Explicar la diferencia.
- 8.28** Los paquetes que se reciben en una tienda departamental pesan en promedio 300 libras (lb) y su desviación estándar es de 50 lb. ¿Cuál es la probabilidad de que 25 paquetes recibidos al azar pesen más del límite de seguridad especificado en el elevador, que es 8 200 lb?

## NÚMEROS ALEATORIOS

- 8.29** Repetir el problema 8.6 usando un conjunto diferente de números aleatorios y seleccionando: a) 15, b) 30, c) 45 y d) 60 muestras, con reposición, de tamaño 4. En cada caso, comparar con los resultados teóricos.
- 8.30** Repetir el problema 8.29 tomando muestras de tamaño: a) 2 y b) 8 con reposición, en lugar de tamaño 4 con reposición.
- 8.31** Repetir el problema 8.6, pero muestreando sin reposición. Comparar con los resultados teóricos.
- 8.32** a) Mostrar cómo se toman 30 muestras de tamaño 2 de la distribución del problema 3.61.  
b) Calcular la media y la desviación estándar de la distribución muestral de las medias obtenida y compararla con los resultados teóricos.
- 8.33** Repetir el problema 8.32 empleando muestras de tamaño 4.

## DISTRIBUCIÓN MUESTRAL DE PROPORCIONES

- 8.34** Encontrar la probabilidad de que de los 200 próximos niños que nazcan, a) menos de 40% sean varones, b) entre 43 y 57% sean niñas y c) más de 54% sean varones. Supóngase que existe la misma probabilidad de nacimiento de un niño que de una niña.
- 8.35** De 1 000 muestras, cada una de 200 niños, ¿en cuántas puede esperarse encontrar que: a) menos del 40% sean niños, b) entre 40 y 60% sean niñas y c) 53% o más sean niñas?

- 8.36** Repetir el problema 8.34 si las muestras son de 100 y no de 200 niños y explicar las diferencias resultantes.
- 8.37** Una urna contiene 80 canicas, de las cuales el 60% son rojas y el 40% son blancas. De 50 muestras, cada una de 20 canicas, tomadas de la urna con reposición, ¿en cuántas muestras se puede esperar que: a) haya el mismo número de canicas rojas que de canicas blancas, b) haya 12 canicas rojas y 8 canicas blancas, c) haya 8 canicas rojas y 12 canicas blancas y d) 10 o más canicas sean blancas?
- 8.38** Diseñar un experimento que tenga por objeto ilustrar los resultados del problema 8.37. En lugar de canicas rojas y blancas se pueden usar tiras de papel en las que se escriba R y B en las proporciones adecuadas. ¿Qué error se introduciría al usar dos conjuntos diferentes de monedas?
- 8.39** Un fabricante envía 1 000 lotes, cada uno de 100 bulbos eléctricos. Si es normal que el 5% de los bulbos esté defectuoso, ¿en cuántos de los lotes se esperaría: a) menos de 90 bulbos buenos y b) 98 o más bulbos buenos?

#### DISTRIBUCIONES MUESTRALES DE DIFERENCIA Y DE SUMAS

- 8.40** A y B fabrican cables que tienen una resistencia media a la ruptura de 4 000 lb y 4 500 lb, y desviaciones estándar de 300 lb y 200 lb, respectivamente. Si se prueban 100 cables del fabricante A y 50 cables del fabricante B, ¿cuál es la probabilidad de que la resistencia media a la ruptura de B sea: a) por lo menos 600 lb mayor que la de A y b) por lo menos 450 lb mayor que la de A?
- 8.41** En el problema 8.40, ¿cuáles son las probabilidades si se prueban 100 cables de cada fabricante? Explicar cualquier diferencia.
- 8.42** La puntuación media obtenida por los estudiantes en una prueba de aptitud es 72 puntos y la desviación estándar es 8 puntos. ¿Cuál es la probabilidad de que dos grupos de estudiantes, uno de 28 y otro de 36 estudiantes, difieran en la media de sus puntuaciones en: a) 3 o más puntos, b) 6 o más puntos y c) entre 2 y 5 puntos?
- 8.43** Una urna contiene 60 canicas rojas y 40 canicas blancas. De esta urna se extraen, con reposición, dos conjuntos de 30 canicas cada uno, y se van anotando sus colores. ¿Cuál es la probabilidad de que los dos conjuntos difieran en 8 o más canicas rojas?
- 8.44** Resolver el problema 8.43 si para obtener los dos conjuntos de canicas el muestreo se hace sin reposición.
- 8.45** Los resultados de una elección indican que un candidato obtuvo el 65% de los votos. Encontrar la probabilidad de que dos muestras aleatorias, cada una de 200 votantes, indiquen una diferencia mayor al 10% entre las proporciones de quienes votaron por el candidato.
- 8.46** Si  $U_1$  y  $U_2$  son los conjuntos de números del problema 8.11, verificar que: a)  $\mu_{U_1+U_2} = \mu_{U_1} + \mu_{U_2}$  y b)  $\sigma_{U_1+U_2} = \sqrt{\sigma_{U_1}^2 + \sigma_{U_2}^2}$ .
- 8.47** Los valores que se obtienen al medir tres masas son 20.48, 35.97 y 62.34 g, con desviaciones estándar de 0.21, 0.46 y 0.54 g, respectivamente. Encontrar: a) la media y b) la desviación estándar de la suma de las masas.
- 8.48** El voltaje medio de una batería es 15.0 volts (V) y la desviación estándar es 0.2 V. ¿Cuál es la probabilidad de que cuatro de estas baterías conectadas en serie tengan, juntas, un voltaje de 60.8 V o más?

## DEMOSTRACIONES DE LA TEORÍA ELEMENTAL DEL MUESTREO EMPLEANDO SOFTWARE

- 8.49** En una universidad la distribución de las horas crédito es como sigue:

|        |     |     |     |     |     |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $x$    | 6   | 9   | 12  | 15  | 18  |
| $p(x)$ | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |

Encontrar  $\mu$  y  $\sigma^2$ . Dar las 25 muestras (con reposición) de tamaño 2 que se pueden obtener, su media y sus probabilidades.

- 8.50** Graficar la distribución de probabilidad de  $x$  barra del problema 8.49, para  $n = 2$ .

- 8.51** Con los datos del problema 8.50, mostrar que  $\mu_{\bar{x}} = \mu$  y  $\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma^2}{2}$ .

- 8.52** Con los datos del problema 8.49, proporcionar y graficar la distribución de probabilidad de  $x$  barra para  $n = 3$ .

# TEORÍA DE LA ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA

## ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

En el capítulo 8 se vio cómo emplear la teoría del muestreo para obtener información acerca de muestras extraídas en forma aleatoria de una población desconocida. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, suele ser más importante poder inferir información acerca de una población a partir de muestras obtenidas de ella. De estos problemas se ocupa la *inferencia estadística* en la que se usan los principios de la teoría del muestreo.

Un problema importante de la inferencia estadística es la estimación de *parámetros poblacionales*, o simplemente *parámetros* (como, por ejemplo, la media y la varianza poblacionales), a partir de los correspondientes *estadísticos muestrales*, o simplemente *estadísticos* (por ejemplo, la media y la varianza muestrales). En este capítulo se analiza este problema.

## ESTIMACIONES INSESGADAS

Si la media de la distribución muestral de un estadístico es igual al parámetro poblacional correspondiente se dice que el estadístico es un *estimador insesgado* del parámetro; si no es así, se dice que es un *estimador sesgado*. A los valores de estos estadísticos se les llama estimaciones *insesgadas* o *sesgadas*, respectivamente.

**EJEMPLO 1** La media de la distribución muestral de las medias  $\mu_{\bar{X}}$  es  $\mu$ , la media poblacional. Por lo tanto, la media muestral  $\bar{X}$  es una estimación insesgada de la media poblacional  $\mu$ .

**EJEMPLO 2** La media de la distribución muestral de las varianzas es

$$\mu_{s^2} = \frac{N - 1}{N} \sigma^2$$

donde  $\sigma^2$  es la varianza poblacional y  $N$  es el tamaño de la muestra (ver tabla 8.1). Por lo tanto, la varianza muestral  $s^2$  es una estimación sesgada de la varianza poblacional  $\sigma^2$ . Empleando la varianza modificada

$$\hat{s}^2 = \frac{N}{N - 1} s^2$$

se encuentra que  $\mu_{\hat{s}^2} = \sigma^2$ , de manera que  $\hat{s}^2$  es una estimación insesgada de  $\sigma^2$ . Sin embargo,  $\hat{s}$  es una estimación sesgada de  $\sigma$ .

En el lenguaje de la esperanza matemática (ver capítulo 6) se puede decir que un estadístico es insesgado si su esperanza matemática es igual al correspondiente parámetro poblacional. Por lo tanto,  $\bar{X}$  y  $s^2$  son insesgados, ya que  $E\{\bar{X}\} = \mu$  y  $E\{s^2\} = \sigma^2$ .

## ESTIMACIONES EFICIENTES

Si la distribución muestral de dos estadísticos tiene la misma media (o esperanza), entonces al estadístico que tiene la menor varianza se le llama *estimador eficiente* del parámetro correspondiente, y al otro se le llama *estimador ineficiente*. A los valores de estos estadísticos se les llama *estimaciones eficientes e ineficientes*, respectivamente.

Si se consideran todos los estadísticos cuya distribución muestral tiene una misma media, al estadístico que tiene la menor varianza suele llamársele *estimador más eficiente o mejor* del parámetro correspondiente.

**EJEMPLO 3** Las distribuciones muestrales de la media y de la mediana tienen la misma media, a saber, la media poblacional. Sin embargo, la varianza de la distribución muestral de las medias es menor que la varianza de la distribución muestral de las medianas (ver tabla 8.1). Por lo tanto, la media muestral proporciona una estimación eficiente de la media poblacional, en tanto que la mediana muestral proporciona una estimación ineficiente de la media poblacional.

De todos los estadísticos que estiman la media poblacional, la media muestral proporciona la mejor (o la más eficiente) estimación.

En la práctica, las estimaciones ineficientes suelen usarse debido a la relativa facilidad con que algunas de ellas pueden obtenerse.

## ESTIMACIONES PUNTUALES Y ESTIMACIONES POR INTERVALO; SU CONFIABILIDAD

A una estimación de un parámetro poblacional que se da mediante un solo número se le llama *estimación puntual* del parámetro. A una estimación de un parámetro poblacional que se da mediante dos números, entre los cuales se considera que debe estar el parámetro en cuestión, se le llama *estimación por intervalo* del parámetro en cuestión.

Las estimaciones por intervalo dan la precisión, o exactitud, de la estimación, y por esto se prefieren a las estimaciones puntuales.

**EJEMPLO 4** Si se dice que en la medición de una distancia se obtuvo como resultado 5.28 metros (m), se está dando una estimación puntual. En cambio, si se dice que la distancia es  $5.28 \pm 0.03$  m (es decir, que la distancia está entre 5.25 y 5.31 m), se está dando una estimación por intervalo.

La información sobre el error (o precisión) de una estimación es su *confiabilidad*.

## ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS POBLACIONALES MEDIANTE UN INTERVALO DE CONFIANZA

Sean  $\mu_S$  y  $\sigma_S$  la media y la desviación estándar (error estándar), respectivamente, de la distribución muestral de un estadístico  $S$ . Entonces, si la distribución muestral de  $S$  es aproximadamente normal (lo que se sabe que es así para muchos estadísticos si el tamaño de la muestra es  $N \geq 30$ ), se puede esperar que exista un estadístico muestral  $S$  que se encuentre en los intervalos  $\mu_S - \sigma_S$  a  $\mu_S + \sigma_S$ ,  $\mu_S - 2\sigma_S$  a  $\mu_S + 2\sigma_S$  o  $\mu_S - 3\sigma_S$  a  $\mu_S + 3\sigma_S$ , a 68.27%, 95.45% y 99.73% de las veces, respectivamente.

De igual manera, se puede hallar (o se puede tener *confianza* de hallar)  $\mu_S$  en los intervalos  $S - \sigma_S$  a  $S + \sigma_S$ ,  $S - 2\sigma_S$  a  $S + 2\sigma_S$  o  $S - 3\sigma_S$  a  $S + 3\sigma_S$  a 68.27, 95.45 y 99.73% de las veces, respectivamente. Debido a ello, a estos intervalos se les llama *intervalos de confianza* de 68.27%, 95.45% y 99.73% para estimar  $\mu_S$ . A los números de los extremos de estos intervalos ( $S \pm \sigma_S$ ,  $S \pm 2\sigma_S$  y  $S \pm 3\sigma_S$ ) se les llama *límites de confianza* o *límites fiduciales*.

De igual manera,  $S \pm 1.96\sigma_S$  y  $S \pm 2.58\sigma_S$  son los límites de confianza de 95% y de 99% (o de 0.95 y 0.99) para  $S$ . Al porcentaje de confianza se le suele llamar *nivel de confianza*. A los números 1.96, 2.58, etc., que aparecen en los límites de confianza, se les llama *coeficientes de confianza* o *valores críticos* y se denotan  $z_c$ . A partir de los niveles de confianza se pueden encontrar los coeficientes de confianza y viceversa.

En la tabla 9.1 se presentan los valores de  $z_c$  que corresponden a varios niveles de confianza que se usan en la práctica. Los valores de  $z_c$  para niveles de confianza que no estén en esta tabla se pueden encontrar en las tablas de áreas de la curva normal (ver apéndice II).

**Tabla 9.1**

| Nivel de confianza | 99.73% | 99%  | 98%  | 96%  | 95.45% | 95%  | 90%   | 80%  | 68.27% | 50%    |
|--------------------|--------|------|------|------|--------|------|-------|------|--------|--------|
| $z_c$              | 3.00   | 2.58 | 2.33 | 2.05 | 2.00   | 1.96 | 1.645 | 1.28 | 1.00   | 0.6745 |

### Intervalos de confianza para las medias

Si el estadístico  $S$  es la media muestral  $\bar{X}$ , entonces los límites de confianza de 95 y 99% para la estimación de la media poblacional  $\mu$  están dados por  $\bar{X} \pm 1.96\sigma_{\bar{X}}$  y  $\bar{X} \pm 2.58\sigma_{\bar{X}}$ , respectivamente. En general, los límites de confianza están dados por  $\bar{X} \pm z_c\sigma_{\bar{X}}$ , donde  $z_c$  (que depende del nivel de confianza deseado) puede leerse en la tabla 9.1. Empleando los valores para  $\sigma_{\bar{X}}$  obtenidos en el capítulo 8, se ve que los límites de confianza para la media poblacional están dados por

$$\bar{X} \pm z_c \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

si el muestreo se hace ya sea de una población infinita o de una población finita, pero con reposición, y están dados por

$$\bar{X} \pm z_c \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{N_p - N}{N_p - 1}} \quad (2)$$

si el muestreo se hace sin reposición de una población de tamaño finito  $N_p$ .

Por lo general no se conoce la desviación estándar poblacional  $\sigma$ ; de manera que para obtener los límites de confianza anteriores, se usa la estimación muestral  $\hat{s}$  o  $s$ . El resultado es satisfactorio si  $N \geq 30$ . Si  $N < 30$ , la aproximación es pobre y se debe emplear la teoría del muestreo para muestras pequeñas (ver capítulo 11).

### Intervalos de confianza para proporciones

Si el estadístico  $S$  es la proporción de “éxitos” en una muestra de tamaño  $N$  obtenida de una población binomial en la que  $p$  es la proporción de éxitos (es decir, la probabilidad de éxito), entonces los límites de confianza para  $p$  están dados por  $P \pm z_c\sigma_p$ , donde  $P$  es la proporción de éxitos en una muestra de tamaño  $N$ . Empleando los valores para  $\sigma_p$  indicados en el capítulo 8 se ve que los límites de confianza para la proporción poblacional están dados por

$$P \pm z_c \sqrt{\frac{pq}{N}} = P \pm z_c \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}} \quad (3)$$

si el muestreo se hace de una población infinita o de una población finita, pero con reposición, y están dados por

$$P \pm z_c \sqrt{\frac{pq}{N}} \sqrt{\frac{N_p - N}{N_p - 1}} \quad (4)$$

si el muestreo se hace sin reposición y de una población finita de tamaño  $N_p$ .

Para calcular estos límites de confianza se emplea la estimación muestral  $P$  para  $p$ , la que por lo general resulta satisfactoria siempre que  $N \geq 30$ . En el problema 9.12 se da un método más exacto para obtener estos límites de confianza.

## Intervalos de confianza para diferencias y sumas

Si  $S_1$  y  $S_2$  son dos estadísticos muestrales con distribuciones aproximadamente normales, los límites de confianza para la diferencia entre los parámetros poblacionales correspondientes a  $S_1$  y  $S_2$  están dados por

$$S_1 - S_2 \pm z_c \sigma_{S_1 - S_2} = S_1 - S_2 \pm z_c \sqrt{\sigma_{S_1}^2 + \sigma_{S_2}^2} \quad (5)$$

y los límites de confianza para la suma de los parámetros poblacionales están dados por

$$S_1 + S_2 \pm z_c \sigma_{S_1 + S_2} = S_1 + S_2 \pm z_c \sqrt{\sigma_{S_1}^2 + \sigma_{S_2}^2} \quad (6)$$

siempre que las muestras sean independientes (ver capítulo 8).

Por ejemplo, los límites de confianza para la diferencia entre dos medias poblacionales, en el caso en que las poblaciones sean infinitas, están dados por

$$\bar{X}_1 - \bar{X}_2 \pm z_c \sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \bar{X}_1 - \bar{X}_2 \pm z_c \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}} \quad (7)$$

donde  $\bar{X}_1$ ,  $\sigma_1$ ,  $N_1$  y  $\bar{X}_2$ ,  $\sigma_2$ ,  $N_2$  son las correspondientes medias, desviaciones estándar y tamaños de las dos muestras obtenidas de las poblaciones.

De igual manera, los límites de confianza para la diferencia entre dos proporciones poblacionales, si las poblaciones son infinitas, están dados por

$$P_1 - P_2 \pm z_c \sigma_{P_1 - P_2} = P_1 - P_2 \pm z_c \sqrt{\frac{p_1(1-p_1)}{N_1} + \frac{p_2(1-p_2)}{N_2}} \quad (8)$$

donde  $P_1$  y  $P_2$  son las dos proporciones muestrales,  $N_1$  y  $N_2$  son los tamaños de las dos muestras obtenidas de las poblaciones y  $p_1$  y  $p_2$  son las proporciones en las dos poblaciones (estimadas por  $P_1$  y  $P_2$ ).

## Intervalos de confianza para desviaciones estándar

Los límites de confianza para la desviación estándar  $\sigma$  de una población distribuida normalmente, estimada a partir de una muestra con desviación estándar  $s$ , están dados por

$$s \pm z_c \sigma_s = s \pm z_c \frac{\sigma}{\sqrt{2N}} \quad (9)$$

empleando la tabla 8.1. Para calcular estos límites de confianza, se usa  $s$  o  $\hat{s}$  para estimar  $\sigma$ .

## ERROR PROBABLE

Los límites de confianza de 50% para el parámetro poblacional correspondiente a un estadístico  $S$  están dados por  $S \pm 0.6745\sigma_S$ . La cantidad  $0.6745\sigma_S$  se conoce como el *error probable* de la estimación.

## PROBLEMAS RESUELTOS

### ESTIMADORES INSESGADOS Y EFICIENTES

- 9.1** Dar un ejemplo de estimadores (o estimaciones) que sean: *a)* insesgados y eficientes, *b)* insesgados e ineficientes y *c)* sesgados e ineficientes.

#### SOLUCIÓN

- a)* La media muestral  $\bar{X}$  y la varianza muestral

$$\hat{s}^2 = \frac{N}{N-1} s^2$$

son dos ejemplos.

- b)* La mediana muestral y el estadístico muestral  $\frac{1}{2}(Q_1 + Q_3)$ , donde  $Q_1$  y  $Q_3$  son los cuartiles muestrales inferior y superior, son dos de estos ejemplos. Ambos estadísticos son estimaciones insesgadas de la media poblacional, ya que la media de sus distribuciones muestrales es la media poblacional.  
*c)* La desviación estándar  $s$ , la desviación estándar modificada  $\hat{s}$ , la desviación media y el rango semiintercuartil son cuatro de estos ejemplos.

- 9.2** Para el diámetro de un esfera, un científico obtiene una muestra de cinco mediciones, 6.33, 6.37, 6.36, 6.32 y 6.37 centímetros (cm). Obténganse estimaciones insesgadas y eficientes de: *a)* la verdadera media y *b)* la verdadera varianza.

#### SOLUCIÓN

- a)* La estimación insesgada y eficiente de la verdadera media (es decir, de la media poblacional) es

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} = \frac{6.33 + 6.37 + 6.36 + 6.32 + 6.37}{5} = 6.35 \text{ cm}$$

- b)* La estimación insesgada y eficiente de la verdadera varianza (es decir de la varianza poblacional) es

$$\begin{aligned} \hat{s}^2 &= \frac{N}{N-1} s^2 = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N-1} \\ &= \frac{(6.33 - 6.35)^2 + (6.37 - 6.35)^2 + (6.36 - 6.35)^2 + (6.32 - 6.35)^2 + (6.37 - 6.35)^2}{5-1} \\ &= 0.00055 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Obsérvese que aunque  $\hat{s} = \sqrt{0.00055} = 0.023 \text{ cm}$  es una estimación de la verdadera desviación estándar, esta estimación no es ni insesgada ni eficiente.

- 9.3** Supóngase que las estaturas de 100 estudiantes varones de la universidad XYZ representan una muestra aleatoria de las estaturas de los 1 546 estudiantes de esa universidad. Determinar estimaciones insesgadas y eficientes: *a)* para la verdadera media y *b)* para la verdadera varianza.

#### SOLUCIÓN

- a)* De acuerdo con el problema 3.22, la estimación insesgada y eficiente de la verdadera estatura media es  $\bar{X} = 67.45$  pulgadas (in).
- b)* De acuerdo con el problema 4.17, la estimación insesgada y eficiente de la verdadera varianza es

$$\hat{s}^2 = \frac{N}{N-1} s^2 = \frac{100}{99} (8.5275) = 8.6136$$

Por lo tanto,  $\hat{s} = \sqrt{8.6136} = 2.93 \text{ in}$ . Obsérvese que como  $N$  es grande, en esencia no hay diferencia entre  $s^2$  y  $\hat{s}^2$  o entre  $s$  y  $\hat{s}$ .

Obsérvese que no se empleó la corrección de Sheppard por agrupamiento. Si se emplea, se usa  $s = 2.79$  in (ver problema 4.21).

- 9.4** Dar una estimación insesgada e ineficiente del verdadero diámetro medio de la esfera del problema 9.2.

### SOLUCIÓN

La mediana es un ejemplo de estimación insesgada e ineficiente de la media poblacional. Para las cinco mediciones coordinadas de acuerdo con su magnitud, la mediana es 6.36 cm.

## INTERVALOS DE CONFIANZA PARA MEDIAS

- 9.5** Encontrar los intervalos de confianza: *a)* de 95% y *b)* 99% para estimar la estatura media de los estudiantes de la universidad XYZ del problema 9.3.

### SOLUCIÓN

- a)* Los límites de confianza del 95% son  $\bar{X} \pm 1.96\sigma/\sqrt{N}$ . Empleando  $\bar{X} = 67.45$  in, y  $\hat{s} = 2.93$  in como estimación de  $\sigma$  (ver problema 9.3), los límites de confianza son  $67.45 \pm 1.96(2.93/\sqrt{100})$  o  $67.45 \pm 0.57$  in. Por lo tanto, el intervalo de confianza del 95% para la media poblacional  $\mu$  es 66.88 a 68.02 in, lo que se denota así  $66.88 < \mu < 68.02$ .

De manera que se puede decir que la probabilidad de que la media poblacional de las estaturas se encuentre entre 66.88 y 68.02 es aproximadamente de 95% o 0.95. Empleando símbolos se escribe  $\Pr\{66.88 < \mu < 68.02\} = 0.95$ . Esto equivale a decir que se tiene 95% de confianza en que la media poblacional (o verdadera media) se encuentre entre 66.88 y 68.02 in.

- b)* Los límites de confianza del 99% son  $\bar{X} \pm 2.58\sigma/\sqrt{N} = \bar{X} \pm 2.58\hat{s}/\sqrt{N} = 67.45 \pm 2.58(2.93/\sqrt{100}) = 67.45 \pm 0.76$  in. Por lo tanto, el intervalo de confianza del 99% para la media poblacional  $\mu$  es 66.69 a 68.21 in, lo que se denota así  $66.69 < \mu < 68.21$ .

Al obtener los intervalos de confianza anteriores se supuso que la población era infinita o tan grande que se podía considerar que las condiciones eran las mismas que en un muestreo con reposición. En el caso de poblaciones finitas, si el muestreo se hace sin reposición, se debe usar

$$\frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{N_p - N}{N_p - 1}} \quad \text{en lugar de} \quad \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

Sin embargo, se puede considerar que el factor

$$\sqrt{\frac{N_p - N}{N_p - 1}} = \sqrt{\frac{1546 - 100}{1546 - 1}} = 0.967$$

es prácticamente 1.0, por lo que no necesita usarse. Si se usa, los límites de confianza anteriores se convierten en 67.45 ± 0.56 in y  $67.45 \pm 0.73$  in, respectivamente.

- 9.6** Una empresa tiene 5 000 árboles de navidad maduros y listos para ser cortados y vendidos. En forma aleatoria se seleccionan 100 de estos árboles y se miden sus alturas. En la tabla 9.2 se dan estas alturas en pulgadas. Emplear MINITAB para dar un intervalo de confianza de 95% para la altura media de los 5 000 árboles. Si estos árboles se venden a \$2.40 por pie, dar un límite inferior y un límite superior para el valor de los 5 000 árboles.

### SOLUCIÓN

El intervalo de confianza de MINITAB, que se da a continuación, indica que la altura media de los 5 000 árboles puede ir desde 57.24 a 61.20 pulgadas. El número total de pulgadas en los 5 000 árboles está entre  $(57.24)(5000) = 286200$  y

Tabla 9.2

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 56 | 61 | 52 | 62 | 63 | 34 | 47 | 35 | 44 | 59 |
| 70 | 61 | 65 | 51 | 65 | 72 | 55 | 71 | 57 | 75 |
| 53 | 48 | 55 | 67 | 60 | 60 | 73 | 74 | 43 | 74 |
| 71 | 53 | 78 | 59 | 56 | 62 | 48 | 65 | 68 | 51 |
| 73 | 62 | 80 | 53 | 64 | 44 | 67 | 45 | 58 | 48 |
| 50 | 57 | 72 | 55 | 56 | 62 | 72 | 57 | 49 | 62 |
| 46 | 61 | 52 | 46 | 72 | 56 | 46 | 48 | 57 | 52 |
| 54 | 73 | 71 | 70 | 66 | 67 | 58 | 71 | 75 | 50 |
| 44 | 59 | 56 | 54 | 63 | 43 | 68 | 69 | 55 | 63 |
| 48 | 49 | 70 | 60 | 67 | 47 | 49 | 69 | 66 | 73 |

$(61.20)(5\ 000) = 306\ 000$ . Si estos árboles se venden a \$2.40 por pie, entonces el precio por pulgada es \$0.2. El valor de los árboles está entre  $(286\ 000)(0.2) = \$57\ 200$  y  $(306\ 000)(0.2) = \$61\ 200$  con 95% de confianza (o de seguridad).

### Despliege de datos

altura

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 56 | 70 | 53 | 71 | 73 | 50 | 46 | 54 | 44 |
| 48 | 61 | 61 | 48 | 53 | 62 | 57 | 61 | 73 |
| 59 | 49 | 52 | 65 | 55 | 78 | 80 | 72 | 52 |
| 71 | 56 | 70 | 62 | 51 | 67 | 59 | 53 | 55 |
| 46 | 70 | 54 | 60 | 63 | 65 | 60 | 56 | 64 |
| 56 | 72 | 66 | 63 | 67 | 34 | 72 | 60 | 62 |
| 44 | 62 | 56 | 67 | 43 | 47 | 47 | 55 | 73 |
| 48 | 67 | 72 | 46 | 58 | 68 | 49 | 35 | 71 |
| 74 | 65 | 45 | 57 | 48 | 71 | 69 | 69 | 44 |
| 57 | 43 | 68 | 58 | 49 | 57 | 75 | 55 | 66 |
| 59 | 75 | 74 | 51 | 48 | 62 | 52 | 50 | 63 |
|    |    |    |    |    |    |    |    | 73 |

MTB > cl desviación estándar

### Columna desviación estándar

Desviación estándar de altura = 10.111

MTB > zintervalo 95% de confianza ds = 10.111 datos en cl

### Intervalos de confianza

Sigma supuesta = 10.1

| Variable | N   | Media | DesvEst | SE media | 95.0% CI       |
|----------|-----|-------|---------|----------|----------------|
| Altura   | 100 | 59.22 | 10.11   | 1.01     | (57.24, 61.20) |

- 9.7 En una encuesta a sacerdotes católicos, cada sacerdote informó de la cantidad de bautizos, bodas y funerales celebrados el año anterior. En la tabla 9.3 se presentan las respuestas obtenidas. Utilizar estos datos para construir un intervalo de confianza de 95% para  $\mu$ , la media del número, por sacerdote, de bautizos, bodas y funerales.

Tabla 9.3

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 32 | 44 | 48 | 35 | 34 | 29 | 31 | 61 | 37 | 41 |
| 31 | 40 | 44 | 43 | 41 | 40 | 41 | 31 | 42 | 45 |
| 29 | 40 | 42 | 51 | 16 | 24 | 40 | 52 | 62 | 41 |
| 32 | 41 | 45 | 24 | 41 | 30 | 42 | 47 | 30 | 46 |
| 38 | 42 | 26 | 34 | 45 | 58 | 57 | 35 | 62 | 46 |

rales celebrados el año anterior. Obtener el intervalo empleando la fórmula para intervalos de confianza y usar también el comando Zinterval de MINITAB para hallar este intervalo.

### SOLUCIÓN

Una vez ingresados los datos de la tabla 9.3 en la columna 1 de la hoja de cálculo de MINITAB y de haberle dado “número” como nombre a esta columna, se dan los comandos para la media y la desviación estándar.

MTB > cl media

Columna media

Media de número = 40.261

MTB > cl desviación estándar

Columna desviación estándar

Desviación estándar de número = 9.9895

El error estándar de la media es igual a  $9.9895/\sqrt{50} = 1.413$ , el valor crítico es 1.96 y el margen de error de 95% es  $1.96(1.413) = 2.769$ . El intervalo de confianza va de  $40.261 - 2.769 = 37.492$  a  $40.261 + 2.769 = 43.030$ .

Con el comando Zinterval se obtiene el resultado siguiente:

MTB > Zinterval, de 95% de confianza sd = 9.9895 datos en cl

Intervalos de confianza Z

Sigma supuesta = 9.99

| Variable | N  | Media | DesvEst | SE media | 95.00% CI      |
|----------|----|-------|---------|----------|----------------|
| Número   | 50 | 40.26 | 9.99    | 1.41     | (37.49, 43.03) |

Se tiene una confianza de 95% de que la verdadera media de todos los sacerdotes esté entre 37.49 y 43.03.

- 9.8 Para medir el tiempo de reacción, un psicólogo estima que la desviación estándar es 0.05 segundos (s). ¿Qué tan grande debe ser la muestra de las medidas para que se tenga una confianza: a) de 95% y b) de 99% en que el error de esta estimación no será mayor de 0.01 s?

### SOLUCIÓN

- a) Los límites de confianza del 95% son  $\bar{X} \pm 1.96\sigma/\sqrt{N}$ , siendo el error de estimación  $1.96\sigma/\sqrt{N}$ . Tomando  $\sigma = s = 0.05$  s, se ve que este error será igual a 0.01 s si  $(1.96)(0.05)/\sqrt{N} = 0.01$ ; es decir,  $\sqrt{N} = (1.96)(0.05)/0.01 = 9.8$  o bien  $N = 96.04$ . Por lo tanto, se puede tener una confianza del 95% en que el error de estimación será menor a 0.01 si  $N$  es 97 o mayor.

**Otro método**

$$\frac{(1.96)(0.05)}{\sqrt{N}} \leq 0.01 \quad \text{si} \quad \frac{\sqrt{N}}{(1.96)(0.05)} \geq \frac{1}{0.01} \quad \text{o bien} \quad \sqrt{N} \geq \frac{(1.96)(0.05)}{0.01} = 9.8$$

Entonces  $N \geq 96.04$ , o bien  $N \geq 97$ .

- b) Los límites de confianza del 99% son  $\bar{X} \pm 2.58\sigma/\sqrt{N}$ . Entonces  $(2.58)(0.05)/\sqrt{N} = 0.01$  o bien  $N = 166.4$ . De manera que se puede tener una confianza de 99% de que el error de estimación será menor a 0.01 s sólo si  $N$  es 167 o mayor.

- 9.9** De un total de 200 calificaciones de matemáticas se tomó una muestra aleatoria de 50 calificaciones en la que la media encontrada fue 75 y la desviación estándar, 10.

- a) ¿Cuáles son los límites de confianza de 95% para la estimación de la media de las 200 calificaciones?  
b) ¿Con qué grado de confianza se puede decir que la media de las 200 calificaciones es  $75 \pm 1$ ?

**SOLUCIÓN**

- a) Como el tamaño de la población no es muy grande en comparación con el tamaño de la muestra, hay que hacer un ajuste. Entonces, los límites de confianza de 95% son

$$\bar{X} \pm 1.96\sigma_{\bar{X}} = \bar{X} \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{N_p - N}{N_p - 1}} = 75 \pm 1.96 \frac{10}{\sqrt{50}} \sqrt{\frac{200 - 50}{200 - 1}} = 75 \pm 2.4$$

- b) Los límites de confianza están representados por

$$\bar{X} \pm z_c \sigma_{\bar{X}} = \bar{X} \pm z_c \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{N_p - N}{N_p - 1}} = 75 \pm z_c \frac{10}{\sqrt{50}} \sqrt{\frac{200 - 50}{200 - 1}} = 75 \pm 1.23z_c$$

Como esto debe ser igual a  $75 \pm 1$ , se tiene  $1.23z_c = 1$ , o bien  $z_c = 0.81$ . El área bajo la curva normal desde  $z = 0$  hasta  $z = 0.81$  es 0.2910; por lo tanto, el grado de confianza buscado es  $2(0.2910) = 0.582$  o bien 58.2%.

**INTERVALOS DE CONFIANZA PARA PROPORCIONES**

- 9.10** Un sondeo realizado con 100 votantes tomados en forma aleatoria de la población de todos los votantes de determinado distrito indica que de éstos, 55% están a favor de cierto candidato. Encontrar límites de confianza de: a) 95%, b) 99% y c) 99.73% para la proporción de todos los votantes a favor de este candidato.

**SOLUCIÓN**

- a) Los límites de confianza de 95% para la  $p$  poblacional son  $P \pm 1.96\sigma_P = P \pm 1.96 \sqrt{p(1-p)/N} = 0.55 \pm 1.96 \sqrt{(0.55)(0.45)/100} = 0.55 \pm 0.10$ , donde se ha usado la proporción muestral  $P$  para estimar  $p$ .  
b) Los límites de confianza de 99% para  $p$  son  $0.55 \pm 2.58 \sqrt{(0.55)(0.45)/100} = 0.55 \pm 0.13$ .  
c) Los límites de confianza de 99.73% para  $p$  son  $0.55 \pm 3 \sqrt{(0.55)(0.45)/100} = 0.55 \pm 0.15$ .

- 9.11** ¿De qué tamaño deberá tomarse la muestra de votantes del problema 9.19 para tener una confianza de: a) 95% y b) 99.73% de que el candidato será electo?

**SOLUCIÓN**

Los límites de confianza para  $p$  son  $P \pm z_c \sqrt{p(1-p)/N} = 0.55 \pm z_c \sqrt{(0.55)(0.45)/N} = 0.55 \pm 0.50z_c/\sqrt{N}$ , donde, de acuerdo con el problema 9.10, se ha usado la estimación  $P = p = 0.55$ . Dado que el candidato gana sólo si tiene más del 50% de la población de votantes, se requiere que  $0.50z_c/\sqrt{N}$  sea menor a 0.05.

- a) Para una confianza de 95%,  $0.50z_c/\sqrt{N} = 0.50(1.96)/\sqrt{N} = 0.05$  si  $N = 384.2$ . Por lo tanto,  $N$  debe ser 385, por lo menos.
- b) Para una confianza de 99.73%,  $0.50z_c/\sqrt{N} = 0.50(3)/\sqrt{N} = 0.05$  si  $N = 900$ . Por lo tanto,  $N$  debe ser 901, por lo menos.

### Otro método

$1.50/\sqrt{N} < 0.05$  si  $\sqrt{N}/1.50 > 1/0.05$  o  $\sqrt{N} > 1.50/0.05$ . Entonces  $\sqrt{N} > 30$  o bien  $N > 900$ , de manera que  $N$  debe ser por lo menos 901.

- 9.12** Se realiza un estudio y se encuentra que 156 de 500 varones adultos son fumadores. Emplear el paquete de software STATISTIX para dar un intervalo de confianza de 99% para  $p$ , la proporción poblacional de varones adultos que son fumadores. Verificar el intervalo de confianza calculándolo a mano.

### SOLUCIÓN

Los resultados de STATISTIX se dan a continuación. El intervalo de confianza de 99% aparece en negritas.

#### Prueba de proporción de una muestra

|                      |             |          |
|----------------------|-------------|----------|
| Tamaño de la muestra | 500         |          |
| Éxito                | 156         |          |
| Proporción           | 0.31200     |          |
|                      |             |          |
| Hipótesis nula       | $P = 0.5$   |          |
| Hipótesis alterna    | $P < > 0.5$ |          |
|                      |             |          |
| Diferencia           | -0.18800    |          |
| Error estándar       | 0.02072     |          |
| Z (sin corregir)     | -8.41       | P 0.0000 |
| Z (corregida)        | -8.36       | P 0.0000 |

#### Intervalo de confianza 99%

|                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| <b>Sin corregir</b> | (0.25863, 0.36537) |
| Corregido           | (0.25763, 0.36637) |

Se tiene una confianza de 99% de que el verdadero porcentaje de varones adultos fumadores esté entre 25.9% y 36.5%.

Verificación:

$$P = 0.312, z_c = 2.58, \sqrt{\frac{0.312(0.688)}{500}} = 0.0207$$

$P \pm z_c \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}}$  o bien  $0.312 \pm 2.58(0.0207)$  o bien **(0.258, 0.365)**. Esto es lo mismo que se obtuvo antes con el paquete de software STATISTIX.

- 9.13** Refiérase al problema 9.12 para dar un intervalo de confianza de 99% para  $p$  empleando MINITAB.

### SOLUCIÓN

El intervalo de confianza de 99% se muestra abajo en negritas. Es el mismo que el intervalo de confianza obtenido con STATISTIX en el problema 9.12.

| Muestra | X   | N   | Muestra P | CI 99%                      | Valor z | Valor P |
|---------|-----|-----|-----------|-----------------------------|---------|---------|
| 1       | 156 | 500 | 0.312000  | <b>(0.258629, 0.365371)</b> | -8.41   | 0.000   |

### INTERVALOS DE CONFIANZA PARA DIFERENCIAS Y SUMAS

- 9.14** Para comparar la cantidad de tiempo que utilizan su celular los estudiantes universitarios, tanto varones como mujeres, se tomaron 50 estudiantes varones y 50 estudiantes mujeres y se determinó la cantidad de tiempo, en horas por semana, que utilizan su celular. En la tabla 9.4 se presentan los resultados en horas. Dar un intervalo de 95% de confianza para  $\mu_1 - \mu_2$  usando MINITAB. Verificar los resultados calculando a mano el intervalo.

**Tabla 9.4**

| Varones |    |    |    |    | Mujeres |    |    |    |    |
|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|
| 12      | 4  | 11 | 13 | 11 | 11      | 9  | 7  | 10 | 9  |
| 7       | 9  | 10 | 10 | 7  | 10      | 10 | 7  | 9  | 10 |
| 7       | 12 | 6  | 9  | 15 | 11      | 8  | 9  | 6  | 11 |
| 10      | 11 | 12 | 7  | 8  | 10      | 7  | 9  | 12 | 14 |
| 8       | 9  | 11 | 10 | 9  | 11      | 12 | 12 | 8  | 12 |
| 10      | 9  | 9  | 7  | 9  | 12      | 9  | 10 | 11 | 7  |
| 11      | 7  | 10 | 10 | 11 | 12      | 7  | 9  | 8  | 11 |
| 9       | 12 | 12 | 8  | 13 | 10      | 8  | 13 | 8  | 10 |
| 9       | 10 | 8  | 11 | 10 | 9       | 9  | 9  | 11 | 9  |
| 13      | 13 | 9  | 10 | 13 | 9       | 8  | 9  | 12 | 11 |

### SOLUCIÓN

Dado que ambas muestras son mayores de 30, se puede usar indistintamente la prueba  $z$  o la prueba  $t$  para dos muestras, ya que la distribución  $t$  y la distribución  $z$  son muy similares.

```

Dos muestras T para varones vs mujeres
      N      Media     DesvEst     SE media
varones   50    9.82        2.15       0.30
mujeres   50    9.70        1.78       0.25
Diferencia = mu (varones) - mu (mujeres)
Estimado para diferencia: 0.120000
CI 95% para diferencia: (-0.663474, 0.903474)
Prueba T de diferencia = 0 (vs no =): valor T = 0.30 valor P = 0.762
DF = 98
Ambos utilizaron la desviación estándar común = 1.9740

```

De acuerdo con los resultados de MINITAB, la diferencia entre las medias poblacionales está entre  $-0.66$  y  $0.90$ . Así que existe la posibilidad de que no haya diferencia entre estas medias poblacionales.

Verificación:

La fórmula para un intervalo de confianza de 95% es  $(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \pm z_c \left( \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \right)$ . Sustituyendo se obtiene  $0.12 \pm 1.96(0.395)$  que corresponde a la respuesta dada por MINITAB.

- 9.15** Usar STATISTIX y SPSS para resolver el problema 9.14.

### SOLUCIÓN

A continuación se presenta la solución dada por STATISTIX. Obsérvese que el intervalo de confianza de 95% es el mismo que el del problema 9.14. Más adelante se verá por qué se supone que las varianzas son iguales.

Pruebas de dos muestras T para varones vs mujeres

| Variable   | Media  | N  | SD     | SE     |
|------------|--------|----|--------|--------|
| varones    | 9.8200 | 50 | 2.1542 | 0.3046 |
| mujeres    | 9.7000 | 50 | 1.7757 | 0.2511 |
| Diferencia | 0.1200 |    |        |        |

Hipótesis nula: diferencia = 0  
 Hipótesis alterna: diferencia < > 0

| Supuesto                          | T    | DF        | P            | CI 95% para diferencia |          |
|-----------------------------------|------|-----------|--------------|------------------------|----------|
|                                   |      |           |              | Inferior               | Superior |
| Varianzas iguales                 | 0.30 | 98        | 0.7618       | -0.6635                | 0.9035   |
| Varianzas desiguales              | 0.30 | 94.6      | 0.7618       | -0.6638                | 0.9038   |
| Prueba para igualdad de varianzas |      | F<br>1.47 | DF<br>49, 49 | P<br>0.0899            |          |

La solución dada por SPSS es la siguiente:

#### Grupo estadístico

| Sexo    |      | N  | Media  | Desviación estándar | Media de error estándar |
|---------|------|----|--------|---------------------|-------------------------|
| momento | 1.00 | 50 | 9.7000 | 1.77569             | .25112                  |
|         | 2.00 | 50 | 9.8200 | 2.15416             | .30464                  |

#### Prueba de muestras independientes

|         | Prueba de Levene para igualdad de varianzas |      | Prueba t para igualdad de medias |       |        |      |                  |                  |                           | Intervalo de confianza de 95% de la diferencia |          |
|---------|---|------|----------------------------------|-------|--------|------|------------------|------------------|---------------------------|--|----------|
|         |   |      | F                                | Sig.  | t      | gl   | Sig. (2-finales) | Diferencia media | Diferencia error estándar |  |          |
|         |   |      |                                  |       |        |      |                  |                  |                           | Inferior                                       | Superior |
| momento | Varianzas iguales supuestas                 | .898 | .346                             | -.304 | 98     | .762 | .762             | -.12000          | .39480                    | -.90347  | .66347   |
|         | Varianzas iguales no supuestas              |      |                                  | -.304 | 94.556 | .762 | .762             | -.12000          | .39480                    | -.90383  | .66383   |

- 9.16 Usar SAS para resolver el problema 9.14. Dar las formas de archivos de datos que permiten usar SAS para realizar este análisis.

#### SOLUCIÓN

El análisis de SAS es como se muestra a continuación. El intervalo de confianza se ha impreso en negritas en la parte inferior de los resultados.

Dos muestras: prueba t para las medias de varones y mujeres

Estadísticos de muestra

| Grupo   | N  | Media | DesvEst | ErrorEst |
|---------|----|-------|---------|----------|
| varones | 50 | 9.82  | 2.1542  | 0.3046   |
| mujeres | 50 | 9.7   | 1.7757  | 0.2511   |

Hipótesis nula: media 1 - media 2 = 0

Alternativa Media 1 - media 2  $\neq$  0

| Si las varianzas son | estadístico t | Df    | Pr > t |
|----------------------|---------------|-------|--------|
| Igual                | 0.304         | 98    | 0.7618 |
| Desigual             | 0.304         | 94.56 | 0.7618 |

Intervalo de confianza 95% para la diferencia entre dos medias.

| Límite inferior | Límite superior |
|-----------------|-----------------|
| -0.66           | 0.90            |

Los archivos de datos que se emplean con SAS para el análisis pueden tener los datos de varones y de mujeres en columnas separadas, pero los datos también pueden consistir en las horas que se emplea el celular, en una columna, y el sexo de la persona (varón o mujer), en otra columna. Varones y mujeres se pueden codificar como 1 y 2, respectivamente. En la primera forma habrá 2 columnas y 50 renglones. En la segunda forma habrá 2 columnas y 100 renglones.

## INTERVALOS DE CONFIANZA PARA DESVIACIONES ESTÁNDAR

- 9.17** Para un intervalo de confianza para la varianza de una población se utiliza la distribución Ji cuadrada. El intervalo de confianza  $(1 - \alpha) \times 100\%$  es  $\frac{(n-1)S^2}{(\chi_{\alpha/2}^2)} < \sigma^2 < \frac{(n-1)S^2}{(\chi_{1-\alpha/2}^2)}$  donde  $n$  es el tamaño de la muestra,  $S^2$  es la varianza muestral,  $\chi_{\alpha/2}^2$  y  $\chi_{1-\alpha/2}^2$  pertenecen a la distribución Ji cuadrada con  $(n - 1)$  grados de libertad. Use EXCEL para hallar un intervalo de confianza de 99% para la varianza de veinte recipientes de 180 onzas. Los datos de los veinte recipientes se presentan en la tabla 9.5.

Tabla 9.5

|       |       |
|-------|-------|
| 181.5 | 180.8 |
| 179.7 | 182.4 |
| 178.7 | 178.5 |
| 183.9 | 182.2 |
| 179.7 | 180.9 |
| 180.6 | 181.4 |
| 180.4 | 181.4 |
| 178.5 | 180.6 |
| 178.8 | 180.1 |
| 181.3 | 182.2 |

## SOLUCIÓN

A continuación se presenta la hoja de cálculo de EXCEL. Los datos se encuentran en A1:B10. En la columna D se muestran las funciones cuyos valores aparecen en la columna C.

| A     | B     | C        | D                 |
|-------|-------|----------|-------------------|
| 181.5 | 180.8 | 2.154211 | =VAR(A1:B10)      |
| 179.1 | 182.4 | 40.93    | =19*C1            |
| 178.7 | 178.5 | 38.58226 | =CHIINV(0.005,19) |
| 183.9 | 182.2 | 6.843971 | =CHIINV(0.995,19) |
| 179.7 | 180.9 |          |                   |
| 180.6 | 181.4 | 1.06085  | =C2/C3            |
| 180.4 | 181.4 | 5.980446 | =C2/C4            |
| 178.5 | 180.6 |          |                   |
| 178.8 | 180.1 |          |                   |
| 181.3 | 182.2 |          |                   |

El intervalo de confianza de 99% para  $\sigma^2$  es:  $(1.06085 < \sigma^2 < 5.980446)$ . El intervalo de confianza de 99% para  $\sigma$  es:  $(1.03, 2.45)$ .

Obsérvese que con =VAR(A1:B10) se obtiene  $S^2$ , con =CHIINV(0.005,19) se obtiene el valor de  $J_1$  cuadrada que tiene a su derecha un área de 0.005, y con =CHIINV(0.995,19) el valor de  $J_2$  cuadrada que tiene a su derecha un área de 0.995. En ambos casos, la distribución  $J$  cuadrada tiene 19 grados de libertad.

- 9.18** Para comparar la varianza de una población con la varianza de otra población se emplea el siguiente intervalo de confianza  $(1 - \alpha) \times 100\%$ :

$$\frac{S_1^2}{S_2^2} \cdot \frac{1}{F_{\alpha/2(\nu_1, \nu_2)}} < \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} < \frac{S_1^2}{S_2^2} F_{\alpha/2(\nu_2, \nu_1)},$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los tamaños de las dos muestras,  $S_1^2$  y  $S_2^2$  son las dos varianzas muestrales,  $v_1 = n_1 - 1$  y  $v_2 = n_2 - 1$  son los grados de libertad, en el numerador y en el denominador, para la distribución  $F$  y los valores  $F$  pertenecen a la distribución  $F$ . En la tabla 9.6 se dan los números de correos electrónicos enviados por semana por los empleados de dos empresas.

Dar un intervalo de confianza de 95% para  $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ .

**Tabla 9.6**

| Empresa 1 | Empresa 2 |
|-----------|-----------|
| 81        | 99        |
| 104       | 100       |
| 115       | 104       |
| 111       | 98        |
| 85        | 103       |
| 121       | 113       |
| 95        | 95        |
| 112       | 107       |
| 100       | 98        |
| 117       | 95        |
| 113       | 101       |
| 109       | 109       |
| 101       | 99        |
|           | 93        |
|           | 105       |

**SOLUCIÓN**

A continuación se muestra la hoja de cálculo de EXCEL. En la columna D se muestran las funciones cuyos valores aparecen en la columna C. En C1 y C2 se calculan las dos varianzas muestrales. En C3 y C4 se calculan los valores  $F$ . En C5 y C6 se calculan los extremos del intervalo de confianza para el cociente de las varianzas. Como se ve, el intervalo de confianza del 95% para  $\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$  es (1.568, 15.334). El intervalo de confianza del 95% para  $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$  es (1.252, 3.916). Obsérvese que =FINV(0.025,12,14) es el punto que corresponde a la distribución  $F$ , con  $\nu_1 = 12$  y  $\nu_2 = 14$  grados de libertad, que tiene un área de 0.025 a su derecha.

| A          | B          | C           | D                  |
|------------|------------|-------------|--------------------|
| Compañía 1 | Compañía 2 |             |                    |
| 81         | 99         | 148.5769231 | =VAR(A2:A14)       |
| 104        | 100        | 31.06666667 | =VAR(B2:B16)       |
| 115        | 104        | 3.050154789 | =FINV(0.025,12,14) |
| 111        | 98         | 3.2062117   | =FINV(0.025,14,12) |
| 85         | 103        | 1.567959436 | =(C1/C2)/C3        |
| 121        | 113        | 15.33376832 | =(C1/C2)*C4        |
| 95         | 95         | 1.25218187  | =SQRT(C5)          |
| 112        | 107        | 3.915835584 | =SQRT(C6)          |
| 100        | 98         |             |                    |
| 117        | 95         |             |                    |
| 113        | 101        |             |                    |
| 109        | 109        |             |                    |
| 101        | 99         |             |                    |
|            | 93         |             |                    |
|            | 105        |             |                    |

**ERROR PROBABLE**

- 9.19** La media del voltaje de 50 baterías del mismo tipo es 18.2 volts (V) y la desviación estándar es 0.5 V. Encontrar:  
*a)* el error probable de la media y *b)* los límites de confianza de 50%.

**SOLUCIÓN**

*a)*

$$\text{Error probable de la media} = 0.674\sigma_{\bar{X}} = 0.6745 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = 0.6745 \frac{\hat{s}}{\sqrt{N}}$$

$$= 0.6745 \frac{s}{\sqrt{N-1}} = 0.6745 \frac{0.5}{\sqrt{49}} = 0.048 \text{ V}$$

Obsérvese que si la desviación estándar de 0.5 V se calcula como  $\hat{s}$ , el error probable también es  $0.6745(0.5/\sqrt{50}) = 0.048$ , de manera que si  $N$  es suficientemente grande puede usarse cualquier estimación.

- b)* Los límites de confianza de 50% son  $18 \pm 0.048$  V.

- 9.20** Una medición se registra como 216.480 gramos (g) con un error probable de 0.272 g. ¿Cuáles son los límites de confianza de 95% para esta medición?

## SOLUCIÓN

El error probable es  $0.272 = 0.6745\sigma_{\bar{X}}$  o bien  $\sigma_{\bar{X}} = 0.272/0.6745$ . Por lo tanto, los límites de confianza de 95% son  $\bar{X} \pm 1.96\sigma_{\bar{X}} = 216.480 \pm 1.96(0.272/0.6745) = 216.480 \pm 0.790$  g.

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### ESTIMADORES INSESGADOS Y EFICIENTES

- 9.21** Las mediciones de una muestra de masas fueron 8.3, 10.6, 9.7, 8.8, 10.2 y 9.4 kilogramos (kg), respectivamente. Determinar estimaciones insesgadas y eficientes de: *a)* la media poblacional, *b)* la varianza poblacional y *c)* comparar la desviación estándar muestral con la desviación estándar poblacional estimada.
- 9.22** En una muestra de 10 cinescopios de televisión, producidos por una empresa, la media del tiempo de vida es 1 200 horas (h) y la desviación estándar es 100 h. Estimar: *a)* la media y *b)* la desviación estándar de todos los cinescopios producidos por esta empresa.
- 9.23** *a)* Repetir el problema 9.22 considerando que la muestra es de 30, 50 y 100 cinescopios de televisión.  
*b)* ¿Qué se puede concluir sobre la relación entre la desviación estándar muestral y las estimaciones de la desviación estándar poblacional obtenidas con diferentes tamaños de muestra?

### INTERVALOS DE CONFIANZA PARA MEDIAS

- 9.24** La media y la desviación estándar de la carga máxima que soporta cada uno de 60 cables (ver problema 3.59) son 11.09 toneladas y 0.73 toneladas, respectivamente. Encontrar los límites de confianza: *a)* de 95% y *b)* de 99% para la media de la carga máxima de cada uno de los cables producidos por la empresa.
- 9.25** La media y la desviación estándar de los diámetros de una muestra de 250 cabezas de remaches fabricados por una empresa son 0.72643 in y 0.00058 in, respectivamente (ver problema 3.61). Encontrar los límites de confianza de: *a)* 99%, *b)* 98%, *c)* 95% y *d)* 90% para los diámetros de todas las cabezas de remaches producidos por la empresa.
- 9.26** Encontrar: *a)* los límites de confianza de 50% y *b)* el error probable para la media de los diámetros del problema 9.25.
- 9.27** Si se estima que la desviación estándar del tiempo de vida de los cinescopios de televisión es de 100 h, ¿de qué tamaño deberá tomarse la muestra para que se tenga una confianza de: *a)* 95%, *b)* 90%, *c)* 99% y *d)* 99.73% de que el error en la vida media estimada no sea mayor de 20 h?
- 9.28** A los integrantes de un grupo de 50 personas que acostumbra comprar por Internet se les preguntó cuánto gastaban anualmente en estas compras por Internet. Las respuestas obtenidas se presentan en la tabla 9.7.
- Empleando las ecuaciones del capítulo 9, así como paquetes de software para estadística, encontrar un intervalo de 80% para  $\mu$ , la cantidad media gastada por las personas que compran por Internet.

**Tabla 9.7**

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 418 | 379 | 77  | 212 | 378 |
| 363 | 434 | 348 | 245 | 341 |
| 331 | 356 | 423 | 330 | 247 |
| 351 | 151 | 220 | 383 | 257 |
| 307 | 297 | 448 | 391 | 210 |
| 158 | 310 | 331 | 348 | 124 |
| 523 | 356 | 210 | 364 | 406 |
| 331 | 364 | 352 | 299 | 221 |
| 466 | 150 | 282 | 221 | 432 |
| 366 | 195 | 96  | 219 | 202 |

- 9.29** Una empresa tiene 500 cables. En una prueba realizada a 40 cables tomados en forma aleatoria se encuentra que la resistencia media a la ruptura es 2 400 libras (lb) y la desviación estándar es 150 lb.
- ¿Cuáles son los límites de confianza de 95% y 99% para la estimación de la resistencia media a la ruptura de los 460 cables restantes?
  - Con qué grado de confianza se puede decir que la resistencia media a la ruptura de los 460 cables restantes es 2 400  $\pm$  35 lb?

#### INTERVALOS DE CONFIANZA PARA PROPORCIONES

- 9.30** Una urna contiene canicas rojas y blancas en proporción desconocida. En una muestra aleatoria de 60 canicas tomadas de esta urna, con reposición, se observó que 70% eran rojas. Encontrar límites de confianza de: *a)* 95%, *b)* 99% y *c)* 99.73% para la verdadera proporción de canicas rojas en esta urna.
- 9.31** Se realizó un sondeo con 1 000 personas mayores de 65 años para determinar el porcentaje de la población de este grupo de edad que tiene conexión a Internet. Se encontró que 387 de las 1 000 personas contaban con conexión a Internet. Empleando las ecuaciones dadas en este libro, así como software para estadística, encontrar un intervalo de confianza de 97.5% para  $p$ .
- 9.32** Se cree que los resultados de la elección entre dos candidatos sean muy reñidos. ¿Cuál será la cantidad mínima de votantes que habrá que sondear para tener una confianza de: *a)* 80%, *b)* 90%, *c)* 95% y *d)* 99% para una decisión a favor de cualquiera de los candidatos?

#### INTERVALOS DE CONFIANZA PARA DIFERENCIAS Y SUMAS

- 9.33** Se tienen dos grupos similares de pacientes, *A* y *B*, que constan de 50 y 100 individuos, respectivamente. A las personas del primer grupo se les administra una nueva pastilla para dormir, y a las del segundo, una pastilla convencional. En los pacientes del grupo *A* la media de la cantidad de horas de sueño es 7.82 y la desviación estándar 0.24 h; en los pacientes del grupo *B* la media de la cantidad de horas de sueño es 6.75 y la desviación estándar es 0.30 h. Encontrar los límites de confianza: *a)* de 95% y *b)* de 99% para la diferencia entre las medias de la cantidad de horas de sueño inducido por los dos tipos de pastillas para dormir.
- 9.34** Se realiza un estudio para comparar la duración media de vida de los varones con la de las mujeres. Se toman muestras aleatorias de las páginas del obituario; los datos recolectados se presentan en la tabla 9.8.

Usando los resultados proporcionados en dicha tabla, las ecuaciones presentadas en este libro y un software para estadística, dar un intervalo de confianza de 85% para  $\mu_{\text{VARONES}} - \mu_{\text{MUJERES}}$ .

Tabla 9.8

| Varones |     |     |    |    | Mujeres |    |     |    |    |
|---------|-----|-----|----|----|---------|----|-----|----|----|
| 85      | 53  | 100 | 49 | 65 | 64      | 93 | 82  | 71 | 77 |
| 60      | 51  | 61  | 83 | 65 | 64      | 60 | 75  | 87 | 60 |
| 55      | 99  | 56  | 55 | 55 | 61      | 84 | 91  | 61 | 85 |
| 90      | 72  | 62  | 69 | 59 | 105     | 90 | 59  | 86 | 62 |
| 49      | 72  | 58  | 60 | 68 | 71      | 99 | 98  | 54 | 94 |
| 90      | 74  | 85  | 80 | 77 | 98      | 61 | 108 | 79 | 50 |
| 62      | 65  | 81  | 55 | 71 | 66      | 74 | 60  | 90 | 95 |
| 78      | 49  | 78  | 80 | 75 | 81      | 86 | 65  | 86 | 81 |
| 53      | 82  | 109 | 87 | 78 | 92      | 77 | 82  | 86 | 79 |
| 72      | 104 | 70  | 31 | 50 | 91      | 93 | 63  | 93 | 53 |

- 9.35** Se comparan dos áreas de un país respecto a la proporción de adolescentes con caries. En una de estas áreas se agrega flúor al agua y en la otra no. En la muestra del área en donde no se agrega flúor al agua, 425 de 1 000 adolescentes tienen por lo menos una caries. En la muestra del área en donde sí se agrega flúor al agua, 376 de 1 000 adolescentes tienen por lo menos una caries. Dar un intervalo de confianza de 99% para esta diferencia, en porcentaje, empleando las ecuaciones dadas en este libro, así como un paquete de software para estadística.

#### INTERVALOS DE CONFIANZA PARA DESVIACIONES ESTÁNDAR

- 9.36** La desviación estándar en la resistencia a la ruptura encontrada en 100 cables de una empresa es 180 lb. Dar límites de confianza de: *a)* 95%, *b)* 99% y *c)* 99.73% para la desviación estándar de todos los cables producidos por esta empresa.
- 9.37** Resolver el problema 9.17 empleando SAS.
- 9.38** Resolver el problema 9.18 empleando SAS.

# TEORÍA ESTADÍSTICA DE LA DECISIÓN

10

## DECISIONES ESTADÍSTICAS

En la práctica, con frecuencia se tienen que tomar decisiones acerca de una población con base en información muestral. A tales decisiones se les llama *decisiones estadísticas*. Por ejemplo, tal vez se tenga que decidir, con base en datos muestrales, si determinado suero es realmente eficaz en la curación de una enfermedad, si un método educativo es mejor que otro, o bien si una moneda está alterada o no.

## HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS

Cuando se trata de tomar una decisión es útil hacer suposiciones (o conjeturas) acerca de la población de que se trata. A estas suposiciones, que pueden ser o no ciertas, se les llama *hipótesis estadísticas*. Estas hipótesis estadísticas son por lo general afirmaciones acerca de las distribuciones de probabilidad de las poblaciones.

### Hipótesis nula

En muchas ocasiones se formula una hipótesis estadística con la única finalidad de refutarla o anularla. Por ejemplo, si se quiere decidir si una moneda está cargada o no, se formula la hipótesis de que no está cargada (es decir,  $p = 0.5$ , donde  $p$  es la probabilidad de cara). También, si se quiere decidir si un método es mejor que otro, se formula la hipótesis de que *no hay diferencia* entre los dos (es decir, que cualquier diferencia que se observe se debe sólo a las fluctuaciones del muestreo de una misma población). A estas hipótesis se les llama *hipótesis nula* y se denota  $H_0$ .

### Hipótesis alternativa

A toda hipótesis que difiera de la hipótesis dada se le llama *hipótesis alternativa*. Por ejemplo, si una hipótesis es  $p = 0.5$ , la hipótesis alternativa puede ser  $p = 0.7$ ,  $p \neq 0.5$  o  $p > 0.5$ . La hipótesis alternativa a la hipótesis nula se denota  $H_1$ .

## PRUEBAS DE HIPÓTESIS Y DE SIGNIFICANCIA O REGLAS DE DECISIÓN

Si se supone que una hipótesis es verdadera, pero se encuentra que los resultados que se observan en una muestra aleatoria difieren marcadamente de los resultados esperados de acuerdo con la hipótesis (es decir, esperados con base sólo en la casualidad, empleando la teoría del muestreo), entonces se dice que las diferencias observadas son *significativas* y se estará inclinado a rechazar la hipótesis (o por lo menos a no aceptarla de acuerdo con la evidencia obtenida). Por ejemplo, si en 20 lanzamientos de una moneda se obtienen 16 caras, se estará inclinado a rechazar que la moneda es buena, aun cuando se puede estar equivocado.

A los procedimientos que permiten determinar si las muestras observadas difieren significativamente de los resultados esperados, ayudando así a decidir si se acepta o se rechaza la hipótesis, se les llama *pruebas de hipótesis, pruebas de significancia o reglas de decisión*.

### ERRORES TIPO I Y TIPO II

Si se rechaza una hipótesis que debería aceptarse se dice que se comete un *error tipo I*. Si por otro lado, se acepta una hipótesis que debería rechazarse, se comete un *error tipo II*. En cualquiera de los casos ha habido una decisión errónea o se ha hecho un juicio erróneo.

Para que las reglas de decisión (o pruebas de hipótesis) sean buenas, deben diseñarse de manera que se minimicen los errores de decisión. Esto no es sencillo, ya que para cualquier tamaño dado de muestra, al tratar de disminuir un tipo de error suele incrementarse el otro tipo de error. En la práctica, un tipo de error puede ser más importante que otro y habrá que sacrificar uno con objeto de limitar al más notable. La única manera de reducir los dos tipos de error es aumentando el tamaño de la muestra, lo que no siempre es posible.

### NIVEL DE SIGNIFICANCIA

Cuando se prueba determinada hipótesis, a la probabilidad máxima con la que se está dispuesto a cometer un error tipo I se le llama *nivel de significancia* de la prueba. Esta probabilidad acostumbra denotarse  $\alpha$  y por lo general se especifica antes de tomar cualquier muestra para evitar que los resultados obtenidos influyan sobre la elección del valor de esta probabilidad.

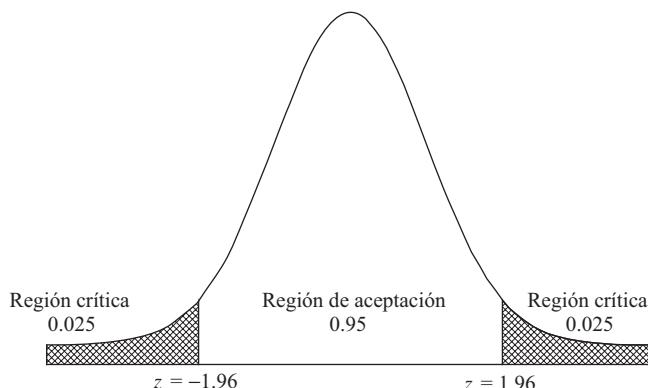
En la práctica, se acostumbran los niveles de significancia 0.05 o 0.01, aunque también se usan otros valores. Si, por ejemplo, al diseñar la regla de decisión se elige el nivel de significancia 0.05 (o bien 5%), entonces existen 5 posibilidades en 100 de que se rechace una hipótesis que debía ser aceptada; es decir, se tiene una *confianza* de aproximadamente 95% de que se ha tomado la decisión correcta. En tal caso se dice que la hipótesis ha sido rechazada al nivel de significancia 0.05, lo que significa que la hipótesis tiene una probabilidad de 0.05 de ser errónea.

### PRUEBAS EMPLEANDO DISTRIBUCIONES NORMALES

Para ilustrar las ideas presentadas antes, supóngase que de acuerdo con determinada hipótesis, la distribución muestral de un estadístico  $S$  es una distribución normal con media  $\mu_S$  y desviación estándar  $\sigma_S$ . Por lo tanto, la distribución de la variable estandarizada (o puntuación  $z$ ), dada por  $z = (S - \mu_S)/\sigma_S$ , es la distribución normal estándar (media 0, varianza 1), que se muestra en la figura 10-1.

Como indica la figura 10-1, se puede tener una confianza del 95% en que si la hipótesis es verdadera, entonces la puntuación  $z$  del estadístico muestral real  $S$  estará entre  $-1.96$  y  $1.96$  (ya que el área bajo la curva normal entre estos dos valores es 0.95). Pero si se toma una sola muestra aleatoria y se encuentra que la puntuación  $z$  del estadístico se encuentra fuera del rango  $-1.96$  a  $1.96$ , se concluye que si la hipótesis dada es verdadera, esto sólo puede ocurrir con una probabilidad de 0.05 (el total del área sombreada en la figura). En tal caso se dice que la puntuación  $z$  difiere en forma *significativa* de lo esperado de acuerdo con la hipótesis dada y se estará inclinado a rechazar esa hipótesis.

El 0.05, que es el total de área sombreada, es el nivel de significancia de la prueba. Esta cantidad representa la probabilidad de estar equivocado al rechazar la hipótesis (es decir, la probabilidad de cometer un error tipo I). Por lo tanto, se dice que la hipótesis *se rechaza al nivel de significancia 0.05* o que la puntuación  $z$  del estadístico muestral dado es *significante al nivel 0.05*.



**Figura 10-1** Curva normal estándar mostrando la *región crítica (0.05)* y la *región de aceptación (0.95)*.

El conjunto de puntuaciones  $z$  que queda fuera del intervalo  $-1.96$  a  $1.96$  constituye lo que se llama *región crítica de la hipótesis*, *región de rechazo de la hipótesis* o *región de significancia*. Al conjunto de puntuaciones  $z$  que queda dentro del intervalo  $-1.96$  a  $1.96$  se le llama *región de aceptación de la hipótesis* o *región de no significancia*.

De acuerdo con las observaciones anteriores, se puede formular la siguiente regla de decisión (o prueba de hipótesis o de significancia):

Rechazar la hipótesis, al nivel de significancia 0.05, si la puntuación  $z$  del estadístico  $S$  se encuentra fuera del rango  $-1.96$  a  $1.96$  (es decir, si  $z > 1.96$  o  $z < -1.96$ ). Esto equivale a decir que el estadístico muestral observado es significante al nivel 0.05.

Si no es así, se acepta la hipótesis (o, si se desea, no se toma ninguna decisión).

Debido a que la puntuación  $z$  es tan importante en las pruebas de hipótesis, también se le conoce como el *estadístico de prueba*.

Hay que hacer notar que también pueden emplearse otros niveles de significancia. Por ejemplo, si se emplea el nivel 0.01, el 1.96, empleado antes se sustituirá por 2.58 (ver la tabla 10.1). También se puede emplear la tabla 9.1, ya que los niveles de significancia y de confianza suman 100%.

**Tabla 10.1**

| Nivel de significancia, $\alpha$                  | 0.10              | 0.05              | 0.01            | 0.005           | 0.002           |
|---|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Valores críticos de $z$ para pruebas de una cola  | -1.28<br>o 1.28   | -1.645<br>o 1.645 | -2.33<br>o 2.33 | -2.58<br>o 2.58 | -2.88<br>o 2.88 |
| Valores críticos de $z$ para pruebas de dos colas | -1.645<br>y 1.645 | -1.96<br>y 1.96   | -2.58<br>y 2.58 | -2.81<br>y 2.81 | -3.08<br>y 3.08 |

## PRUEBAS DE UNA Y DE DOS COLAS

En la prueba anterior interesaban los valores extremos del estadístico  $S$ , o de sus correspondientes puntuaciones  $z$ , a ambos lados de la media (es decir, en las dos colas de la distribución). Por lo tanto, a las pruebas de este tipo se les llama *pruebas bilaterales* o *pruebas de dos colas*.

Sin embargo, hay ocasiones en las que interesan únicamente los valores extremos a un solo lado de la media (es decir, en una sola cola de la distribución); por ejemplo, cuando se prueba si un método es mejor que otro (que es distinto a probar si un método es mejor o peor que otro). A este tipo de pruebas se les llama *pruebas unilaterales* o *pruebas de una cola*. En estos casos la *región crítica* es una *región* en un solo lado de la distribución y su área es igual al nivel de significancia.

La tabla 10.1, en la que se dan los valores críticos de  $z$  tanto para pruebas de una cola como para pruebas de dos colas correspondientes a varios niveles de significancia, se encontrará útil como referencia. Valores críticos de  $z$  para otros niveles de significancia se encuentran en la tabla de áreas de la curva normal (apéndice II).

## PRUEBAS ESPECIALES

Cuando las muestras son grandes, las distribuciones muestrales de muchos estadísticos tienen una distribución normal (o por lo menos aproximadamente normal), y en estas pruebas se puede emplear la correspondiente puntuación  $z$ . Los siguientes casos especiales, tomados de la tabla 8.1, son sólo algunos de los estadísticos de interés práctico. En cada uno de estos casos, el resultado es válido para poblaciones infinitas o cuando el muestreo se hace con reposición. Si el muestreo se hace de poblaciones finitas y sin reposición, es necesario modificar las fórmulas. Ver la página 182.

1. **Media.** Aquí  $S = \bar{X}$ , la media muestral;  $\mu_S = \mu_{\bar{X}} = \mu$ , la media poblacional, y  $\sigma_S = \sigma_{\bar{X}} = \sigma/\sqrt{N}$ , donde  $\sigma$  es la desviación estándar poblacional y  $N$  es el tamaño de la muestra. La puntuación  $z$  está dada por

$$z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{N}}$$

Si es necesario, para estimar  $\sigma$  se emplea la desviación muestral  $s$  o  $\hat{s}$ .

2. **Proporciones.** Aquí  $S = P$ , la proporción de “éxitos” en una muestra;  $\mu_S = \mu_P = p$ , donde  $p$  es la proporción poblacional de éxitos y  $N$  es el tamaño de la muestra, y  $\sigma_S = \sigma_P = \sqrt{pq/N}$ , donde  $q = 1 - p$ .

La puntuación  $z$  está dada por

$$z = \frac{P - p}{\sqrt{pq/N}}$$

En el caso de  $P = X/N$ , donde  $X$  = cantidad de éxitos obtenidos realmente en una muestra, la puntuación  $z$  se transforma en

$$z = \frac{X - Np}{\sqrt{Npq}}$$

Es decir,  $\mu_X = \mu = Np$ ,  $\sigma_X = \sigma = \sqrt{Npq}$  y  $S = X$ .

Las fórmulas para otros estadísticos se pueden obtener de manera similar.

## CURVA CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN; POTENCIA DE UNA PRUEBA

Se ha visto cómo limitar el error tipo I eligiendo de manera adecuada el nivel de significancia. Para evitar totalmente cometer un error tipo II, simplemente no hay que cometerlo, que es lo mismo que no aceptar ninguna hipótesis. Sin embargo, en la práctica esto no es posible. Entonces lo que se hace es emplear las *curvas características de operación* o *curvas OC*, que son curvas que muestran la probabilidad de cometer un error tipo II bajo diversas hipótesis. Estas curvas proporcionan indicaciones de qué tan bien permite una prueba determinada minimizar los errores tipo II; es decir, indican la *potencia de una prueba* para evitar que se cometan errores de decisión. Estas curvas son útiles en el diseño de experimentos, ya que muestran informaciones como qué tamaño de muestra emplear.

## VALOR $p$ EN PRUEBAS DE HIPÓTESIS

El valor  $p$  es la probabilidad de obtener un estadístico muestral tan extremo o más extremo que el obtenido, suponiendo que la hipótesis nula sea verdadera. Para probar una hipótesis empleando este método se establece un valor  $\alpha$ ; se

calcula el valor  $p$  y si el valor  $p \leq \alpha$ , se rechaza  $H_0$ . En caso contrario, no se rechaza  $H_0$ . En pruebas para medias empleando muestras grandes ( $n > 30$ ), el valor  $p$  se calcula como sigue:

1. Para  $H_0: \mu = \mu_0$  y  $H_1: \mu < \mu_0$ , valor  $p = P(Z < \text{el estadístico de prueba calculado})$ .
2. Para  $H_0: \mu = \mu_0$  y  $H_1: \mu > \mu_0$ , valor  $p = P(Z > \text{el estadístico de prueba calculado})$ .
3. Para  $H_0: \mu = \mu_0$  y  $H_1: \mu \neq \mu_0$ , valor  $p = P(|Z| > |\text{el estadístico de prueba calculado}|) + P(|Z| < -|\text{el estadístico de prueba calculado}|)$ .

El estadístico de prueba calculado es  $\frac{\bar{x} - \mu_0}{(s/\sqrt{n})}$ , donde  $\bar{x}$  es la media de la muestra,  $s$  es la desviación estándar de la muestra y  $\mu_0$  es el valor que se ha especificado para  $\mu$  en la hipótesis nula. Obsérvese que  $\sigma$  no se conoce, se estima a partir de la muestra y se usa  $s$ . Este método para pruebas de hipótesis es equivalente al método de hallar el o los valores críticos y si el estadístico de prueba cae en la región de rechazo, rechazar la hipótesis nula. Usando cualquiera de estos métodos se llega a la misma decisión.

## GRÁFICAS DE CONTROL

En la práctica suele ser importante darse cuenta cuándo un proceso ha cambiado lo suficiente como para que se deban tomar medidas para remediar la situación. Estos problemas surgen, por ejemplo, en el control de calidad. Los supervisores de control de calidad deben decidir si los cambios observados se deben sólo a fluctuaciones casuales o a verdaderos cambios en el proceso de fabricación debidos al deterioro de las máquinas, a los empleados, a errores, etc. Las *gráficas de control* proporcionan un método útil y sencillo para tratar tales problemas (ver problema 10.16).

## PRUEBAS PARA DIFERENCIAS MUESTRALES

### Diferencias entre medias

Sean  $\bar{X}_1$  y  $\bar{X}_2$  las medias muestrales de muestras grandes de tamaños  $N_1$  y  $N_2$  obtenidas de poblaciones cuyas medias son  $\mu_1$  y  $\mu_2$  y cuyas desviaciones estándar son  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , respectivamente. Considérese la hipótesis nula de que *no hay diferencia* entre las dos medias poblacionales (es decir,  $\mu_1 = \mu_2$ ), lo cual es equivalente a decir que las muestras se han tomado de dos poblaciones que tienen la misma media.

Haciendo  $\mu_1 = \mu_2$  en la ecuación (5) del capítulo 8 se ve que la distribución muestral de las diferencias entre las medias es aproximadamente normal con media y desviación estándar dadas por

$$\mu_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = 0 \quad \text{y} \quad \sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}} \quad (I)$$

donde, si es necesario, se pueden usar las desviaciones estándar muestrales  $s_1$  y  $s_2$  (o  $\hat{s}_1$  y  $\hat{s}_2$ ) como estimaciones de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ .

Empleando la variable estandarizada, o puntuación  $z$ , dada por

$$z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - 0}{\sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}} \quad (2)$$

se puede probar la hipótesis nula contra la hipótesis alternativa (o la significancia de la diferencia observada) a un nivel de significancia apropiado.

### Diferencias entre proporciones

Sean  $P_1$  y  $P_2$  las proporciones muestrales de muestras grandes de tamaños  $N_1$  y  $N_2$  obtenidas de poblaciones cuyas proporciones son  $p_1$  y  $p_2$ . Considérese la hipótesis nula de que *no hay diferencia* entre estos parámetros poblacionales (es decir,  $p_1 = p_2$ ) y que por lo tanto las muestras se han obtenido realmente de la misma población.

Haciendo, en la ecuación (6) del capítulo 8,  $p_1 = p_2 = p$ , se ve que la distribución muestral de las diferencias entre las proporciones es aproximadamente normal, y que su media y su desviación estándar están dadas por

$$\mu_{P_1 - P_2} = 0 \quad \text{y} \quad \sigma_{P_1 - P_2} = \sqrt{pq\left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}\right)} \quad (3)$$

donde  $p = \frac{N_1 P_1 + N_2 P_2}{N_1 + N_2}$

se usa como estimación de la proporción poblacional y donde  $q = 1 - p$ .

Empleando la variable estandarizada

$$z = \frac{P_1 - P_2 - 0}{\sigma_{P_1 - P_2}} = \frac{P_1 - P_2}{\sigma_{P_1 - P_2}} \quad (4)$$

se puede probar la diferencia observada a nivel de significancia apropiado y con esto probar la hipótesis nula.

Se pueden hacer pruebas con otros estadísticos de manera similar.

## PRUEBAS EMPLEANDO DISTRIBUCIONES BINOMIALES

Las pruebas en las que se usen distribuciones binomiales (así como otras distribuciones) pueden hacerse de manera análoga a las pruebas en las que se emplean distribuciones normales; el principio básico es esencialmente el mismo. Ver los problemas del 10.23 al 10.28.

## PROBLEMAS RESUELTOS

### PRUEBAS DE MEDIAS Y PROPORCIONES EMPLEANDO DISTRIBUCIONES NORMALES

- 10.1** Encontrar la probabilidad de obtener entre 40 y 60 caras inclusive en 100 lanzamientos de una moneda que no esté cargada.

#### SOLUCIÓN

De acuerdo con la probabilidad binomial, la probabilidad buscada es

$$\binom{100}{40} \left(\frac{1}{2}\right)^{40} \left(\frac{1}{2}\right)^{60} + \binom{100}{41} \left(\frac{1}{2}\right)^{41} \left(\frac{1}{2}\right)^{59} + \cdots + \binom{100}{60} \left(\frac{1}{2}\right)^{60} \left(\frac{1}{2}\right)^{40}$$

Como tanto  $Np = 100(\frac{1}{2})$  como  $Nq = 100(\frac{1}{2})$  son mayores que 5, para evaluar esta suma puede emplearse la aproximación normal a la distribución binomial. La media y la desviación estándar de la cantidad de caras en 100 lanzamientos están dadas por

$$\mu = Np = 100(\frac{1}{2}) = 50 \quad \text{y} \quad \sigma = \sqrt{Npq} = \sqrt{(100)(\frac{1}{2})(\frac{1}{2})} = 5$$

En una escala continua, entre 40 y 60 caras corresponden a entre 39.5 y 60.5 caras. Por lo tanto, se tiene

$$39.5 \text{ en unidades estándar} = \frac{39.5 - 50}{5} = -2.10 \quad 60.5 \text{ en unidades estándar} = \frac{60.5 - 50}{5} = 2.10$$

$$\begin{aligned} \text{Probabilidad buscada} &= \text{área bajo la curva normal entre } z = -2.10 \text{ y } z = 2.10 \\ &= 2(\text{área entre } z = 0 \text{ y } z = 2.10) = 2(0.4821) = 0.9642. \end{aligned}$$

- 10.2** Para probar la hipótesis de que una moneda no está cargada se adopta la siguiente regla de decisión:

Aceptar la hipótesis si el número de caras de una sola muestra de 100 lanzamientos está entre 40 y 60 inclusive.

Rechazar la hipótesis si no es así.

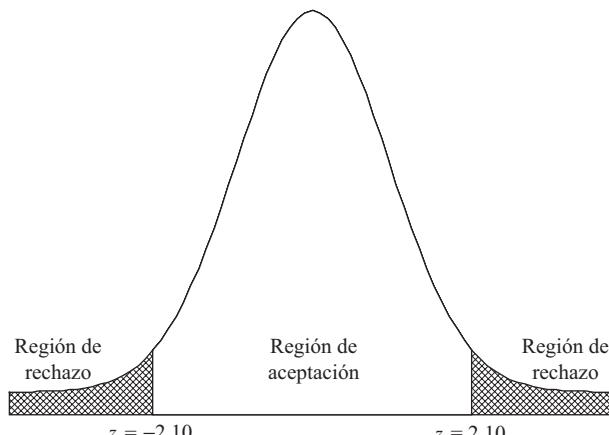
- Encontrar la probabilidad de rechazar la hipótesis en caso de que en realidad sea correcta.
- Graficar la regla de decisión y el resultado del inciso a).
- ¿A qué conclusión se llega si en la muestra de 100 lanzamientos se obtienen 53 caras? ¿Y si se obtienen 60 caras?
- ¿Puede estar equivocada la conclusión obtenida en el inciso c)?

### SOLUCIÓN

- De acuerdo con el problema 10.1, la probabilidad de que no se obtengan entre 40 y 60 caras inclusive si la moneda no está cargada es  $1 - 0.9642 = 0.0358$ . Por lo tanto, la probabilidad de rechazar la hipótesis (nula) cuando en realidad sea correcta es 0.0358.
- En la figura 10.2 se ilustra la regla de decisión. Se muestra la distribución de probabilidad para la obtención de caras en 100 lanzamientos de una moneda no cargada. Si en una sola muestra de 100 lanzamientos se obtiene una puntuación  $z$  entre  $-2.10$  y  $2.10$ , se acepta la hipótesis; si no es así, se rechaza la hipótesis y se concluye que la moneda está cargada.

El error que se comete si se rechaza la hipótesis cuando en realidad deba aceptarse es el *error tipo I* de la regla de decisión, y la probabilidad de cometer este error es igual a 0.0358, de acuerdo con el inciso a); este error está representado por el total del área sombreada de la figura. Si en una sola muestra de 100 lanzamientos se obtiene una cantidad de caras cuya puntuación  $z$  (o estadístico  $z$ ) se encuentra en la región sombreada, se dice que la puntuación  $z$  difiere de manera *significativa* de lo que se esperaría si la hipótesis fuera verdadera. Es por esta razón que a la región sombreada (es decir, a la probabilidad de cometer un error tipo I) se le conoce como *nivel de significancia* de la regla de decisión, que en este caso es igual a 0.0358. Por lo tanto, se habla de rechazo de la hipótesis a nivel de significancia 0.0358 (o 3.58%).

- De acuerdo con la regla de decisión, en ambos casos debe aceptarse la hipótesis de que la moneda no está cargada. Puede argumentarse que bastará que se obtenga una cara más para que se rechace la hipótesis. Esto es a lo que se enfrenta cuando se emplea una clara línea divisoria para tomar una decisión.
- Sí. Tal vez se acepte la hipótesis cuando en realidad debería haberse rechazado, que sería el caso, por ejemplo, si la probabilidad de cara fuera en realidad 0.7 en lugar de 0.5. El error que se comete al aceptar una hipótesis que debería rechazarse es un *error tipo II* de la decisión.



**Figura 10-2** Curva normal estándar en la que se muestran las regiones de aceptación y de rechazo para probar que una moneda no está cargada.

- 10.3** Empleando la distribución binomial y no la aproximación normal a la distribución binomial, diseñar una regla de decisión para probar la hipótesis de que una moneda no está cargada si se emplea una muestra de 64 lanzamientos y se usa como nivel de significancia 0.05. Usar MINITAB como ayuda para encontrar la solución.

### SOLUCIÓN

En la figura 10-3 se presenta la gráfica de probabilidades binomiales cuando una moneda no cargada se lanza 64 veces. Abajo de la figura 10-3 se presentan las probabilidades acumuladas generadas con MINITAB.

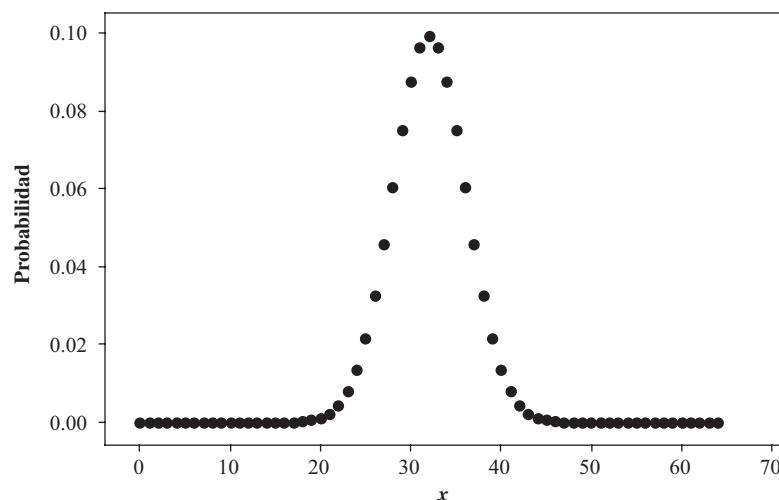


Figura 10-3 MINITAB, gráfica de la distribución binomial correspondiente a  $n = 64$  y  $p = 0.5$ .

| x  | Probabilidad | Acumulada | x  | Probabilidad | Acumulada |
|----|--------------|-----------|----|--------------|-----------|
| 0  | 0.0000000    | 0.0000000 | 13 | 0.0000007    | 0.0000009 |
| 1  | 0.0000000    | 0.0000000 | 14 | 0.0000026    | 0.0000035 |
| 2  | 0.0000000    | 0.0000000 | 15 | 0.0000086    | 0.0000122 |
| 3  | 0.0000000    | 0.0000000 | 16 | 0.0000265    | 0.0000387 |
| 4  | 0.0000000    | 0.0000000 | 17 | 0.0000748    | 0.0001134 |
| 5  | 0.0000000    | 0.0000000 | 18 | 0.0001952    | 0.0003087 |
| 6  | 0.0000000    | 0.0000000 | 19 | 0.0004727    | 0.0007814 |
| 7  | 0.0000000    | 0.0000000 | 20 | 0.0010636    | 0.0018450 |
| 8  | 0.0000000    | 0.0000000 | 21 | 0.0022285    | 0.0040735 |
| 9  | 0.0000000    | 0.0000000 | 22 | 0.0043556    | 0.0084291 |
| 10 | 0.0000000    | 0.0000000 | 23 | 0.0079538    | 0.0163829 |
| 11 | 0.0000000    | 0.0000001 | 24 | 0.0135877    | 0.0299706 |
| 12 | 0.0000002    | 0.0000002 | 25 | 0.0217403    | 0.0517109 |

Como se ve,  $P(X \leq 23) = 0.01638$ . Como la distribución es simétrica, se sabe también que  $P(X \geq 41) = 0.01638$ . La región de rechazo  $\{X \leq 23 \text{ y } X \geq 41\}$  tiene la probabilidad  $2(0.01638) = 0.03276$ . La región de rechazo  $\{X \leq 24 \text{ y } X \geq 40\}$  es mayor que 0.05. Cuando se usa una distribución binomial no se puede tener una región de rechazo exactamente igual a 0.05. Lo más cercano a 0.05 que se puede tener, sin que se tenga una probabilidad mayor a este valor, es 0.03276.

Resumiendo, la moneda se lanza 64 veces. Se declarará que está cargada, o no equilibrada, si se obtienen 23 o menos, o 41 o más caras. La posibilidad de cometer un error tipo I es 0.03276, que es lo más cerca que se puede estar de 0.05, sin sobrepasar este valor.

- 10.4** Volver al problema 10.3. Usando la distribución binomial, no la aproximación normal a la distribución binomial, diseñar una regla de decisión para probar la hipótesis de que la moneda no está cargada empleando una mues-

tra de 64 lanzamientos de la moneda y un nivel de significancia de 0.05. Emplear EXCEL como ayuda para dar la solución.

### SOLUCIÓN

En la columna A de la hoja de cálculo de EXCEL se ingresan los resultados 0 a 64. Las expresiones  $=BINOMDIST(A1,64,0.5,0)$  y  $=BINOMDIST(A1,64,0.5,1)$  se emplean para obtener la distribución binomial y la distribución binomial acumulada. El 0, que aparece como cuarto parámetro, indica que se requieren probabilidades individuales, y el 1 indica que se desean las probabilidades acumuladas. Haciendo clic y arrastrando en la columna B se obtienen las probabilidades individuales y haciendo clic y arrastrando en la columna C se obtienen las probabilidades acumuladas.

| A  | B            | C           | A  | B            | C           |
|----|--------------|-------------|----|--------------|-------------|
| x  | Probabilidad | Acumulada   | x  | Probabilidad | Acumulada   |
| 0  | 5.42101E-20  | 5.42101E-20 | 13 | 7.12151E-07  | 9.40481E-07 |
| 1  | 3.46945E-18  | 3.52366E-18 | 14 | 2.59426E-06  | 3.53474E-06 |
| 2  | 1.09288E-16  | 1.12811E-16 | 15 | 8.64754E-06  | 1.21823E-05 |
| 3  | 2.25861E-15  | 2.37142E-15 | 16 | 2.64831E-05  | 3.86654E-05 |
| 4  | 3.44438E-14  | 3.68152E-14 | 17 | 7.47758E-05  | 0.000113441 |
| 5  | 4.13326E-13  | 4.50141E-13 | 18 | 0.000195248  | 0.000308689 |
| 6  | 4.06437E-12  | 4.51451E-12 | 19 | 0.000472706  | 0.000781395 |
| 7  | 3.36762E-11  | 3.81907E-11 | 20 | 0.001063587  | 0.001844982 |
| 8  | 2.39943E-10  | 2.78134E-10 | 21 | 0.002228469  | 0.004073451 |
| 9  | 1.49298E-09  | 1.77111E-09 | 22 | 0.004355644  | 0.008429095 |
| 10 | 8.21138E-09  | 9.98249E-09 | 23 | 0.007953785  | 0.01638288  |
| 11 | 4.03104E-08  | 5.02929E-08 | 24 | 0.013587715  | 0.029970595 |
| 12 | 1.78038E-07  | 2.28331E-07 | 25 | 0.021740344  | 0.051710939 |

Se encuentra, como en el problema 10.3, que  $P(X \leq 23) = 0.01638$  y debido a la simetría,  $P(X \geq 41) = 0.01638$ , y que la región de rechazo es  $\{X \leq 23 \text{ o } X \geq 41\}$  y el nivel de significancia es  $0.01638 + 0.01638$  o bien 0.03276.

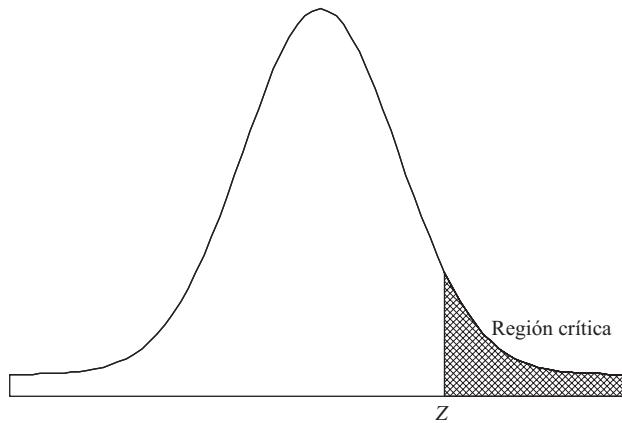


Figura 10-4 Determinación del valor Z que dará una región crítica igual a 0.05.

- 10.5** Se realiza un experimento de percepción extrasensorial (PES) en el que se pide a un individuo que está en una habitación que adivine el color (rojo o verde) de una carta extraída de un juego de 50 cartas bien mezcladas por una persona en otra habitación. El individuo no sabe cuántas cartas rojas o verdes hay en ese conjunto de cartas. Si este individuo identifica 32 cartas correctamente, determinar si los resultados son significativos al nivel: a) 0.05 y b) 0.01.

## SOLUCIÓN

Si  $p$  es la probabilidad de que la persona elija correctamente el color de la carta, entonces hay que decidir entre las dos hipótesis:

$H_0: p = 0.5$ , el individuo simplemente está adivinando (es decir, el resultado se debe a la casualidad).

$H_1: p > 0.5$ , la persona tiene PES.

Como lo que interesa no es la habilidad de la persona para obtener puntuaciones extremadamente bajas, sino sólo su habilidad para obtener puntuaciones altas, se elige una prueba de una cola. Si la hipótesis  $H_0$  es verdadera, entonces la media y la desviación estándar de la cantidad de cartas identificadas correctamente están dadas por

$$\mu = Np = 50(0.5) = 25 \quad \text{y} \quad \sigma = \sqrt{Npq} = \sqrt{50(0.5)(0.5)} = \sqrt{12.5} = 3.54$$

- a) Como se trata de una prueba de una cola con nivel de significancia 0.05, en la figura 10-4 se debe elegir  $z$  de manera que el área sombreada, en la región crítica de puntuaciones altas, sea 0.05. El área entre 0 y  $z$  será 0.4500 y  $z = 1.645$ ; este valor también se puede leer en la tabla 10.1. Por lo tanto, la regla de decisión (o prueba de significancia) es:

Si la puntuación  $z$  observada es mayor a 1.645, los resultados son significativos al nivel 0.05 y la persona tiene poderes extrasensoriales.

Si la puntuación  $z$  es menor a 1.645, los resultados se deben a la casualidad (es decir, no son significativos al nivel 0.05).

Como 32 en unidades estándar  $(32 - 25)/3.54 = 1.98$ , lo cual es mayor a 1.645, se concluye, al nivel 0.05, que la persona tiene poderes extrasensoriales.

Obsérvese que en realidad debe aplicarse la corrección por continuidad, ya que 32 en una escala continua está entre 31.5 y 32.5. Sin embargo, la puntuación estándar correspondiente a 31.5 es  $(31.5 - 25)/3.54 = 1.84$ , con lo que se llega a la misma conclusión.

- b) Si el nivel de significancia es 0.01, entonces el área entre 0 y  $z$  es 0.4900, de donde se concluye que  $z = 2.33$ .

Como 32 (o 31.5) en unidades estándar es 1.98 (o 1.84), que es menor a 2.33, se concluye que los resultados *no son significativos* al nivel 0.01.

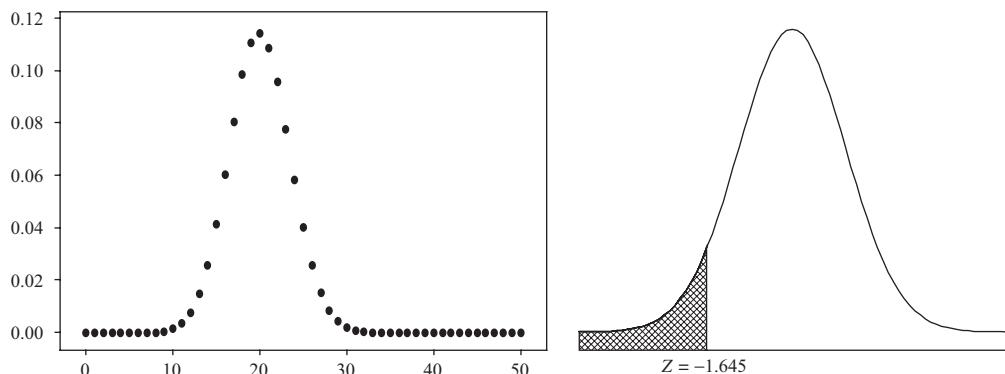
Algunos especialistas en estadística adoptan la siguiente terminología: resultados significativos al nivel 0.01 son *altamente significativos*; resultados significativos al nivel 0.05, pero no al nivel 0.01, son *probablemente significativos*, y resultados significativos a niveles mayores a 0.05 *no son significativos*. De acuerdo con esta terminología se concluye que los resultados experimentales anteriores son *probablemente significativos*, de manera que será necesario hacer más investigaciones acerca del fenómeno.

Como los niveles de significancia sirven de guía en la toma de decisiones, algunos especialistas en estadística dan las probabilidades empleadas. Por ejemplo, como en este problema,  $\Pr\{z \geq 1.84\} = 0.0322$ , un especialista en estadística dirá que con base en el experimento, las posibilidades de estar equivocado al concluir que la persona tiene poderes extrasensoriales son aproximadamente 3 en 100. A la probabilidad que se da (0.0322 en este caso) se le conoce como valor  $p$  de la prueba.

- 10.6** Se asegura que 40% de las personas que hacen sus declaraciones de impuestos, las hacen empleando algún software para impuestos. En una muestra de 50 personas, 14 emplearon software para hacer su declaración de impuestos. Probar  $H_0: p = 0.4$  versus  $H_a: p < 0.4$  a  $\alpha = 0.05$ , donde  $p$  es la proporción poblacional de los que emplean software para hacer su declaración de impuestos. Haga la prueba empleando la distribución binomial y también empleando la aproximación normal a la distribución binomial.

## SOLUCIÓN

Si se emplea la prueba exacta  $H_0: p = 0.4$  versus  $H_a: p < 0.4$  a  $\alpha = 0.05$ , la hipótesis nula se rechaza si  $X \leq 15$ . A esta región se le llama la región de rechazo. Si se emplea la prueba basada en la aproximación normal a la binomial, la hipótesis nula se rechaza si  $Z < -1.645$  y a esta región se le llama la región de rechazo. A  $X = 14$  se le llama estadístico de prueba. El estadístico de prueba binomial está en la región de rechazo y la hipótesis nula se rechaza. Usando la aproximación normal, el estadístico de prueba es  $z = \frac{14 - 20}{3.46} = -1.73$ . El verdadero valor de  $\alpha$  es 0.054 y la región de rechazo es  $X \leq 15$  y se emplea la probabilidad binomial acumulada  $P(X \leq 15)$ . Empleando la aproximación normal también se rechazaría la hipótesis nula, ya que  $z = -1.73$  está en la región de rechazo que es  $Z < -1.645$ . Obsérvese que si se usa la distribución binomial para realizar la prueba, el estadístico de prueba tiene una distribución binomial. Si se emplea la distribución normal, el estadístico de prueba,  $Z$ , tiene una distribución normal estándar.



**Figura 10-5 Comparación entre la prueba exacta a la izquierda (binomial) y la prueba aproximada a la derecha (normal estándar).**

- 10.7** El valor  $p$  en una prueba de hipótesis se define como el menor nivel de significancia al cual se rechaza la hipótesis nula. En este problema se ilustra el cálculo del valor  $p$  para un estadístico de prueba. Usar los datos del problema 9.6 para probar la hipótesis nula de que la altura media de los árboles es igual a 5 pies (ft) contra la hipótesis alternativa de que la altura media es menor a 5 ft. Encontrar el valor  $p$  de esta prueba.

### SOLUCIÓN

El valor encontrado para  $z$  es  $z = (59.22 - 60)/1.01 = -0.77$ . El menor nivel de significancia al que se rechaza la hipótesis nula es el valor  $p = P(z < -0.77) = 0.5 - 0.2794 = 0.2206$ . La hipótesis nula se rechaza si el valor  $p$  es menor al nivel de significancia preestablecido. En este problema, si el nivel de significancia preestablecido es 0.05, no se rechaza la hipótesis nula. A continuación se presenta la solución que da MINITAB, donde el comando Alternative-1 indica que se trata de una prueba de la cola inferior.

```
MTB> ZTest mean = 60 sd = 10.111 data in c1 ;
SUBC>Alternative -1
```

### Prueba Z

```
Test of mu = 60.00 vs mu < 60.00
The assumed sigma = 10.1
```

| Variable | N   | Mean  | StDev | SE Mean | Z     | P    |
|----------|-----|-------|-------|---------|-------|------|
| height   | 100 | 59.22 | 10.11 | 1.01    | -0.77 | 0.22 |

- 10.8** Se toma una muestra de 33 personas que escuchan radio y se determina la cantidad de horas, por semana, que escuchan la radio. Los datos son los siguientes.

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |   |    |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|----|---|---|---|---|---|
| 9 | 8 | 7 | 4 | 8 | 6 | 8 | 8 | 7 | 10 | 8 | 10 | 6 | 7 | 7 | 8 | 9 |
| 6 | 5 | 8 | 5 | 6 | 8 | 7 | 8 | 5 | 5  | 8 | 7  | 6 | 6 | 4 | 5 |   |

Probar, de las siguientes tres maneras equivalentes, la hipótesis nula  $\mu = 5$  horas (h) contra la hipótesis alternativa  $\mu \neq 5$  h al nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ :

- Calcular el valor del estadístico de prueba y compararlo con el valor crítico correspondiente a  $\alpha = 0.05$ .
- Calcular el valor  $p$  del estadístico de prueba encontrado y comparar este valor  $p$  con  $\alpha = 0.05$ .
- Calcular el intervalo de confianza  $1 - \alpha = 0.95$  para  $\mu$  y determinar si 5 cae dentro de este intervalo.

## SOLUCIÓN

En el siguiente resultado de MINITAB se halla, primero, la desviación estándar y después se emplea en las declaraciones Ztest y Zinterval.

```
MTB > standard deviation cl
Standard deviation of hours = 1.6005

MTB > ZTest 5.01.6005 'hours' ;
SUBC> Alternative 0.
```

### Prueba Z

```
Test of mu = 5.000 vs mu not = 5.000
The assumed sigma = 1.60
```

| Variable | N  | Mean  | StDev | SE Mean | Z           | P             |
|----------|----|-------|-------|---------|-------------|---------------|
| hours    | 33 | 6.897 | 1.600 | 0.279   | <b>6.81</b> | <b>0.0000</b> |

```
MTB > ZInterval 95.01.6005 'hours'
Variable      N      Mean      StDev      SE Mean      95.0 % CI
hours        33     6.897     1.600     0.279      ( 6.351, 7.443)
```

- a) El valor calculado para el estadístico de prueba es  $Z = \frac{6.897 - 5}{0.279} = 6.81$ , los valores críticos son  $\pm 1.96$ , y la hipótesis nula se rechaza. Obsérvese que éste es el valor encontrado que aparece en el resultado de MINITAB.
- b) El valor  $p$  encontrado, de acuerdo con los resultados de MINITAB, es 0.0000, por lo tanto, el valor  $p < \alpha = 0.05$ , la hipótesis nula se rechaza.
- c) Como el valor especificado por la hipótesis nula, 5, no está contenido en el intervalo de confianza de 95% para  $\mu$ , la hipótesis nula se rechaza.

Estos tres procedimientos para probar una hipótesis nula contra una de hipótesis alternativa de dos colas son equivalentes.

- 10.9** La resistencia a la ruptura de los cables fabricados por una empresa tiene media de 1 800 libras (lb) y desviación estándar de 100 lb. Se asegura que mediante una nueva técnica puede aumentarse la resistencia a la ruptura. Para probar esto, se prueba una muestra de 50 cables y se encuentra que su resistencia media a la ruptura es 1 850 lb. ¿Puede apoyarse, a nivel de significancia 0.01, la aseveración hecha antes?

## SOLUCIÓN

Se tiene que decidir entre las dos hipótesis siguientes:

$$H_0: \mu = 1800 \text{ lb, en realidad no hay cambio en la resistencia a la ruptura.}$$

$$H_1: \mu > 1800 \text{ lb, sí hay cambio en la resistencia a la ruptura.}$$

Por lo tanto, se debe usar una prueba de una cola; el diagrama correspondiente a esta prueba es idéntico al de la figura 10-4 del problema 10.5a). A nivel de significancia 0.01, la regla de decisión es:

Si la puntuación  $z$  observada es mayor a 2.33, los resultados son significativos a nivel de significancia 0.01 y  $H_0$  se rechaza.

Si no es así,  $H_0$  se acepta (o la decisión se aplaza).

Bajo la hipótesis de que  $H_0$  es verdadera, se encuentra que

$$z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{N}} = \frac{1850 - 1800}{100/\sqrt{50}} = 3.55$$

que es mayor a 2.33. Por lo tanto, se concluye que los resultados son *altamente significativos* y que la aseveración hecha puede apoyarse.

## VALORES $p$ PARA PRUEBAS DE HIPÓTESIS

- 10.10** A un grupo de 50 compradores se le preguntó cuánto gastaba anualmente en sus compras por Internet. En la tabla 10.2 se muestran las respuestas. Se desea probar que gastan \$325 por año contra una cantidad diferente a \$325. Encontrar el valor  $p$  para la prueba de hipótesis. ¿A qué conclusión se llega empleando  $\alpha = 0.05$ ?

Tabla 10.2

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 418 | 379 | 77  | 212 | 378 |
| 363 | 434 | 348 | 245 | 341 |
| 331 | 356 | 423 | 330 | 247 |
| 351 | 151 | 220 | 383 | 257 |
| 307 | 297 | 448 | 391 | 210 |
| 158 | 310 | 331 | 348 | 124 |
| 523 | 356 | 210 | 364 | 406 |
| 331 | 364 | 352 | 299 | 221 |
| 466 | 150 | 282 | 221 | 432 |
| 366 | 195 | 96  | 219 | 202 |

## SOLUCIÓN

La media de estos datos es 304.60, la desviación estándar es 101.51, el estadístico de prueba obtenido es

$$z = \frac{304.60 - 325}{101.50/\sqrt{50}} = -1.43.$$

El estadístico  $Z$  tiene aproximadamente una distribución normal estándar. El valor  $p$  calculado es el siguiente  $P(Z < -1.43)$  o  $P(Z > 1.43)$ . La respuesta puede hallarse usando el apéndice II o usando EXCEL. Mediante EXCEL, el valor  $p = 2*\text{NORMDIST}(-1.43) = 0.1527$ , dado que la curva normal es simétrica y las áreas a la izquierda de  $-1.43$  y a la derecha de  $1.43$  son iguales, se puede simplemente duplicar en el área a la izquierda de  $-1.43$ . Como el valor  $p$  es menor a 0.05, no se rechaza la hipótesis nula. En la figura 10.6 se muestra gráficamente el valor  $p$  calculado en este problema.

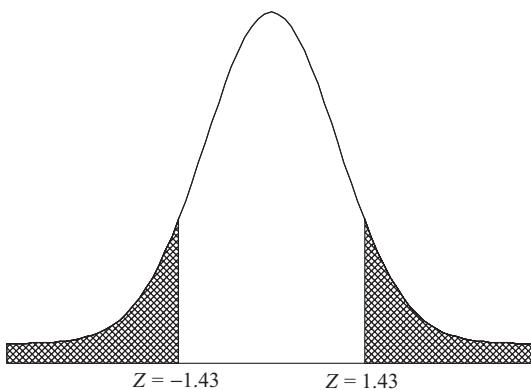


Figura 10-6 El valor  $p$  es la suma del área a la izquierda de  $Z = -1.43$  más que el área a la derecha de  $Z = 1.43$ .

- 10.11** Volver al problema 10.10. Para analizar los datos usar el software para estadística de MINITAB. Obsérvese que el software da el valor  $p$  y al usuario se le deja la decisión respecto a la hipótesis de acuerdo con el valor que le haya asignado a  $\alpha$ .

## SOLUCIÓN

Con la secuencia “**Stat ⇒ Basic statistics ⇒ 1 sample Z**” se obtiene el análisis siguiente. El software calcula para el usuario el estadístico de prueba y el valor  $p$ .

### Muestra uno Z: cantidad

```
Test of mu = 325 vs not = 325
The assumed standard deviation = 101.51
```

| Variable | N  | Mean    | StDev   | SE Mean | Z     | P     |
|----------|----|---------|---------|---------|-------|-------|
| Amount   | 50 | 304.460 | 101.508 | 14.356  | -1.43 | 0.152 |

Obsérvese que el software proporciona el valor del estadístico de prueba ( $-1.43$ ) y el valor  $p$  ( $0.152$ ).

- 10.12** En la tabla 10.3 se muestran los resultados de un estudio sobre individuos que emplean la computadora para hacer sus declaraciones de impuestos. Los datos de la tabla dan el tiempo que necesitan para hacer su declaración. La hipótesis nula es  $H_0: \mu = 8.5$  horas contra la hipótesis alternativa, que es  $H_1: \mu < 8.5$ . Encontrar el valor  $p$  de esta prueba de hipótesis. ¿A qué conclusión llega empleando  $\alpha = 0.05$ ?

**Tabla 10.3**

|      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|
| 6.2  | 4.8  | 8.9  | 5.6  | 6.5  |
| 11.5 | 8.6  | 6.2  | 8.5  | 5.2  |
| 2.7  | 14.9 | 11.2 | 6.9  | 7.9  |
| 4.8  | 9.5  | 12.4 | 9.7  | 10.7 |
| 8.0  | 11.8 | 7.4  | 9.1  | 4.9  |
| 9.1  | 6.4  | 9.5  | 7.6  | 6.7  |
| 2.6  | 3.5  | 6.4  | 4.3  | 7.9  |
| 3.3  | 10.3 | 3.2  | 11.5 | 1.7  |
| 10.4 | 8.5  | 10.8 | 6.9  | 5.3  |
| 4.9  | 4.4  | 9.4  | 5.6  | 7.0  |

## SOLUCIÓN

La media de los datos que se presentan en la tabla 10.3 es 7.42 h, la desviación estándar es 2.91 h y el estadístico de prueba calculado es  $Z = \frac{7.42 - 8.5}{2.91/\sqrt{50}} = -2.62$ . El estadístico Z tiene aproximadamente la distribución normal estándar. Con la secuencia de MINITAB “**Calc ⇒ Probability distribution ⇒ Normal**” se obtiene el cuadro de diálogo que se muestra en la figura 10-7. El cuadro de diálogo se llena como se indica.

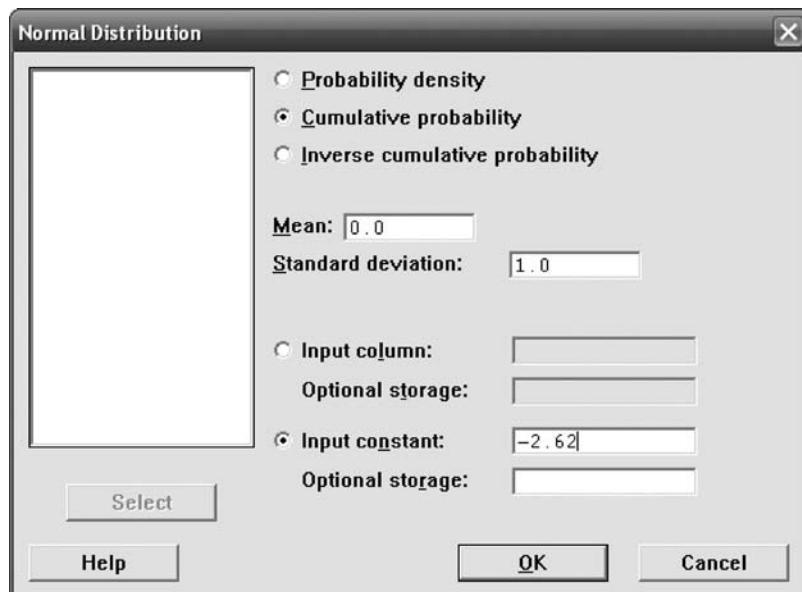
Los resultados que da el cuadro de diálogo de la figura 10-7 son los siguientes:

### Función de distribución acumulada

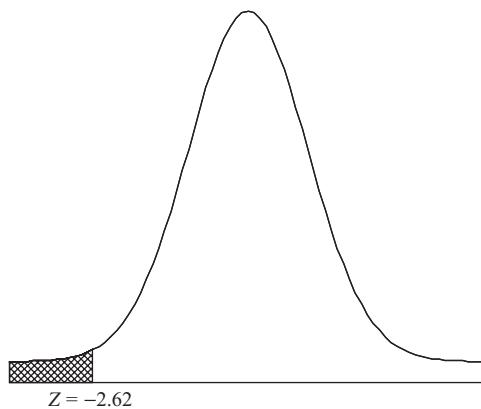
```
Normal with mean = 0 and standard deviation = 1

x      P ( X<=x)
-2.62  0.0043965
```

El valor  $p$  es 0.0044 y como el valor  $p < \alpha$ , se rechaza la hipótesis nula. Consultar la figura 10-8 para ver gráficamente el valor  $p$  obtenido en este problema.



**Figura 10-7** Cuadro de diálogo para calcular el valor  $p$  si el estadístico de prueba es igual a  $-2.62$ .



**Figura 10-8** El valor  $p$  es el área a la izquierda de  $Z = -2.62$ .

- 10.13** Refiérase al problema 10.12. Para analizar los datos usar el software para estadística SAS. Obsérvese que este software da el valor  $p$  y deja al usuario la decisión respecto de la hipótesis de acuerdo con el valor que el usuario haya asignado a  $\alpha$ .

### SOLUCIÓN

A continuación se presentan los resultados dados por SAS. El valor  $p$  se da como  $\text{Prob} > z = 0.0044$ , el mismo valor que se obtuvo en el problema 10.12. Este valor es el área bajo la curva normal estándar a la izquierda de  $-2.62$ . Comparar las demás cantidades dadas como resultados de SAS con las del problema 10.12.

### RESULTADOS DE SAS

```
One Sample Z Test for a Mean
Sample Statistics for time
      N       Mean      Std. Dev      Std Error
-----  
      50      7.42       2.91        0.41
```

```

Hypothesis Test
Null hypothesis      Mean of time => 8.5
Alternative          Mean of time < 8.5
with a specified known standard deviation of 2.91
Z Statistic          Prob > Z
-----
-2.619               0.0044
95% Confidence Interval for the Mean
(Upper Bound Only)
Lower Limit          Upper Limit
-----
-infinity            8.10

```

Obsérvese que el intervalo unilateral de 95%  $(-\infty, 8.10)$  no contiene el valor de la hipótesis nula, 8.5. Ésta es otra indicación de que la hipótesis nula se debe rechazar a nivel  $\alpha = 0.05$ .

- 10.14** Se asegura que el promedio de tiempo que escuchan MP3 las personas que utilizan estos dispositivos es 5.5 h por semana, contra un promedio mayor a 5.5. En la tabla 10.4 se dan las cantidades de tiempo que 50 personas pasan escuchando un MP3. Probar  $H_0: \mu = 5.5$  h contra la hipótesis alternativa  $H_1: \mu > 5.5$  h. Encontrar el valor  $p$  de esta prueba de hipótesis usando STATISTIX. ¿A qué conclusión se llega empleando  $\alpha = 0.05$ ?

**Tabla 10.4**

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 6.4 | 6.4 | 6.8 | 7.6 | 6.9 |
| 5.8 | 5.9 | 6.9 | 5.9 | 6.0 |
| 6.3 | 5.5 | 6.1 | 6.4 | 4.8 |
| 6.3 | 4.2 | 6.2 | 5.0 | 5.9 |
| 6.5 | 6.8 | 6.8 | 5.1 | 6.5 |
| 6.7 | 5.4 | 5.9 | 3.5 | 4.4 |
| 6.9 | 6.7 | 6.4 | 5.1 | 5.4 |
| 4.7 | 7.0 | 6.0 | 5.8 | 5.8 |
| 5.7 | 5.2 | 4.9 | 6.6 | 8.2 |
| 6.9 | 5.5 | 5.2 | 3.3 | 8.3 |

## SOLUCIÓN

STATISTIX proporciona los resultados siguientes:

```

Statistix 8.0
Descriptive Statistics
Variable    N        Mean         SD
MP3        50       5.9700      1.0158

```

El estadístico de prueba calculado es  $Z = \frac{5.97 - 5.5}{1.0158/\sqrt{50}} = 3.27$ . En la figura 10-9 se calcula el valor  $p$ .

En la figura 10-10 se muestra gráficamente el valor  $p$  encontrado en este problema.

El valor  $p$  encontrado es 0.00054 y como es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula.

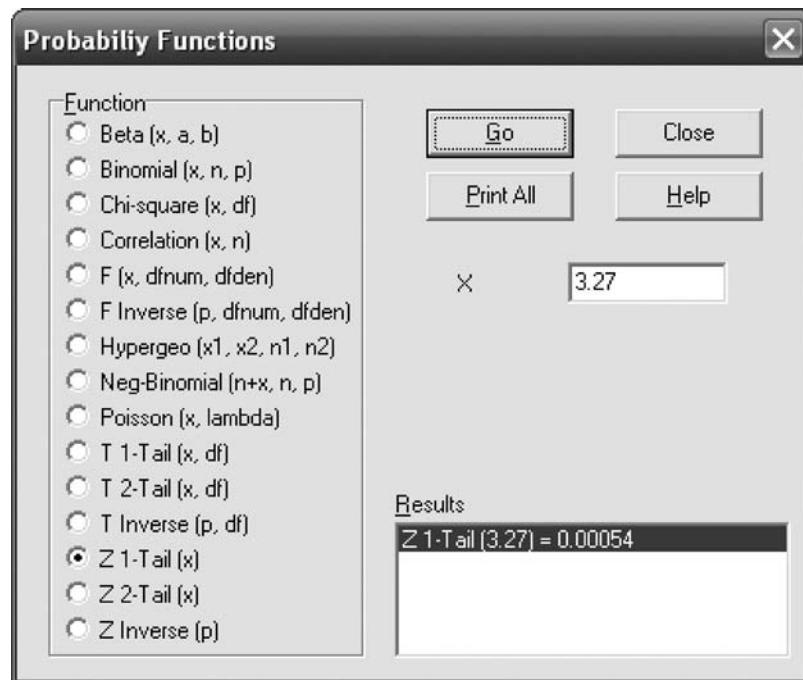


Figura 10-9 Cuadro de diálogo para hallar el valor  $p$  siendo el estadístico de prueba igual a 3.27.

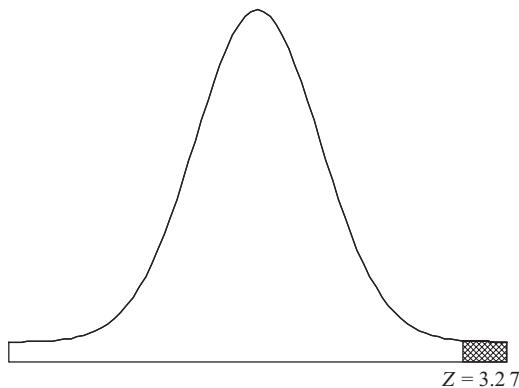


Figura 10-10 El valor  $p$  es el área a la derecha de  $z = 3.27$ .

- 10.15** Empleando SPSS, usar la secuencia “Analyze  $\Rightarrow$  Compare means  $\Rightarrow$  one-sample t test” y los datos del problema 10.14 para probar  $H_0: \mu = 5.5$  h contra la hipótesis alternativa  $H_a: \mu > 5.5$  h a  $\alpha = 0.05$  hallando el valor  $p$  y comparándolo con  $\alpha$ .

#### SOLUCIÓN

Los resultados de SPSS son los siguientes:

#### One-sample statistics

|     | N  | Media  | Desv. estándar | Media error estándar |
|-----|----|--------|----------------|----------------------|
| MPE | 50 | 5.9700 | 1.0184         | .14366               |

**One-sample test**

|     | Valor de prueba = 5.5 |    |                 |                  |  |          |
|-----|-----------------------|----|-----------------|------------------|--|----------|
|     | t                     | gl | Sigma (2 colas) | Diferencia media | Intervalo de confianza de 95% de la diferencia |          |
|     |                       |    |                 |                  | Inferior                                       | Superior |
| MPE | 3.272                 | 49 | 0.002           | .47000           | .1813  | .7587    |

En la primera parte de los resultados de SPSS se dan los estadísticos necesarios. Obsérvese que al estadístico de prueba encontrado se le llama  $t$  y no  $z$ . Esto se debe a que para  $n > 30$ , la distribución  $t$  y la distribución  $z$  son muy similares. La distribución  $t$  tiene un parámetro llamado grados de libertad que es igual a  $n - 1$ . El valor  $p$  encontrado por SPSS es siempre un valor  $p$  para dos colas y se le conoce como sigma(2 colas). Este valor es igual a 0.002. El valor para 1 cola es  $0.002/2 = 0.001$ . Este valor es un valor cercano al encontrado en el problema 10.14 que es igual a 0.00054. Cuando se usa un software, el usuario debe estar atento a la idiosincrasia de ese software.

**GRÁFICAS DE CONTROL**

**10.16** Para controlar el llenado de recipientes de mostaza se emplea una gráfica de control. La cantidad media de llenado es 496 gramos (g) y la desviación estándar es 5 g. Para determinar si la máquina llenadora está trabajando en forma adecuada, cada hora, a lo largo de las 8 h del día, se toma una muestra de cinco recipientes. En la tabla 10.5 se presentan los datos de dos días.

- Diseñar una regla de decisión mediante la cual se pueda estar muy seguro de que la media de llenado se mantiene, durante estos dos días, en 496 g con una desviación estándar igual a 5 g.
- Mostrar cómo graficar la regla de decisión del inciso a).

**Tabla 10.5**

| 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 492.2 | 486.2 | 493.6 | 508.6 | 503.4 | 494.9 | 497.5 | 490.5 |
| 487.9 | 489.5 | 503.2 | 497.8 | 493.4 | 492.3 | 497.0 | 503.0 |
| 493.8 | 495.9 | 486.0 | 493.4 | 493.9 | 502.9 | 493.8 | 496.4 |
| 495.4 | 494.1 | 498.4 | 495.8 | 493.8 | 502.8 | 497.1 | 489.7 |
| 491.7 | 494.0 | 496.5 | 508.0 | 501.3 | 498.9 | 488.3 | 492.6 |

| 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 492.2 | 486.2 | 493.6 | 508.6 | 503.4 | 494.9 | 497.5 | 490.5 |
| 487.9 | 489.5 | 503.2 | 497.8 | 493.4 | 492.3 | 497.0 | 503.0 |
| 493.8 | 495.9 | 486.0 | 493.4 | 493.9 | 502.9 | 493.8 | 496.4 |
| 495.4 | 494.1 | 498.4 | 495.8 | 493.8 | 502.8 | 497.1 | 489.7 |
| 491.7 | 494.0 | 496.5 | 508.0 | 501.3 | 498.9 | 488.3 | 492.6 |

**SOLUCIÓN**

- Con una confianza de 99.73% puede decirse que la media muestral  $\bar{x}$  debe encontrarse en el intervalo de  $\mu_{\bar{x}} - 3\sigma_{\bar{x}}$  hasta  $\mu_{\bar{x}} + 3\sigma_{\bar{x}}$  o bien, de:  $\mu - 3\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$  hasta:  $\mu + 3\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ . Como  $\mu = 496$ ,  $\sigma = 5$  y  $n = 5$ , se sigue que con una confianza

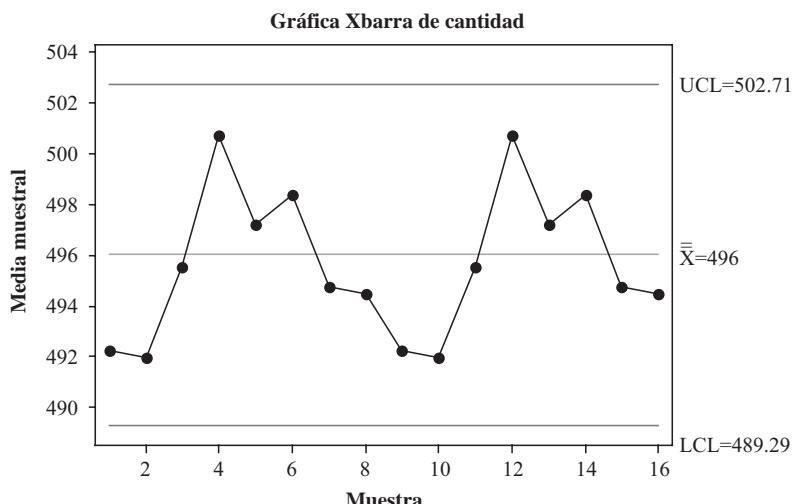
de 99.73% la media muestral debe estar en el intervalo de:  $496 - 3 \frac{5}{\sqrt{5}}$  hasta:  $496 + 3 \frac{5}{\sqrt{5}}$  o bien entre 489.29 y 502.71. Por lo tanto, la regla de decisión es la siguiente:

Si la media muestral cae dentro del intervalo de 489.29 g a 502.71 g, se supone que la máquina está llenando correctamente.

Si no es así, se concluye que la máquina de llenado no está trabajando en forma adecuada y se busca la razón por la que el llenado es incorrecto.

- b) Empleando una gráfica como la de la figura 10-11, llamada *gráfica de control de calidad*, se puede llevar un registro de las medias muestrales. Cada vez que se calcula una media muestral se representa mediante un punto. Mientras estos puntos se encuentren entre el límite inferior y el límite superior, el proceso está bajo control. Si un punto se sale de estos límites de control puede ser que algo esté mal y se recomienda hacer una investigación.

Las 80 observaciones se ingresan en la columna C1. Con la secuencia “**Stat ⇒ Control Charts ⇒ Variable charts for subgroups ⇒ Xbar**” se abre la ventana de diálogo que, una vez llenada, da la gráfica de control que se muestra en la figura 10-11.



**Figura 10-11** Gráfica de control con límites  $3\sigma$  para el control de la media de llenado de los envases de mostaza.

Los límites de control especificados antes se conocen como límites de confianza del 99.73%, o simplemente, límites  $3\sigma$ . También se pueden determinar otros límites de confianza (por ejemplo, límites del 99% o del 95%). En cada caso la elección depende de las circunstancias particulares.

## PRUEBAS PARA DIFERENCIAS DE MEDIAS Y PROPORCIONES

- 10.17** A dos grupos de estudiantes, uno de 40 y el otro de 50 alumnos, se les puso un examen. En el primer grupo la puntuación media fue 74 y la desviación estándar 8; en el segundo grupo la puntuación media fue 78 y la desviación estándar 7. ¿Existe diferencia en el desempeño de estos dos grupos a los niveles de significancia: a) 0.05 y b) 0.01?

### SOLUCIÓN

Supóngase que los dos grupos provienen de dos poblaciones cuyas medias son  $\mu_1$  y  $\mu_2$ , respectivamente. Entonces se debe decidir entre las hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2, \text{ la diferencia se debe únicamente a la casualidad.}$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2, \text{ existe una diferencia significativa entre los dos grupos.}$$

De acuerdo con la hipótesis  $H_0$ , ambos grupos provienen de una misma población. La media y la desviación estándar de la diferencia entre las medias están dadas por

$$\mu_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = 0 \quad \text{y} \quad \sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}} = \sqrt{\frac{8^2}{40} + \frac{7^2}{50}} = 1.606$$

donde se han empleado las desviaciones estándar muestrales como estimación de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ . Por lo tanto,

$$z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}} = \frac{74 - 78}{1.606} = -2.49$$

- a) En una prueba de dos colas, los resultados son significativos al nivel 0.05 si  $z$  se encuentra fuera del intervalo de  $-1.96$  a  $1.96$ . Por lo tanto, se concluye que al nivel de significancia 0.05 existe una diferencia significativa en el desempeño de estos dos grupos y que el segundo grupo parece ser mejor.
- b) En una prueba de dos colas, los resultados son significativos al nivel 0.01 si  $z$  se encuentra fuera del intervalo de  $-2.58$  a  $2.58$ . Por lo tanto, se concluye que al nivel 0.01 no hay diferencia significativa entre las clases.

Ya que los resultados son significativos al nivel 0.05 pero no al nivel 0.01, se concluye que los resultados sean *probablemente significativos* (de acuerdo con la terminología presentada al final del problema 10.5).

- 10.18** La estatura media de 50 estudiantes que mostraron una participación especial en las actividades deportivas de su escuela fue 68.2 pulgadas (in) con una desviación estándar de 2.5 in, en tanto que la estatura media de 50 estudiantes que no mostraron interés en los deportes fue 67.5 in con una desviación estándar de 2.8 in. Probar la hipótesis de que los estudiantes que mostraron interés en el deporte son más altos que el resto de los estudiantes.

### SOLUCIÓN

Hay que decidir entre las hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2, \text{ no hay diferencia entre las estaturas medias.}$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2, \text{ la estatura media del primer grupo es mayor que la del segundo grupo.}$$

Bajo la hipótesis  $H_0$ ,

$$\mu_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = 0 \quad \text{y} \quad \sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}} = \sqrt{\frac{(2.5)^2}{50} + \frac{(2.8)^2}{50}} = 0.53$$

donde para estimar  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  se han empleado las desviaciones estándar muestrales. Por lo tanto,

$$z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}} = \frac{68.2 - 67.5}{0.53} = 1.32$$

Usando una prueba de una cola al nivel de significancia 0.05 se puede rechazar  $H_0$  si la puntuación  $z$  es mayor a 1.645. Por lo tanto, en este caso, a ese nivel de significancia no se puede rechazar la hipótesis nula.

Sin embargo, hay que observar que la hipótesis se puede rechazar al nivel de significancia 0.10 si se está dispuesto a correr el riesgo de tener una probabilidad de 0.10 de cometer un error (es decir, 1 posibilidad en 10).

- 10.19** Se realiza un estudio para comparar la media, en horas por semana, que usan sus celulares varones y mujeres estudiantes universitarios. De una universidad se tomaron 50 estudiantes mujeres y 50 estudiantes varones y se registró la cantidad de horas por semana que utilizan sus celulares. Los resultados se muestran en la tabla 10.6. Se quiere probar  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$  contra  $H_a: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$ , basándose en estas muestras. Usar EXCEL para calcular el valor  $p$  y llegar a una decisión acerca de la hipótesis nula.

**Tabla 10.6 Horas por semana que usan su celular varones y mujeres estudiantes de una universidad**

| Varones |    |    |    |    | Mujeres |    |    |    |    |
|---------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|
| 12      | 4  | 11 | 13 | 11 | 11      | 9  | 7  | 10 | 9  |
| 7       | 9  | 10 | 10 | 7  | 10      | 10 | 7  | 9  | 10 |
| 7       | 12 | 6  | 9  | 15 | 11      | 8  | 9  | 6  | 11 |
| 10      | 11 | 12 | 7  | 8  | 10      | 7  | 9  | 12 | 14 |
| 8       | 9  | 11 | 10 | 9  | 11      | 12 | 12 | 8  | 12 |
| 10      | 9  | 9  | 7  | 9  | 12      | 9  | 10 | 11 | 7  |
| 11      | 7  | 10 | 10 | 11 | 12      | 7  | 9  | 8  | 11 |
| 9       | 12 | 12 | 8  | 13 | 10      | 8  | 13 | 8  | 10 |
| 9       | 10 | 8  | 11 | 10 | 9       | 9  | 9  | 11 | 9  |
| 13      | 13 | 9  | 10 | 13 | 9       | 8  | 9  | 12 | 11 |

### SOLUCIÓN

Los datos de la tabla 10.6 se ingresan en una hoja de cálculo de EXCEL como se muestra en la figura 10-12. Los datos de los varones se ingresan en las celdas A2:E11 y los datos de las mujeres en las celdas F2:J11. La varianza de los datos de los varones se calcula ingresando en la celda A14 =VAR(A2:E11). La varianza de los datos de las mujeres se calcula ingresando en la celda A15 =VAR(F2:J11). La media de los datos de los varones se calcula ingresando en la celda

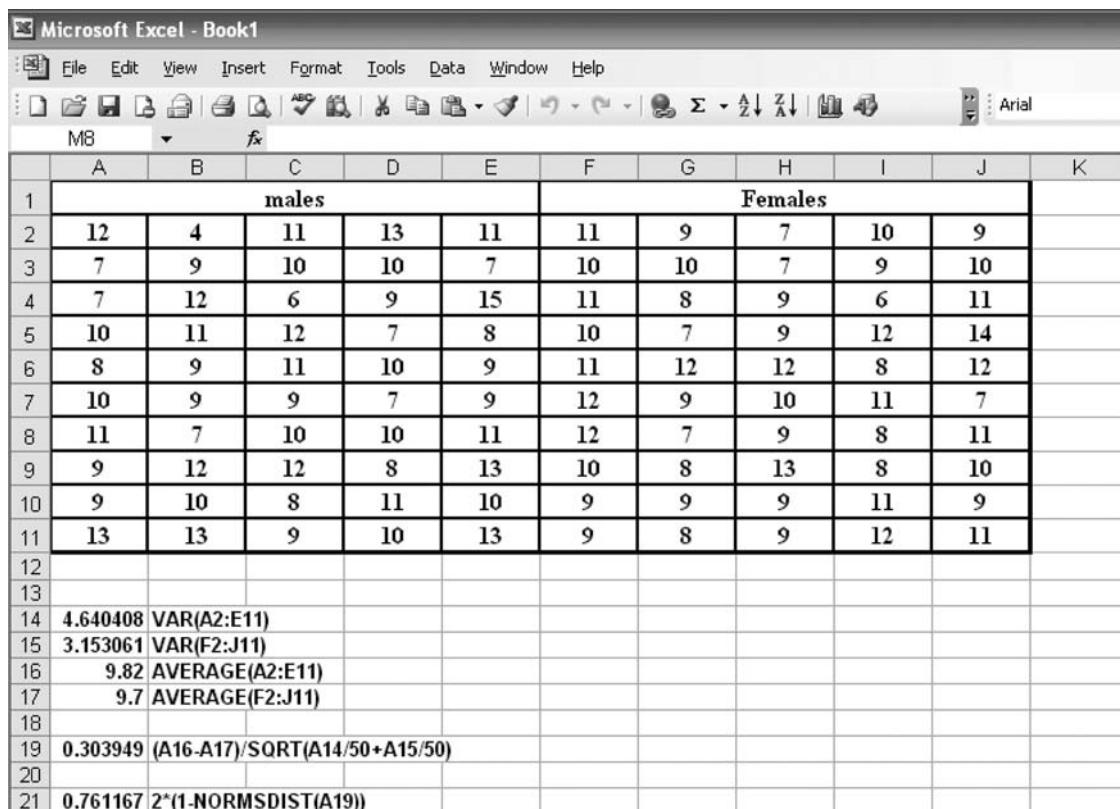


Figura 10-12 Hoja de cálculo EXCEL para calcular el valor  $p$  del problema 10.19.

A16 =AVERAGE(A2:E11). La media de los datos de las mujeres se calcula ingresando en la celda A17 =AVERAGE(F2:J11). El estadístico de prueba es =(A16-A17)/SQRT(A14/50+A15/50) y se muestra en A19. Este estadístico tiene una distribución normal estándar y su valor es 0.304. La expresión =2\*(1-NORMSDIST(A19) calcula el área a la derecha de 0.304 y la duplica. Con esto se obtiene que el valor  $p = 0.761$ .

Como este valor  $p$  no es menor que ninguno de los valores  $\alpha$  usuales, 0.01 o bien 0.05, no se rechaza la hipótesis nula. La probabilidad de obtener muestras como la obtenida es 0.761, suponiendo que la hipótesis nula sea verdadera. Por lo tanto, no hay evidencia que sugiera que la hipótesis nula es falsa y que se deba rechazar.

- 10.20** Se tienen dos grupos de personas,  $A$  y  $B$ , cada uno de 100 personas que padecen una enfermedad. Al grupo  $A$  se le administra un suero, pero al grupo  $B$  (que es el grupo *control*) no; por lo demás, los dos grupos se tratan en forma idéntica. En los grupos  $A$  y  $B$  se encuentra que 75 y 65 personas, respectivamente, se recuperan de esta enfermedad. A los niveles de significancia: *a)* 0.01, *b)* 0.05 y *c)* 0.10, probar la hipótesis de que el suero ayuda a la curación de la enfermedad. Calcular el valor  $p$  y mostrar que valor  $p > 0.01$ , valor  $p > 0.05$ , pero valor  $p < 0.10$ .

### SOLUCIÓN

Sean  $p_1$  y  $p_2$  las proporciones poblacionales de las personas curadas: 1) usando el suero y 2) sin usar el suero, respectivamente. Hay que decidir entre las hipótesis:

$$H_0: p_1 = p_2, \text{ las diferencias observadas se deben a la casualidad (es decir, el suero no es eficiente).}$$

$$H_1: p_1 > p_2, \text{ el suero sí es eficiente.}$$

Bajo la hipótesis  $H_0$ ,

$$\mu_{P_1-P_2} = 0 \quad \text{y} \quad \sigma_{P_1-P_2} = \sqrt{pq\left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}\right)} = \sqrt{(0.70)(0.30)\left(\frac{1}{100} + \frac{1}{100}\right)} = 0.0648$$

donde, como estimación de  $p$ , se ha empleado la proporción promedio de curados en las dos muestras dada por  $(75 + 65)/200 = 0.70$ , de donde  $q = 1 - p = 0.30$ . Por lo tanto,

$$z = \frac{P_1 - P_2}{\sigma_{P_1-P_2}} = \frac{0.750 - 0.650}{0.0648} = 1.54$$

- a)* Empleando una prueba de una cola al nivel de significancia 0.01, la hipótesis  $H_0$  se rechaza únicamente si la puntuación  $z$  es mayor a 2.33. Como la puntuación  $z$  es de sólo 1.54, se concluye que a este nivel de significancia los resultados se deben a la casualidad.
- b)* Empleando una prueba de una cola al nivel de significancia 0.05, la hipótesis  $H_0$  se rechaza únicamente si la puntuación  $z$  es mayor a 1.645. Por lo tanto, se concluye que a este nivel de significancia los resultados se deben a la casualidad.
- c)* Si se usa una prueba de una cola al nivel de significancia 0.10,  $H_0$  se rechaza sólo si la puntuación  $z$  es mayor a 1.28. Dado que esta condición se satisface, se concluye que el suero es eficiente al nivel 0.10.
- d)* Empleando EXCEL, el valor  $p$  se obtiene mediante =1-NORMDIST(1.54), que es igual a 0.06178. Ésta es el área a la derecha de 1.54. Obsérvese que este valor es mayor a 0.01, 0.05, pero menor a 0.10.

Nótese que la conclusión depende de qué tanto se está dispuesto a arriesgarse a estar equivocado. Si en realidad los resultados se deben a la casualidad, pero se concluye que se deben al suero (error tipo I), se procederá a administrar el suero a una gran cantidad de personas, con el único resultado de que en realidad no sea efectivo. Éste es un riesgo que no siempre se está dispuesto a asumir.

Por otro lado, se puede concluir que el suero no ayuda, cuando en realidad sí lo hace (error tipo II). Esta conclusión es muy peligrosa, en especial porque lo que está en juego son vidas humanas.

- 10.21** Repetir el problema 10.20, pero considerando que cada grupo consta de 300 personas y que sanan 225 personas del grupo  $A$  y 195 del grupo  $B$ . Encontrar el valor  $p$  usando EXCEL y comentar sobre su decisión.

**SOLUCIÓN**

Obsérvese que la proporción de personas que sana en cada grupo es  $225/300 = 0.750$  y  $195/300 = 0.650$ , respectivamente, que son las mismas que en el problema 10.20. De acuerdo con la hipótesis  $H_0$

$$\mu_{P1-P2} = 0 \quad \text{y} \quad \sigma_{P1-P2} = \sqrt{pq\left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}\right)} = \sqrt{(0.70)(0.30)\left(\frac{1}{300} + \frac{1}{300}\right)} = 0.0374$$

donde  $(225 + 195)/600 = 0.70$  se usa como estimación de  $p$ . Por lo tanto,

$$z = \frac{P_1 - P_2}{\sigma_{P1-P2}} = \frac{0.750 - 0.650}{0.0374} = 2.67$$

Como el valor de  $z$  es mayor que 2.33, la hipótesis nula se puede rechazar al nivel de significancia 0.01; es decir, se puede concluir que el suero es efectivo con una probabilidad de estar equivocado de sólo 0.01.

Esto muestra cómo al aumentar el tamaño de la muestra se incrementa la confiabilidad de las decisiones. Sin embargo, en muchos casos suele no ser posible aumentar el tamaño de la muestra. En esos casos se está forzado a tomar las decisiones con base en la información disponible, y por lo tanto se debe conformar con correr mayor riesgo de tomar una decisión incorrecta.

valor  $p = 1 - \text{NORMDIST}(2.67) = 0.003793$ . Esto es menor a 0.01.

- 10.22** Se realizó un sondeo en una muestra de 300 votantes del distrito  $A$  y 200 votantes del distrito  $B$ ; se encontró que 56 y 48%, respectivamente, estaban a favor de determinado candidato. Al nivel de significancia 0.05, probar las hipótesis: *a)* existe diferencia entre los distritos, *b)* el candidato se prefiere en el distrito  $A$  y *c)* calcular el valor  $p$  de los incisos *a)* y *b)*.

**SOLUCIÓN**

Sean  $p_1$  y  $p_2$  las proporciones de todos los votantes de los distritos  $A$  y  $B$  que están a favor de este candidato. Bajo la hipótesis  $H_0: p_1 = p_2$ , se tiene

$$\mu_{P1-P2} = 0 \quad \text{y} \quad \sigma_{P1-P2} = \sqrt{pq\left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}\right)} = \sqrt{(0.528)(0.472)\left(\frac{1}{300} + \frac{1}{200}\right)} = 0.0456$$

donde se emplean los valores  $[(0.56)(300) + (0.48)(200)]/500 = 0.528$  y  $(1 - 0.528) = 0.472$  como estimaciones de  $p$  y  $q$ , respectivamente. Por lo tanto,

$$z = \frac{P_1 - P_2}{\sigma_{P1-P2}} = \frac{0.560 - 0.480}{0.0456} = 1.75$$

- a)* Si sólo se desea determinar si existe alguna diferencia entre los distritos, hay que decidir entre las hipótesis  $H_0: p_1 = p_2$  y  $H_1: p_1 \neq p_2$ , lo que implica una prueba de dos colas. Usando una prueba de dos colas al nivel de significancia 0.05,  $H_0$  se puede rechazar si  $z$  está fuera del intervalo  $-1.96$  a  $1.96$ . Como  $z = 1.75$  se encuentra en este intervalo, a este nivel no se puede rechazar  $H_0$ ; esto es, no hay diferencia significativa entre los dos distritos.
- b)* Si se desea determinar si el candidato es preferido en el distrito  $A$ , hay que decidir entre las hipótesis  $H_0: p_1 = p_2$  y  $H_1: p_1 > p_2$ , lo que implica una prueba de una cola. Usando una prueba de una cola al nivel de significancia 0.05,  $H_0$  se rechaza si  $z$  es mayor a 1.645. Dado que éste es el caso, se rechaza  $H_0$  a este nivel de significancia y se concluye que el candidato es preferido en el distrito  $A$ .
- c)* Con la alternativa de dos colas, el valor  $p = 2 * (1 - \text{NORMDIST}(1.75)) = 0.0801$ . A  $\alpha = 0.05$  no se puede rechazar la hipótesis nula. Con la alternativa de una cola, valor  $p = 1 - \text{NORMDIST}(1.75) = 0.04006$ . A  $\alpha = 0.05$  se puede rechazar la hipótesis nula.

**PRUEBAS EMPLEANDO DISTRIBUCIONES BINOMIALES**

- 10.23** Un profesor aplica un pequeño examen en el que hay 10 preguntas de verdadero o falso. Para probar la hipótesis de que los alumnos contestan sólo adivinando, el profesor adopta la siguiente regla de decisión:

Si hay siete o más de las respuestas correctas, el estudiante no está sólo adivinando.

Si hay menos de siete respuestas correctas, el estudiante está sólo adivinando.

Encontrar la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando ésta sea correcta: *a)* empleando la distribución binomial y *b)* empleando EXCEL.

### SOLUCIÓN

- a)* Sea  $p$  la probabilidad de que una pregunta se responda correctamente. La probabilidad de tener  $X$  de 10 preguntas correctas es  $\binom{10}{X} p^X q^{10-X}$ , donde  $q = 1 - p$ . Entonces bajo la hipótesis  $p = 0.5$  (es decir, el estudiante está sólo adivinando),

$$\begin{aligned}\Pr\{7 \text{ o más correctas}\} &= \Pr\{7 \text{ correctas}\} + \Pr\{8 \text{ correctas}\} + \Pr\{9 \text{ correctas}\} + \Pr\{10 \text{ correctas}\} \\ &= \binom{10}{7} \left(\frac{1}{2}\right)^7 \left(\frac{1}{2}\right)^3 + \binom{10}{8} \left(\frac{1}{2}\right)^8 \left(\frac{1}{2}\right)^2 + \binom{10}{9} \left(\frac{1}{2}\right)^9 \left(\frac{1}{2}\right)^1 + \binom{10}{10} \left(\frac{1}{2}\right)^{10} = 0.1719\end{aligned}$$

Por lo tanto, la probabilidad de concluir que el estudiante no está sólo adivinando cuando en realidad sí lo esté haciendo es 0.1719. Obsérvese que ésta es la probabilidad de un error tipo I.

- b)* Los números 7, 8, 9 y 10 se ingresan en A1:A4 de la hoja de cálculo de EXCEL. Después se ingresa =BINOMDIST(A1, 10,0.5,0). A continuación se hace clic y se arrastra desde B1 hasta B4. En B5 se ingresa =SUM(B1:B4). La respuesta aparece en B5.

| A  | B        |
|----|----------|
| 7  | 0.117188 |
| 8  | 0.043945 |
| 9  | 0.009766 |
| 10 | 0.000977 |
|    | 0.171875 |

- 10.24** En el problema 10.23, encontrar la probabilidad de aceptar la hipótesis  $p = 0.5$  cuando en realidad  $p = 0.7$ . Encontrar la respuesta: *a)* usando la fórmula de probabilidad binomial y *b)* usando EXCEL.

### SOLUCIÓN

- a)* Bajo la hipótesis  $p = 0.7$ ,

$$\begin{aligned}\Pr\{\text{menos de 7 correctas}\} &= 1 - \Pr\{7 \text{ o más correctas}\} \\ &= 1 - \left[ \binom{10}{7} (0.7)^7 (0.3)^3 + \binom{10}{8} (0.7)^8 (0.3)^2 + \binom{10}{9} (0.7)^9 (0.3) + \binom{10}{10} (0.3)^{10} \right] \\ &= 0.3504\end{aligned}$$

- b)* La solución usando EXCEL es:

$\Pr\{\text{menos de 7 correctas cuando } p = 0.7\}$  está dada por =BINOMDIST (6,10,0.7,1) que es igual a 0.350389. El 1 en la función BINOMDIST indica que la probabilidad, correspondiente a  $n = 10$  y  $p = 0.7$ , desde 0 hasta 6 está acumulada.

- 10.25** En el problema 10.23, encontrar la probabilidad de aceptar la hipótesis  $p = 0.5$  cuando en realidad: *a)*  $p = 0.6$ , *b)*  $p = 0.8$ , *c)*  $p = 0.9$ , *d)*  $p = 0.4$ , *e)*  $p = 0.3$ , *f)*  $p = 0.2$  y *g)*  $p = 0.1$ .

### SOLUCIÓN

- a)* Si  $p = 0.6$ ,

$$\begin{aligned}\text{Probabilidad buscada} &= 1 - [\Pr\{7 \text{ correctas}\} + \Pr\{8 \text{ correctas}\} + \Pr\{9 \text{ correctas}\} + \Pr\{10 \text{ correctas}\}] \\ &= 1 - \left[ \binom{10}{7} (0.6)^7 (0.4)^3 + \binom{10}{8} (0.6)^8 (0.4)^2 + \binom{10}{9} (0.6)^9 (0.4) + \binom{10}{10} (0.6)^{10} \right] = 0.618\end{aligned}$$

Los resultados de los incisos b) a g) se encuentran de manera similar y se presentan en la tabla 10.7, junto con los correspondientes valores desde  $p = 0.5$  hasta  $p = 0.7$ . Obsérvese que en la tabla 10.7 la probabilidad se denota por  $\beta$  (probabilidad de cometer un error tipo II); la entrada  $\beta$  correspondiente a  $p = 0.5$  está dada por  $\beta = 1 - 0.1719 = 0.828$  (de acuerdo con el problema 10.23) y la entrada  $\beta$  correspondiente a  $p = 0.7$  se tomó del problema 10.24.

Tabla 10.7

| $p$     | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\beta$ | 1.000 | 0.999 | 0.989 | 0.945 | 0.828 | 0.618 | 0.350 | 0.121 | 0.013 |

- 10.26** Usar el problema 10.25 para construir una gráfica de  $\beta$  contra  $p$ .

### SOLUCIÓN

La gráfica buscada se muestra en la figura 10-3.

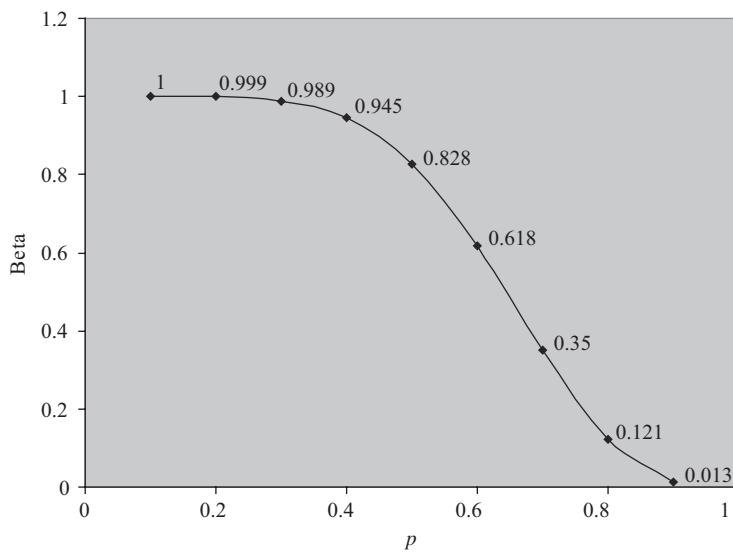


Figura 10-13 Gráfica para los errores tipo II en el problema 10.25.

- 10.27** La hipótesis nula es que un dado no está cargado y la hipótesis alternativa es que el dado sí está cargado, de manera que la cara seis aparece con más frecuencia de la que debería. Esta hipótesis se prueba lanzando el dado 18 veces y observando cuántas veces cae seis. Encontrar el valor  $p$  si la cara seis se presenta 7 veces en 18 lanzamientos del dado.

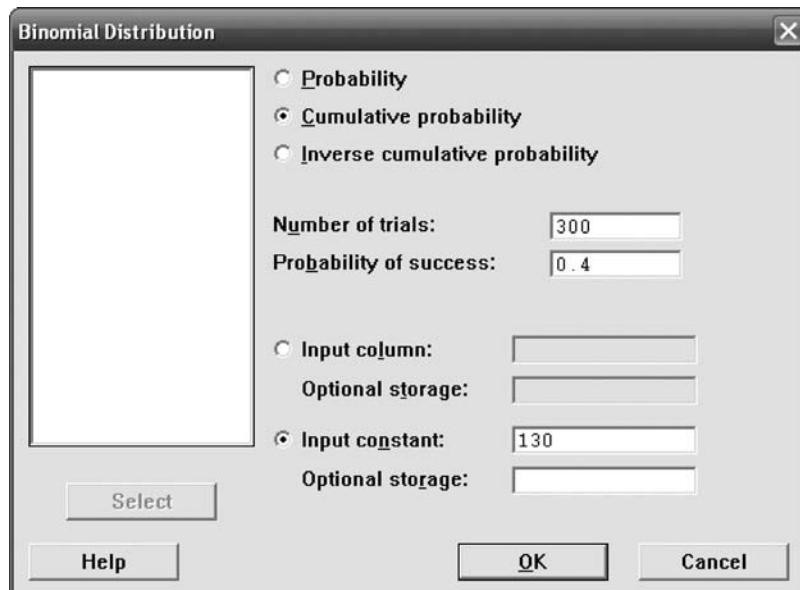
### SOLUCIÓN

En la hoja de cálculo de EXCEL se ingresan en A1:A19 los números del 0 al 18. En B1 se ingresa =BINOMDIST(A1,18,0.16666,0), se hace clic y se arrastra desde B1 hasta B19 para obtener cada una de las probabilidades binomiales, en C1 se ingresa =BINOMDIST(A1,18,0.16666,1), se hace clic y se arrastra desde C1 hasta C19 con lo que se obtiene la probabilidad binomial acumulada.

| A  | B        | C           |
|----|----------|-------------|
| 0  | 0.037566 | 0.037566446 |
| 1  | 0.135233 | 0.17279916  |
| 2  | 0.229885 | 0.402683738 |
| 3  | 0.245198 | 0.647882186 |
| 4  | 0.18389  | 0.831772194 |
| 5  | 0.102973 | 0.934745656 |
| 6  | 0.04462  | 0.979365347 |
| 7  | 0.015297 | 0.994662793 |
| 8  | 0.004207 | 0.998869389 |
| 9  | 0.000935 | 0.999804143 |
| 10 | 0.000168 | 0.999972391 |
| 11 | 2.45E-05 | 0.999996862 |
| 12 | 2.85E-06 | 0.999999717 |
| 13 | 2.64E-07 | 0.99999998  |
| 14 | 1.88E-08 | 0.999999999 |
| 15 | 1E-09    | 1           |
| 16 | 3.76E-11 | 1           |
| 17 | 8.86E-13 | 1           |
| 18 | 9.84E-15 | 1           |

El valor  $p$  es  $p\{X \geq 7\} = 1 - P\{X \leq 6\} = 1 - 0.979 = 0.021$ . El resultado  $X = 6$  es significativo a  $\alpha = 0.05$ , pero no a  $\alpha = 0.01$ .

- 10.28** Para probar que 40% de las personas que pagan impuestos emplean algún software para el cálculo de los mismos contra la hipótesis alternativa de que el porcentaje es mayor a 40%, se seleccionan en forma aleatoria 300 personas que pagan impuestos y se les pregunta si emplean algún software. Si 131 de las 300 emplea algún software, encontrar el valor  $p$  correspondiente a esta observación.



**Figura 10-14** Cuadro de diálogo de la distribución binomial para calcular 130 o menos de 300 usuarios de software, dado que 40% de los que pagan impuestos usan algún software.

**SOLUCIÓN**

La hipótesis nula es  $H_0: p = 0.4$  y la hipótesis alternativa  $H_a: p > 0.4$ . El valor de  $X$  observado es 131, donde  $X$  es la cantidad de los que usan algún software. El valor  $p = P\{X \geq 131 \text{ dado que } p = 0.4\}$ . El valor  $p = 1 - P\{X \leq 130 \text{ dado que } p = 0.4\}$ . Empleando MINITAB, con la secuencia “**Calc**  $\Rightarrow$  **Probability Distribution**  $\Rightarrow$  **Binomial**” se abre el cuadro de diálogo que se muestra en la figura 10-14.

Con el cuadro de diálogo de la figura 10-14 se obtiene el resultado siguiente.

**Función de distribución acumulada**

Binomial with n=300 and p=0.4

|     |               |
|-----|---------------|
| x   | $P(X \leq x)$ |
| 130 | 0.891693      |

El valor  $p$  es  $1 - P\{X \leq 130 \text{ dado que } p = 0.4\} = 1 - 0.8971 = 0.1083$ . El resultado  $X = 131$  no es significativo a 0.01, 0.05 ni 0.10.

**PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS****PRUEBAS PARA MEDIAS Y PARA PROPORCIONES  
EMPLEANDO DISTRIBUCIONES NORMALES**

- 10.29** Una urna contiene sólo canicas azules y rojas. Para probar la hipótesis nula de que las canicas de ambos colores se encuentran en la misma proporción, se toma una muestra, con reposición, de 64 canicas; se anotan los colores de las canicas que se van extrayendo y se adopta la siguiente regla de decisión:

La hipótesis nula se acepta si  $28 \leq X \leq 36$ , donde  $X$  es la cantidad de canicas rojas en la muestra de tamaño 64.

La hipótesis nula se rechaza si  $X \leq 27$  o si  $X \geq 37$ .

- a) Encontrar la probabilidad de rechazar la hipótesis nula si es correcta.
- b) Graficar la regla de decisión y el resultado que se obtenga en el inciso a).

- 10.30** a) ¿Qué regla de decisión se adopta en el problema 10.29 si lo que se busca es que la probabilidad de rechazar la hipótesis nula siendo en realidad correcta no sea mayor a 0.01 (es decir, si se quiere que el nivel de significancia sea 0.01)?  
 b) ¿A qué nivel de confianza se puede aceptar la hipótesis nula?  
 c) ¿Cuál es la regla de decisión si se emplea como nivel de significancia 0.05?

- 10.31** Supóngase que en el problema 10.29 se desea probar la hipótesis de que la proporción de canicas rojas es mayor que la de canicas azules.
- a) ¿Cuál es entonces la hipótesis nula y cuál la hipótesis alternativa?
  - b) ¿Se debe usar una prueba de una cola o de dos colas? ¿Por qué?
  - c) ¿Cuál debe ser la regla de decisión si el nivel de significancia es 0.05?
  - d) ¿Cuál es la regla de decisión si el nivel de significancia es 0.01?

- 10.32** Se lanzan 100 veces un par de dados y en 23 de las veces aparece un 7. Al nivel de significancia 0.05, probar la hipótesis de que los dados no están cargados empleando: a) una prueba de dos colas y b) una prueba de una cola. Analizar las razones, si es que las hay, para preferir una de estas dos pruebas.

- 10.33** Repetir el problema 10.32 empleando como nivel de significancia 0.01.

- 10.34** Un fabricante asegura que por lo menos el 95% de los equipos que vende a una fábrica satisfacen las especificaciones. En una muestra de 200 equipos examinados, 18 no cumplen con las especificaciones. Probar la afirmación del fabricante a los niveles de significancia: *a)* 0.01 y *b)* 0.05.
- 10.35** Se afirma que los compradores por Internet gastan en promedio \$335 por año. Se desea probar que esta cantidad no es la correcta empleando  $\alpha = 0.075$ . Se hace un estudio en el que intervienen 300 compradores por Internet y se encuentra que la media muestral es \$354 y la desviación estándar es \$125. Encontrar el valor del estadístico de prueba, los valores críticos y efectuar la conclusión.
- 10.36** Por experiencia se sabe que la resistencia a la ruptura de determinada marca de hilo es 9.72 onzas (oz) y su desviación estándar es 1.40 oz. En una muestra reciente de 36 piezas de este hilo se encuentra que la resistencia media a la ruptura es 8.93 oz. Probar la hipótesis nula  $H_0: \mu = 9.72$  contra la hipótesis alternativa  $H_a: \mu < 9.72$  y dar el valor del estadístico de prueba y el valor crítico que corresponde a: *a)*  $\alpha = 0.10$  y *b)*  $\alpha = 0.025$ . ¿Es este resultado significativo a  $\alpha = 0.10$ ? ¿Es este resultado significativo a  $\alpha = 0.025$ ?
- 10.37** Se realiza un estudio para probar la hipótesis nula de que la cantidad media de correos electrónicos enviados semanalmente por los empleados en una ciudad grande es 25.5 contra la hipótesis alternativa de que esta cantidad es mayor a 25.5. Se entrevista a 200 empleados de toda la ciudad y se encuentra que  $\bar{x} = 30.1$  y  $s = 10.5$ . Dar el valor del estadístico de prueba y el valor crítico para  $\alpha = 0.03$ , y efectuar la conclusión.
- 10.38** Para una  $n$  grande ( $n > 30$ ) y una desviación estándar conocida se usa la distribución normal estándar para realizar una prueba acerca de la media de la población de la que se toma la muestra. A la hipótesis alternativa  $H_a: \mu < \mu_0$  se le llama *alternativa de la cola inferior* y a la hipótesis alternativa  $H_a: \mu > \mu_0$  se le llama *alternativa de la cola superior*. Para una alternativa de la cola superior, dar la expresión de EXCEL para el valor crítico si  $\alpha = 0.1$ ,  $\alpha = 0.01$  y  $\alpha = 0.001$ .

### VALORES $p$ EN PRUEBAS DE HIPÓTESIS

- 10.39** Para probar que una moneda está balanceada se lanza 15 veces y se obtienen 12 caras. Dar el valor  $p$  correspondiente a este resultado. Para hallar el valor  $p$  emplear BINOMDIST de EXCEL.
- 10.40** Dar el valor  $p$  correspondiente al resultado del problema 10.35.
- 10.41** Dar el valor  $p$  correspondiente al resultado del problema 10.36.
- 10.42** Dar el valor  $p$  correspondiente al resultado del problema 10.37.

### GRÁFICAS DE CONTROL DE CALIDAD

- 10.43** Cierto tipo de hilo producido por un fabricante ha tenido una resistencia a la ruptura de 8.64 oz y una desviación estándar de 1.28 oz. Para determinar si este producto satisface los estándares, cada tres horas se toma una muestra de 16 piezas y se determina la media de su resistencia al rompimiento. En una gráfica de control de calidad, registrar los límites de control de: *a)* 99.73% (o  $3\sigma$ ), *b)* 99% y *c)* 95%, y explicar sus aplicaciones.
- 10.44** En promedio, cerca del 3% de los pernos que produce una empresa están defectuosos. Para mantener esta calidad cada cuatro horas se toma una muestra de 200 pernos y se examina. Determinar los límites de control de: *a)* 99% y *b)* 95% para la cantidad de pernos defectuosos en cada muestra. Obsérvese que en este caso sólo se necesitan los *límites superiores de control*.

### PRUEBAS PARA DIFERENCIAS DE MEDIAS Y PROPORCIONES

- 10.45** En un estudio se compara la vida media, en horas, de dos tipos de focos. Los resultados del estudio se muestran en la tabla 10.8.

**Tabla 10.8**

|            | Foco ecológico | Foco tradicional |
|------------|----------------|------------------|
| n          | 75             | 75               |
| Media      | 1 250          | 1 305            |
| Desv. est. | 55             | 65               |

Probar  $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$  contra  $H_a : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$  con  $\alpha = 0.05$ . Dar el valor de la prueba estadística y calcular el valor de  $p$  y comparar el valor  $p$  con  $\alpha = 0.05$ . Proporcionar su conclusión.

- 10.46** En un estudio se comparan las calificaciones de 50 estudiantes universitarios que tienen televisión en su dormitorio con las de 50 estudiantes universitarios que no tienen televisión en su dormitorio. Los resultados se muestran en la tabla 10.9. La hipótesis alternativa es que la media de las calificaciones de los universitarios que no tienen televisión en su dormitorio es mayor a la de los que sí la tienen. Dar el valor del estadístico de prueba suponiendo que no haya diferencia entre las calificaciones. Dar el valor  $p$  y las conclusiones para  $\alpha = 0.05$  y para  $\alpha = 0.10$ .

**Tabla 10.9**

|            | Televisión en el dormitorio | Sin televisión |
|------------|-----------------------------|----------------|
| n          | 50                          | 50             |
| Media      | 2.58                        | 2.77           |
| Desv. est. | 0.55                        | 0.65           |

- 10.47** En un examen de ortografía en una escuela primaria, la calificación promedio de 32 niños fue de 72 puntos y su desviación estándar de 8 puntos, y la calificación promedio de 36 niñas fue de 75 puntos y su desviación estándar de 6 puntos. La hipótesis alternativa es que las niñas son mejores en ortografía que los niños. Dar el valor del estadístico de prueba suponiendo que entre niños y niñas no hay diferencia en la calificación de ortografía. Dar el valor  $p$  y la conclusión para  $\alpha = 0.05$  y para  $\alpha = 0.10$ .

- 10.48** Para probar los efectos de un nuevo fertilizante sobre la producción de trigo se dividió una parcela en 60 cuadrados de la misma área, todos de idéntica calidad en términos de suelo, exposición a la luz, etc. En 30 de los cuadrados se empleó el nuevo fertilizante y el fertilizante viejo se usó en el resto de los cuadrados. La cantidad media de bushels (bu) de trigo, usando el nuevo fertilizante, cosechado por cuadrado, fue de 18.2 bu y su desviación estándar de 0.63 bu. La media y la desviación estándar correspondientes en el caso en que se usó el fertilizante viejo fueron 17.8 y 0.54 bu, respectivamente. Empleando como niveles de significancia: a) 0.05 y b) 0.01, probar la hipótesis de que el nuevo fertilizante es mejor que el viejo.

- 10.49** En muestras aleatorias de 200 remaches elaborados con la máquina A y 100 remaches elaborados con la máquina B se encontraron 19 y 5 remaches defectuosos, respectivamente.

- a) Dar el estadístico de prueba, el valor  $p$ , y su conclusión a  $\alpha = 0.05$  para probar que las dos máquinas tienen diferente calidad de desempeño.
- b) Dar el estadístico de prueba, el valor  $p$  y la conclusión a  $\alpha = 0.05$  para probar que la máquina B es mejor que la máquina A.

- 10.50** Dos urnas, A y B, contienen la misma cantidad de canicas, pero no se sabe cuál es la proporción de canicas rojas y canicas blancas en cada una de ellas. De cada una se toma una muestra, con reposición, de 50 canicas. En las 50 canicas de la urna A hay 32 rojas y en las 50 canicas de la urna B hay 23 rojas.

- a) Empleando  $\alpha = 0.05$ , probar la hipótesis de que la proporción de canicas rojas es la misma en las dos urnas, contra la hipótesis de que es diferente; dar el estadístico de prueba calculado, el valor  $p$  calculado y la conclusión.
- b) Empleando  $\alpha = 0.05$ , probar la hipótesis de que la urna A tiene una proporción mayor de canicas rojas que la urna B; dar el estadístico de prueba calculado, el valor  $p$  calculado y la conclusión.
- 10.51** Para determinar si una moneda está cargada, de manera que al lanzarla sea más probable que aparezca cara que cruz, se lanza 15 veces. Sea  $X$  = cantidad de caras en los 15 lanzamientos. Se declarará que la moneda está cargada a favor de cara si  $X \geq 11$ . Usar EXCEL para hallar  $\alpha$ .
- 10.52** Se lanza una moneda 20 veces para determinar si está cargada. Se declarará cargada si  $X = 0, 1, 2, 18, 19, 20$ , donde  $X$  = cantidad de cruces obtenidas. Usar EXCEL para hallar  $\alpha$ .
- 10.53** Se lanza una moneda 15 veces para determinar si está cargada, de manera que al lanzarla sea más probable que aparezca cara que cruz. Sea  $X$  = cantidad de caras en los 15 lanzamientos. Se declarará cargada a favor de cara si  $X \geq 11$ . Usar EXCEL y encontrar  $\beta$  si  $p = 0.6$ .
- 10.54** Se lanza una moneda 20 veces para determinar si está cargada. Se declarará cargada si  $X = 0, 1, 2, 18, 19, 20$ , donde  $X$  = cantidad de cruces obtenidas. Usar EXCEL para hallar  $\beta$  si  $p = 0.9$ .
- 10.55** Se lanza una moneda 15 veces para determinar si está cargada, de manera que al lanzarla sea más probable que aparezca cara que cruz. Sea  $X$  = cantidad de caras en los 15 lanzamientos. Se declarará cargada a favor de cara si  $X \geq 11$ . Encontrar el valor  $p$  correspondiente al resultado  $X = 10$ . Comparar el valor  $p$  con el valor de  $\alpha$  en este problema.
- 10.56** Se lanza una moneda 20 veces para determinar si está cargada. Se declarará cargada si  $X = 0, 1, 2, 3, 4, 16, 17, 18, 19$  y  $20$ , donde  $X$  = cantidad de cruces obtenidas. Encontrar el valor  $p$  correspondiente al resultado  $X = 17$ . Comparar el valor  $p$  con el valor de  $\alpha$  en este problema.
- 10.57** En una línea de producción se fabrican teléfonos celulares. Tres por ciento de defectuosos se considera aceptable. De la producción diaria se selecciona una muestra de 50. Si en la muestra se encuentran más de tres defectuosos, se considera que el porcentaje de defectuosos se ha excedido del 3% y la línea de producción se detiene hasta que se satisfaga el 3%. Emplear EXCEL para determinar  $\alpha$ .
- 10.58** En el problema 10.57 encontrar la probabilidad de que 4% de defectuosos no haga que se detenga la línea de producción.
- 10.59** Para determinar si un dado está balanceado se lanza 20 veces. Se declarará que no está balanceado porque el 6 aparece más de  $1/6$  de las veces si en 20 lanzamientos se obtienen más de 5 seises. Hallar el valor de  $\alpha$ . Si se lanza el dado 20 veces y se obtienen 6 seises, hallar el valor  $p$  correspondiente a este resultado.

# TEORÍA DE LAS MUESTRAS PEQUEÑAS

# 11

En los capítulos anteriores con frecuencia se utilizó el hecho de que si el tamaño de las muestras es grande,  $N > 30$ , lo que se conoce como *muestras grandes*, las distribuciones muestrales de muchos de los estadísticos son aproximadamente normales; esta aproximación mejora a medida que aumenta  $N$ . Si el tamaño de las muestras es  $N < 30$ , lo que se conoce como *muestras pequeñas*, esta aproximación no es buena y empeora a medida que  $N$  disminuye, de manera que es necesario hacer algunas modificaciones.

Al estudio de las distribuciones muestrales de los estadísticos, cuando las muestras son pequeñas, se le llama *teoría de las muestras pequeñas*. Sin embargo, un nombre más adecuado sería *teoría del muestreo exacto*, ya que los resultados obtenidos son válidos tanto para muestras grandes como para muestras pequeñas. En este capítulo se estudian tres distribuciones importantes: la distribución  $t$  de Student, la distribución  $\chi^2$  cuadrada y la distribución  $F$ .

## DISTRIBUCIÓN $t$ DE STUDENT

Sea el estadístico

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{s} \sqrt{N-1} = \frac{\bar{X} - \mu}{\hat{s}/\sqrt{N}} \quad (1)$$

que es análogo al estadístico  $z$  dado por

$$z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{N}}.$$

Si se consideran muestras de tamaño  $N$  extraídas de una población normal (o aproximadamente normal) cuya media es  $\mu$  y si para cada muestra se calcula  $t$ , usando la media muestral  $\bar{X}$  y la desviación estándar muestral  $s$  o  $\hat{s}$ , se obtiene la distribución muestral de  $t$ . Esta distribución (ver figura 11-1) está dada por

$$Y = \frac{Y_0}{\left(1 + \frac{t^2}{N-1}\right)^{N/2}} = \frac{Y_0}{\left(1 + \frac{t^2}{\nu}\right)^{(\nu+1)/2}} \quad (2)$$

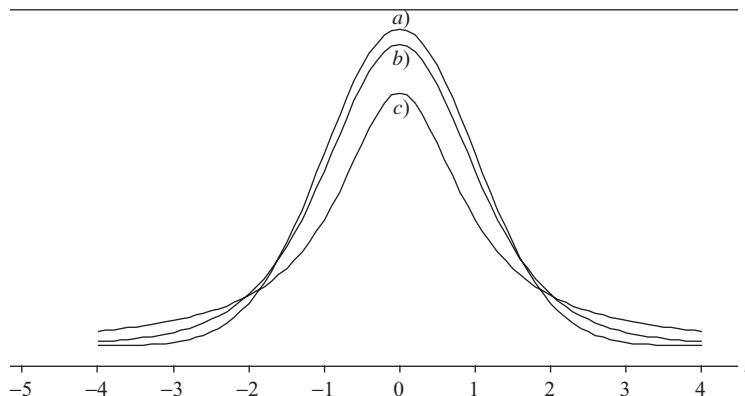


Figura 11-1 a) Curva normal estándar, b)  $t$  de Student para  $\nu = 5$ , c)  $t$  de Student para  $\nu = 1$ .

donde  $Y_0$  es una constante que depende de  $N$ , tal que el área total bajo la curva sea 1, y donde a la constante  $\nu = (N - 1)$  se le conoce como el *número de grados de libertad* ( $\nu$  es la letra griega nu).

A la distribución (2) se le llama *distribución t de Student* en honor a su descubridor, W. S. Gossett, quien en la primera mitad del siglo xx publicó sus trabajos bajo el seudónimo “Student”.

Si los valores de  $\nu$  o de  $N$  son grandes ( $N \geq 30$ ), la curva (2) se approxima a la curva normal estándar

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)t^2}$$

como se muestra en la figura 11-1.

## INTERVALOS DE CONFIANZA

Como se hizo en el capítulo 9 con las distribuciones normales, se pueden definir intervalos de confianza de 95%, 99% u otros intervalos usando la tabla de la distribución  $t$  que aparece en el apéndice III. De esta manera puede estimarse la media poblacional  $\mu$  dentro de determinados límites de confianza.

Por ejemplo, si  $-t_{.975}$  y  $t_{.975}$  son los valores de  $t$  para los cuales 2.5% del área se encuentra repartida en cada una de las colas de la distribución  $t$ , entonces el intervalo de confianza para  $t$  de 95% es

$$-\bar{t}_{.975} < \frac{\bar{X} - \mu}{s} \sqrt{N - 1} < t_{.975} \quad (3)$$

a partir de lo cual se puede estimar que  $\mu$  se encuentra en el intervalo

$$\bar{X} - t_{.975} \frac{s}{\sqrt{N - 1}} < \mu < \bar{X} + t_{.975} \frac{s}{\sqrt{N - 1}} \quad (4)$$

con una confianza de 95% (es decir, con una probabilidad de 0.95). Obsérvese que  $t_{.975}$  representa el valor del percentil 97.5, y que  $t_{.025} = -t_{.975}$  representa el valor del percentil 2.5.

En general, los límites de confianza para la media poblacional se representan mediante

$$\bar{X} \pm t_c \frac{s}{\sqrt{N - 1}} \quad (5)$$

donde los valores  $\pm t_c$ , llamados *valores críticos* o *coeficientes de confianza*, dependen del nivel de confianza deseado y del tamaño de la muestra. Estos valores se leen en el apéndice III.

Se supone que la muestra se toma de una población normal. Esta suposición se puede verificar empleando la prueba para normalidad de Kolmogorov-Smirnov.

Comparando la ecuación (5) con los límites de confianza ( $\bar{X} \pm z_c \sigma / \sqrt{N}$ ) dados en el capítulo 9, se ve que cuando se tienen muestras pequeñas  $z_c$  (que se obtienen de la distribución normal) se sustituye por  $t_c$  (que se obtiene de la distribución  $t$ ) y que  $\sigma$  se sustituye por  $\sqrt{N/(N-1)}s = \hat{s}$ , que es la estimación de  $\sigma$ . A medida que  $N$  aumenta, ambos métodos tienden a coincidir.

## PRUEBAS DE HIPÓTESIS Y DE SIGNIFICANCIA

Las pruebas de hipótesis y de significancia, o reglas de decisión (vistas en el capítulo 10), pueden extenderse fácilmente a problemas con muestras pequeñas; la única diferencia es que la *puntuación z*, o *estadístico z*, se sustituye por la *puntuación t* o *estadístico t* apropiado.

1. **Media.** Para probar la hipótesis  $H_0$  de que una población normal tiene una media  $\mu$ , se usa la puntuación  $t$  (o estadístico  $t$ )

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{s} \sqrt{N-1} = \frac{\bar{X} - \mu}{\hat{s}} \sqrt{N} \quad (6)$$

donde  $\bar{X}$  es la media de una muestra de tamaño  $N$ . Esto es análogo a usar la puntuación  $z$

$$z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{N}}$$

para una  $N$  grande, salvo que se usa  $\hat{s} = \sqrt{N/(N-1)}s$  en lugar de  $\sigma$ . La diferencia es que mientras  $z$  está distribuida normalmente,  $t$  sigue una distribución de Student. A medida que  $N$  aumenta, estas distribuciones tienden a coincidir.

2. **Diferencias entre medias.** Supóngase que de poblaciones normales cuya desviaciones estándar son iguales ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ) se toman dos muestras aleatorias de tamaños  $N_1$  y  $N_2$ . Supóngase, además, que las medias de estas dos muestras son  $\bar{X}_1$  y  $\bar{X}_2$  y que sus desviaciones estándar son  $s_1$  y  $s_2$ , respectivamente. Para probar la hipótesis  $H_0$  de que las muestras provienen de una misma población (es decir que  $\mu_1 = \mu_2$  y también  $\sigma_1 = \sigma_2$ ) se usa la puntuación  $t$  dada por

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma \sqrt{1/N_1 + 1/N_2}} \quad \text{donde} \quad \sigma = \sqrt{\frac{N_1 s_1^2 + N_2 s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (7)$$

Esta distribución  $t$  tiene una distribución de Student con  $\nu = N_1 + N_2 - 2$  grados de libertad. El uso de la ecuación (7) se hace plausible al hacer  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$  en la puntuación  $z$  de la ecuación (2) del capítulo 10 y después usar como estimación de  $\sigma^2$  la media ponderada

$$\frac{(N_1 - 1)\hat{s}_1^2 + (N_2 - 1)\hat{s}_2^2}{(N_1 - 1) + (N_2 - 1)} = \frac{N_1 s_1^2 + N_2 s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}$$

donde  $\hat{s}_1^2$  y  $\hat{s}_2^2$  son estimadores insesgados de  $\sigma_1^2$  y  $\sigma_2^2$ .

## DISTRIBUCIÓN JI CUADRADA

Sea el estadístico

$$\chi^2 = \frac{Ns^2}{\sigma^2} = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \cdots + (X_N - \bar{X})^2}{\sigma^2} \quad (8)$$

donde  $\chi$  es la letra griega *ji* y  $\chi^2$  se lee “*ji cuadrada*”.

Si se consideran muestras de tamaño  $N$  obtenidas de una población normal cuya desviación estándar es  $\sigma$ , y si para cada muestra se calcula  $\chi^2$ , se obtiene una distribución muestral de  $\chi^2$ . Esta distribución, llamada *distribución ji cuadrada*, está dada por

$$Y = Y_0(\chi^2)^{(1/2)(\nu-2)} e^{-(1/2)\chi^2} = Y_0 \chi^{\nu-2} e^{-(1/2)\chi^2} \quad (9)$$

donde  $\nu = N - 1$  es el *número de grados de libertad* y  $Y_0$  es una constante que depende de  $\nu$ , de manera que el área bajo la curva sea 1. En la figura 11-2 se presentan distribuciones ji cuadrada correspondientes a diversos valores de  $\nu$ . El valor máximo de  $Y$  se obtiene cuando  $\chi^2 = \nu - 2$  para  $\nu \geq 2$ .

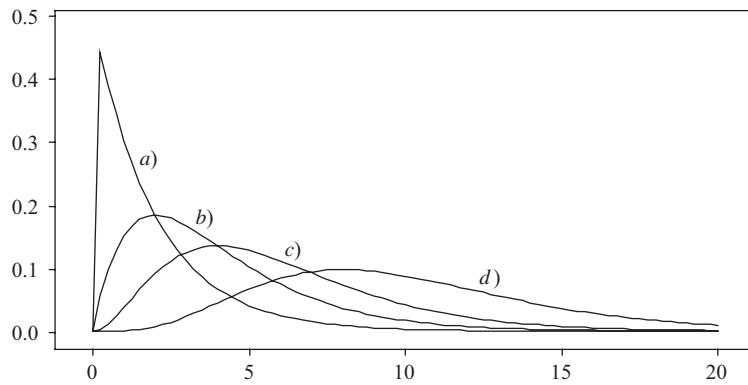


Figura 11-2 Distribuciones ji cuadrada correspondientes a: a) 2, b) 4, c) 6 y d) 10 grados de libertad.

## INTERVALOS DE CONFIANZA PARA $\sigma$

Como se hizo con la distribución normal y con la distribución  $t$ , pueden definirse límites de confianza de 95%, 99%, u otros límites empleando la tabla de distribución  $\chi^2$  que se presenta en el apéndice IV. De esta manera puede estimarse la desviación estándar poblacional  $\sigma$  en términos de la desviación estándar muestral dentro de determinados límites de confianza.

Por ejemplo, si  $\chi^2_{.025}$  y  $\chi^2_{.975}$  son los valores de  $\chi^2$  (llamados *valores críticos*), tales que 2.5% del área se encuentra repartida en ambas colas de la distribución, entonces el intervalo de confianza de 95% es

$$\chi^2_{.025} < \frac{Ns^2}{\sigma^2} < \chi^2_{.975} \quad (10)$$

de donde se ve que puede estimarse que  $\sigma$  se encuentra en el intervalo

$$\frac{s\sqrt{N}}{\chi_{.975}} < \sigma < \frac{s\sqrt{N}}{\chi_{.025}} \quad (11)$$

con 95% de confianza. De manera similar se pueden encontrar otros intervalos de confianza. Los valores  $\chi_{.025}$  y  $\chi_{.975}$  representan, respectivamente, los percentiles 2.5 y 97.5.

En el apéndice IV se encuentran valores percentiles correspondientes a diversos grados de libertad  $\nu$ . Si se tienen valores grandes de  $\nu$  ( $\nu \geq 30$ ), se puede usar el hecho de que  $(\sqrt{2\chi^2} - \sqrt{2\nu - 1})$  se approxima mucho a una distribución normal con media 0 y desviación estándar 1; por lo tanto, las tablas para la distribución normal pueden emplearse cuando  $\nu \geq 30$ . Si  $\chi_p^2$  y  $z_p$  son los percentiles  $p$  de la distribución ji cuadrada y de la distribución normal, respectivamente, se tiene

$$\chi_p^2 = \frac{1}{2}(z_p + \sqrt{2\nu - 1})^2 \quad (12)$$

En este caso hay una gran coincidencia con los resultados obtenidos en los capítulos 8 y 9.

Para más aplicaciones de la distribución ji cuadrada, ver el capítulo 12.

## GRADOS DE LIBERTAD

Para calcular un estadístico, por ejemplo (1) y (8), es necesario emplear observaciones obtenidas de una muestra y también ciertos parámetros poblacionales. Si estos parámetros no se conocen, es necesario estimarlos a partir de la muestra.

El *número de grados de libertad* de un estadístico, que por lo general se denota  $\nu$ , se define como la cantidad  $N$  de observaciones en la muestra (es decir, el tamaño de la muestra) menos la cantidad  $k$  de parámetros poblacionales que tengan que estimarse a partir de las observaciones muestrales. En símbolos,  $\nu = N - k$ .

En el caso del estadístico (1), la cantidad de observaciones independientes en la muestra es  $N$ , y a partir de ellas se calculan  $\bar{X}$  y  $s$ . Sin embargo, como se necesita estimar  $\mu$ ,  $k = 1$  y por lo tanto  $\nu = N - 1$ .

En el caso del estadístico (8), la cantidad de observaciones independientes en la muestra es  $N$ , a partir de las cuales se calcula  $s$ . Sin embargo, como se tiene que estimar  $\sigma$ ,  $k = 1$  y por lo tanto  $\nu = N - 1$ .

## LA DISTRIBUCIÓN F

Según se ha visto, en algunas aplicaciones es importante conocer la distribución muestral de la diferencia entre las medias ( $\bar{X}_1 - \bar{X}_2$ ) de dos muestras. De igual manera, algunas veces se necesita la distribución muestral de la diferencia entre varianzas ( $S_1^2 - S_2^2$ ). Sin embargo, resulta que esta distribución es bastante complicada. Debido a ello, se considera el estadístico  $S_1^2/S_2^2$ , ya que un cociente grande o pequeño indica una gran diferencia, en tanto que un cociente cercano a 1 indica una diferencia pequeña. En este caso se puede encontrar una distribución muestral a la que se le conoce como *distribución F* en honor a R. A. Fischer.

Más precisamente, supóngase que se tienen dos muestras, 1 y 2, de tamaños  $N_1$  y  $N_2$ , respectivamente, obtenidas de dos poblaciones normales (o casi normales) cuyas varianzas son  $\sigma_1^2$  y  $\sigma_2^2$ . Sea el estadístico

$$F = \frac{\hat{S}_1^2/\sigma_1^2}{\hat{S}_2^2/\sigma_2^2} = \frac{N_1 S_1^2/(N_1 - 1)\sigma_1^2}{N_2 S_2^2/(N_2 - 1)\sigma_2^2} \quad (13)$$

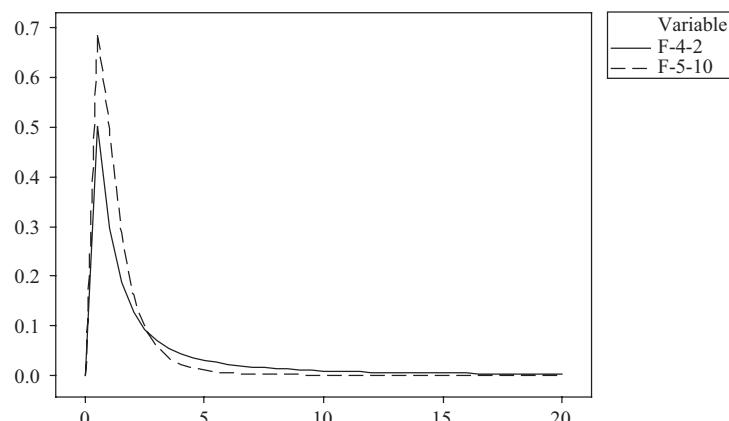
donde

$$\hat{S}_1^2 = \frac{N_1 S_1^2}{N_1 - 1} \quad \hat{S}_2^2 = \frac{N_2 S_2^2}{N_2 - 1}. \quad (14)$$

Entonces a la distribución muestral de  $F$  se le llama distribución *F* de Fisher, o simplemente distribución *F*, con  $\nu_1 = N_1 - 1$  y  $\nu_2 = N_2 - 1$  grados de libertad. Esta distribución está dada por

$$Y = \frac{C F^{(\nu_1/2)-1}}{(\nu_1 F + \nu_2)^{(\nu_1+\nu_2)/2}} \quad (15)$$

donde  $C$  es una constante que depende de  $\nu_1$  y  $\nu_2$ , de manera que el área total bajo la curva sea 1. Esta curva tiene una forma similar a la de las curvas que se muestran en la figura 11-3, aunque esta forma puede variar de manera notable de acuerdo con los valores de  $\nu_1$  y  $\nu_2$ .



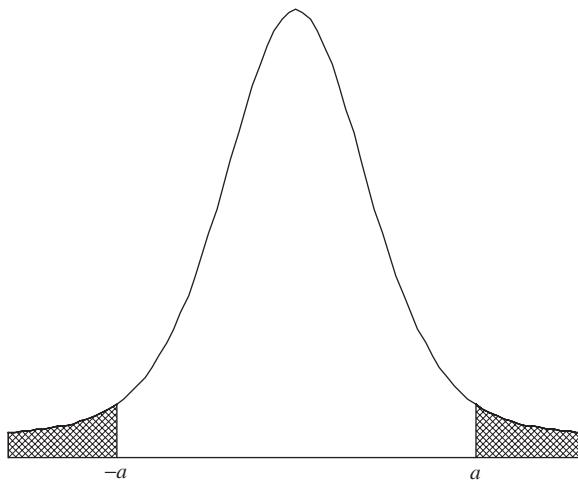
**Figura 11-3** La línea continua representa la distribución *F* con 4 y 2 grados de libertad, y la línea punteada representa la distribución *F* con 5 y 10 grados de libertad.

En los apéndices V y VI se dan los valores percentiles de  $F$  para los cuales las áreas en la cola derecha son 0.05 y 0.01, respectivamente, que se denotan  $F_{.95}$  y  $F_{.99}$ . Estos valores que representan los niveles de significancia del 5% y del 1% se usan para determinar si la varianza  $S_1^2$  es significativamente mayor que la varianza  $S_2^2$ . En la práctica, como muestra 1 se considera la muestra que tenga la mayor varianza.

El software para estadística permite encontrar las áreas bajo la distribución  $t$  de Student, la distribución  $\chi^2$  cuadrada y la distribución  $F$ . Este software también permite trazar las distintas distribuciones. Esto se ilustrará en la sección de problemas resueltos de este capítulo.

## PROBLEMAS RESUELTOS

### DISTRIBUCIÓN $t$ DE STUDENT



**Figura 11-4 Distribución  $t$  de Student para 9 grados de libertad.**

- 11.1** En la figura 11-4 se muestra la gráfica de la distribución  $t$  de Student para nueve grados de libertad. Utilizar el apéndice III para hallar los valores de  $a$  para los que: *a)* el área a la derecha de  $a$  sea 0.05, *b)* el total del área sombreada sea 0.05, *c)* el total del área que no está sombreada sea 0.99, *d)* el área sombreada de la izquierda sea 0.01 y *e)* el área a la izquierda de  $a$  sea 0.90. Hallar los incisos del *a)* al *e)* empleando EXCEL.

### SOLUCIÓN

- Si el área sombreada a la derecha de  $a$  es 0.05, el área a la izquierda de  $a$  es  $(1 - 0.05) = 0.95$ , y  $a$  representa el percentil 95,  $t_{.95}$ . En el apéndice III, se desciende por la columna cuyo encabezado es  $\nu$  hasta llegar a la entrada 9, después se avanza a la derecha hasta la columna cuyo encabezado es  $t_{.95}$ ; el resultado, 1.83, es el valor de  $t$  que se busca.
- Si el total del área sombreada es 0.05, entonces, por simetría, el área sombreada de la derecha es 0.025. Por lo tanto, el área a la izquierda de  $a$  es  $(1 - 0.025) = 0.975$  y  $a$  representa el percentil 97.5,  $t_{.975}$ . En el apéndice III se encuentra que 2.26 es el valor de  $t$  buscado.
- Si el total del área no sombreada es 0.99, entonces el total del área sombreada es  $(1 - 0.99) = 0.01$  y el área sombreada a la derecha de  $a$  es  $0.01/2 = 0.005$ . En el apéndice III se encuentra que  $t_{.995} = 3.25$ .
- Si el área sombreada a la izquierda es 0.01, entonces por simetría el área sombreada a la derecha es 0.01. En el apéndice III,  $t_{.99} = 2.82$ . Por lo tanto, el valor crítico de  $t$  para el cual el área sombreada a la izquierda es 0.01 es igual a  $-2.82$ .
- Si el área sombreada a la izquierda de  $a$  es 0.90,  $a$  corresponde al percentil 90,  $t_{.90}$ , el cual en el apéndice III se encuentra que es igual a 1.38.

Usando EXCEL, con la expresión =TINV(0.1,9) se obtiene 1.833113. EXCEL requiere la suma de las áreas en las dos colas y los grados de libertad. De igual manera, con =TINV(0.05,9) se obtiene 2.262157, con =TINV(0.01,9) se obtiene 3.249836, con =TINV(0.02,9) se obtiene 2.821438 y con =TINV(0.2,9) se obtiene 1.383029.

- 11.2** Encontrar los valores críticos de  $t$  para los cuales el área de la cola derecha de la distribución  $t$  es 0.05, siendo el número de grados de libertad,  $\nu$ , igual a: a) 16, b) 27 y c) 200.

### SOLUCIÓN

Usando el apéndice III, en la columna cuyo encabezado es  $t_{.95}$  se encuentran los valores: a) 1.75, correspondiente a  $\nu = 16$ ; b) 1.70, correspondiente a  $\nu = 27$  y c) 1.645, correspondiente a  $\nu = 200$ . (El último es el valor que se obtendría usando la curva normal; en el apéndice III este valor corresponde a la entrada en el último renglón marcado  $\infty$ , o infinito.)

- 11.3** Los coeficientes de confianza del 95% (dos colas) en la distribución normal son  $\pm 1.96$ . ¿Cuáles son los coeficientes correspondientes en la distribución  $t$  para: a)  $\nu = 9$ , b)  $\nu = 20$ , c)  $\nu = 30$  y d)  $\nu = 60$ ?

### SOLUCIÓN

Para los coeficientes de confianza de 95% (dos colas), el total del área sombreada en la figura 11-4 debe ser 0.05; por lo tanto, el área sombreada de la cola derecha debe ser 0.025 y el correspondiente valor de  $t$  es  $t_{.975}$ . Entonces, los coeficientes de confianza buscados son  $\pm t_{.975}$ , que para los valores de  $\nu$  dados son: a)  $\pm 2.26$ , b)  $\pm 2.09$ , c)  $\pm 2.04$  y d)  $\pm 2.00$ .

- 11.4** En una muestra de 10 mediciones del diámetro de una esfera, la media es  $\bar{X} = 438$  centímetros (cm) y la desviación estándar es  $s = 0.06$  cm. Encontrar los límites de confianza de: a) 95% y b) 99% para el verdadero diámetro.

### SOLUCIÓN

- a) Los límites de confianza del 95% están dados por  $\bar{X} \pm t_{.975}(s/\sqrt{N-1})$ .

Como  $\nu = N - 1 = 10 - 1 = 9$ , se encuentra que  $t_{.975} = 2.26$  [ver también el problema 11.3a)]. Despues, usando  $\bar{X} = 4.38$  y  $s = 0.06$ , los límites de confianza buscados de 95% son  $4.38 \pm 2.26(0.06/\sqrt{10-1}) = 4.38 \pm 0.0452$  cm. Por lo tanto, se puede tener una confianza de 95% en que la verdadera media se encuentra entre  $(4.38 - 0.045) = 4.335$  cm y  $(4.38 + 0.045) = 4.425$  cm.

- b) Los límites de confianza del 99% están dados por  $\bar{X} \pm t_{.995}(s/\sqrt{N-1})$ .

Para  $\nu = 9$ ,  $t_{.995} = 3.25$ . Entonces, los límites de confianza del 99% son  $4.38 \pm 3.25(0.06/\sqrt{10-1}) = 4.38 \pm 0.0650$  cm y el intervalo de confianza de 99% es 4.315 a 4.445 cm.

- 11.5** De 25 trabajadores seleccionados en forma aleatoria se registró la cantidad de días que el año pasado faltaron al trabajo debido al síndrome del túnel carpiano, relacionado con el trabajo. Los resultados se presentan en la tabla 11.1. Cuando se usan estos datos para establecer un intervalo de confianza para la media poblacional de todos los casos, relacionados con el trabajo, de síndrome del túnel carpiano, se supone que el número de días de ausencia se distribuye normalmente en la población. Usar los datos para probar la suposición de normalidad, y si se está dispuesto a asumir la normalidad, entonces dar un intervalo de 95% para  $\mu$ .

Tabla 11.1

|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| 21 | 23 | 33 | 32 | 37 |
| 40 | 37 | 29 | 23 | 29 |
| 24 | 32 | 24 | 46 | 32 |
| 17 | 29 | 26 | 46 | 27 |
| 36 | 38 | 28 | 33 | 18 |

## SOLUCIÓN

La gráfica de probabilidad normal de MINITAB (figura 11-5) indica que la suposición de la normalidad es razonable, ya que el valor  $p$  es mayor a 0.15. Este valor  $p$  se usa para probar la hipótesis nula de que los datos han sido tomados de una población distribuida en forma normal. Empleando el nivel de significancia convencional, 0.05, la normalidad de la distribución de la población se rechazaría sólo si el valor  $p$  fuera menor a 0.05. Como se indica que el valor  $p$  correspondiente a la prueba de Kolmogorov-Smirnov para normalidad es valor  $p > 0.15$ , no se rechaza la suposición de normalidad.

Usando MINITAB, el intervalo de confianza que se encuentra es el siguiente. El intervalo de confianza de 95% para la media poblacional va de 27.21 a 33.59 días por año.

```
MTB > tinterval 95% confidence for data in cl
```

### Intervalos de confianza

| Variable | N  | Mean  | StDev | SE Mean | 95.0 % CI      |
|----------|----|-------|-------|---------|----------------|
| days     | 25 | 30.40 | 7.72  | 1.54    | (27.21, 33.59) |

- 11.6** El espesor de las arandelas producidas con una máquina es 0.050 pulgadas (in). Para determinar si la máquina está trabajando de manera adecuada se toma una muestra de 10 arandelas en las cuales el espesor medio es 0.053 in y la desviación estándar es 0.003 in. Probar la hipótesis de que la máquina está trabajando en forma adecuada usando los niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01.

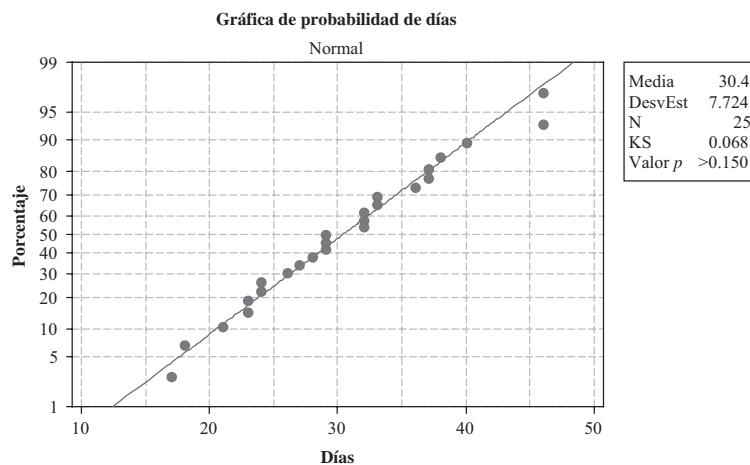


Figura 11-5 Gráfica de probabilidad normal y prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov.

## SOLUCIÓN

Se desea decidir entre las dos hipótesis:

$$H_0: \mu = 0.050, \text{ la máquina está trabajando de manera adecuada.}$$

$$H_1: \mu \neq 0.050, \text{ la máquina no está trabajando en forma adecuada.}$$

Por lo tanto, se requiere una prueba de dos colas. De acuerdo con la hipótesis  $H_0$  se tiene

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{s} \sqrt{N-1} = \frac{0.053 - 0.050}{0.003} \sqrt{10-1} = 3.00$$

- a)* Para una prueba de dos colas a nivel de significancia 0.05, se adopta la siguiente regla de decisión:

Aceptar  $H_0$  si  $t$  se encuentra dentro del intervalo  $-t_{.975}$  a  $t_{.975}$ , el cual para  $10 - 1 = 9$  grados de libertad es el intervalo  $-2.26$  a  $2.26$ .

Rechazar  $H_0$  si no es así.

Como  $t = 3.00$ , se rechaza  $H_0$  al nivel 0.05.

b) Para una prueba de dos colas al nivel de significancia 0.01, se adopta la siguiente regla de decisión:

Aceptar  $H_0$  si  $t$  se encuentra dentro del intervalo  $-t_{.995}$  a  $t_{.995}$ , el cual para  $10 - 1 = 9$  grados de libertad es el intervalo  $-3.25$  a  $3.25$ .

Rechazar  $H_0$  si no es así.

Como  $t = 3.00$ , se acepta  $H_0$  al nivel de significancia 0.01.

Como  $H_0$  se puede rechazar al nivel de significancia 0.05 pero no al nivel de significancia 0.01, se dice que la muestra da como resultado una *probabilidad significativa* (ver esta terminología al final del problema 10.5). Por lo tanto, será recomendable verificar el funcionamiento de la máquina o, por lo menos, tomar otra muestra.

- 11.7** El gerente de un centro comercial realiza una prueba de hipótesis para probar  $\mu = \$50$  contra  $\mu \neq \$50$ , donde  $\mu$  representa la cantidad media que gasta un comprador en ese centro comercial. En los datos que se presentan en la tabla 11.2 se dan las cantidades, en dólares, gastadas por 28 personas en el centro comercial. Para esta prueba de hipótesis, usando la distribución  $t$  de Student, se supone que los datos empleados para la prueba han sido tomados de una población distribuida normalmente. Esta suposición de normalidad puede comprobarse usando cualquiera de los métodos para *pruebas de normalidad*. MINITAB tiene tres posibilidades diferentes para pruebas de normalidad. Probar la normalidad al nivel de significancia convencional  $\alpha = 0.05$ . Si la suposición de normalidad no se rechaza, entonces se procede a realizar la prueba de hipótesis en que  $\mu = \$50$  contra la alternativa  $\mu \neq \$50$  empleando  $\alpha = 0.05$ .

**Tabla 11.2**

|    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|
| 68 | 49 | 45 | 76 | 65 | 50 |
| 54 | 92 | 24 | 36 | 60 | 66 |
| 57 | 74 | 52 | 75 | 36 | 40 |
| 62 | 56 | 94 | 57 | 64 |    |
| 72 | 65 | 59 | 45 | 33 |    |

## SOLUCIÓN

Empleando la prueba para normalidad de Anderson-Darling de MINITAB se obtiene el valor  $p = 0.922$ , la prueba de normalidad de Ryan-Joyner da un valor  $p$  mayor a 0.10, y la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov da un valor  $p$  mayor a 0.15. Al nivel de significancia convencional de 5%, en ninguno de los tres casos se puede rechazar la hipótesis de que los datos han sido tomados de una población distribuida normalmente. Recuérdese que una hipótesis nula se rechaza sólo si el valor  $p$  es menor que el nivel de significancia pre establecido. A continuación se presenta el análisis de MINITAB para la prueba de la cantidad media gastada por los clientes. Empleando el método clásico para pruebas de hipótesis, la hipótesis nula se rechaza si el valor encontrado para el estadístico de prueba es mayor, en valor absoluto, a 2.05. El valor crítico, 2.05, se encuentra empleando la distribución  $t$  de Student para 27 grados de libertad. Como el valor hallado para el estadístico de prueba es 18.50, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que la cantidad media gastada por los clientes es mayor a \$50. Si hace la prueba de hipótesis empleando el método del valor  $p$ , entonces como el valor  $p = 0.0000$  es menor al nivel de significancia (0.05), también se rechaza la hipótesis nula.

### Despliegue de datos

| Amount | 54 | 57 | 62 | 72 | 49 | 92 | 74 | 56 |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 68     | 45 | 24 | 52 | 94 | 59 | 76 | 36 | 75 |
| 57     | 45 | 65 | 60 | 36 | 64 | 33 | 50 | 66 |
| 40     |    |    |    |    |    |    |    |    |

```
MTB > TTest 0.0 'Amount';
SUBC > Alternative 0.
```

## T-Test of the Mean

Test of mu = 0.00 vs mu not = 0.00

| Variable | N  | Mean  | StDev | SE Mean | T     | P      |
|----------|----|-------|-------|---------|-------|--------|
| Amount   | 28 | 58.07 | 16.61 | 3.14    | 18.50 | 0.0000 |

- 11.8** El cociente intelectual (CI) de 16 estudiantes de una región de una ciudad resultó con una media de 107 y una desviación estándar de 10, el CI de 14 estudiantes de otra región de esa ciudad resultó de 112 y la desviación estándar de 8. Al nivel de significancia: a) 0.01 y b) 0.05, ¿hay diferencia entre los CI de estos dos grupos?

**SOLUCIÓN**

Si  $\mu_1$  y  $\mu_2$ , respectivamente, denotan las medias poblacionales de los CI de los estudiantes de estas dos regiones, hay que decidir entre las hipótesis:

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ , en esencia no hay diferencia entre los dos grupos.

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ , hay una diferencia significativa entre los dos grupos.

De acuerdo con la hipótesis  $H_0$ ,

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma \sqrt{1/N_1 + 1/N_2}} \quad \text{donde} \quad \sigma = \sqrt{\frac{N_1 s_1^2 + N_2 s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}}$$

Por lo tanto,  $\sigma = \sqrt{\frac{16(10)^2 + 14(8)^2}{16 + 14 - 2}} = 9.44$  y  $t = \frac{112 - 107}{9.44 \sqrt{1/16 + 1/14}} = 1.45$

- a) Empleando una prueba de dos colas al nivel de significancia 0.01,  $H_0$  se rechaza si  $t$  queda fuera del intervalo  $-t_{.995}$  a  $t_{.995}$ , el cual para  $(N_1 + N_2 - 2) = (16 + 14 - 2) = 28$  grados de libertad es el intervalo  $-2.76$  a  $2.76$ . Por lo tanto, al nivel de significancia 0.01 no se puede rechazar  $H_0$ .
- b) Empleando una prueba de dos colas al nivel de significancia 0.05,  $H_0$  se rechaza si  $t$  queda fuera del intervalo  $-t_{.975}$  a  $t_{.975}$ , el cual para 28 grados de libertad es el intervalo  $-2.05$  a  $2.05$ . Por lo tanto, al nivel de significancia 0.05 no se puede rechazar  $H_0$ .

Se concluye que no hay una diferencia significativa entre los CI de los dos grupos.

- 11.9** En la tabla 11.3 se dan los costos anuales (en miles de dólares) de colegiatura, alojamiento y manutención en 10 universidades privadas elegidas en forma aleatoria y 15 universidades públicas elegidas en forma aleatoria. Probar la hipótesis nula de que el costo medio anual en las universidades privadas es 10 mil dólares mayor al costo medio anual en las universidades públicas, contra la hipótesis alternativa de que la diferencia no es de 10 mil dólares. Usar el nivel de significancia 0.05. Antes de realizar la prueba de las medias, probar, al nivel de significancia 0.05, la suposición de normalidad y de varianzas iguales.

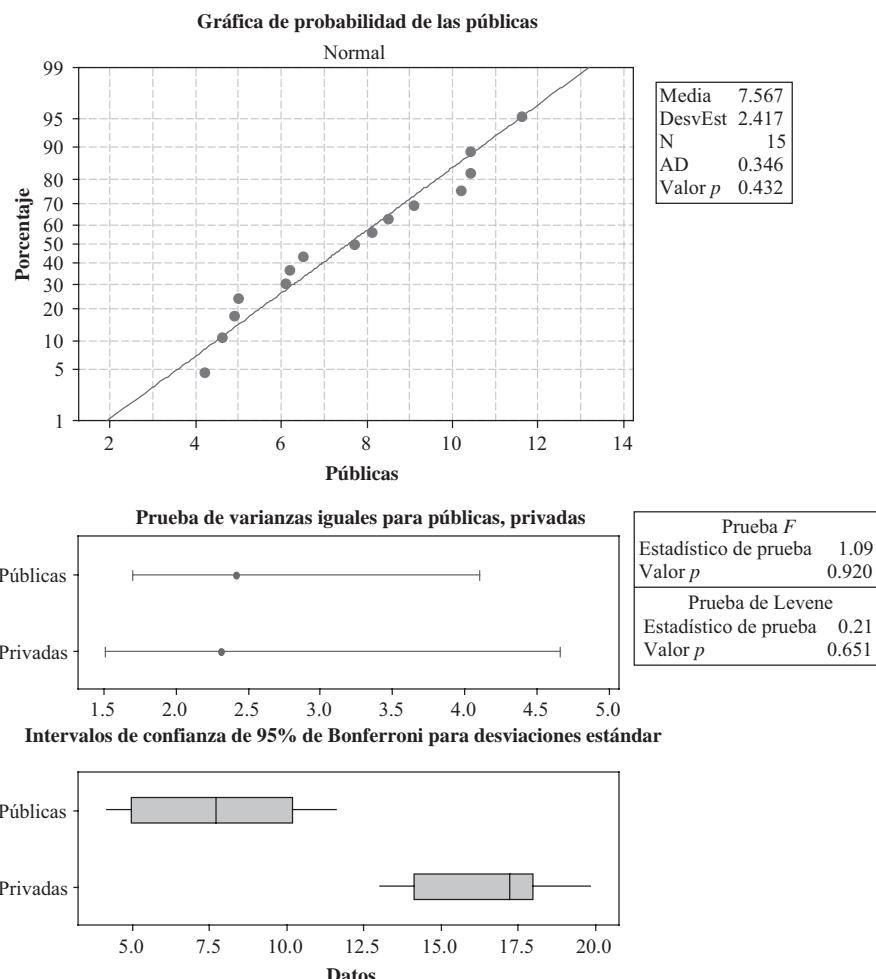
**Tabla 11.3**

| Universidades públicas |      |      | Universidades privadas |      |
|------------------------|------|------|------------------------|------|
| 4.2                    | 9.1  | 11.6 | 13.0                   | 17.7 |
| 6.1                    | 7.7  | 10.4 | 18.8                   | 17.6 |
| 4.9                    | 6.5  | 5.0  | 13.2                   | 19.8 |
| 8.5                    | 6.2  | 10.4 | 14.4                   | 16.8 |
| 4.6                    | 10.2 | 8.1  | 17.7                   | 16.1 |

**SOLUCIÓN**

En la figura 11-6 se muestran los resultados de MINITAB para la prueba de normalidad de Anderson-Darling de las universidades públicas. Dado que el valor  $p$  (0.432) no es menor a 0.05, la suposición de normalidad no se rechaza. Una

prueba similar para las universidades privadas indica que la suposición de normalidad también es válida para las universidades privadas.



**Figura 11-6 Prueba de normalidad de Anderson-Darling y prueba F de varianzas iguales.**

La prueba  $F$  que se muestra en la parte inferior de la figura 11-6 indica que puede suponerse que las varianzas son iguales. Con la secuencia de comandos “**Stat ⇒ Basic Statistics ⇒ 2-sample t**” se obtiene el resultado que se da a continuación. Los resultados indican que no se puede rechazar que el costo de las universidades privadas sea 10 mil dólares mayor al de las universidades públicas.

#### Prueba T de dos muestras y CI: públicas, privadas

Two-sample T for Public vs Private

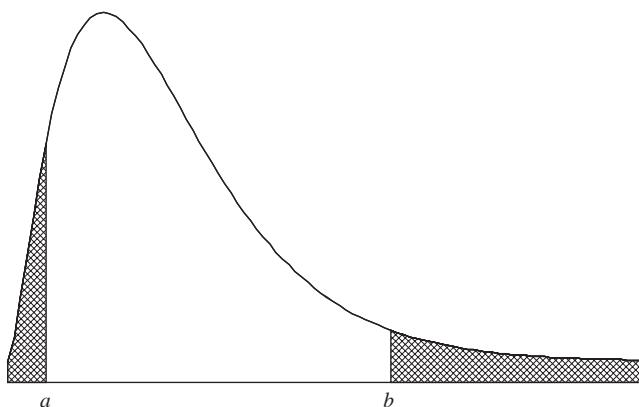
|         | N  | Mean  | StDev | SE Mean |
|---------|----|-------|-------|---------|
| Public  | 15 | 7.57  | 2.42  | 0.62    |
| Private | 10 | 16.51 | 2.31  | 0.73    |

```

Difference = mu (Public) - mu(Private)
Estimate for difference: -8.9433
95% CI for difference: (-10.9499, -6.9367)
T-Test of difference = -10 (vs not =) : T-Value = 1.09 P-Value = 0.287
DF = 23
Both use Pooled StDev = 2.3760

```

## DISTRIBUCIÓN JI CUADRADA



**Figura 11-7 Distribución ji cuadrada para 5 grados de libertad.**

- 11.10** En la figura 11-7 se muestra la gráfica de la distribución ji cuadrada para 5 grados de libertad. Empleando el apéndice IV, hallar los valores críticos de  $\chi^2$  para los cuales: a) el área sombreada de la derecha es 0.05, b) el total del área sombreada es 0.05, c) el área sombreada de la izquierda es 0.10 y d) el área sombreada de la derecha es 0.01. Hallar también estas respuestas usando EXCEL.

### SOLUCIÓN

- Si el área sombreada de la derecha es 0.05, entonces el área a la izquierda de  $b$  es  $(1 - 0.05) = 0.95$  y  $b$  es el percentil 95,  $\chi^2_{.95}$ . Refiérase al apéndice IV, bajar por la columna que tiene como encabezado  $\nu$  hasta llegar a la entrada 5, y después avanzar hacia la derecha hasta la columna cuyo encabezado es  $\chi^2_{.95}$ ; el resultado, 11.1, es el valor crítico de  $\chi^2$  que se busca.
- Como esta distribución no es simétrica, hay muchos valores críticos para los que el total del área sombreada es 0.05. Por ejemplo, el área sombreada de la derecha puede ser 0.04 y el área sombreada de la izquierda 0.01. Sin embargo, se acostumbra, a menos que se especifique otra cosa, elegir estas áreas de manera que sean iguales. En este caso, entonces, cada área es 0.025. Si el área sombreada de la derecha es 0.025, el área a la izquierda de  $b$  es  $1 - 0.025 = 0.975$  y  $b$  es el percentil 97.5,  $\chi^2_{.975}$ , el cual de acuerdo con el apéndice IV es 12.8. De igual manera, si el área sombreada de la izquierda es 0.025, el área a la izquierda de  $a$  es 0.025 y  $a$  es el percentil 2.5,  $\chi^2_{.025}$ , que es igual a 0.831. Por lo tanto, los valores críticos son 0.831 y 12.8.
- Si el área sombreada de la izquierda es 0.10,  $a$  representa el percentil 10,  $\chi^2_{.10}$ , el cual es igual a 1.61.
- Si el área sombreada de la derecha es 0.01, el área a la izquierda de  $b$  es 0.99 y  $b$  representa el percentil 99,  $\chi^2_{.99}$ , el cual es igual a 15.1.

La respuesta de EXCEL para a) se obtiene con =CHIINV(0.05,5), que da 11.0705. El primer parámetro de CHIINV es el área a la derecha del punto y el segundo es el número de grados de libertad. La respuesta para b) se obtiene con =CHIINV(0.975,5), que da 0.8312 y =CHIINV(0.025,5) da 12.8325. La respuesta para c) se obtiene con =CHIINV(0.9,5), que da 1.6103. La respuesta para d) se obtiene con =CHIINV(0.01,5), que da 15.0863.

- 11.11** Encontrar el valor crítico de  $\chi^2$  tal que el área en la cola derecha de la distribución  $\chi^2$  sea 0.05, siendo el número de grados de libertad,  $\nu$ , igual a: a) 15, b) 21 y c) 50.

### SOLUCIÓN

En el apéndice IV, en la columna cuyo encabezado es  $\chi^2_{.95}$  se encuentran los valores: a) 25.0 que corresponde a  $\nu = 15$ ; b) 32.7 que corresponde a  $\nu = 21$  y c) 67.5 que corresponde a  $\nu = 50$ .

- 11.12** Encontrar el valor mediano de  $\chi^2$  que corresponda a: a) 9, b) 28 y c) 40 grados de libertad.

### SOLUCIÓN

En el apéndice IV, en la columna cuyo encabezado es  $\chi^2_{.50}$  (ya que la mediana es el percentil 50), se encuentran los valores: a) 8.34, que corresponde a  $\nu = 9$ ; b) 27.3, que corresponde a  $\nu = 28$ , y c) 39.3, que corresponde a  $\nu = 40$ .

Resulta interesante observar que los valores medianos están muy cercanos a la igualdad del número de grados de libertad. De hecho, para  $\nu > 10$ , los valores medianos son iguales a  $(\nu - 0.7)$ , como puede verse en la tabla.

- 11.13** La desviación estándar de las estaturas de 16 estudiantes elegidos en forma aleatoria en una escuela de 1 000 estudiantes es 2.40 in. Encontrar los límites de confianza de: a) 95% y b) 99% para la desviación estándar de las estaturas de todos los estudiantes de esta escuela.

### SOLUCIÓN

- a) Los límites de confianza de 95% son  $s\sqrt{N}/\chi_{.975}$  y  $s\sqrt{N}/\chi_{.025}$ .

Para  $\nu = 16 - 1 = 15$  grados de libertad,  $\chi^2_{.975} = 27.5$  (o bien  $\chi_{.975} = 5.24$ ) y  $\chi^2_{.025} = 6.26$  (o bien  $\chi_{.025} = 2.50$ ). Los límites de confianza de 95% son  $2.40\sqrt{16}/5.24$  y  $2.40\sqrt{16}/2.50$  (es decir, 1.83 y 3.84 in). Por lo tanto, se puede tener una confianza de 95% de que la desviación estándar poblacional se encuentra entre 1.83 y 3.84 in.

- b) Los límites de confianza de 99% son  $s\sqrt{N}/\chi_{.995}$  y  $s/\sqrt{N}/\chi_{.005}$ .

Para  $\nu = 16 - 1 = 15$  grados de libertad están dados por  $\chi^2_{.995} = 32.8$  (o  $\chi_{.995} = 5.73$ ) y  $\chi^2_{.005} = 4.60$  (o bien  $\chi_{.005} = 2.14$ ). Entonces los límites de confianza de 99% son  $2.40\sqrt{16}/5.73$  y  $2.40\sqrt{16}/2.14$  (es decir, 1.68 y 4.49 in). Por lo tanto, se puede tener una confianza de 99% de que la desviación estándar poblacional se encuentre entre 1.68 y 4.49 in.

- 11.14** Encontrar  $\chi^2_{.95}$  para: a)  $\nu = 50$  y b)  $\nu = 100$  grados de libertad.

### SOLUCIÓN

Para  $\nu$  mayor que 30 se puede emplear el hecho de que  $\sqrt{2\chi^2} - \sqrt{2\nu - 1}$  es una distribución aproximadamente normal en la que la media es 0 y la desviación estándar es 1. Entonces, si  $z_p$  es un percentil de la puntuación  $z$  en la distribución normal estándar, se puede escribir, con un alto grado de aproximación,

$$\sqrt{2\chi^2_p} - \sqrt{2\nu - 1} = z_p \quad \text{o} \quad \sqrt{2\chi^2_p} = z_p + \sqrt{2\nu - 1}$$

de donde  $\chi^2_p = \frac{1}{2}(z_p + \sqrt{2\nu - 1})^2$ .

- a) Si  $\nu = 50$ ,  $\chi^2_{.95} = \frac{1}{2}(z_{.95} + \sqrt{2(50) - 1})^2 = \frac{1}{2}(1.64 + \sqrt{99})^2 = 67.2$ , lo que coincide muy bien con el valor 67.5 dado en el apéndice IV.

- b) Si  $\nu = 100$ ,  $\chi^2_{.95} = \frac{1}{2}(z_{.95} + \sqrt{2(100) - 1})^2 = \frac{1}{2}(1.64 + \sqrt{199})^2 = 124.0$  (verdadero valor = 124.3).

- 11.15** La desviación estándar del tiempo de vida de una muestra de 200 bombillas eléctricas es 100 horas (h). Encontrar los límites de confianza de: a) 95% y b) 99% para la desviación estándar de estas bombillas eléctricas.

### SOLUCIÓN

- a) Los límites de confianza de 95% están dados por  $s\sqrt{N}/\chi_{.975}$  y  $s\sqrt{N}/\chi_{.025}$ .

Para  $\nu = 200 - 1 = 199$  grados de libertad, se encuentra (como en el problema 11.14)

$$\chi^2_{.975} = \frac{1}{2}(z_{.975} + \sqrt{2(199) - 1})^2 = \frac{1}{2}(1.96 + 19.92)^2 = 239$$

$$\chi^2_{.025} = \frac{1}{2}(z_{.025} + \sqrt{2(199) - 1})^2 = \frac{1}{2}(-1.96 + 19.92)^2 = 161$$

por lo tanto,  $\chi_{.975} = 15.5$  y  $\chi_{.025} = 12.7$ . De manera que los límites de confianza del 95% son  $100\sqrt{200}/15.5 = 91.2$  h y  $100\sqrt{200}/12.7 = 111.3$  h, respectivamente. Se puede tener una confianza de 95% en que la desviación estándar poblacional esté entre 91.2 y 111.3 h.

- b) Los límites de confianza de 99% están dados por  $s\sqrt{N}/\chi_{.995}$  y  $s\sqrt{N}/\chi_{.005}$ .

Para  $\nu = 200 - 1 = 199$  grados de libertad,

$$\begin{aligned}\chi_{.995}^2 &= \frac{1}{2}(z_{.995} + \sqrt{2(199) - 1})^2 = \frac{1}{2}(2.58 + 19.92)^2 = 253 \\ \chi_{.005}^2 &= \frac{1}{2}(z_{.005} + \sqrt{2(199) - 1})^2 = \frac{1}{2}(-2.58 + 19.92)^2 = 150\end{aligned}$$

por lo tanto,  $\chi_{.995} = 15.9$  y  $\chi_{.005} = 12.2$ . De manera que los límites de confianza del 99% son  $100\sqrt{200}/15.9 = 88.9$  h y  $100\sqrt{200}/12.2 = 115.9$  h, respectivamente. Se puede tener una confianza de 99% en que la desviación estándar poblacional esté entre 88.9 y 115.9 h.

- 11.16** Un fabricante de ejes requiere que en el proceso de fabricación el diámetro de los ejes sea 5.000 cm. Además, para garantizar que las ruedas se ajusten de manera adecuada a los ejes, es necesario que la desviación estándar en los diámetros sea 0.005 cm o menos. En la tabla 11.4 se presentan los diámetros de los 20 ejes de una muestra.

Tabla 11.4

|       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| 4.996 | 4.998 | 5.002 | 4.999 |
| 5.010 | 4.997 | 5.003 | 4.998 |
| 5.006 | 5.004 | 5.000 | 4.993 |
| 5.002 | 4.996 | 5.005 | 4.992 |
| 5.007 | 5.003 | 5.000 | 5.000 |

El fabricante desea probar la hipótesis nula de que la desviación estándar poblacional es 0.005 cm contra la hipótesis alternativa de que la desviación estándar poblacional es mayor a 0.005 cm. Si se confirma la hipótesis alternativa, entonces el proceso de fabricación debe detenerse y deben hacerse ajustes a las máquinas. Para la prueba se supone que los diámetros de los ejes tienen una distribución normal. Probar esta suposición al nivel de significancia 0.05. Si se está dispuesto a suponer normalidad, entonces hacer la prueba concerniente a la desviación estándar poblacional al nivel de significancia 0.05.

### SOLUCIÓN

En la figura 11-8 se muestra la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. Como el valor  $p$  que se obtiene es grande (0.9966), no se puede rechazar la normalidad. Esta gráfica de probabilidad y el análisis de Shapiro-Wilk se hicieron empleando el paquete STATISTIX de software para estadística.

Se tiene que decidir entre las hipótesis:

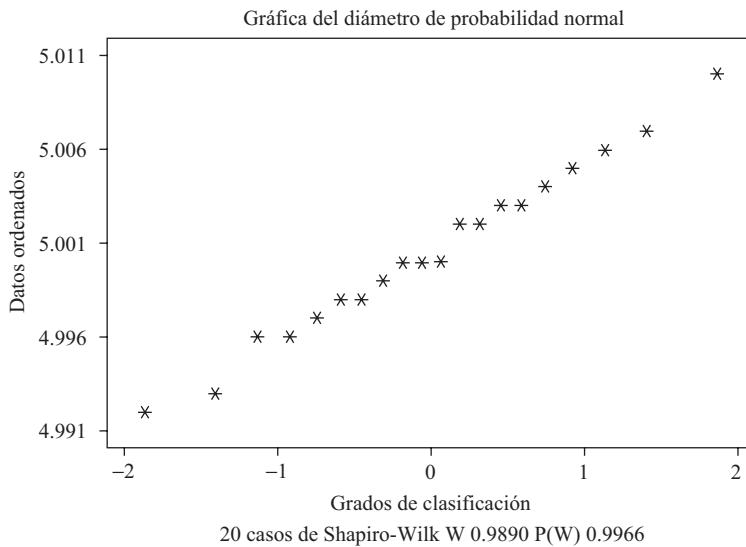
$$\begin{aligned}H_0: \sigma &= 0.005 \text{ cm, el valor observado se debe a la casualidad.} \\ H_1: \sigma &= 0.005 \text{ cm, la variabilidad es demasiado grande.}\end{aligned}$$

El análisis realizado con SAS es el siguiente:

```
One Sample Chi-square Test for a Variance
Sample Statistics for diameter
N          Mean        Std. Dev.        Variance
-----  20          5.0006      0.0046       215E-7

Hypothesis Test
Null hypothesis: Variance of diameter <=0.000025
Alternative: Variance of diameter > 0.000025
Chi-square      Df        Prob
-----  16.358      19        0.6333
```

Como el valor  $p$  obtenido (0.6333) es grande, esto indica que la hipótesis nula no se debe rechazar.



**Figura 11-8 STATISTIX, prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.**

- 11.17** La desviación estándar en los pesos de paquetes de 40.0 onzas (oz), llenados con una máquina, ha sido 0.25 oz. En una muestra de 20 paquetes se observa una desviación estándar de 0.32 oz. ¿Este aparente incremento en la variabilidad es significativo a los niveles: a) 0.05 y b) 0.01?

### SOLUCIÓN

Decidir entre las hipótesis:

$$H_0: \sigma = 0.25 \text{ oz}, \text{ el resultado observado es casualidad.}$$

$$H_1: \sigma > 0.25 \text{ oz}, \text{ la variabilidad ha aumentado.}$$

El valor de  $\chi^2$  para la muestra es

$$\chi^2 = \frac{Ns^2}{\sigma^2} = \frac{20(0.32)^2}{(0.25)^2} = 32.8$$

- a) Empleando una prueba de una cola, al nivel de significancia 0.05, se rechaza  $H_0$  si los valores muestrales de  $\chi^2$  son mayores a  $\chi^2_{0.95}$ , lo que es igual a 30.1 para  $\nu = 20 - 1 = 19$  grados de libertad. Por lo tanto, se rechaza  $H_0$  al nivel de significancia 0.05.
- b) Empleando una prueba de una cola, al nivel de significancia 0.01, se puede rechazar  $H_0$  si los valores muestrales de  $\chi^2$  son mayores a  $\chi^2_{0.99}$ , lo que es igual a 36.2 para 19 grados de libertad. Por lo tanto, al nivel de significancia 0.01, no se rechaza  $H_0$ .

Se concluye que la variabilidad probablemente ha aumentado. Se recomienda examinar la máquina.

### LA DISTRIBUCIÓN F

- 11.18** De poblaciones distribuidas en forma normal se obtienen dos muestras de tamaños 9 y 12 cuyas varianzas son 16 y 25. Si las varianzas muestrales son 20 y 8, respectivamente, determinar si la primera muestra tiene una varianza bastante mayor que la segunda muestra al nivel de significancia: a) 0.05, b) 0.01 y c) usar EXCEL para mostrar que el área a la derecha de 4.03 está entre 0.01 y 0.05.

**SOLUCIÓN**

Para estas dos muestras, 1 y 2, se tiene  $N_1 = 9$ ,  $N_2 = 12$ ,  $\sigma_1^2 = 16$ ,  $\sigma_2^2 = 25$ ,  $S_1^2 = 20$  y  $S_2^2 = 8$ . Por lo tanto,

$$F = \frac{\hat{S}_1^2/\sigma_1^2}{\hat{S}_2^2/\sigma_2^2} = \frac{N_1 S_1^2/(N_1 - 1)\sigma_1^2}{N_2 S_2^2/(N_2 - 1)\sigma_2^2} = \frac{(9)(20)/(9 - 1)(16)}{(12)(8)/(12 - 1)(25)} = 4.03$$

- a) Los grados de libertad para el numerador y para el denominador de  $F$  son  $\nu_1 = N_1 - 1 = 9 - 1 = 8$  y  $\nu_2 = N_2 - 1 = 12 - 1 = 11$ . Entonces, en el apéndice V se encuentra que  $F_{.95} = 2.95$ . Como el valor de  $F$  calculado es  $F = 4.03$ , que es mayor a 2.95, se concluye que la varianza de la muestra 1 es significativamente mayor que la de la muestra 2, al nivel de significancia 0.05.
  - b) Para  $\nu_1 = 8$  y  $\nu_2 = 11$ , en el apéndice VI se encuentra  $F_{.01} = 4.74$ . En este caso el valor de  $F$  calculado es  $F = 4.03$ , que es menor a 4.74. Por lo tanto, no se puede concluir que la varianza de la muestra 1 sea mayor que la varianza de la muestra 2, al nivel de significancia 0.01.
  - c) El área a la derecha de 4.03 está dada por =FDIST(4.03,8,11) y es 0.018.
- 11.19** De dos poblaciones distribuidas de manera normal se toman dos muestras, una de tamaño 8 y otra de tamaño 10, cuyas varianzas corresponden a 20 y 36. Encontrar la probabilidad de que la varianza de la primera muestra sea mayor al doble de la varianza de la segunda muestra.
- Usar EXCEL para hallar la probabilidad exacta de que  $F$  con 7 y 9 grados de libertad sea mayor a 3.70.

**SOLUCIÓN**

Se tiene  $N_1 = 8$ ,  $N_2 = 10$ ,  $\sigma_1^2 = 20$ , y  $\sigma_2^2 = 36$ . Por lo tanto,

$$F = \frac{8S_1^2/(7)(20)}{10S_2^2/(9)(36)} = 1.85 \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

El número de grados de libertad en el numerador y en el denominador es  $\nu_1 = N_1 - 1 = 8 - 1 = 7$  y  $\nu_2 = N_2 - 1 = 10 - 1 = 9$ . Ahora, si  $S_1^2$  es mayor al doble de  $S_2^2$ , entonces

$$F = 1.85 \frac{S_1^2}{S_2^2} > (1.85)(2) = 3.70$$

Buscando 3.70 en los apéndices V y VI se encuentra que la probabilidad es menor a 0.05 pero mayor a 0.01. Para encontrar los valores exactos se necesita una tabulación más extensa que la distribución  $F$ .

Con EXCEL la respuesta se obtiene con =FDIST(3.7,7,9), que da 0.036, que es la probabilidad de que  $F$  con 7 y 9 grados de libertad sea mayor a 3.70.

**PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS****DISTRIBUCIÓN  $t$  DE STUDENT**

- 11.20** En una distribución de Student con 15 grados de libertad, encontrar el valor de  $t_1$  tal que: a) el área a la derecha de  $t_1$  sea 0.01, b) el área a la izquierda de  $t_1$  sea 0.95, c) el área a la derecha de  $t_1$  sea 0.10, d) el área a la derecha de  $t_1$  junto con el área a la izquierda de  $-t_1$  sea 0.01 y e) el área entre  $-t_1$  y  $t_1$  sea 0.95.
- 11.21** Usando el apéndice III, encontrar los valores críticos de  $t$  para los cuales el área en la cola derecha de la distribución  $t$  sea 0.01, siendo el número de grados de libertad,  $\nu$ , igual a: a) 4, b) 12, c) 25, d) 60 y e) 150. Dar las soluciones de a) a e) usando EXCEL.

- 11.22** En la distribución  $t$  de Student encontrar los valores de  $t_1$  que satisfacen cada una de las condiciones siguientes:
- El área entre  $-t_1$  y  $t_1$  es 0.90 y  $\nu = 25$ .
  - El área a la izquierda de  $-t_1$  es 0.025 y  $\nu = 20$ .
  - El área a la derecha de  $t_1$  junto con el área a la izquierda de  $-t_1$  es 0.01 y  $\nu = 5$ .
  - El área a la derecha de  $t_1$  es 0.55 y  $\nu = 16$ .
- 11.23** Si una variable  $U$  tiene una distribución  $t$  de Student con  $\nu = 10$ , encontrar la constante  $C$  que satisface: *a)*  $\Pr\{U > C\} = 0.05$ , *b)*  $\Pr\{-C \leq U \leq C\} = 0.98$ , *c)*  $\Pr\{U \leq C\} = 0.20$  y *d)*  $\Pr\{U \geq C\} = 0.90$ .
- 11.24** En la distribución normal, los coeficientes de confianza de 99% (dos colas) son  $\pm 2.58$ . ¿Cuáles son los coeficientes correspondientes en la distribución  $t$  si: *a)*  $\nu = 4$ , *b)*  $\nu = 12$ , *c)*  $\nu = 25$ , *d)*  $\nu = 30$ , y *e)*  $\nu = 40$ ?
- 11.25** En una muestra de 12 mediciones de la resistencia a la ruptura de un hilo de algodón, la media es 7.38 gramos (g) y la desviación estándar 1.24 g. Encontrar los límites de confianza de: *a)* 95% y *b)* 99% para la verdadera resistencia a la ruptura y *c)* la solución que da MINITAB usando el resumen de estadísticos.
- 11.26** Resolver el ejercicio 11.25 suponiendo que los métodos de la teoría de muestras grandes son aplicables, y comparar los resultados obtenidos.
- 11.27** Se tomaron cinco mediciones del tiempo de reacción de una persona a cierto estímulo; las mediciones fueron 0.28, 0.30, 0.27, 0.33 y 0.31 segundos. Encontrar los límites de confianza de: *a)* 95% y *b)* 99% para el verdadero tiempo de reacción.
- 11.28** El tiempo medio de vida de los focos eléctricos producidos por una empresa ha sido 1 120 h y la desviación estándar 125 h. En una muestra de 8 focos eléctricos, recientemente producidos, el tiempo medio de vida fue de 1 070 h. Probar la hipótesis de que el tiempo medio de vida de los focos no ha variado, usando los niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01.
- 11.29** En el problema 11.28 probar las hipótesis  $\mu = 1 120$  h contra  $\mu < 1 120$  h, usando como niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01.
- 11.30** Las especificaciones en la producción de cierta aleación exigen 23.2% de cobre. En una muestra consistente en 10 análisis del producto, el contenido medio de cobre fue 23.5% y la desviación estándar 0.24%. A los niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01 ¿puede concluirse que el producto satisface las especificaciones?
- 11.31** En el problema 11.30, empleando los niveles de significancia: *a)* 0.01 y *b)* 0.05, probar la hipótesis de que el contenido medio de cobre es mayor que el requerido por las especificaciones.
- 11.32** Un experto asegura que introduciendo un nuevo tipo de máquina en un proceso de producción se puede disminuir notablemente el tiempo de producción. Debido a los gastos requeridos para el mantenimiento de esta máquina, el gerente encuentra que a menos que el tiempo de producción se reduzca por lo menos en 8%, no vale la pena introducir la nueva máquina. Seis experimentos resultantes mostraron que el tiempo de producción se redujo en 8.4% con una desviación estándar de 0.32%. Usando como niveles de significancia: *a)* 0.01 y *b)* 0.05, probar la hipótesis de que debe introducirse la nueva máquina.
- 11.33** Empleando una marca *A* de gasolina el rendimiento medio en millas por galón encontrado en cinco automóviles similares bajo condiciones idénticas es 22.6 y la desviación estándar es 0.48. Empleando la marca *B*, el rendimiento medio es 21.4 y la desviación estándar es 0.54. Usando el nivel de significancia 0.05, investigar si la marca *A* da realmente un mejor rendimiento que la marca *B*.

- 11.34** Se prueba el pH (grado de acidez de una solución) de dos soluciones químicas, *A* y *B*. En seis muestras de *A* la media en el pH es 7.2 y la desviación estándar es 0.024. En cinco muestras de la solución *B* la media en el pH es 7.49 y la desviación estándar es 0.032. Al nivel de significancia 0.05, determinar si el pH de estos dos tipos de soluciones es diferente.
- 11.35** En un examen de psicología, la media de las calificaciones de los 12 estudiantes de un grupo es 78 y la desviación estándar es 6; la media de las calificaciones de los 15 estudiantes de otro grupo es 74 y la desviación estándar es 8. Empleando el nivel de significancia 0.05, determinar si el primer grupo es mejor que el segundo grupo.

### LA DISTRIBUCIÓN JI CUADRADA

- 11.36** En el apéndice IV, en la distribución ji cuadrada para 12 grados de libertad, hallar el valor de  $\chi_c^2$  tal que: *a)* el área a la derecha de  $\chi_c^2$  sea 0.05, *b)* el área a la izquierda de  $\chi_c^2$  sea 0.99, *c)* el área a la derecha de  $\chi_c^2$  sea 0.025 y *d)* resolver los incisos del *a)* al *c)* empleando EXCEL.
- 11.37** Hallar los valores críticos de  $\chi^2$  para los cuales el área en la cola derecha de la distribución es 0.05, siendo el número de grados de libertad,  $\nu$ , igual a: *a)* 8, *b)* 19, *c)* 29 y *d)* 40.
- 11.38** Resolver el problema 11.37 si el área en la cola derecha es 0.01.
- 11.39** *a)* Encontrar  $\chi_1^2$  y  $\chi_2^2$  tales que el área bajo la distribución  $\chi^2$  para  $\nu = 20$  entre  $\chi_1^2$  y  $\chi_2^2$  sea 0.95, suponiendo áreas iguales a la derecha de  $\chi_2^2$  y a la izquierda de  $\chi_1^2$ .  
*b)* Mostrar que si en *a)* no se hace la suposición de áreas iguales, los valores  $\chi_1^2$  y  $\chi_2^2$  no son únicos.
- 11.40** Si una variable *U* tiene la distribución ji cuadrada con  $\nu = 7$ , encontrar  $\chi_1^2$  y  $\chi_2^2$  tales que: *a)*  $\Pr\{U > \chi_2^2\} = 0.025$ , *b)*  $\Pr\{U < \chi_1^2\} = 0.50$  y *c)*  $\Pr\{\chi_1^2 \leq U \leq \chi_2^2\} = 0.90$ .
- 11.41** La desviación estándar encontrada en la duración de 10 bombillas eléctricas producidas por una empresa es 120 h. Encontrar los límites de confianza de: *a)* 95% y *b)* 99% para la desviación estándar de todas las bombillas eléctricas fabricadas por la empresa.
- 11.42** Resolver el problema 11.41 si se tienen 25 bombillas eléctricas en las que la desviación estándar es 120 h.
- 11.43** Encontrar: *a)*  $\chi_{.05}^2$  y *b)*  $\chi_{.95}^2$  para  $\nu = 150$  empleando  $\chi_p^2 = \frac{1}{2}(z_p + \sqrt{2\nu - 1})^2$  y *c)* comparar estos resultados con los que se obtienen usando EXCEL.
- 11.44** Encontrar: *a)*  $\chi_{.025}^2$  y *b)*  $\chi_{.975}^2$  para  $\nu = 250$  empleando  $\chi_p^2 = \frac{1}{2}(z_p + \sqrt{2\nu - 1})^2$  y *c)* comparar estos resultados con los que se obtienen usando EXCEL.
- 11.45** Mostrar que si se tienen valores grandes de  $\nu$ , una buena aproximación a  $\chi^2$  es la dada por  $(v + z_p\sqrt{2\nu})$ , donde  $z_p$  es el percentil *p* de la distribución normal estándar.
- 11.46** Resolver el problema 11.39 usando la distribución  $\chi^2$  si en una muestra de 100 bombillas eléctricas se encuentra la misma desviación estándar de 120 h. Comparar los resultados con los obtenidos con los métodos del capítulo 9.
- 11.47** En el problema 11.44, ¿cuál es el intervalo de confianza de 95% que tiene la menor amplitud?

- 11.48** La desviación estándar en la resistencia a la ruptura de determinados cables producidos por una empresa es de 240 libras (lb). Después de que se introdujo una modificación en el proceso de fabricación de estos cables, en una muestra de ocho cables la desviación estándar encontrada fue 300 lb. Investigar la significancia del aparente aumento de variabilidad a los niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01.
- 11.49** La desviación estándar de la temperatura anual de una ciudad durante 100 años fue de 16° Fahrenheit. Usando la temperatura media del día 15 de cada mes durante los últimos 15 años, la desviación estándar calculada de la temperatura anual fue de 10° Fahrenheit. Probar la hipótesis de que la temperatura en la ciudad se volvió menos variable que en el pasado, usando los niveles de significancia de: *a)* 0.05 y *b)* 0.01.

#### LA DISTRIBUCIÓN *F*

- 11.50** Empleando los apéndices V y VI, encontrar los valores de *F* que se piden en los incisos del *a)* al *d)*.
- $F_{0.95}$  para  $V_1 = 8$  y  $V_2 = 10$ .
  - $F_{0.99}$  para  $V_1 = 24$  y  $V_2 = 11$ .
  - $F_{0.85}$  para  $N_1 = 16$  y  $N_2 = 25$ .
  - $F_{0.90}$  para  $N_1 = 21$  y  $N_2 = 23$ .
- 11.51** Resolver el problema 11.50 usando EXCEL.
- 11.52** De poblaciones distribuidas normalmente cuyas varianzas son 40 y 60 se toman dos muestras de tamaños 10 y 15, respectivamente. Si las varianzas muestrales son 90 y 50, determinar si la varianza de la muestra 1 es significativamente mayor que la de la muestra 2 a los niveles de: *a)* 0.05 y *b)* 0.01.
- 11.53** Dos empresas, *A* y *B*, fabrican bombillas eléctricas. Los tiempos de vida de estas bombillas están distribuidos casi en forma normal y sus desviaciones estándar son 20 y 27 h, respectivamente. Si se toman 16 bombillas de la empresa *A* y 20 bombillas de la empresa *B* y se determina que las desviaciones estándar de sus tiempos de vida corresponden a 15 y 40 h, ¿puede determinarse, a los niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01, que la variabilidad en las bombillas de *A* es mayor que la variabilidad en las bombillas de *B*?

# LA PRUEBA JI CUADRADA

# 12

## FRECUENCIAS OBSERVADAS Y FRECUENCIAS TEÓRICAS

Como se ha visto, los resultados obtenidos de las muestras no siempre coinciden exactamente con los resultados teóricos esperados según las reglas de la probabilidad. Por ejemplo, aunque de acuerdo con las consideraciones teóricas en 100 lanzamientos de una moneda se esperarían 50 caras y 50 cruces, es raro que se obtengan exactamente estos resultados.

Supóngase que en una muestra determinada se observa la ocurrencia de un conjunto de eventos  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_k$  (ver tabla 12.1) con las frecuencias  $o_1, o_2, o_3, \dots, o_k$ , llamadas *frecuencias observadas* y que, según las reglas de la probabilidad, se esperaría que estos eventos ocurrieran con frecuencias  $e_1, e_2, e_3, \dots, e_k$ , llamadas *frecuencias esperadas o teóricas*. Se desea saber si las frecuencias observadas difieren, de manera significativa, de las frecuencias esperadas.

Tabla 12.1

| Eventos                | $E_1$ | $E_2$ | $E_3$ | $\cdots$ | $E_k$ |
|------------------------|-------|-------|-------|----------|-------|
| Frecuencias observadas | $o_1$ | $o_2$ | $o_3$ | $\cdots$ | $o_k$ |
| Frecuencias esperadas  | $e_1$ | $e_2$ | $e_3$ | $\cdots$ | $e_k$ |

## DEFINICIÓN DE $\chi^2$

Una medida de la discrepancia entre las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas la proporciona el estadístico  $\chi^2$  (léase ji cuadrada) dado por

$$\chi^2 = \frac{(o_1 - e_1)^2}{e_1} + \frac{(o_2 - e_2)^2}{e_2} + \cdots + \frac{(o_k - e_k)^2}{e_k} = \sum_{j=1}^k \frac{(o_j - e_j)^2}{e_j} \quad (1)$$

Donde, si la frecuencia total es  $N$ ,

$$\sum o_j = \sum e_j = N \quad (2)$$

Una expresión equivalente a la fórmula (1) es (ver problema 12.11)

$$\chi^2 = \sum \frac{o_j^2}{e_j} - N \quad (3)$$

Si  $\chi^2 = 0$ , las frecuencias observadas y las frecuencias teóricas coinciden exactamente; en tanto que si  $\chi^2 > 0$ , la coincidencia no es exacta. Cuanto mayor sea el valor de  $\chi^2$ , mayor la discrepancia entre frecuencias observadas y frecuencias esperadas.

La distribución muestral de  $\chi^2$  se puede aproximar con bastante exactitud mediante la distribución ji cuadrada

$$Y = Y_0(\chi^2)^{1/2(\nu-2)}e^{-1/2\chi^2} = Y_0\chi^{\nu-2}e^{-1/2\chi^2} \quad (4)$$

(vista en el capítulo 11) si las frecuencias esperadas son mayores o iguales a 5. La aproximación mejora cuanto mayores sean estos valores.

El número de grados de libertad,  $\nu$ , es

1.  $\nu = k - 1$  si las frecuencias esperadas pueden calcularse sin tener que estimar parámetros poblacionales a partir de estadísticos muestrales. Obsérvese que a  $k$  se le resta 1 debido a la condición restrictiva (2), que establece que conociendo  $k - 1$  de las frecuencias esperadas, queda determinada la frecuencia restante.
2.  $\nu = k - 1 - m$  si las frecuencias esperadas sólo pueden calcularse estimando  $m$  parámetros poblacionales a partir de estadísticos muestrales.

## PRUEBAS DE SIGNIFICANCIA

En la práctica, las frecuencias esperadas se calculan basándose en la hipótesis  $H_0$ . Si de acuerdo con esta hipótesis el valor calculado para  $\chi^2$ , mediante las ecuaciones (1) o (3) es mayor a algún valor crítico (por ejemplo,  $\chi^2_{.95}$  o  $\chi^2_{.99}$ , que son los valores críticos para los niveles de significancia 0.05 y 0.01, respectivamente), se concluye que las frecuencias observadas difieren *en forma significativa* de las frecuencias esperadas y se rechaza  $H_0$  al correspondiente nivel de significancia; si no es así, se acepta  $H_0$  (o por lo menos no se rechaza). A este procedimiento se le conoce como *prueba ji cuadrada* de hipótesis o de significancia.

Es necesario notar que hay que tener desconfianza de aquellas circunstancias en las que  $\chi^2$  tenga un valor *demasiado cercano a cero*, pues es raro que exista una coincidencia *tan buena* entre las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas. Para examinar tales situaciones se determina si el valor obtenido para  $\chi^2$  es menor a  $\chi^2_{.05}$  o a  $\chi^2_{.01}$ , en cuyo caso se decide que a los niveles de significancia 0.05 o 0.01, respectivamente, la coincidencia es *demasiado buena*.

## LA PRUEBA JI CUADRADA DE BONDAD DE AJUSTE

La prueba chi cuadrada puede emplearse para determinar qué tan bien se ajustan una distribución teórica (por ejemplo, la distribución normal o la distribución binomial) a una distribución empírica (es decir, a una distribución obtenida a partir de datos muestrales). Ver los problemas 12.12 y 12.13.

**EJEMPLO 1** Un par de dados se lanzan 500 veces y las sumas de las caras que caen hacia arriba son las que se muestran en la tabla 12.2.

Tabla 12.2

| Suma      | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Observada | 15 | 35 | 49 | 58 | 65 | 76 | 72 | 60 | 35 | 29 | 6  |

Los números esperados, si el dado no está cargado, se determinan a partir de la distribución de  $x$  y son los que se muestran en la tabla 12.3.

Tabla 12.3

| $x$    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $p(x)$ | 1/36 | 2/36 | 3/36 | 4/36 | 5/36 | 6/36 | 5/36 | 4/36 | 3/36 | 2/36 | 1/36 |

En la tabla 12.4 se presentan las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas.

Tabla 12.4

| Observada | 15   | 35   | 49   | 58   | 65   | 76   | 72   | 60   | 35   | 29   | 6    |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Esperada  | 13.9 | 27.8 | 41.7 | 55.6 | 69.5 | 83.4 | 69.5 | 55.6 | 41.7 | 27.8 | 13.9 |

Si en las celdas B1:L2 de una hoja de cálculo de EXCEL se introducen las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas, en la celda B4 se introduce la expresión  $=(B1-B2)^2/B2$ , se hace clic y se arrastra desde B4 hasta L4 y las cantidades en B4:L4 se suman, se obtiene 10.34 como el valor de  $\chi^2 = \sum_j ((o_j - e_j)^2 / e_j)$ .

El valor  $p$  que corresponde a 10.34 se obtiene mediante la expresión de EXCEL =CHIDIST(10.34,10). Este valor  $p$  es 0.411 y dado que es grande, no hay razón para pensar que el dato esté cargado.

## TABLAS DE CONTINGENCIA

A tablas como la 12.1 en las que las frecuencias observadas ocupan un solo renglón se les llama *tablas de clasificación en un solo sentido*. Como el número de columnas es  $k$ , se les llama también *tablas  $1 \times k$*  (que se lee “1 por  $k$ ”). Por extensión de estas ideas, se obtienen *tablas de clasificación en dos sentidos*, o *tablas  $h \times k$* , en las que las frecuencias observadas ocupan  $h$  renglones y  $k$  columnas. A estas tablas se les suele llamar *tablas de contingencia*.

En una tabla de contingencia  $h \times k$ , para cada frecuencia observada hay una *frecuencia esperada* (o *teórica*), que se calcula basándose en alguna hipótesis y sujetándose a las reglas de probabilidad. A las frecuencias que ocupan las *celdas* de una tabla de contingencia se les llama *frecuencias de celda*. Al total de las frecuencias de un renglón o de una columna se le llama *frecuencia marginal*.

Para investigar el grado de coincidencia entre las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas se calcula el estadístico

$$\chi^2 = \sum_j \frac{(o_j - e_j)^2}{e_j} \quad (5)$$

donde la suma se realiza sobre todas las celdas de la tabla de contingencia y donde los símbolos  $o_j$  y  $e_j$  representan frecuencias, observada y esperada, en la celda  $j$ . Esta suma, que es análoga a la de la ecuación (1), contiene  $hk$  términos. La suma de todas las frecuencias observadas, que se denota  $N$ , es igual a la suma de todas las frecuencias esperadas [ver la ecuación (2)].

Como antes, el estadístico (5) tiene una distribución muestral que está dada, con una aproximación muy buena, por (4), siempre y cuando las frecuencias esperadas no sean demasiado pequeñas. El número de grados de libertad,  $\nu$ , de esta distribución ji cuadrada es, para  $h > 1$  y  $k > 1$ ,

1.  $\nu = (h - 1)(k - 1)$  si las frecuencias esperadas pueden calcularse sin necesidad de estimar parámetros poblacionales mediante estadísticos muestrales. Una demostración de esto se da en el problema 12.18.
2.  $\nu = (h - 1)(k - 1) - m$  si las frecuencias esperadas sólo pueden calcularse estimando  $m$  parámetros poblacionales mediante estadísticos muestrales.

Las pruebas de significancia para tablas  $h \times k$  son similares a las pruebas de significancia para tablas  $1 \times k$ . Las frecuencias esperadas se establecen basándose en la hipótesis  $H_0$  de que se trate; una de las hipótesis más empleadas es que las dos clasificaciones son independientes una de otra.

Las tablas de contingencia pueden extenderse a dimensiones mayores. Así, se pueden tener, por ejemplo, tablas  $h \times k \times 1$ , en las que hay tres clasificaciones.

**EJEMPLO 2** En la tabla 12.5 se presenta la manera en que las personas hacen sus declaraciones de impuestos y su nivel de estudios. La hipótesis nula es que la manera en que las personas hacen sus declaraciones de impuestos (usando software o sólo lápiz y papel) es independiente de su nivel de estudios. La tabla 12.5 es una tabla de contingencia.

Tabla 12.5

| Manera        | Nivel de estudios |              |          |
|---------------|-------------------|--------------|----------|
|               | Preparatoria      | Licenciatura | Maestría |
| Computadora   | 23                | 35           | 42       |
| Papel y lápiz | 45                | 30           | 25       |

Empleando MINITAB para analizar estos datos se obtienen los resultados siguientes.

### Prueba ji cuadrada: preparatoria, licenciatura, maestría

Los resultados esperados se muestran debajo de los observados

Las contribuciones de ji cuadrada se muestran debajo de los esperados

|       | preparatoria | licenciatura | maestría | Total |
|-------|--------------|--------------|----------|-------|
| 1     | 23           | 35           | 42       | 100   |
|       | 34.00        | 32.50        | 33.50    |       |
|       | 3.559        | 0.192        | 2.157    |       |
| 2     | 45           | 30           | 25       | 100   |
|       | 34.00        | 32.50        | 33.50    |       |
|       | 3.559        | 0.192        | 2.157    |       |
| Total | 68           | 65           | 67       | 200   |

Ji-Sq = 11.816, DF = 2, P-Value = 0.003

Debido a que el valor  $p$  es pequeño, se rechaza la hipótesis de independencia y se concluye que la manera en que se hace la declaración de impuestos y el nivel de educación no son independientes.

### CORRECCIÓN DE YATES POR CONTINUIDAD

Cuando a datos discretos se aplican fórmulas para datos continuos, como se ha visto en capítulos anteriores, es necesario hacer una corrección por continuidad. Para el empleo de la distribución ji cuadrada hay una corrección similar. Esta corrección consiste en reescribir la ecuación (1) de la manera siguiente:

$$\chi^2 \text{ (corregida)} = \frac{(|o_1 - e_1| - 0.5)^2}{e_1} + \frac{(|o_2 - e_2| - 0.5)^2}{e_2} + \dots + \frac{(|o_k - e_k| - 0.5)^2}{e_k} \quad (6)$$

y se le conoce como *corrección de Yates*. Para la ecuación (5) existe una modificación análoga.

En general, esta corrección sólo se hace cuando el número de grados de libertad es  $\nu = 1$ . Cuando se tienen muestras grandes, se obtiene prácticamente el mismo resultado que con  $\chi^2$  no corregida, pero cerca de los valores críticos pueden surgir dificultades (ver el problema 12.8). Cuando se tienen muestras pequeñas, donde cada una de las frecuencias esperadas está entre 5 y 10, quizás sea mejor comparar ambos valores de  $\chi^2$ , el corregido y el no corregido. Si ambos valores conducen a la misma conclusión respecto a la hipótesis, por ejemplo al rechazo al nivel 0.05, es raro que se encuentren dificultades. Si ambos valores conducen a conclusiones diferentes se puede recurrir a aumentar el tamaño de la muestra, o si esto no es posible se pueden usar métodos de probabilidad en los que se emplee la *distribución multinomial* del capítulo 6.

### FÓRMULAS SENCILLAS PARA CALCULAR $\chi^2$

Para calcular  $\chi^2$  pueden deducirse fórmulas sencillas en las que únicamente se emplean las frecuencias esperadas. A continuación se dan las fórmulas para tablas de contingencia  $2 \times 2$  y  $2 \times 3$  (ver las tablas 12.6 y 12.7, respectivamente).

#### Tablas $2 \times 2$

$$\chi^2 = \frac{N(a_1b_2 - a_2b_1)^2}{(a_1 + b_1)(a_2 + b_2)(a_1 + a_2)(b_1 + b_2)} = \frac{N\Delta^2}{N_1N_2N_AN_B} \quad (7)$$

**Tabla 12.6**

|       | I     | II    | Total |
|-------|-------|-------|-------|
| A     | $a_1$ | $a_2$ | $N_A$ |
| B     | $b_1$ | $b_2$ | $N_B$ |
| Total | $N_1$ | $N_2$ | $N$   |

**Tabla 12.7**

|       | I     | II    | III   | Total |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| A     | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $N_A$ |
| B     | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $N_B$ |
| Total | $N_1$ | $N_2$ | $N_3$ | $N$   |

donde  $\Delta = a_1b_2 - a_2b_1$ ,  $N = a_1 + a_2 + b_1 + b_2$ ,  $N_1 = a_1 + b_1$ ,  $N_2 = a_2 + b_2$ ,  $N_3 = b_1 + b_2$ ,  $N_A = a_1 + a_2$  y  $N_B = b_1 + b_2$  (ver problema 12.19). Empleando la corrección de Yates, esta ecuación se convierte en

$$\chi^2(\text{corregida}) = \frac{N(|a_1b_2 - a_2b_1| - \frac{1}{2}N)^2}{(a_1 + b_1)(a_2 + b_2)(a_1 + a_2)(b_1 + b_2)} = \frac{N(|\Delta| - \frac{1}{2}N)^2}{N_1 N_2 N_A N_B} \quad (8)$$

## Tablas $2 \times 3$

$$\chi^2 = \frac{N}{N_A} \left[ \frac{a_1^2}{N_1} + \frac{a_2^2}{N_2} + \frac{a_3^2}{N_3} \right] + \frac{N}{N_B} \left[ \frac{b_1^2}{N_1} + \frac{b_2^2}{N_2} + \frac{b_3^2}{N_3} \right] - N \quad (9)$$

donde se ha empleado el resultado general válido para todas las tablas de contingencia (ver el problema 12.43):

$$\chi^2 = \sum \frac{o_j^2}{e_j} - N \quad (10)$$

La fórmula (9) puede generalizarse a tablas  $2 \times k$  donde  $k > 3$  (ver el problema 12.46).

## COEFICIENTE DE CONTINGENCIA

Una medida del grado de relación, asociación o dependencia entre las clasificaciones en una tabla de contingencia es la dada por

$$C = \sqrt{\frac{\chi^2}{\chi^2 + N}} \quad (II)$$

que se conoce como *coeficiente de contingencia*. Cuanto mayor sea el valor de  $C$  mayor será el grado de relación entre las clasificaciones. El valor máximo de  $C$  está determinado por la cantidad de renglones y columnas de la tabla de contingencia y este valor nunca es mayor a 1. Si  $k$  es la cantidad de renglones y columnas en una tabla de contingencia, el valor máximo de  $C$  es  $\sqrt{(k-1)/k}$  (ver los problemas 12.22, 12.52 y 12.53).

**EJEMPLO 3** Encontrar el coeficiente de contingencia correspondiente al ejemplo 2.

$$C = \sqrt{\frac{\chi^2}{\chi^2 + N}} = \sqrt{\frac{11.816}{11.816 + 200}} = 0.236$$

## CORRELACIÓN DE ATRIBUTOS

Como las clasificaciones de una tabla de contingencia suelen describir características de personas u objetos, a estas clasificaciones se les suele llamar *atributos* y a su grado de dependencia, asociación o relación se le llama *correlación de atributos*. Para tablas  $k \times k$ , el coeficiente de correlación entre atributos (o clasificaciones) se define como

$$r = \sqrt{\frac{\chi^2}{N(k-1)}} \quad (12)$$

este coeficiente se encuentra entre 0 y 1 (ver el problema 12.24). En tablas  $2 \times 2$  en las que  $k = 2$ , a la correlación se le conoce como *correlación tetracórica*.

En el capítulo 14 se considera el problema general de la correlación entre variables numéricas.

## PROPIEDAD ADITIVA DE $\chi^2$

Supóngase que como resultado de la repetición de un experimento se obtienen los valores muestrales de  $\chi^2$  dados por  $\chi_1^2, \chi_2^2, \chi_3^2, \dots$  con  $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots$  grados de libertad, respectivamente. Entonces el resultado de todos estos experimentos puede considerarse equivalente al valor  $\chi^2$  dado por  $\chi_1^2 + \chi_2^2 + \chi_3^2 + \dots$  con  $\nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \dots$  grados de libertad (ver el problema 12.25).

## PROBLEMAS RESUELTOS

### LA PRUEBA JI CUADRADA

- 12.1** En 200 lanzamientos de una moneda se obtienen 115 caras y 85 cruces. Pruebe la hipótesis de que la moneda no está cargada a los niveles de significancia: a) 0.05 y b) 0.01, empleando el apéndice IV y c) pruebe esta hipótesis calculando el valor  $p$  y comparándolo con los niveles 0.05 y 0.01.

#### SOLUCIÓN

Las frecuencias observadas de caras y cruces son  $o_1 = 115$  y  $o_2 = 85$ , respectivamente, y las frecuencias esperadas de caras y cruces (si la moneda no está cargada) son  $e_1 = 100$  y  $e_2 = 100$ , respectivamente. Por lo tanto,

$$\chi^2 = \frac{(o_1 - e_1)^2}{e_1} + \frac{(o_2 - e_2)^2}{e_2} = \frac{(115 - 100)^2}{100} + \frac{(85 - 100)^2}{100} = 4.50$$

Dado que el número de categorías, o clases (caras, cruces), es  $k = 2$ ,  $\nu = k - 1 = 2 - 1 = 1$ .

- a) El valor crítico  $\chi_{.95}^2$  para 1 grado de libertad es 3.84. Por lo tanto, como  $4.50 > 3.84$ , al nivel de significancia 0.05 se rechaza la hipótesis de que la moneda no está cargada.
- b) El valor crítico  $\chi_{.99}^2$  para 1 grado de libertad es 6.63. Por lo tanto, como  $4.50 < 6.63$ , al nivel de significancia 0.01 no se puede rechazar la hipótesis de que la moneda no está cargada.

Se concluye que los resultados encontrados *tal vez sean significativos* y que la moneda *quizás esté cargada*. Para comparar este método con métodos usados antes, ver el problema 12.3.

Empleando EXCEL, el valor  $p$  se obtiene mediante =CHIDIST(4.5,1) que da como resultado 0.0339. Y empleando el método del valor  $p$  se ve que los resultados son significativos a 0.05, pero no a 0.01. Cualquiera de estos métodos puede emplearse para realizar la prueba.

- 12.2** Se repite el problema 12.1 empleando la corrección de Yates.

#### SOLUCIÓN

$$\begin{aligned}\chi^2 (\text{corregida}) &= \frac{(|o_1 - e_1| - 0.5)^2}{e_1} + \frac{(|o_2 - e_2| - 0.5)^2}{e_2} = \frac{(|115 - 100| - 0.5)^2}{100} + \frac{(|85 - 100| - 0.5)^2}{100} \\ &= \frac{(14.5)^2}{100} + \frac{(14.5)^2}{100} = 4.205\end{aligned}$$

Como  $4.205 > 3.84$  y  $4.205 < 6.63$ , las conclusiones a las que se llegó en el problema 12.1 son válidas. Para hacer una comparación con los métodos anteriores, ver el problema 12.3.

- 12.3** Resolver el problema 12.1 empleando la aproximación normal a la distribución binomial.

### SOLUCIÓN

De acuerdo con la hipótesis de que la moneda no está cargada, la media y la desviación estándar de la cantidad de caras esperadas en 200 lanzamientos de una moneda son  $\mu = Np = (200)(0.5) = 100$  y  $\sigma = \sqrt{Npq} = \sqrt{(200)(0.5)(0.5)} = 7.07$ , respectivamente.

#### Primer método

$$115 \text{ caras en unidades estándar} = \frac{115 - 100}{7.07} = 2.12$$

Al nivel de significancia 0.05, empleando una prueba de dos colas, la hipótesis de que la moneda no está cargada se rechaza si la puntuación  $z$  que se obtenga cae fuera del intervalo  $-1.96$  a  $1.96$ . Al nivel 0.01 el intervalo correspondiente es  $-2.58$  a  $2.58$ . Se concluye (como en el problema 12.1) que la hipótesis puede rechazarse al nivel 0.05, pero no al nivel 0.01.

Obsérvese que el cuadrado de la puntuación estándar anterior es  $(2.12)^2 = 4.50$ , que es igual al valor de  $\chi^2$  obtenido en el problema 12.1. Éste es siempre el caso en una prueba ji cuadrada con dos categorías (ver problema 12.10).

#### Segundo método

Usando la corrección por continuidad 115 o más caras es equivalente a 114.5 o más caras. Entonces 114.5 en unidades estándar  $= (114.5 - 100)/7.07 = 2.05$ . Esto conduce a la misma conclusión obtenida con el primer método.

Obsérvese que el cuadrado de la puntuación estándar es  $(2.05)^2 = 4.20$ , valor que coincide con el valor de  $\chi^2$  corregido por continuidad empleando la corrección de Yates en el problema 12.2. Éste es siempre el caso en una prueba ji cuadrada en la que haya dos categorías y se emplee la corrección de Yates.

- 12.4** En la tabla 12.8 se muestran las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas al lanzar un dado 120 veces.

- a) Pruebe la hipótesis de que el dado no está cargado calculando  $\chi^2$  y comparando el estadístico de prueba encontrado con el valor crítico correspondiente al nivel de significancia 0.05.
- b) Calcule el valor  $p$  y compárelo con 0.05 para probar la hipótesis.

Tabla 12.8

| Cara del dado          | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
|------------------------|----|----|----|----|----|----|
| Frecuencias observadas | 25 | 17 | 15 | 23 | 24 | 16 |
| Frecuencias esperadas  | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |

### SOLUCIÓN

$$\begin{aligned}\chi^2 &= \frac{(o_1 - e_1)^2}{e_1} + \frac{(o_2 - e_2)^2}{e_2} + \frac{(o_3 - e_3)^2}{e_3} + \frac{(o_4 - e_4)^2}{e_4} + \frac{(o_5 - e_5)^2}{e_5} + \frac{(o_6 - e_6)^2}{e_6} \\ &= \frac{(25 - 20)^2}{20} + \frac{(17 - 20)^2}{20} + \frac{(15 - 20)^2}{20} + \frac{(23 - 20)^2}{20} + \frac{(24 - 20)^2}{20} + \frac{(16 - 20)^2}{20} = 5.00\end{aligned}$$

- a) Empleando EXCEL, el valor crítico correspondiente a 0.05 se obtiene mediante la expresión  $=CHIINV(0.05,5)$ , que da 11.0705. El valor encontrado para el estadístico de prueba es 5.00. Como el valor encontrado para el estadístico de prueba no está en la región crítica 0.05, no se rechaza la hipótesis nula de que el dado no esté cargado.
- b) Empleando EXCEL, el valor  $p$  se obtiene mediante la expresión  $=CHIDIST(5.00,5)$ , que da 0.4159. Como el valor  $p$  no es menor a 0.05, no se rechaza la hipótesis nula de que el dado no esté cargado.

- 12.5** En la tabla 12.9 se muestra la distribución de los dígitos 0, 1, 2, ..., 9 en los 250 dígitos de una tabla de números aleatorios. a) Encontrar el valor del estadístico de prueba  $\chi^2$ , b) encontrar el valor crítico correspondiente a  $\alpha = 0.01$  y dar una conclusión y c) encontrar el valor  $p$  correspondiente al valor encontrado en el inciso a) y dar una conclusión para  $\alpha = 0.01$ .

Tabla 12.9

| Dígito                 | 0  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
|------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Frecuencias observadas | 17 | 31 | 29 | 18 | 14 | 20 | 35 | 30 | 20 | 36 |
| Frecuencias esperadas  | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |

**SOLUCIÓN**

a)  $\chi^2 = \frac{(17 - 25)^2}{25} + \frac{(31 - 25)^2}{25} + \frac{(29 - 25)^2}{25} + \frac{(18 - 25)^2}{25} + \dots + \frac{(36 - 25)^2}{25} = 23.3$

- b) El valor crítico correspondiente a 0.01 se obtiene mediante la expresión =CHIINV(0.01,9) y es 21.6660. Como el valor obtenido para  $\chi^2$  es mayor a este valor, se rechaza la hipótesis de que estos números sean aleatorios.
- c) Empleando EXCEL, el valor  $p$  se obtiene mediante la expresión =CHIDIST(23.3,9) y es 0.0056, que es menor a 0.01. De manera que con la técnica del valor  $p$  se rechaza la hipótesis nula.

- 12.6** En un experimento empleando chícharos, Gregor Mendel observó que 315 eran redondos y amarillos, 108 eran redondos y verdes, 101 eran deformes y amarillos, y 32 eran deformes y verdes. De acuerdo con su teoría sobre la herencia, estas cantidades debían estar en la proporción 9:3:3:1. ¿Existe alguna evidencia que haga dudar de su teoría a los niveles de significancia: a) 0.01 y b) 0.05?

**SOLUCIÓN**

La cantidad total de chícharos es  $315 + 108 + 101 + 32 = 556$ . Como las cantidades esperadas están en la proporción 9:3:3:1 (y  $9 + 3 + 3 + 1 = 16$ ), se esperaría que hubiera

$$\begin{aligned}\frac{9}{16}(556) &= 312.75 \text{ redondos y amarillos} & \frac{3}{16}(556) &= 104.25 \text{ deformes y amarillos} \\ \frac{3}{16}(556) &= 104.25 \text{ redondos y verdes} & \frac{1}{16}(556) &= 34.75 \text{ deformes y verdes}\end{aligned}$$

Por lo tanto,  $\chi^2 = \frac{(315 - 312.75)^2}{312.75} + \frac{(108 - 104.25)^2}{104.25} + \frac{(101 - 104.25)^2}{104.25} + \frac{(32 - 34.75)^2}{34.75} = 0.470$

Dado que hay cuatro categorías,  $k = 4$  y el número de grados de libertad es  $\nu = 4 - 1 = 3$ .

- a) Para  $\nu = 3$ ,  $\chi^2_{.99} = 11.3$ ; por lo tanto, al nivel 0.01 no puede rechazarse su teoría.  
b) Para  $\nu = 3$ ,  $\chi^2_{.95} = 7.81$ ; por lo tanto, al nivel 0.05 no puede rechazarse su teoría.

Se concluye que sí hay coincidencia entre la teoría y la experimentación.

Obsérvese que para 3 grados de libertad  $\chi^2_{.05} = 0.352$  y  $\chi^2 = 0.470 > 0.352$ . Por lo tanto, aunque la coincidencia sea buena, el resultado obtenido está sujeto a una cantidad razonable de error muestral.

- 12.7** En una urna hay una cantidad grande de canicas de cuatro colores: rojas, anaranjadas, amarillas y verdes. En una muestra de 12 canicas, tomada de la urna en forma aleatoria, se encuentran 2 canicas rojas, 4 canicas anaranjadas, 4 canicas amarillas y 1 canica verde. Probar la hipótesis de que en la urna las canicas de los distintos colores están en la misma proporción.

**SOLUCIÓN**

Bajo la hipótesis de que en la urna hay la misma proporción de canicas de cada color, se esperaría que en una muestra de 12 canicas hubiera 3 de cada color. Como las cantidades esperadas son menores a 5, la aproximación ji cuadrada será errónea. Para evitar esto se fusionan categorías de manera que el tamaño de cada categoría sea por lo menos 5.

Si se desea rechazar la hipótesis habrá que combinar las categorías de manera que la evidencia contra la hipótesis sea la mejor posible. En tal caso, esto se logra formando las categorías “rojas o verdes” y “anaranjadas o amarillas”, con lo cual las muestras serán de 3 y 9 canicas, respectivamente. Como la cantidad esperada en cada categoría, de acuerdo con la hipótesis de proporciones iguales, es 6, se tiene

$$\chi^2 = \frac{(3 - 6)^2}{6} + \frac{(9 - 6)^2}{6} = 3$$

Para  $\nu = 2 - 1 = 1$ ,  $\chi_{.95}^2 = 3.84$ . Por lo tanto, al nivel de significancia 0.05 no se puede rechazar la hipótesis (aunque sí al nivel de significancia 0.10). Por supuesto que los resultados obtenidos pueden deberse únicamente a la casualidad aun cuando los distintos colores estén en la misma proporción.

#### Otro método

Empleando la corrección de Yates, se encuentra

$$\chi^2 = \frac{(|3 - 6| - 0.5)^2}{6} + \frac{(|9 - 6| - 0.5)^2}{6} = \frac{(2.5)^2}{6} + \frac{(2.5)^2}{6} = 2.1$$

lo que conduce a la misma conclusión obtenida antes. Esto era de esperarse, ya que la corrección de Yates siempre *reduce* el valor de  $\chi^2$ .

Nótese que empleando la aproximación  $\chi^2$ , aun cuando las frecuencias son demasiado pequeñas, se obtiene

$$\chi^2 = \frac{(2 - 3)^2}{3} + \frac{(5 - 3)^2}{3} + \frac{(4 - 3)^2}{3} + \frac{(1 - 3)^2}{3} = 3.33$$

Como  $\nu = 4 - 1 = 3$ ,  $\chi_{.95}^2 = 7.81$  y se llega a la misma conclusión que antes. Infortunadamente, cuando las frecuencias son pequeñas, la aproximación  $\chi^2$  es pobre; por lo tanto, cuando no sea recomendable combinar frecuencias hay que recurrir a los métodos exactos de probabilidad del capítulo 6.

- 12.8** En 360 lanzamientos de un par de dados se obtuvo 74 veces un 7 y 24 veces un 11. Empleando como nivel de significancia 0.05 pruebe la hipótesis de que el dado no está cargado.

#### SOLUCIÓN

Un par de dados pueden caer de 36 maneras. El número once se puede obtener de 6 maneras y el número siete de 2 maneras. Entonces  $\Pr\{\text{siete}\} = \frac{6}{36} = \frac{1}{6}$  y  $\Pr\{\text{once}\} = \frac{2}{36} = \frac{1}{18}$ . Por lo tanto, en 360 lanzamientos se esperan  $\frac{1}{6}(360) = 60$  sietes y  $\frac{1}{18}(360) = 20$  onces, de manera que

$$\chi^2 = \frac{(74 - 60)^2}{60} + \frac{(24 - 20)^2}{20} = 4.07$$

Para  $\nu = 2 - 1 = 1$ ,  $\chi_{.95}^2 = 3.84$ . Por lo tanto, como  $4.07 > 3.84$ , se estará inclinado a rechazar la hipótesis de que el dado no está cargado. Sin embargo, empleando la corrección de Yates se encuentra

$$\chi^2 (\text{corregida}) = \frac{(|74 - 60| - 0.5)^2}{60} + \frac{(|24 - 20| - 0.5)^2}{20} = \frac{(13.5)^2}{60} + \frac{(3.5)^2}{20} = 3.65$$

Así, de acuerdo con el valor de  $\chi^2$  corregida, no se puede rechazar la hipótesis al nivel 0.05.

En general, con muestras grandes como las que se tienen en este caso, los resultados empleando la corrección de Yates son más confiables que sin usar la corrección de Yates. Sin embargo, como aun el valor corregido de  $\chi^2$  está tan cercano al valor crítico, se estará indeciso para tomar una decisión en un sentido o en otro. En tales casos, quizás lo mejor sea aumentar el tamaño de la muestra si, por alguna razón, se está especialmente interesado en el nivel 0.05; si no es así, se puede rechazar la hipótesis a algún otro nivel (por ejemplo, al nivel 0.10) si esto es satisfactorio.

- 12.9** Se estudian 320 familias de 5 hijos cada una y se encuentra la distribución que se muestra en la tabla 12.10. ¿Este resultado es consistente con la hipótesis de que el nacimiento de un hombre o de una mujer es igualmente probable?

Tabla 12.10

| Cantidad de niños y niñas | 5 niños<br>0 niñas | 4 niños<br>1 niña | 3 niños<br>2 niñas | 2 niños<br>3 niñas | 1 niño<br>4 niñas | 0 niños<br>5 niñas | Total |
|---------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------|
| Cantidad de familias      | 18                 | 56                | 110                | 88                 | 40                | 8                  | 320   |

**SOLUCIÓN**

Sea  $p$  = probabilidad de que nazca un hombre y  $q = 1 - p$  = probabilidad de que nazca una mujer. Entonces las probabilidades de (5 niños), (4 niños y 1 niña), ..., (5 niñas) están dadas por los términos de la expansión binomial

$$(p + q)^5 = p^5 + 5p^4q + 10p^3q^2 + 10p^2q^3 + 5pq^4 + q^5$$

Si  $p = q = \frac{1}{2}$ , se tiene

$$\begin{aligned} \Pr\{5 \text{ niños y } 0 \text{ niñas}\} &= \left(\frac{1}{2}\right)^5 = \frac{1}{32} & \Pr\{2 \text{ niños y } 3 \text{ niñas}\} &= 10\left(\frac{1}{2}\right)^2\left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{10}{32} \\ \Pr\{4 \text{ niños y } 1 \text{ niña}\} &= 5\left(\frac{1}{2}\right)^4\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{5}{32} & \Pr\{1 \text{ niño y } 4 \text{ niñas}\} &= 5\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)^4 = \frac{5}{32} \\ \Pr\{3 \text{ niños y } 2 \text{ niñas}\} &= 10\left(\frac{1}{2}\right)^3\left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{10}{32} & \Pr\{0 \text{ niños y } 5 \text{ niñas}\} &= \left(\frac{1}{2}\right)^5 = \frac{1}{32} \end{aligned}$$

Por lo que las cantidades esperadas de familias con 5, 4, 3, 2, 1 y 0 niños se obtienen multiplicando las probabilidades anteriores por 320, y los resultados son 10, 50, 100, 100, 50 y 10, respectivamente. Por lo tanto,

$$\chi^2 = \frac{(18 - 10)^2}{10} + \frac{(56 - 50)^2}{50} + \frac{(110 - 100)^2}{100} + \frac{(88 - 100)^2}{100} + \frac{(40 - 50)^2}{50} + \frac{(8 - 10)^2}{10} = 12.0$$

Como  $\chi^2_{95} = 11.1$  y  $\chi^2_{99} = 15.1$  para  $\nu = 6 - 1 = 5$  grados de libertad, la hipótesis nula puede rechazarse al nivel de significancia 0.05, pero no al nivel de significancia 0.01. De manera que se concluye que los resultados tal vez sean significativos y que el nacimiento de hombres y mujeres no es igualmente probable.

- 12.10** En 500 personas estudiadas se encontró que la semana pasada 155 de ellas habían rentado por lo menos un video. Empleando una prueba de dos colas y  $\alpha = 0.05$ , probar la hipótesis de que la semana pasada el 25% de la población rentó por lo menos un video. Realizar la prueba empleando tanto la distribución normal estándar como la distribución ji cuadrada. Mostrar que la prueba ji cuadrada con sólo dos categorías es equivalente a la prueba de significancia para proporciones dada en el capítulo 10.

**SOLUCIÓN**

Si la hipótesis nula es verdadera, entonces  $\mu = Np = 500(0.25) = 125$  y  $\sigma = \sqrt{Npq} = \sqrt{500(0.25)(0.75)} = 9.68$ . El estadístico de prueba calculado es  $Z = (155 - 125)/9.68 = 3.10$ . Los valores críticos son  $\pm 1.96$ , por lo que la hipótesis nula se rechaza.

La solución empleando la distribución ji cuadrada se halla empleando los resultados que se muestran en la tabla 12.11.

Tabla 12.11

| Frecuencias | Rentaron videos | No rentaron videos | Total |
|-------------|-----------------|--------------------|-------|
| Observadas  | 155             | 345                | 500   |
| Esperadas   | 125             | 375                | 500   |

El estadístico ji cuadrada calculado se obtiene como sigue:

$$\chi^2 = \frac{(155 - 125)^2}{125} + \frac{(345 - 375)^2}{375} = 9.6$$

El valor crítico para un grado de libertad es 3.84, por lo que se rechazó la hipótesis nula. Obsérvese que  $(3.10)^2 = 9.6$  y que  $(\pm 1.96)^2 = 3.84$ , o sea  $Z^2 = \chi^2$ . Los dos procedimientos son equivalentes.

- 12.11** a) Probar que la fórmula (1) de este capítulo puede escribirse como

$$\chi^2 = \sum \frac{o_j^2}{e_j} - N$$

- b) Utilizar el resultado de a) para comprobar el valor de  $\chi^2$  calculado en el problema 12.6.

### SOLUCIÓN

- a) Por definición

$$\begin{aligned}\chi^2 &= \sum \frac{(o_j - e_j)^2}{e_j} = \sum \left( \frac{o_j^2 - 2o_j e_j + e_j^2}{e_j} \right) \\ &= \sum \frac{o_j^2}{e_j} - 2 \sum o_j + \sum e_j = \sum \frac{o_j^2}{e_j} - 2N + N = \sum \frac{o_j^2}{e_j} - N\end{aligned}$$

donde se ha empleado la fórmula (2) de este capítulo.

$$b) \quad \chi^2 = \sum \frac{o_j^2}{e_j} - N = \frac{(315)^2}{312.75} + \frac{(108)^2}{104.25} + \frac{(101)^2}{104.25} + \frac{(32)^2}{34.75} - 556 = 0.470$$

### BONDAD DE AJUSTE

- 12.12** Un jugador de tenis se entrena jugando series de tres juegos; lleva un registro de los juegos perdidos y ganados en estas series a lo largo del año. Su registro muestra que de 250 días, 25 días ganó 0 juegos, 75 días ganó 1 juego, 125 días ganó 2 juegos y 25 días ganó 3 juegos. Con  $\alpha = 0.05$ , probar que  $X$  = cantidad de juegos ganados, en las series de 3, está distribuida en forma binomial.

### SOLUCIÓN

La cantidad media de juegos ganados en estas series de 3 juegos es  $(0 \times 25 + 1 \times 75 + 2 \times 125 + 3 \times 25)/250 = 1.6$ . Si  $X$  es binomial, la media es  $np = 3p$ , lo cual igualándolo al estadístico 1.6 y despejando  $p$  permite encontrar que  $p = 0.53$ . Se desea probar que  $X$  es binomial con  $n = 3$  y  $p = 0.53$ . Si  $X$  es binomial con  $p = 0.53$ , su distribución y el número esperado de juegos ganados son los que muestran los siguientes resultados de EXCEL. Obsérvese que las probabilidades binomiales  $p(x)$  se encontraron ingresando =BINOMDIST(A2,3,0.53,0) y haciendo clic y arrastrando desde B2 hasta B5. De esta manera se obtuvieron los valores que se muestran a continuación bajo  $p(x)$ .

| x | $p(x)$   | Ganados esperados | Ganados observados |
|---|----------|-------------------|--------------------|
| 0 | 0.103823 | 25.95575          | 25                 |
| 1 | 0.351231 | 87.80775          | 75                 |
| 2 | 0.396069 | 99.01725          | 125                |
| 3 | 0.148877 | 37.21925          | 25                 |

La cantidad de juegos ganados esperados se encuentra multiplicando los valores de  $p(x)$  por 250.

$$\chi^2 = \frac{(25 - 30.0)^2}{30.0} + \frac{(75 - 87.8)^2}{87.8} + \frac{(125 - 99.0)^2}{99.0} + \frac{(25 - 37.2)^2}{37.2} = 12.73.$$

Como la cantidad de parámetros necesarios para estimar las frecuencias esperadas es  $m = 1$  (a saber, el parámetro  $p$  de la distribución binomial),  $v = k - 1 - m = 4 - 1 - 1 = 2$ . El valor  $p$  se obtiene mediante la expresión de EXCEL =CHIDIST(12.73,2) = 0.0017, por lo que se rechaza la hipótesis de que la variable  $X$  esté distribuida en forma binomial.

- 12.13** El número de horas por semana que 200 estudiantes universitarios usan Internet se ha agrupado en las clases 0 a 3, 4 a 7, 8 a 11, 12 a 15, 16 a 19, 20 a 23 y 24 a 27, cuyas frecuencias observadas son 12, 25, 36, 45, 34, 31 y 17. A partir de estos datos se obtiene la media y la desviación estándar de estos datos agrupados. La hipótesis

nula es que estos datos están distribuidos normalmente. De acuerdo con la media y con la desviación estándar encontradas y suponiendo que la distribución sea normal, se obtienen las frecuencias esperadas que, redondeadas, son las siguientes: 10, 30, 40, 50, 36, 28 y 6.

- Encontrar  $\chi^2$ .
- ¿Cuántos grados de libertad tiene  $\chi^2$ ?
- Empleando EXCEL, encontrar el valor crítico del 5% y dar las conclusiones al 5%.
- Empleando EXCEL, hallar el valor  $p$  para el resultado.

### SOLUCIÓN

- En la figura 12-1 se muestra parte de la hoja de cálculo de EXCEL. En C2 se ingresa  $=(A2-B2)^2/B2$ , se hace clic y se arrastra desde C2 hasta C8. En C9 se ingresa  $=SUM(C2:C8)$ . Como se ve,  $\chi^2 = 22.7325$ .

|    | A        | B        | C             | D |
|----|----------|----------|---------------|---|
| 1  | observed | expected | $(O - E)^2/E$ |   |
| 2  | 12       | 10       | 0.4           |   |
| 3  | 25       | 30       | 0.83333333    |   |
| 4  | 36       | 40       | 0.4           |   |
| 5  | 45       | 50       | 0.5           |   |
| 6  | 34       | 36       | 0.11111111    |   |
| 7  | 31       | 28       | 0.3214286     |   |
| 8  | 17       | 6        | 20.166667     |   |
| 9  |          |          | 22.73254      |   |
| 10 |          |          |               |   |

Figura 12-1 EXCEL, parte de la hoja de cálculo para el problema 12.13.

- Como el número de parámetros empleados para estimar las frecuencias esperadas es  $m = 2$  (comúnmente son la media  $\mu$  y la desviación estándar  $\sigma$  de una distribución normal),  $\nu = k - 1 - m = 7 - 1 - 2 = 4$ . Obsérvese que no es necesario combinar clases, ya que todas las frecuencias esperadas son mayores a 5.
- El valor crítico de 5% se obtiene mediante  $=CHIINV(0.05,4)$  y es 9.4877. Como 22.73 es mayor al valor crítico, se rechaza la hipótesis nula de que los datos provengan de una distribución normal.
- El valor  $p$  se encuentra mediante  $=CHIDIST(22.7325,4)$ , que da valor  $p = 0.000143$ .

### TABLAS DE CONTINGENCIA

- 12.14** Se repite el problema 10.20 usando, primero, la prueba ji cuadrada, y después MINITAB. Comparar las dos soluciones.

### SOLUCIÓN

En la tabla 12.12a) se presentan las condiciones del problema. Bajo la hipótesis nula de que el suero no tiene efecto alguno, se esperaría que en cada grupo se recuperaran 70 personas y 30 no, como se muestra en la tabla 12.12b). Obsérvese que la hipótesis nula es equivalente a afirmar que la recuperación es *independiente* del uso del suero (es decir, que las clasificaciones son independientes).

Tabla 12.12a) Frecuencias observadas

|                            | Recuperados | No recuperados | Total |
|----------------------------|-------------|----------------|-------|
| Grupo A (usan el suero)    | 75          | 25             | 100   |
| Grupo B (no usan el suero) | 65          | 35             | 100   |
| Total                      | 140         | 60             | 200   |

**Tabla 12.12b) Frecuencias esperadas bajo  $H_0$** 

|                            | Recuperados | No recuperados | Total |
|----------------------------|-------------|----------------|-------|
| Grupo A (usan el suero)    | 70          | 30             | 100   |
| Grupo B (no usan el suero) | 70          | 30             | 100   |
| Total                      | 140         | 60             | 200   |

$$\chi^2 = \frac{(75 - 70)^2}{70} + \frac{(65 - 70)^2}{70} + \frac{(25 - 30)^2}{30} + \frac{(35 - 30)^2}{30} = 2.38$$

Para determinar el número de grados de libertad, considérese la tabla 12.13, que es la misma tabla 12.12, excepto que sólo muestra los totales. Es claro que en cualquiera de las cuatro celdas vacías sólo se tiene la libertad de colocar un número, ya que una vez hecho esto los números de las celdas restantes quedan determinados de manera única por los totales dados. Por lo tanto, hay 1 grado de libertad.

**Tabla 12.13**

|         | Recuperados | No recuperados | Total |
|---------|-------------|----------------|-------|
| Grupo A |             |                | 100   |
| Grupo B |             |                | 100   |
| Total   | 140         | 60             | 200   |

### Otro método

Empleando la fórmula (ver problema 12.18),  $\nu = (h - 1)(k - 1) = (2 - 1)(2 - 1) = 1$ . Como  $\chi^2_{.95} = 3.84$  para 1 grado de libertad y como  $\chi^2 = 2.38 < 3.84$ , se concluye que los resultados *no son significativos* al nivel 0.05. Por lo tanto, no se puede rechazar  $H_0$  a este nivel, y se concluye que el suero no es efectivo o se aplaza la decisión hasta tener más resultados.

Obsérvese que  $\chi^2 = 2.38$  es el cuadrado de la puntuación  $z$ ,  $z = 1.54$ , que se obtuvo en el problema 10.20. En general, la prueba ji cuadrada para proporciones muestrales en una tabla de contingencia  $2 \times 2$  es equivalente a una prueba de significancia para la diferencia entre proporciones usando la aproximación normal.

Nótese también que una prueba de una cola empleando  $\chi^2$  es equivalente a una prueba de dos colas empleando  $\chi$ , ya que, por ejemplo,  $\chi^2 > \chi^2_{.95}$  corresponde a  $\chi > \chi_{.95}$  o  $\chi < -\chi_{.95}$ . Como en tablas  $2 \times 2$   $\chi^2$  es el cuadrado de la puntuación  $z$ , se sigue que, en este caso,  $\chi$  es igual a  $z$ . Por lo tanto, el rechazo de una hipótesis al nivel 0.05 empleando  $\chi^2$  es equivalente al rechazo de una prueba de dos colas al nivel 0.10 empleando  $z$ .

### Prueba ji cuadrada: recuperación, no recuperación

Los resultados esperados se muestran debajo de los observados

Las contribuciones de ji cuadrada se muestran debajo de los resultados esperados

|       | Recuperación | No recuperación | Total |
|-------|--------------|-----------------|-------|
| 1     | 75           | 25              | 100   |
|       | 70.00        | 30.00           |       |
|       | 0.357        | 0.833           |       |
| 2     | 65           | 35              | 100   |
|       | 70.00        | 30.00           |       |
|       | 0.357        | 0.833           |       |
| Total | 140          | 60              | 200   |

Ji-Sq=2.381, DF=1, P-Value=0.123

- 12.15** Resolver el problema 12.14 empleando la corrección de Yates.

**SOLUCIÓN**

$$\chi^2(\text{corregida}) = \frac{(|75 - 70| - 0.5)^2}{70} + \frac{(|65 - 70| - 0.5)^2}{70} + \frac{(|25 - 30| - 0.5)^2}{30} + \frac{(|35 - 30| - 0.5)^2}{30} = 1.93$$

Por lo tanto, las conclusiones a las que se llegó en el problema 12.14 son correctas. Esto era de suponer sabiendo que la corrección de Yates siempre hace disminuir el valor de  $\chi^2$ .

- 12.16** Una empresa de teléfonos celulares realiza una encuesta para determinar la proporción de personas que tienen teléfono celular en los distintos grupos de edad. En la tabla 12.14 se muestran los resultados obtenidos en 100 hogares. Probar la hipótesis de que en los diferentes grupos de edad, las proporciones de personas que tienen teléfono celular son las mismas.

**Tabla 12.14**

| Teléfono celular | 18-24 | 25-54 | 55-64 | $\geq 65$ | Total |
|------------------|-------|-------|-------|-----------|-------|
| Sí               | 50    | 80    | 70    | 50        | 250   |
| No               | 200   | 170   | 180   | 200       | 750   |
| Total            | 250   | 250   | 250   | 250       | 1 000 |

**SOLUCIÓN**

De acuerdo con la hipótesis de que la proporción de personas que tienen teléfono celular es la misma en los distintos grupos de edad,  $250/1\,000 = 25\%$  es una estimación del porcentaje de personas que tienen teléfono celular en cada grupo de edad y  $75\%$  es una estimación del porcentaje de personas que no tienen teléfono celular en cada grupo de edad. En la tabla 12.15 se presentan las frecuencias esperadas en cada grupo de edad.

El valor del estadístico ji cuadrada se puede encontrar como se muestra en la tabla 12.16.

El número de grados de libertad para la distribución ji cuadrada es  $\nu = (h - 1)(k - 1) = (2 - 1)(4 - 1) = 3$ . Como  $\chi^2_{.95} = 7.81$ , y 14.3 es mayor que 7.81, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los porcentajes en los cuatro grupos de edad no son los mismos.

**Tabla 12.15**

| Teléfono celular | 18-24                 | 25-54                 | 55-64                 | $\geq 65$             | Total |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| Sí               | 25% de 250 = 62.5     | 250   |
| No               | 75% de<br>250 = 187.5 | 750   |
| Total            | 250                   | 250                   | 250                   | 250                   | 1 000 |

**Tabla 12.16**

| Renglón, columna | $o$   | $e$   | $(o - e)$ | $(o - e)^2$ | $(o - e)^2/e$ |
|------------------|-------|-------|-----------|-------------|---------------|
| 1, 1             | 50    | 62.5  | -12.5     | 156.25      | 2.5           |
| 1, 2             | 80    | 62.5  | 17.5      | 306.25      | 4.9           |
| 1, 3             | 70    | 62.5  | 7.5       | 56.25       | 0.9           |
| 1, 4             | 50    | 62.5  | -12.5     | 156.25      | 2.5           |
| 2, 1             | 200   | 187.5 | 12.5      | 156.25      | 0.8           |
| 2, 2             | 170   | 187.5 | -17.5     | 306.25      | 1.6           |
| 2, 3             | 180   | 187.5 | -7.5      | 56.25       | 0.3           |
| 2, 4             | 200   | 187.5 | 12.5      | 156.25      | 0.8           |
| Suma             | 1 000 | 1 000 | 0         |             | 14.3          |

- 12.17** Utilizar MINITAB para resolver el problema 12.16.

### SOLUCIÓN

A continuación se presenta la solución que da MINITAB al problema 12.16. Las cantidades observadas y esperadas se presentan junto con los cálculos del estadístico de prueba. Obsérvese que la hipótesis nula se rechazará a cualquier nivel de significancia mayor a 0.002.

#### Muestra de datos

| Fila | 18-24 | 25-54 | 55-64 | 65 o más |
|------|-------|-------|-------|----------|
| 1    | 50    | 80    | 70    | 50       |
| 2    | 200   | 170   | 180   | 200      |

MTB > chisquare c1-c4

#### Prueba ji cuadrada

Los resultados esperados se muestran debajo de los observados

|                         | 18-24   | 25-54   | 55-64   | 65 o más | Total  |
|-------------------------|---------|---------|---------|----------|--------|
| 1                       | 50      | 80      | 70      | 50       | 250    |
|                         | 62.50   | 62.50   | 62.50   | 62.50    |        |
| 2                       | 200     | 170     | 180     | 200      | 750    |
|                         | 187.50  | 187.50  | 187.50  | 187.50   |        |
| Total                   | 250     | 250     | 250     | 250      | 1 000  |
| Ji-Sq=                  | 2.500 + | 4.900 + | 0.900 + | 2.500 +  |        |
|                         | 0.833 + | 1.633 + | 0.300 + | 0.833 =  | 14.400 |
| DF = 3, P-Value = 0.002 |         |         |         |          |        |

- 12.18** Mostrar que en una tabla de contingencia de  $h \times k$ , el número de grados de libertad es  $(h - 1)(k - 1)$ , donde  $h > 1$  y  $k > 1$ .

### SOLUCIÓN

En una tabla con  $h$  renglones y  $k$  columnas únicamente se puede dejar sin introducir un número en cada renglón y en cada columna, ya que estos números se determinan conociendo los totales de cada columna y de cada renglón. Por lo tanto, sólo se tiene la libertad de colocar  $(h - 1)(k - 1)$  números en la tabla, los números restantes quedan determinados automáticamente y de manera única. Por lo tanto, el número de grados de libertad es  $(h - 1)(k - 1)$ . Obsérvese que este resultado es válido si se conocen los parámetros poblacionales necesarios para obtener las frecuencias esperadas.

- 12.19** a) Demostrar que para la tabla de contingencia  $2 \times 2$  que se muestra en la tabla 12.17a),

$$\chi^2 = \frac{N(a_1b_2 - a_2b_1)^2}{N_1N_2N_AN_B}$$

- b) Ilustrar el resultado de a) empleando los datos del problema 12.14.

**Tabla 12.17a) Resultados observados**

|       | I     | II    | Total |
|-------|-------|-------|-------|
| A     | $a_1$ | $a_2$ | $N_A$ |
| B     | $b_1$ | $b_2$ | $N_B$ |
| Total | $N_1$ | $N_2$ | $N$   |

**Tabla 12.17b) Resultados esperados**

|       | I          | II         | Total |
|-------|------------|------------|-------|
| A     | $N_1N_A/N$ | $N_2N_A/N$ | $N_A$ |
| B     | $N_1N_B/N$ | $N_2N_B/N$ | $N_B$ |
| Total | $N_1$      | $N_2$      | $N$   |

**SOLUCIÓN**

- a) Como en el problema 12.14, los resultados esperados, basándose en la hipótesis nula, se presentan en la tabla 12.17b). Entonces,

$$\chi^2 = \frac{(a_1 - N_1 N_A / N)^2}{N_1 N_A / N} + \frac{(a_2 - N_2 N_A / N)^2}{N_2 N_A / N} + \frac{(b_1 - N_1 N_B / N)^2}{N_1 N_B / N} + \frac{(b_2 - N_2 N_B / N)^2}{N_2 N_B / N}$$

Pero  $a_1 - \frac{N_1 N_A}{N} = a_1 - \frac{(a_1 + b_1)(a_1 + a_2)}{a_1 + b_1 + a_2 + b_2} = \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{N}$

De manera similar  $a_2 - \frac{N_2 N_A}{N}$  y  $b_1 - \frac{N_1 N_B}{N}$  y  $b_2 - \frac{N_2 N_B}{N}$

son también igual a  $\frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{N}$

Por lo tanto, se puede escribir

$$\begin{aligned} \chi^2 &= \frac{N}{N_1 N_A} \left( \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{N} \right)^2 + \frac{N}{N_2 N_A} \left( \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{N} \right)^2 \\ &\quad + \frac{N}{N_1 N_B} \left( \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{N} \right)^2 + \frac{N}{N_2 N_B} \left( \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{N} \right)^2 \end{aligned}$$

de donde, simplificando, se obtienen  $\chi^2 = \frac{N(a_1 b_2 - a_2 b_1)^2}{N_1 N_2 N_A N_B}$

- b) En el problema 12.14,  $a_1 = 75$ ,  $a_2 = 25$ ,  $b_1 = 65$ ,  $b_2 = 35$ ,  $N_1 = 140$ ,  $N_2 = 60$ ,  $N_A = 100$ ,  $N_B = 100$  y  $N = 200$ ; entonces, como se obtuvo antes,

$$\chi^2 = \frac{200[(75)(35) - (25)(65)]^2}{(140)(60)(100)(100)} = 2.38$$

Empleando la corrección de Yates se llega al mismo resultado que en el problema 12.15:

$$\chi^2(\text{corregida}) = \frac{N(|a_1 b_2 - a_2 b_1| - \frac{1}{2}N)^2}{N_1 N_2 N_A N_B} = \frac{200[|(75)(35) - (25)(65)| - 100]^2}{(140)(60)(100)(100)} = 1.93$$

- 12.20** A 900 hombres y 900 mujeres se les preguntó si deseaban que hubiera más programas federales de ayuda para el cuidado de los niños. Cuarenta por ciento de las mujeres y 36 por ciento de los hombres respondieron que sí. Probar con  $\alpha = 0.05$  la hipótesis nula de estos porcentajes iguales contra la hipótesis alternativa de estos porcentajes diferentes. Mostrar que la prueba ji cuadrada para dos proporciones muestrales es equivalente a la prueba de significancia para diferencias empleando la aproximación normal del capítulo 10.

**SOLUCIÓN**

Bajo la hipótesis  $H_0$ ,

$$\mu_{P_1 - P_2} = 0 \text{ y } \sigma_{P_1 - P_2} = \sqrt{pq\left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}\right)} = \sqrt{(0.38)(0.62)\left(\frac{1}{900} + \frac{1}{900}\right)} = 0.0229$$

donde  $p$  se estima fusionando las proporciones de las dos muestras. Es decir,

$$p = \frac{360 + 324}{900 + 900} = 0.38 \quad \text{y} \quad q = 1 - 0.38 = 0.62$$

El estadístico de prueba para la aproximación normal es el siguiente:

$$Z = \frac{P_1 - P_2}{\sigma_{P_1 - P_2}} = \frac{0.40 - 0.36}{0.0229} = 1.7467$$

El resultado que da MINITAB del análisis ji cuadrada es el siguiente:

#### Prueba ji cuadrada

Los resultados esperados se muestran debajo de los observados

|       | males  | females | Total |
|-------|--------|---------|-------|
| 1     | 324    | 360     | 684   |
|       | 342.00 | 342.00  |       |
| 2     | 576    | 549     | 1 116 |
|       | 558.00 | 558.00  |       |
| Total | 900    | 900     | 1 800 |

$$\begin{aligned} \text{Ji-Sq} &= 0.947 + 0.947 + \\ &\quad 0.581 + 0.581 = 3.056 \\ \text{DF} &= 1, \text{ P-Value} = 0.080 \end{aligned}$$

El cuadrado del estadístico de prueba normal es  $(1.7467)^2 = 3.056$ , que es el valor del estadístico ji cuadrada. Las dos pruebas son equivalentes. Los valores  $p$  son siempre los mismos para las dos pruebas.

## COEFICIENTE DE CONTINGENCIA

- 12.21** Encontrar el coeficiente de contingencia correspondiente a los datos de la tabla de contingencia del problema 12.14.

#### SOLUCIÓN

$$C = \sqrt{\frac{\chi^2}{\chi^2 + N}} = \sqrt{\frac{2.38}{2.38 + 200}} = \sqrt{0.01176} = 0.1084$$

- 12.22** Encontrar el valor máximo de  $C$  correspondiente a la tabla  $2 \times 2$  del problema 12.14.

#### SOLUCIÓN

El valor máximo de  $C$  se presenta cuando las dos clasificaciones son perfectamente dependientes o están muy bien relacionadas. En ese caso, todos los que toman el suero sanan y todos los que no lo toman no sanan. La tabla de contingencia, entonces, será como la tabla 12.18.

Tabla 12.18

|                            | Sanados | No sanados | Total |
|----------------------------|---------|------------|-------|
| Grupo A (usan el suero)    | 100     | 0          | 100   |
| Grupo B (no usan el suero) | 0       | 100        | 100   |
| Total                      | 100     | 100        | 200   |

Dado que las frecuencias de celda esperadas, suponiendo completa independencia, son todas igual a 50,

$$\chi^2 = \frac{(100 - 50)^2}{50} + \frac{(0 - 50)^2}{50} + \frac{(0 - 50)^2}{50} + \frac{(100 - 50)^2}{50} = 200$$

Por lo tanto, el máximo valor de  $C$  es  $\sqrt{\chi^2 / (\chi^2 + N)} = \sqrt{200 / (200 + 200)} = 0.7071$ .

En general, para que exista dependencia perfecta en una tabla de contingencia en la que la cantidad de renglones y de columnas son ambas igual a  $k$ , las únicas frecuencias de celda distintas de cero deben encontrarse en la diagonal que va de la esquina superior izquierda a la esquina inferior derecha de la tabla de contingencia. En tales casos,  $C_{\max} = \sqrt{(k-1)/k}$ . (Ver los problemas 12.52 y 12.53.)

## CORRELACIÓN DE ATRIBUTOS

- 12.23** Encontrar el coeficiente de correlación correspondiente a la tabla 12.12 del problema 12.14: *a)* sin corrección de Yates y *b)* con corrección.

### SOLUCIÓN

*a)* Como  $\chi^2 = 2.28$ ,  $N = 200$  y  $k = 2$ , se tiene

$$r = \sqrt{\frac{\chi^2}{N(k-1)}} = \sqrt{\frac{2.38}{200}} = 0.1091$$

lo que indica una correlación muy pequeña entre la recuperación de la salud y el uso del suero.

*b)* De acuerdo con el problema 12.15,  $r$  (corregida) =  $\sqrt{1.93/200} = 0.0982$ .

- 12.24** Demostrar que el coeficiente de correlación para tablas de contingencia, definido por la ecuación (12) de este capítulo, se encuentra entre 0 y 1.

### SOLUCIÓN

De acuerdo con el problema 12.53, el valor máximo de  $\sqrt{\chi^2/(\chi^2 + N)}$  es  $\sqrt{(k-1)/k}$ . Por lo tanto,

$$\frac{\chi^2}{\chi^2 + N} \leq \frac{k-1}{k} \quad k\chi^2 \leq (k-1)(\chi^2 + N) \quad k\chi^2 \leq k\chi^2 - \chi^2 + kN - N$$

$$\chi^2 \leq (k-1)N \quad \frac{\chi^2}{N(k-1)} \leq 1 \quad \text{y} \quad r = \sqrt{\frac{\chi^2}{N(k-1)}} \leq 1$$

Como  $\chi^2 \geq 0$ ,  $r \geq 0$ . Por lo tanto,  $0 \leq r \leq 1$ , que es lo requerido.

## PROPIEDAD ADITIVA DE $\chi^2$

- 12.25** Para probar una hipótesis  $H_0$ , se repite un experimento tres veces. Los valores que se obtienen para  $\chi^2$  son 2.37, 2.86 y 3.54, cada uno de los cuales corresponde a 1 grado de libertad. Mostrar que aunque no puede rechazarse  $H_0$ , al nivel 0.05, con base en ninguno de estos experimentos, sí puede rechazarse fusionando los tres experimentos.

### SOLUCIÓN

El valor de  $\chi^2$  que se obtiene fusionando los resultados de los tres experimentos es, de acuerdo con la *propiedad aditiva*,  $\chi^2 = 2.37 + 2.86 + 3.54 = 8.77$  con  $1 + 1 + 1 = 3$  grados de libertad. Como  $\chi^2_{.95}$  para 3 grados de libertad es 7.81, se puede rechazar  $H_0$  al nivel de significancia 0.05. Pero como para 1 grado de libertad  $\chi^2_{.95} = 3.84$ , basándose en cualquiera de los tres experimentos, no se puede rechazar  $H_0$ .

Cuando se fusionan experimentos en los que se han obtenido valores de  $\chi^2$  que corresponden a 1 grado de libertad, se omite la corrección de Yates debido a que ésta tiende a sobrecorregir.

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### LA PRUEBA JI CUADRADA

- 12.26** En 60 lanzamientos de una moneda se obtuvieron 37 caras y 23 cruces. Empleando como niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01, probar la hipótesis de que la moneda no está cargada.
- 12.27** Resolver el problema 12.26 empleando la corrección de Yates.
- 12.28** Durante algún tiempo, las puntuaciones dadas a los alumnos por un grupo de profesores de determinada materia fueron, en promedio: 12% Aes; 18% Bes; 40% Ces; 18% Des, y 12% Efes. Durante dos semestres, un profesor nuevo da 22 Aes, 34 Bes, 66 Ces, 16 Des y 12 Efes. Al nivel de significancia 0.05, determinar si el nuevo profesor sigue el patrón de calificaciones establecido por los otros profesores.
- 12.29** Tres monedas se lanzan 240 veces anotando cada vez la cantidad de caras y de cruces que se obtienen. En la tabla 12.19 se muestran los resultados junto con los resultados esperados bajo la hipótesis de que las monedas no están cargadas. Probar esta hipótesis al nivel de significancia 0.05.

**Tabla 12.19**

|                        | 0 caras | 1 cara | 2 caras | 3 caras |
|------------------------|---------|--------|---------|---------|
| Frecuencias observadas | 24      | 108    | 95      | 23      |
| Frecuencias esperadas  | 30      | 90     | 90      | 30      |

- 12.30** En la tabla 12.20 se muestra el número de libros prestados en una biblioteca pública a lo largo de determinada semana. Probar la hipótesis de que el número de libros que se prestan no depende del día de la semana; usar los niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01.

**Tabla 12.20**

|                              | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes |
|------------------------------|-------|--------|-----------|--------|---------|
| Cantidad de libros prestados | 135   | 108    | 120       | 114    | 146     |

- 12.31** Una urna contiene 6 canicas rojas y 3 canicas blancas. Se sacan en forma aleatoria dos canicas de la urna, se anotan sus colores y se devuelven a la urna. Este proceso se realiza 120 veces, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 12.21.
- Determinar las frecuencias esperadas.
  - Al nivel de significancia 0.05, determinar si los resultados obtenidos son consistentes con los resultados esperados.

**Tabla 12.21**

|                        | 0 rojas<br>2 blancas | 1 roja<br>1 blanca | 2 rojas<br>0 blancas |
|------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| Número de extracciones | 6                    | 53                 | 61                   |

- 12.32** Se toman en forma aleatoria 200 pernos de la producción de cada una de cuatro máquinas. La cantidad de pernos defectuosos que se encuentran es 2, 9, 10 y 3. Empleando como nivel de significancia 0.05, determinar si hay una diferencia significativa entre las máquinas.

**BONDAD DE AJUSTE**

- 12.33** *a)* Emplear la prueba  $\chi^2$  cuadrada para determinar la bondad de ajuste de los datos de la tabla 7.9 del problema 7.75.  
*b)* ¿Es el ajuste “demasiado bueno”? Emplear el nivel de significancia 0.05.
- 12.34** Usar la prueba  $\chi^2$  cuadrada para determinar la bondad de ajuste de los datos: *a)* de la tabla 3.8 del problema 3.59 y *b)* de la tabla 3.10 del problema 3.61. Usar el nivel de significancia 0.05 y determinar, en cada caso, si el ajuste es “demasiado bueno”.
- 12.35** Usar la prueba  $\chi^2$  cuadrada para determinar la bondad de ajuste de los datos: *a)* de la tabla 7.9 del problema 7.75 y *b)* de la tabla 7.12 del problema 7.80. ¿Es el resultado obtenido en *a)* consistente con el del problema 12.33?

**TABLAS DE CONTINGENCIA**

- 12.36** La tabla 12.22 muestra el resultado de un experimento para investigar el efecto que tiene la vacunación contra determinada enfermedad en los animales de laboratorio. Empleando el nivel de significancia: *a)* 0.01 y *b)* 0.05, probar la hipótesis de que no hay diferencia entre el grupo vacunado y el no vacunado (es decir, la vacunación y la enfermedad son independientes).

**Tabla 12.22**

|              | Adquirieron la enfermedad | No adquirieron la enfermedad |
|--------------|---------------------------|------------------------------|
| Vacunados    | 9                         | 42                           |
| No vacunados | 17                        | 28                           |

**Tabla 12.23**

|         | Aprobaron | No aprobaron |
|---------|-----------|--------------|
| Grupo A | 72        | 17           |
| Grupo B | 64        | 23           |

- 12.37** Resolver el problema 12.36 empleando la corrección de Yates.
- 12.38** En la tabla 12.23 se presenta la cantidad de estudiantes de dos grupos, *A* y *B*, que aprobaron y que no aprobaron un examen realizado a ambos grupos. Empleando el nivel de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01, probar la hipótesis de que no hay diferencia entre los dos grupos. Resolver el problema con corrección de Yates y sin ella.
- 12.39** De un grupo de pacientes que se quejaba de no dormir bien, a algunos se les dieron unas pastillas para dormir, en tanto que a otros se les dieron pastillas de azúcar (aunque todos *pensaban* que se les daban pastillas para dormir). Después se les interrogó acerca de si las pastillas les habían ayudado a dormir o no. En la tabla 12.24 se muestran los resultados obtenidos. Suponiendo que todos los pacientes digan la verdad, probar la hipótesis de que no hay diferencia entre las pastillas para dormir y las pastillas de azúcar, empleando como nivel de significancia 0.05.

**Tabla 12.24**

|                            | Durmió bien | No durmió bien |
|----------------------------|-------------|----------------|
| Tomó pastillas para dormir | 44          | 10             |
| Tomó pastillas de azúcar   | 81          | 35             |

- 12.40** En relación con determinada propuesta de interés nacional, los votos de demócratas y republicanos son como se muestra en la tabla 12.25. Al nivel de significancia: *a)* 0.01 y *b)* 0.05, probar la hipótesis de que, en lo referente a esta propuesta, no hay diferencia entre los dos partidos.

Tabla 12.25

|              | A favor | En contra | Indeciso |
|--------------|---------|-----------|----------|
| Demócratas   | 85      | 78        | 37       |
| Republicanos | 118     | 61        | 25       |

- 12.41** En la tabla 12.26 se muestra la relación que hay entre el desempeño de los estudiantes en matemáticas y en física. Probar la hipótesis de que el desempeño en matemáticas es independiente del desempeño en física, empleando el nivel de significancia: a) 0.05 y b) 0.01.

Tabla 12.26

|        |                         | Matemáticas       |                         |                   |
|--------|-------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
|        |                         | Calificación alta | Calificación intermedia | Calificación baja |
| Física | Calificación alta       | 56                | 71                      | 12                |
|        | Calificación intermedia | 47                | 163                     | 38                |
|        | Calificación baja       | 14                | 42                      | 85                |

- 12.42** En la tabla 12.27 se muestran los resultados de una encuesta realizada con objeto de determinar si la edad de un conductor de 21 años o más tiene alguna relación con la cantidad de accidentes automovilísticos en los que se ve implicado (incluyendo accidentes menores). Al nivel de significancia: a) 0.05 y b) 0.01, probar la hipótesis de que la cantidad de accidentes es independiente de la edad del conductor. ¿Cuáles pueden ser las fuentes de dificultad en la técnica de muestreo, así como otras consideraciones, que puedan afectar los resultados?

Tabla 12.27

|                      |    | Edad del conductor |       |       |       |       |
|----------------------|----|--------------------|-------|-------|-------|-------|
|                      |    | 21-30              | 31-40 | 41-50 | 51-60 | 61-70 |
| Número de accidentes | 0  | 748                | 821   | 786   | 720   | 672   |
|                      | 1  | 74                 | 60    | 51    | 66    | 50    |
|                      | 2  | 31                 | 25    | 22    | 16    | 15    |
|                      | >2 | 9                  | 10    | 6     | 5     | 7     |

- 12.43** a) Probar que  $\chi^2 = \sum (\sigma_j^2 / e_j) - N$  para todas las tablas de contingencia, donde  $N$  es la frecuencia total de todas las celdas.  
b) Resolver el problema 12.41 empleando los resultados de a).
- 12.44** Si  $N_i$  y  $N_j$  denotan, respectivamente, la suma de las frecuencias en el renglón  $i$  y en la columna  $j$  de una tabla de contingencia (las *frecuencias marginales*), demostrar que la frecuencia esperada en la celda del renglón  $i$  y la columna  $j$  es  $N_i N_j / N$ , donde  $N$  es la frecuencia total de todas las celdas.
- 12.45** Probar la fórmula (9) de este capítulo. (*Sugerencia:* Utilizar los problemas 12.43 y 12.44.)
- 12.46** Extender la fórmula (9) de este capítulo a tablas de contingencia  $2 \times k$ , donde  $k > 3$ .

- 12.47** Probar la fórmula (8) de este capítulo.
- 12.48** Por analogía con las ideas desarrolladas para tablas de contingencia  $h \times k$ , analizar las tablas de contingencia  $h \times k \times 1$ , indicando sus posibles aplicaciones.

### COEFICIENTE DE CONTINGENCIA

- 12.49** En la tabla 12.28 se muestra la relación entre color de pelo y color de ojos encontrada en una muestra de 200 estudiantes.
- Encontrar el coeficiente de contingencia sin corrección de Yates y con ella.
  - Comparar el resultado de a) con el coeficiente máximo de contingencia.

Tabla 12.28

|               |           | Color de pelo |          |
|---------------|-----------|---------------|----------|
|               |           | Rubio         | No rubio |
| Color de ojos | Azules    | 49            | 25       |
|               | No azules | 30            | 96       |

- 12.50** Encontrar el coeficiente de contingencia correspondiente a los datos: a) del problema 12.36 y b) del problema 12.38, con corrección de Yates y sin ella.
- 12.51** Encontrar el coeficiente de contingencia correspondiente a los datos del problema 12.41.
- 12.52** Probar que el coeficiente máximo de contingencia de una tabla  $3 \times 3$  es  $\sqrt{\frac{2}{3}} = 0.8165$ , aproximadamente.
- 12.53** Probar que el coeficiente máximo de contingencia de una tabla  $k \times k$  es  $\sqrt{(k-1)/k}$ .

### CORRELACIÓN DE ATRIBUTOS

- 12.54** Encontrar el coeficiente de correlación de los datos de la tabla 12.28.
- 12.55** Encontrar el coeficiente de correlación de los datos: a) de la tabla 12.22 y b) de la tabla 12.23, con corrección de Yates y sin ella.
- 12.56** Encontrar el coeficiente de correlación entre las calificaciones de matemáticas y de física de la tabla 12.26.

**12.57** Si  $C$  es el coeficiente de contingencia de una tabla  $k \times k$  y  $r$  es el coeficiente de correlación correspondiente, probar que  $r = C/\sqrt{(1-C^2)(k-1)}$ .

### PROPIEDAD ADITIVA DE $\chi^2$

- 12.58** Para probar una hipótesis  $H_0$ , se repite un experimento cinco veces. Los valores obtenidos para  $\chi^2$ , correspondiente cada uno a 4 grados de libertad, son 8.3, 9.1, 8.9, 7.8 y 8.6. Mostrar que aunque al nivel de significancia 0.05 no se puede rechazar  $H_0$  con base en ninguno de los experimentos por separado, sí se puede rechazar a este nivel de significancia con base en todos los experimentos juntos.

# AJUSTE DE CURVAS Y MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

# 13

## RELACIÓN ENTRE VARIABLES

Con frecuencia, en la práctica se encuentra que existen relaciones entre dos (o más) variables. Por ejemplo, el peso de los hombres adultos depende de alguna manera de su estatura; la circunferencia de un círculo depende de su radio, y la presión de una masa de gas depende de su temperatura y volumen.

Es útil expresar estas relaciones en forma matemática mediante una ecuación que conecte estas variables.

## AJUSTE DE CURVAS

Para hallar una ecuación que relacione las variables, el primer paso es obtener datos que muestren los valores de las variables que se están considerando. Por ejemplo, si  $X$  y  $Y$  denotan, respectivamente, la estatura y el peso de hombres adultos, entonces en una muestra de  $N$  individuos se hallan las estaturas  $X_1, X_2, \dots, X_N$  y los correspondientes pesos  $Y_1, Y_2, \dots, Y_N$ .

El paso siguiente es graficar los puntos  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_N, Y_N)$  en un sistema de coordenadas rectangulares. Al conjunto de puntos obtenido se le llama *diagrama de dispersión*.

En el diagrama de dispersión es posible visualizar alguna curva cuya forma se aproxime a los datos. A esta curva se le llama *curva de aproximación*. Por ejemplo, en la figura 13-1 los datos al parecer se aproximan adecuadamente mediante una línea recta; entonces se dice que entre las variables existe una relación lineal. En cambio, en la figura 13-2, aunque existe una relación entre las variables, esta relación no es una relación lineal y por lo tanto se le llama *relación no lineal*.

En general, al problema de hallar la ecuación de una curva de aproximación que se ajuste a un conjunto dado de datos se le conoce como *ajuste de curvas*.

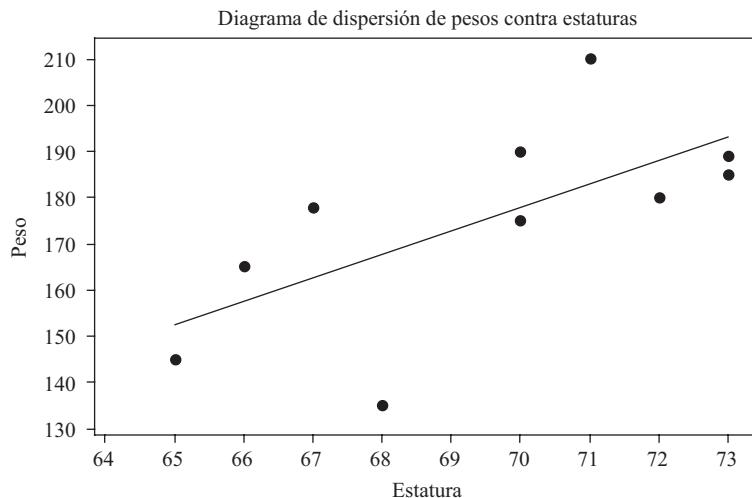


Figura 13-1 Algunas veces la relación entre dos variables se describe mediante una línea recta.

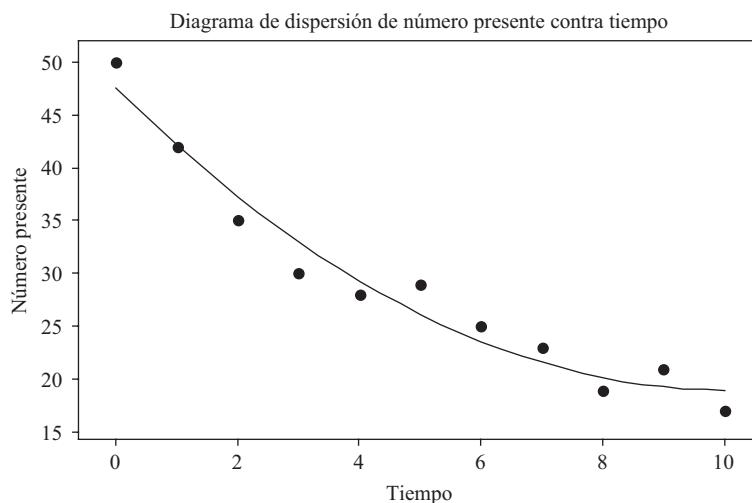


Figura 13-2 Algunas veces la relación entre dos variables se describe mediante una relación no lineal.

## ECUACIONES DE CURVAS DE APROXIMACIÓN

Como referencia, a continuación se presentan varios de los tipos más comunes de curvas de aproximación. Todas las letras, excepto  $X$  y  $Y$ , representan constantes. A las variables  $X$  y  $Y$  se les llama *variable independiente* y *variable dependiente*, respectivamente, aunque estos papeles pueden intercambiarse.

$$\text{Línea recta} \quad Y = a_0 + a_1 X \quad (1)$$

$$\text{Parábola o curva cuadrática} \quad Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 \quad (2)$$

$$\text{Curva cúbica} \quad Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 \quad (3)$$

$$\text{Curva cuártica} \quad Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 \quad (4)$$

$$\text{Curva de grado } n \quad Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \cdots + a_n X^n \quad (5)$$

En las ecuaciones anteriores, a las expresiones de los lados derechos se les conoce como *polinomios* de primero, segundo, tercero, cuarto y  $n$ -ésimo grados, respectivamente. Las funciones definidas por las primeras cuatro ecuaciones se llaman funciones *lineales*, *cuadráticas*, *cúbicas* y *cuárticas*, en ese orden.

Las siguientes son algunas de las muchas otras funciones que se emplean en la práctica:

$$\text{Hipérbola} \quad Y = \frac{1}{a_0 + a_1 X} \quad \text{o bien} \quad \frac{1}{Y} = a_0 + a_1 X \quad (6)$$

$$\text{Curva exponencial} \quad Y = ab^X \quad \text{o bien} \quad \log Y = \log a + (\log b)X = a_0 + a_1 X \quad (7)$$

$$\text{Curva geométrica} \quad Y = aX^b \quad \text{o bien} \quad \log Y = \log a + b(\log X) \quad (8)$$

$$\text{Curva exponencial modificada} \quad Y = ab^X + g \quad (9)$$

$$\text{Curva geométrica modificada} \quad Y = aX^b + g \quad (10)$$

$$\text{Curva de Gompertz} \quad Y = pq^{b^X} \quad \text{o bien} \quad \log Y = \log p + b^X(\log q) = ab^X + g \quad (11)$$

$$\text{Curva de Gompertz modificada} \quad Y = pq^{b^X} + h \quad (12)$$

$$\text{Curva logística} \quad Y = \frac{1}{ab^X + g} \quad \text{o bien} \quad \frac{1}{Y} = ab^X + g \quad (13)$$

$$Y = a_0 + a_1(\log X) + a_2(\log X)^2 \quad (14)$$

Para saber cuál de estas curvas emplear, es útil obtener el diagrama de dispersión de las variables transformadas. Por ejemplo, si el diagrama de dispersión de  $\log Y$  contra  $X$  muestra una relación lineal, la ecuación será de la forma (7), en tanto que si  $\log Y$  contra  $\log X$  muestra una relación lineal, la ecuación será de la forma (8). Como ayuda para saber qué tipo de curva utilizar suele emplearse papel especial para graficar. Al papel para graficar en el que una de las escalas está calibrada logarítmicamente se le conoce como *papel semilogarítmico*, y al papel en el que las dos escalas están calibradas de manera logarítmica se le conoce como *papel logarítmico*.

## MÉTODO DE AJUSTE DE CURVAS A MANO

Para trazar una curva de aproximación que se ajuste a los datos puede emplearse el criterio personal. A este método se le llama *ajuste de curva a mano*. Si se sabe cuál es el tipo de ecuación, las constantes de la ecuación se determinan eligiendo tantos puntos de la curva como constantes tenga la ecuación. Por ejemplo, si la curva es una línea recta, se necesitarán dos puntos; si es una parábola, se necesitarán tres puntos. Este método tiene la desventaja de que personas distintas encontrarán curvas y ecuaciones distintas.

### LA LÍNEA RECTA

El tipo más sencillo de curva de aproximación es una línea recta, cuya ecuación puede escribirse como

$$Y = a_0 + a_1 X \quad (15)$$

Dados dos puntos cualesquiera  $(X_1, Y_1)$  y  $(X_2, Y_2)$  de la recta, se determinan las constantes  $a_0$  y  $a_1$ . La ecuación que se obtiene es

$$Y - Y_1 = \left( \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \right) (X - X_1) \quad \text{o bien} \quad Y - Y_1 = m(X - X_1) \quad (16)$$

donde

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

es la *pendiente* de la recta y representa el cambio o variación en  $Y$  dividido por un cambio o variación correspondiente en  $X$ .

En la ecuación escrita de la forma (15), la constante  $a_1$  es la pendiente  $m$ . La constante  $a_0$ , que es el valor de  $Y$  cuando  $X = 0$ , se conoce como la *intersección con el eje Y*.

## EL MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

Para evitar el empleo del criterio personal para la construcción de rectas, paráolas u otras curvas de aproximación que se ajusten a un conjunto de datos, es necesario ponerse de acuerdo en una definición de la “recta de mejor ajuste”, la “parábola de mejor ajuste”, etcétera.

Con objeto de dar una definición, considérese la figura 13-3, en la que los datos son los puntos  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_N, Y_N)$ . Dado un valor de  $X$ , por ejemplo  $X_1$ , entre el valor  $Y_1$  y el valor correspondiente determinado de acuerdo con la curva  $C$  habrá una diferencia. Como se muestra en la figura, esta diferencia se denota  $D_1$  y se llama la *desviación*, el *error* o el *residual* y puede ser positivo, negativo o cero. De manera semejante se obtienen las desviaciones  $X_2, \dots, X_N$  correspondientes a cada valor  $D_2, \dots, D_N$ .

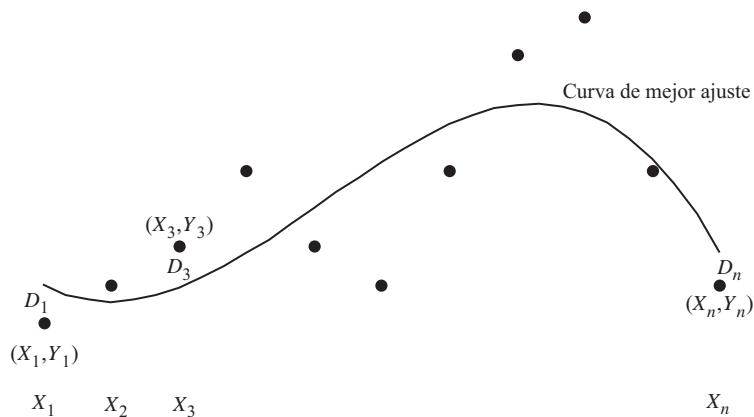
Una medida de la “bondad de ajuste” de la curva  $C$  a los datos dados es la cantidad  $D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_N^2$ . Si esta cantidad es pequeña, el ajuste es bueno; si es grande, el ajuste es malo. De esta manera se llega a la definición siguiente:

**Definición:** De todas las curvas que se aproximan a un conjunto dado de puntos, a la curva que tiene la propiedad de que  $D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_N^2$  sea la mínima se le llama *curva de mejor ajuste*.

Una curva que tiene esta propiedad se dice que se ajusta a los datos en el *sentido de mínimos cuadrados* y se le llama *curva de mínimos cuadrados*. De manera que una recta que tiene esta propiedad se dice que es una *recta de mínimos cuadrados*, una parábola que tiene esta propiedad es una *parábola de mínimos cuadrados*, etcétera.

La definición anterior suele emplearse cuando  $X$  es la variable independiente y  $Y$  es la variable dependiente. Si  $X$  es la variable dependiente, la definición se modifica considerando desviaciones horizontales en lugar de desviaciones verticales, lo que equivale a intercambiar los ejes  $X$  y  $Y$ . Por lo general, estas dos definiciones llevan a curvas distintas de mínimos cuadrados. En este libro, a menos que se especifique otra cosa, se considerará que  $X$  es la variable independiente y que  $Y$  es la variable dependiente.

También pueden definirse otras curvas de mínimos cuadrados considerando las distancias perpendiculares del punto a la curva en lugar de las distancias verticales u horizontales. Sin embargo, esto no suele usarse.



**Figura 13-3**  $D_1$  es la distancia del punto  $(X_1, Y_1)$  a la curva de mejor ajuste, ...,  $D_n$  es la distancia del punto  $(X_n, Y_n)$  a la curva de mejor ajuste.

## LA RECTA DE MÍNIMOS CUADRADOS

La recta de mínimos cuadrados que aproxima el conjunto de puntos  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_N, Y_N)$  tiene la ecuación

$$Y = a_0 + a_1 X \quad (17)$$

donde las constantes  $a_0$  y  $a_1$  se determinan resolviendo las ecuaciones simultáneas

$$\begin{aligned}\sum Y &= a_0 N + a_1 \sum X \\ \sum XY &= a_0 \sum X + a_1 \sum X^2\end{aligned}\quad (18)$$

a las que se les denomina *ecuaciones normales de la recta de mínimos cuadrados* (17). Las constantes  $a_0$  y  $a_1$  de las ecuaciones (18) pueden hallarse empleando las fórmulas

$$a_0 = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad a_1 = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (19)$$

Para recordar las ecuaciones normales (18) hay que observar que la primera ecuación se obtiene formalmente sumando a ambos lados de la ecuación (17) [es decir,  $\sum Y = \sum (a_0 + a_1 X) = a_0 N + a_1 \sum X$ ] y la segunda ecuación se obtiene multiplicando, primero, ambos lados de la ecuación (17) por  $X$  y después sumando [es decir,  $\sum XY = \sum X(a_0 + a_1 X) = a_0 \sum X + a_1 \sum X^2$ ]. Obsérvese que no se trata de una deducción de las ecuaciones normales, sino simplemente de una manera que facilita recordarlas. Obsérvese también que en las ecuaciones (18) y (19) se ha empleado la notación abreviada  $\sum X$ ,  $\sum XY$ , etc., en lugar de  $\sum_{j=1}^N X_j$ ,  $\sum_{j=1}^N X_j Y_j$ , etcétera.

El trabajo que implica hallar la recta de mínimos cuadrados puede reducirse transformando los datos de manera que  $x = X - \bar{X}$  y  $y = Y - \bar{Y}$ . Entonces, la ecuación de la recta de mínimos cuadrados puede escribirse de la manera siguiente (problema 13.15):

$$y = \left( \frac{\sum xy}{\sum x^2} \right) x \quad \text{o bien} \quad y = \left( \frac{\sum xY}{\sum x^2} \right) x \quad (20)$$

En particular, si  $X$  es tal que  $\sum X = 0$  (es decir,  $\bar{X} = 0$ ), la ecuación se convierte en

$$Y = \bar{Y} + \left( \frac{\sum XY}{\sum X^2} \right) X \quad (21)$$

La ecuación (20) implica que  $y = 0$  para  $x = 0$ ; por lo tanto, la recta de mínimos cuadrados pasa por el punto  $(\bar{X}, \bar{Y})$ , al que se le llama el *centroide o centro de gravedad* de los datos.

Si se considera que la variable  $X$  es la variable dependiente en lugar de la variable independiente, la ecuación (17) se escribe  $X = b_0 + b_1 Y$ . Las fórmulas anteriores también son válidas cuando se intercambian  $X$  y  $Y$ , y  $a_0$  y  $a_1$  se sustituyen por  $b_0$  y  $b_1$ , respectivamente. Sin embargo, por lo general la recta de mínimos cuadrados que se obtiene no es la misma que la que se obtuvo antes [ver problemas 13.11 y 13.15d)].

## RELACIONES NO LINEALES

Algunas veces, las relaciones no lineales pueden reducirse a relaciones lineales mediante transformaciones adecuadas de las variables (ver problema 13.21).

## LA PARÁBOLA DE MÍNIMOS CUADRADOS

La parábola de mínimos cuadrados que aproxima el conjunto de puntos  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_N, Y_N)$  tiene la ecuación

$$Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 \quad (22)$$

donde las constantes  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  se determinan resolviendo simultáneamente las ecuaciones

$$\begin{aligned}\sum Y &= a_0 N + a_1 \sum X + a_2 \sum X^2 \\ \sum XY &= a_0 \sum X + a_1 \sum X^2 + a_2 \sum X^3 \\ \sum X^2 Y &= a_0 \sum X^2 + a_1 \sum X^3 + a_2 \sum X^4\end{aligned}\quad (23)$$

llamadas *ecuaciones normales de la parábola de mínimos cuadrados* (22).

Para recordar las ecuaciones (23), obsérvese que se pueden obtener formalmente multiplicando la ecuación (22) por 1,  $X$  y  $X^2$ , respectivamente, y sumando a ambos lados de las ecuaciones resultantes. Esta técnica puede extenderse a las ecuaciones normales de curvas cúbicas de mínimos cuadrados, ecuaciones cuárticas de mínimos cuadrados y, en general, a cualquiera de las curvas de mínimos cuadrados correspondientes a la ecuación (5).

Como en el caso de la recta de mínimos cuadrados, las ecuaciones (23) se simplifican si las  $X$  se escogen de manera que  $\sum X = 0$ . Estas ecuaciones también se simplifican empleando las nuevas variables  $x = X - \bar{X}$  y  $y = Y - \bar{Y}$ .

## REGRESIÓN

Con frecuencia se desea estimar el valor de la variable  $Y$  que corresponde a un valor dado de la variable  $X$ , basándose en los datos muestrales. Esto se hace estimando el valor de  $Y$  a partir de la curva de mínimos cuadrados ajustada a los datos muestrales. A la curva de mínimos cuadrados se le llama *curva de regresión de  $Y$  en  $X$* , debido a que  $Y$  se estima a partir de  $X$ .

Si lo que se desea es estimar un valor de  $X$  a partir de un valor dado de  $Y$ , se emplea la *curva de regresión de  $X$  en  $Y$* , que es lo mismo que intercambiar las variables en el diagrama de dispersión, de manera que  $X$  sea la variable dependiente y  $Y$  sea la variable independiente. En este caso se sustituyen las desviaciones verticales, de la definición de la curva de mínimos cuadrados de la página 284, por desviaciones horizontales.

En general, la recta o la curva de regresión de  $Y$  en  $X$  no es igual a la recta o a la curva de regresión de  $X$  en  $Y$ .

## APLICACIONES A SERIES DE TIEMPO

Si la variable independiente  $X$  representa tiempo, los datos dan el valor de  $Y$  en distintos momentos. A los datos ordenados de acuerdo con el tiempo se les llama *serie de tiempo*. En este caso, a la recta o a la curva de regresión de  $Y$  en  $X$  se le llama *recta* o *curva de tendencia* y se emplea para hacer *estimaciones, predicciones o pronósticos*.

## PROBLEMAS EN LOS QUE INTERVIENEN MÁS DE DOS VARIABLES

Los problemas en los que intervienen más de dos variables se tratan de manera análoga a los problemas de dos variables. Por ejemplo, entre las tres variables  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  puede haber una relación que pueda ser descrita mediante la ecuación

$$Z = a_0 + a_1 X + a_2 Y \quad (24)$$

a la que se le llama *ecuación lineal en las variables  $X$ ,  $Y$  y  $Z$* .

En un sistema de coordenadas rectangulares, esta ecuación representa un plano y los puntos muestrales  $(X_1, Y_1, Z_1)$ ,  $(X_2, Y_2, Z_2)$ , ...,  $(X_N, Y_N, Z_N)$  estarán “dispersos” no demasiado lejos de este plano, al que se le llama *plano de aproximación*.

Por extensión del método de mínimos cuadrados, se puede hablar de un *plano de mínimos cuadrados* que se approxime a los datos. Si  $Z$  se aproxima a partir de los valores de  $X$  y  $Y$ , a este plano se le llamará *plano de regresión de  $Z$  en  $X$  y  $Y$* . Las ecuaciones normales correspondientes al plano de mínimos cuadrados (24) son

$$\begin{aligned} \sum Z &= a_0 N + a_1 \sum X + a_2 \sum Y \\ \sum XZ &= a_0 \sum X + a_1 \sum X^2 + a_2 \sum XY \\ \sum YZ &= a_0 \sum Y + a_1 \sum XY + a_2 \sum Y^2 \end{aligned} \quad (25)$$

y para recordarlas se puede pensar que se obtienen a partir de la ecuación (24) multiplicando ésta por 1,  $X$  y  $Y$  y sumando después.

También se pueden considerar ecuaciones más complicadas que la (24). Éstas representan *superficies de regresión*. Cuando el número de variables es mayor a tres, se pierde la intuición geométrica debido a que se requieren espacios de cuatro, cinco o  $n$  dimensiones.

A los problemas en los que se estima una variable a partir de dos o más variables se les llama problemas de *regresión múltiple*. Estos problemas serán considerados más detalladamente en el capítulo 15.

## PROBLEMAS RESUELTOS

### LÍNEAS RECTAS

- 13.1** Treinta estudiantes de secundaria fueron entrevistados en un estudio acerca de la relación entre el tiempo que pasan en Internet y su promedio de calificaciones. Los resultados se muestran en la tabla 13.1.  $X$  es la cantidad de tiempo que pasan en Internet y  $Y$  es su promedio de calificaciones.

Tabla 13.1

| Horas | Promedio | Horas | Promedio | Horas | Promedio |
|-------|----------|-------|----------|-------|----------|
| 11    | 2.84     | 9     | 2.85     | 25    | 1.85     |
| 5     | 3.20     | 5     | 3.35     | 6     | 3.14     |
| 22    | 2.18     | 14    | 2.60     | 9     | 2.96     |
| 23    | 2.12     | 18    | 2.35     | 20    | 2.30     |
| 20    | 2.55     | 6     | 3.14     | 14    | 2.66     |
| 20    | 2.24     | 9     | 3.05     | 19    | 2.36     |
| 10    | 2.90     | 24    | 2.06     | 21    | 2.24     |
| 19    | 2.36     | 25    | 2.00     | 7     | 3.08     |
| 15    | 2.60     | 12    | 2.78     | 11    | 2.84     |
| 18    | 2.42     | 6     | 2.90     | 20    | 2.45     |

Usar MINITAB para:

- Hacer un diagrama de dispersión con estos datos.
- Ajustar una recta a estos datos y dar los valores de  $a_0$  y  $a_1$ .

### SOLUCIÓN

- En las columnas C1 y C2 de la hoja de cálculo de MINITAB se ingresan estos datos. La columna C1 se titula Horas en Internet y la columna C2 Promedio de calificaciones. Empleando la secuencia **Stat → Regresión → Regression** se obtienen los resultados que se muestran en la figura 13-4.
- El valor de  $a_0$  es 3.49 y el valor de  $a_1$  es -0.0594.

- 13.2** Resolver el problema 13.1 usando EXCEL.

### SOLUCIÓN

En las columnas A y B de la hoja de cálculo de EXCEL se ingresan los datos. Con la secuencia **Tools → Data Análisis → Regression** se obtiene el cuadro de diálogo de la figura 13-5 que se llena como ahí se muestra. La parte de interés del resultado, en este momento, es

|                   |          |
|-------------------|----------|
| Intersección      | 3.488753 |
| Horas en Internet | -0.05935 |

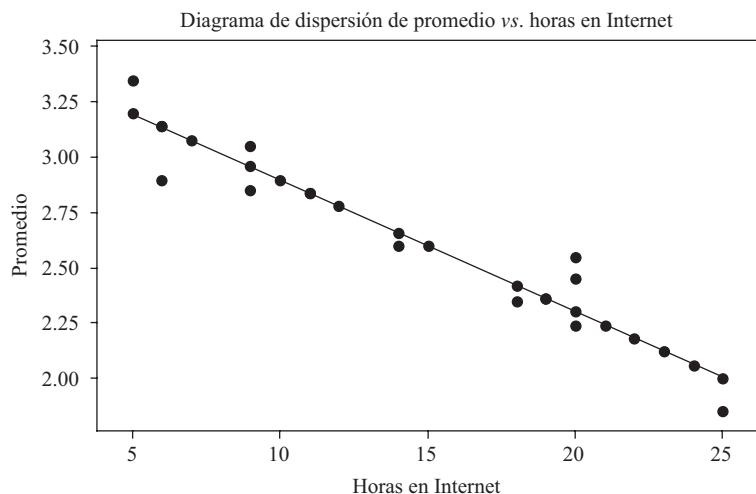


Figura 13-4 La suma de los cuadrados de las distancias de los puntos a la recta de mejor ajuste es la mínima utilizando la recta promedio =  $3.49 - 0.0594$  horas en Internet.

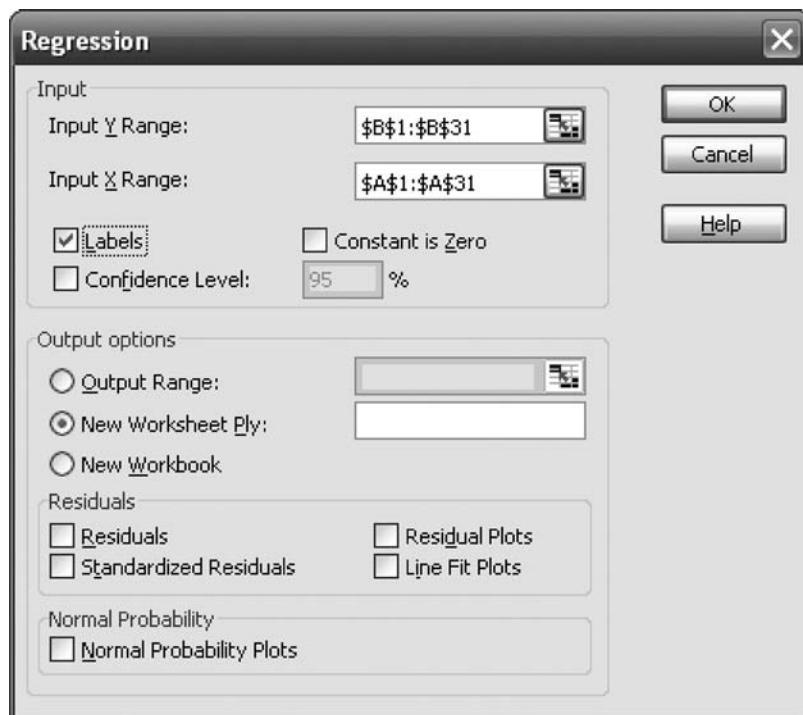


Figura 13-5 EXCEL, cuadro de diálogo para el problema 13.2.

A la constante  $a_0$  se le llama *intersección* y a la constante  $a_1$  se le denomina *pendiente*. Se obtienen los mismos valores que con MINITAB.

- 13.3 a) Mostrar que la ecuación de la recta que pasa a través de los puntos  $(X_1, Y_1)$  y  $(X_2, Y_2)$  está dada por

$$Y - Y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X - X_1)$$

- b) Encontrar la ecuación de la recta que pasa a través de los puntos  $(2, -3)$  y  $(4, 5)$ .

### SOLUCIÓN

- a) La ecuación de la recta es

$$Y = a_0 + a_1 X \quad (29)$$

Como  $(X_1, Y_1)$  está en la recta,

$$Y_1 = a_0 + a_1 X_1 \quad (30)$$

Como  $(X_2, Y_2)$  está en la recta,

$$Y_2 = a_0 + a_1 X_2 \quad (31)$$

Sustrayendo la ecuación (30) de la ecuación (29),

$$Y - Y_1 = a_1(X - X_1) \quad (32)$$

Sustrayendo la ecuación (30) de la ecuación (31),

$$Y_2 - Y_1 = a_1(X_2 - X_1) \quad \text{o bien} \quad a_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

Sustituyendo este valor de  $a_1$  en la ecuación (32), se obtiene

$$Y - Y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X - X_1)$$

como se deseaba. La cantidad

$$\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

se abrevia  $m$ , representa el cambio en  $Y$  dividido entre el correspondiente cambio en  $X$  y es la *pendiente* de la recta. La ecuación buscada es  $Y - Y_1 = m(X - X_1)$ .

- b) **Primer método** [empleando los resultados del inciso a)]

En el primer punto  $(2, -3)$  se tiene  $X_1 = 2$  y  $Y_1 = -3$ ; en el segundo punto  $(4, 5)$  se tiene  $X_2 = 4$  y  $Y_2 = 5$ . Por lo tanto, la pendiente es

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{5 - (-3)}{4 - 2} = \frac{8}{2} = 4$$

y la ecuación buscada es

$$Y - Y_1 = m(X - X_1) \quad \text{o bien} \quad Y - (-3) = 4(X - 2)$$

la cual se puede escribir como  $Y + 3 = 4(X - 2)$ , o bien  $Y = 4X - 11$ .

### Segundo método

La ecuación de una línea recta es  $Y = a_0 + a_1 X$ . Como el punto  $(2, -3)$  pertenece a esta recta,  $-3 = a_0 + 2a_1$ , y como también el punto  $(4, 5)$  pertenece a esta recta,  $5 = a_0 + 4a_1$ ; resolviendo estas dos ecuaciones simultáneas, se obtiene  $a_1 = 4$  y  $a_0 = -11$ . Por lo tanto, la ecuación buscada es

$$Y = -11 + 4X \quad \text{o bien} \quad Y = 4X - 11$$

- 13.4** Se siembra trigo en 9 parcelas del mismo tamaño. En la tabla 13.2 se muestran las cantidades de fertilizante empleadas en cada parcela, así como las cantidades de trigo obtenidas.

Usar MINITAB para ajustar una curva parabólica  $Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2$  a estos datos.

Tabla 13.2

| Cantidad de trigo (y) | Fertilizante (x) |
|-----------------------|------------------|
| 2.4                   | 1.2              |
| 3.4                   | 2.3              |
| 4.4                   | 3.3              |
| 5.1                   | 4.1              |
| 5.5                   | 4.8              |
| 5.2                   | 5.0              |
| 4.9                   | 5.5              |
| 4.4                   | 6.1              |
| 3.9                   | 6.9              |

**SOLUCIÓN**

Las cantidades de trigo se ingresan en la columna C1 y las de fertilizante en la columna C2. Con la secuencia **Stat** → **Regresión** → **Fitted Line Plot** se obtiene el cuadro de diálogo que se muestra en la figura 13-6.

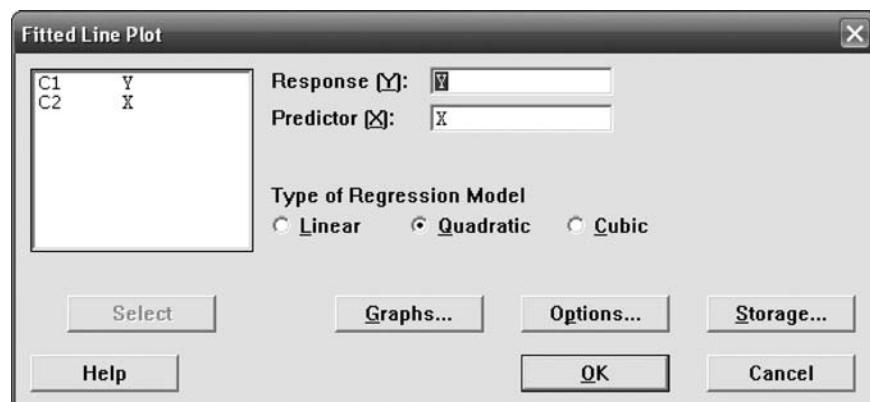


Figura 13-6 MINITAB, cuadro de diálogo para el problema 13.4.

Con este cuadro de diálogo se obtiene el resultado que se muestra en la figura 13-7.

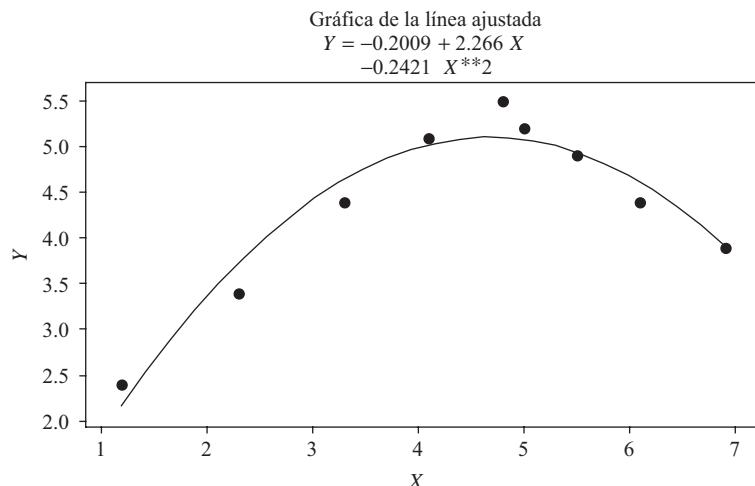


Figura 13-7 MINITAB, ajuste de la curva parabólica de mínimos cuadrados a un conjunto de datos.

- 13.5** Encontrar: *a)* la pendiente, *b)* la ecuación, *c)* la intersección con el eje  $Y$  y *d)* la intersección con el eje  $X$  de la recta que pasa por los puntos  $(1, 5)$  y  $(4, -1)$ .

### SOLUCIÓN

*a)*  $(X_1 = 1, Y_1 = 5)$  y  $(X_2 = 4, Y_2 = -1)$ . Por lo tanto,

$$m = \text{pendiente} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{-1 - 5}{4 - 1} = \frac{-6}{3} = -2$$

El signo negativo de la pendiente indica que a medida que  $X$  crece,  $Y$  decrece, como se muestra en la figura 13-8.

- b)* La ecuación de la recta es

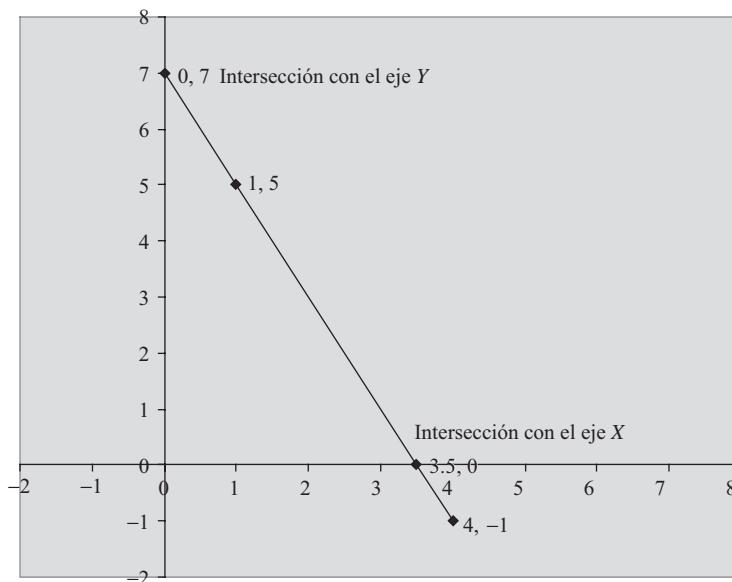
$$Y - Y_1 = m(X - X_1) \quad \text{o} \quad Y - 5 = -2(X - 1)$$

Es decir,

$$Y - 5 = -2X + 2 \quad \text{o} \quad Y = 7 - 2X$$

Esta ecuación también se puede obtener empleando el segundo método del problema 13.3*b*).

- c)* La intersección con el eje  $Y$ , que es el valor de  $Y$  cuando  $X = 0$ , es  $Y = 7 - 2(0) = 7$ . Esto también puede verse directamente en la figura 13-8.



**Figura 13-8** Recta que muestra la intersección con el eje  $X$  y la intersección con el eje  $Y$ .

- d)* La intersección con el eje  $X$  es el valor de  $X$  cuando  $Y = 0$ . Sustituyendo  $Y = 0$  en la ecuación  $Y = 7 - 2X$ , se tiene  $0 = 7 - 2X$ , o  $2X = 7$  y  $X = 3.5$ . Esto también se puede ver directamente en la figura 13-8.

- 13.6** Encontrar la ecuación de la recta que pasa a través del punto  $(4, 2)$  y que es paralela a la recta  $2X + 3Y = 6$ .

### SOLUCIÓN

Si dos rectas son paralelas, sus pendientes son iguales. De  $2X + 3Y = 6$  se obtiene  $3Y = 6 - 2X$ , o bien  $Y = 2 - \frac{2}{3}X$ , de manera que la pendiente de la recta es  $m = -\frac{2}{3}$ . Por lo tanto, la ecuación de la recta que se busca es

$$Y - Y_1 = m(X - X_1) \quad \text{o} \quad Y - 2 = -\frac{2}{3}(X - 4)$$

la cual también se puede escribir como  $2X + 3Y = 14$ .

**Otro método**

La ecuación de cualquier recta paralela a  $2X + 3Y = 6$  es de la forma  $2X + 3Y = c$ . Para encontrar  $c$ , sea  $X = 4$  y  $Y = 2$ . Entonces  $2(4) + 3(2) = c$ , o  $c = 14$ , con lo que la ecuación buscada es  $2X + 3Y = 14$ .

- 13.7** Encontrar la ecuación de la recta cuya pendiente es  $-4$  y cuya intersección con el eje  $Y$  es  $16$ .

**SOLUCIÓN**

En la ecuación  $Y = a_0 + a_1X$ ,  $a_0 = 16$  es la intersección con el eje  $Y$  y  $a_1 = -4$  es la pendiente. Por lo tanto, la ecuación buscada es  $Y = 16 - 4X$ .

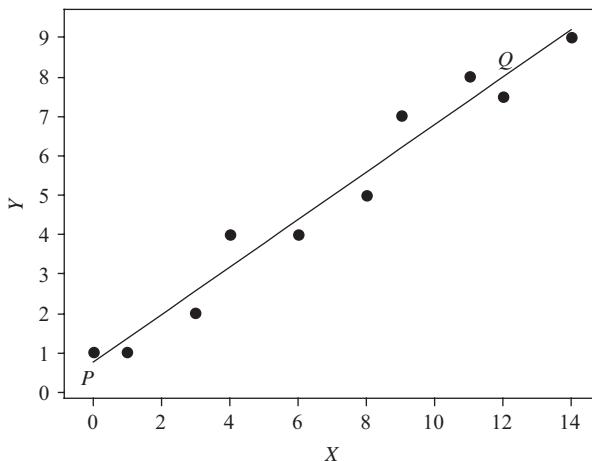
- 13.8** *a)* Construir una recta que se aproxime a los datos de la tabla 13.3.  
*b)* Encontrar la ecuación de esta recta.

**Tabla 13.3**

|     |   |   |   |   |   |   |    |    |
|-----|---|---|---|---|---|---|----|----|
| $X$ | 1 | 3 | 4 | 6 | 8 | 9 | 11 | 14 |
| $Y$ | 1 | 2 | 4 | 4 | 5 | 7 | 8  | 9  |

**SOLUCIÓN**

- a)* En un sistema de coordenadas rectangulares se grafican los puntos  $(1, 1)$ ,  $(3, 2)$ ,  $(4, 4)$ ,  $(6, 4)$ ,  $(8, 5)$ ,  $(9, 7)$ ,  $(11, 8)$  y  $(14, 9)$ , como se muestra en la figura 13-9. En la figura se ha trazado *a mano* una recta que se aproxima a los datos. En el problema 13.11 se muestra un método que elimina el criterio personal; ese método es el de mínimos cuadrados.

**Figura 13-9** Método a mano para el ajuste de curvas.

- b)* Para obtener la ecuación de la recta construida en el inciso *a*), se eligen cualesquiera dos puntos de la recta, por ejemplo,  $P$  y  $Q$ ; como se muestra en la gráfica, las coordenadas de los puntos  $P$  y  $Q$  son aproximadamente  $(0, 1)$  y  $(12, 7.5)$ . La ecuación de una recta es  $Y = a_0 + a_1X$ . Por lo tanto, para el punto  $(0, 1)$  se tiene  $1 = a_0 + a_1(0)$ , y para el punto  $(12, 7.5)$  se tiene  $7.5 = a_0 + 12a_1$ ; como de la primera de estas ecuaciones se obtiene  $a_0 = 1$ , de la segunda se obtiene  $a_1 = 6.5/12 = 0.542$ . Entonces, la ecuación buscada es  $Y = 1 + 0.542X$ .

**Otro método**

$$Y - Y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X - X_1) \quad \text{y} \quad Y - 1 = \frac{7.4 - 1}{12 - 0} (X - 0) = 0.542X$$

Por lo tanto,  $Y = 1 + 0.542X$ .

- 13.9** *a)* Comparar los valores de  $Y$  obtenidos a partir de la recta de aproximación con los datos de la tabla 13.2.  
*b)* Estimar el valor de  $Y$  para  $X = 10$ .

### SOLUCIÓN

- a)* Para  $X = 1$ ,  $Y = 1 + 0.542(1) = 1.542$ , o bien 1.5. Para  $X = 3$ ,  $Y = 1 + 0.542(3) = 2.626$  o bien 2.6. De la misma manera se obtienen valores de  $Y$  correspondientes a otros valores de  $X$ . Los valores estimados para  $Y$  a partir de la ecuación  $Y = 1 + 0.542X$  se denotan  $Y_{\text{est}}$ . En la tabla 13.4 se presentan estos valores estimados junto con los datos originales.
- b)* El valor estimado de  $Y$  correspondiente a  $X = 10$  es  $Y = 1 + 0.542(10) = 6.42$  o 6.4.

Tabla 13.4

|                  |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $X$              | 1   | 3   | 4   | 6   | 8   | 9   | 11  | 14  |
| $Y$              | 1   | 2   | 4   | 4   | 5   | 7   | 8   | 9   |
| $Y_{\text{est}}$ | 1.5 | 2.6 | 3.2 | 4.3 | 5.3 | 5.9 | 7.0 | 8.6 |

- 13.10** En la tabla 13.5 se presentan las estaturas en pulgadas (in) y los pesos en libras (lb) de 12 estudiantes varones que forman una muestra aleatoria de los estudiantes de primer año de una universidad.

Tabla 13.5

|                   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Estatura $X$ (in) | 70  | 63  | 72  | 60  | 66  | 70  | 74  | 65  | 62  | 67  | 65  | 68  |
| Peso $Y$ (lb)     | 155 | 150 | 180 | 135 | 156 | 168 | 178 | 160 | 132 | 145 | 139 | 152 |

- a)* Obtener el diagrama de dispersión de estos datos.  
*b)* Trazar una recta que se aproxime a los datos.  
*c)* Encontrar la ecuación de la recta que se trazó en el inciso *b*).  
*d)* Estimar el peso de un estudiante cuya estatura es 63 in.  
*e)* Estimar la estatura de un estudiante cuyo peso es 168 lb.

### SOLUCIÓN

- a)* El diagrama de dispersión que se muestra en la figura 13-10 se obtiene graficando los puntos  $(70, 155)$ ,  $(63, 150)$ , ...,  $(68, 152)$ .  
*b)* En la figura 13-10 se presenta una recta que se aproxima a los datos. Pero ésta es sólo una de las muchas que podían haberse trazado.  
*c)* Se toman dos puntos cualesquiera de la recta construida en el inciso *b*), por ejemplo  $P$  y  $Q$ . Las coordenadas de estos puntos, de acuerdo con la gráfica, son aproximadamente  $(60, 130)$  y  $(72, 170)$ . Por lo tanto,

$$Y - Y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X - X_1) \quad Y - 130 = \frac{170 - 130}{72 - 60} (X - 60) \quad Y = \frac{10}{3} X - 70$$

- d)* Si  $X = 63$ , entonces  $Y = \frac{10}{3}(63) - 70 = 140$  lb.  
*e)* Si  $Y = 168$ , entonces  $168 = \frac{10}{3}X - 70$ ,  $\frac{10}{3}X = 238$  y  $X = 71.4$  o bien 71 in.

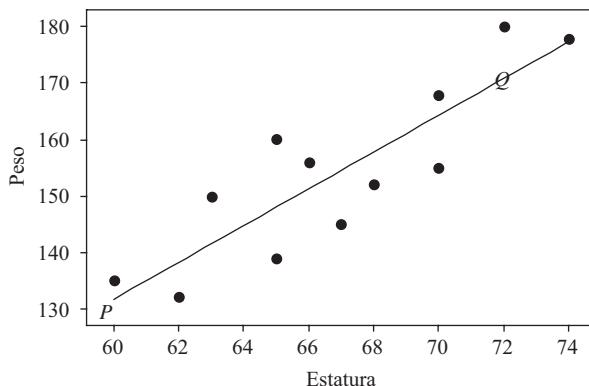


Figura 13-10 Método a mano para el ajuste de curvas.

### LA RECTA DE MÍNIMOS CUADRADOS

- 13.11** Encontrar la recta de mínimos cuadrados correspondiente a los datos del problema 13.8 empleando: *a)*  $X$  como variable independiente y *b)*  $X$  como variable dependiente.

#### SOLUCIÓN

- a)* La ecuación de una recta es  $Y = a_0 + a_1X$ . Las ecuaciones normales son

$$\begin{aligned}\sum Y &= a_0N + a_1 \sum X \\ \sum XY &= a_0 \sum X + a_1 \sum X^2\end{aligned}$$

El cálculo de estas sumas se puede organizar como se muestra en la tabla 13.6. Aunque la última columna de la derecha no se necesita en esta parte del problema, se ha incluido en la tabla para emplearla en el inciso *b*.

Como hay ocho pares de valores  $X$  y  $Y$ ,  $N = 8$  y las ecuaciones normales resultan ser

$$8a_0 + 56a_1 = 40$$

$$56a_0 + 524a_1 = 364$$

Resolviendo simultáneamente estas ecuaciones, se obtiene  $a_0 = \frac{6}{11}$  o 0.545;  $a_1 = \frac{7}{11}$  o 0.636; con lo que la recta de mínimos cuadrados buscada es  $Y = \frac{6}{11} + \frac{7}{11}X$ , o  $Y = 0.545 + 0.636X$ .

Tabla 13.6

| $X$           | $Y$ | $X^2$         | $XY$             | $Y^2$            |
|---------------|-----|---------------|------------------|------------------|
| 1             | 1   | 1             | 1                | 1                |
| 3             | 2   | 9             | 6                | 4                |
| 4             | 4   | 16            | 16               | 16               |
| 6             | 4   | 36            | 24               | 16               |
| 8             | 5   | 64            | 40               | 25               |
| 9             | 7   | 81            | 63               | 49               |
| 11            | 8   | 121           | 88               | 64               |
| 14            | 9   | 196           | 126              | 81               |
| $\sum X = 56$ |     | $\sum Y = 40$ | $\sum X^2 = 524$ | $\sum Y^2 = 256$ |

**Otro método**

$$a_0 = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{(40)(524) - (56)(364)}{(8)(524) - (56)^2} = \frac{6}{11} \quad \text{o bien} \quad 0.545$$

$$a_1 = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{(8)(364) - (56)(40)}{(8)(524) - (56)^2} = \frac{7}{11} \quad \text{o bien} \quad 0.636$$

Por lo tanto,  $Y = a_0 + a_1X$ , o bien  $Y = 0.545 + 0.636X$ , como antes.

- b) Si  $X$  es considerada como la variable dependiente, entonces  $Y$  es la variable independiente; la ecuación de la recta de mínimos cuadrados es  $X = b_0 + b_1Y$  y las ecuaciones normales son

$$\begin{aligned} \sum X &= b_0 N + b_1 \sum Y \\ \sum XY &= b_0 \sum Y + b_1 \sum Y^2 \end{aligned}$$

Entonces, de acuerdo con la tabla 13.6, las ecuaciones normales son

$$8b_0 + 40b_1 = 56$$

$$40b_0 + 256b_1 = 364$$

de donde  $b_0 = -\frac{1}{2}$  o bien  $-0.50$  y  $b_1 = \frac{3}{2}$  o bien  $1.50$ . Estos valores también pueden obtenerse de la manera siguiente

$$b_0 = \frac{(\sum X)(\sum Y^2) - (\sum Y)(\sum XY)}{N \sum Y^2 - (\sum Y)^2} = \frac{(56)(256) - (40)(364)}{(8)(256) - (40)^2} = -0.50$$

$$b_1 = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum Y^2 - (\sum Y)^2} = \frac{(8)(364) - (56)(40)}{(8)(256) - (40)^2} = 1.50$$

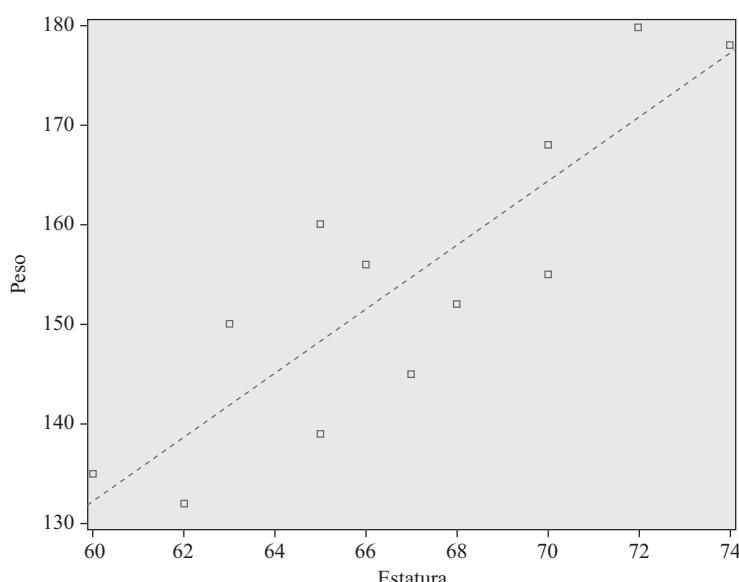
Por lo tanto, la ecuación buscada de la recta de mínimos cuadrados es  $X = b_0 + b_1Y$  o bien  $X = -0.50 + 1.50Y$ .

Obsérvese que despejando  $Y$  de esta ecuación se obtiene  $Y = \frac{1}{3} + \frac{2}{3}X$  o bien  $Y = 0.333 + 0.667X$ , que no es igual a la recta obtenida en el inciso a).

- 13.12** Emplear el paquete para estadística SAS para trazar, en una misma gráfica, los puntos correspondientes a los datos de estatura y peso del problema 13.10 y la recta de mínimos cuadrados.

**SOLUCIÓN**

En la figura 13-11, los puntos correspondientes a los datos se presentan como pequeños círculos vacíos y la recta de mínimos cuadrados como una recta punteada.



**Figura 13-11** SAS, gráfica que presenta los puntos correspondientes a los datos de la tabla 13.5 y la recta de mínimos cuadrados.

- 13.13** a) Muestre que las dos rectas de mínimos cuadrados obtenidas en el problema 13.11 se intersecan en el punto  $(\bar{X}, \bar{Y})$ .  
 b) Estimar el valor de  $Y$  para  $X = 12$ .  
 c) Estimar el valor de  $X$  para  $Y = 3$ .

**SOLUCIÓN**

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} = \frac{56}{8} = 7 \quad \bar{Y} = \frac{\sum Y}{N} = \frac{40}{8} = 5$$

Por lo tanto, el punto  $(\bar{X}, \bar{Y})$ , llamado el *centroide*, es  $(7, 5)$ .

- a) El punto  $(7, 5)$  se encuentra en la recta  $Y = 0.545 + 0.636X$ ; o, más exactamente,  $Y = \frac{6}{11} + \frac{7}{11}X$ , ya que  $5 = \frac{6}{11} + \frac{7}{11}(7)$ . El punto  $(7, 5)$  se encuentra en la recta  $X = -\frac{1}{2} + \frac{3}{2}Y$ , ya que  $7 = -\frac{1}{2} + \frac{3}{2}(5)$ .

**Otro método**

Las ecuaciones de las dos rectas son  $Y = \frac{6}{11} + \frac{7}{11}X$  y  $X = -\frac{1}{2} + \frac{3}{2}Y$ . Resolviendo simultáneamente estas dos ecuaciones se encuentra  $X = 7$  y  $Y = 5$ . Por lo tanto, las rectas se intersecan en el punto  $(7, 5)$ .

- b) Sustituyendo  $X = 12$  en la recta de regresión de  $Y$  (problema 13.11),  $Y = 0.545 + 0.636(12) = 8.2$ .  
 c) Sustituyendo  $Y = 3$  en la recta de regresión de  $X$  (problema 13.11),  $X = -0.50 + 1.50(3) = 4.0$ .

- 13.14** Probar que una recta de mínimos cuadrados siempre pasa por el punto  $(\bar{X}, \bar{Y})$ .

**SOLUCIÓN****Caso 1** ( $X$  es la variable independiente)

La ecuación de la recta de mínimos cuadrados es

$$Y = a_0 + a_1X \quad (34)$$

Una de las ecuaciones normales de la recta de mínimos cuadrados es

$$\sum Y = a_0N + a_1 \sum X \quad (35)$$

Dividiendo ambos lados de la ecuación (35) entre  $N$  se obtiene

$$\bar{Y} = a_0 + a_1\bar{X} \quad (36)$$

Restando la ecuación (36) de la ecuación (34), la recta de mínimos cuadrados se puede escribir como

$$Y - \bar{Y} = a_1(X - \bar{X}) \quad (37)$$

lo que muestra que la recta pasa a través del punto  $(\bar{X}, \bar{Y})$ .

**Caso 2** ( $Y$  es la variable independiente)

Procediendo como en el caso 1, pero intercambiando  $X$  y  $Y$  y sustituyendo las constantes  $a_0$  y  $a_1$  por  $b_0$  y  $b_1$ , respectivamente, se encuentra que la recta de mínimos cuadrados puede escribirse como

$$X - \bar{X} = b_1(Y - \bar{Y}) \quad (38)$$

lo que indica que la recta pasa por el punto  $(\bar{X}, \bar{Y})$ .

Obsérvese que las rectas (37) y (38) no coinciden, sino que se intersecan en  $(\bar{X}, \bar{Y})$ .

- 13.15** a) Considerando  $X$  como la variable independiente, mostrar que la ecuación de la recta de mínimos cuadrados se puede escribir como

$$y = \left( \frac{\sum xy}{\sum x^2} \right)x \quad \text{o bien} \quad y = \left( \frac{\sum xY}{\sum x^2} \right)x$$

donde  $x = X - \bar{X}$  y  $y = Y - \bar{Y}$ .

- b) Si  $\bar{X} = 0$ , mostrar que la recta de mínimos cuadrados del inciso a) puede escribirse como

$$Y = \bar{Y} + \left( \frac{\sum XY}{\sum X^2} \right) X$$

- c) Dar la ecuación de la recta de mínimos cuadrados correspondiente a la del inciso a) en el caso en que  $Y$  sea la variable independiente.  
d) Verificar que las rectas de los incisos a) y c) no son necesariamente iguales.

### SOLUCIÓN

- a) La ecuación (37) puede escribirse como  $y = a_1x$ , donde  $x = X - \bar{X}$  y  $y = Y - \bar{Y}$ . Además, resolviendo simultáneamente las ecuaciones normales (18) se tiene

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{N \sum (x + \bar{X})(y + \bar{Y}) - [\sum (x + \bar{X})][\sum (y + \bar{Y})]}{N \sum (x + \bar{X})^2 - [\sum (x + \bar{X})]^2} \\ &= \frac{N \sum (xy + x\bar{Y} + \bar{X}y + \bar{X}\bar{Y}) - (\sum x + N\bar{X})(\sum y + N\bar{Y})}{N \sum (x^2 + 2x\bar{X} + \bar{X}^2) - (\sum x + N\bar{X})^2} \\ &= \frac{N \sum xy + N\bar{Y} \sum x + N\bar{X} \sum y + N^2\bar{X}\bar{Y} - (\sum x + N\bar{X})(\sum y + N\bar{Y})}{N \sum x^2 + 2N\bar{X} \sum x + N^2\bar{X}^2 - (\sum x + N\bar{X})^2} \end{aligned}$$

Pero  $\sum x = \sum (X - \bar{X}) = 0$  y  $\sum y = \sum (Y - \bar{Y}) = 0$ ; por lo que la fórmula anterior se simplifica a

$$a_1 = \frac{N \sum xy + N^2\bar{X}\bar{Y} - N^2\bar{X}\bar{Y}}{N \sum x^2 + N^2\bar{X}^2 - N^2\bar{X}^2} = \frac{\sum xy}{\sum x^2}$$

Lo que puede escribirse como

$$a_1 = \frac{\sum xy}{\sum x^2} = \frac{\sum x(Y - \bar{Y})}{\sum x^2} = \frac{\sum xY - \bar{Y} \sum x}{\sum x^2} = \frac{\sum xY}{\sum x^2}$$

Por lo tanto, la recta de mínimos cuadrados es  $y = a_1x$ ; es decir,

$$y = \left( \frac{\sum xy}{\sum x^2} \right) x \quad \text{o bien} \quad y = \left( \frac{\sum xY}{\sum x^2} \right) x$$

- b) Si  $\bar{X} = 0$ ,  $x = X - \bar{X} = X$ . Entonces, de acuerdo con la fórmula

$$y = \left( \frac{\sum xY}{\sum x^2} \right)$$

se tiene  $y = \left( \frac{\sum XY}{\sum X^2} \right) X \quad \text{o bien} \quad Y = \bar{Y} + \left( \frac{\sum XY}{\sum X^2} \right) X$

### Otro método

Las ecuaciones normales de la recta de mínimos cuadrados  $Y = a_0 + a_1X$  son

$$\sum Y = a_0N + a_1 \sum X \quad \text{y} \quad \sum XY = a_0 \sum X + a_1 \sum X^2$$

Si  $\bar{X} = (\sum X)/N = 0$ , entonces  $\sum X = 0$  y las ecuaciones normales se transforman en

$$\sum Y = a_0N \quad \text{y} \quad \sum XY = a_1 \sum X^2$$

de donde  $a_0 = \frac{\sum Y}{N} = \bar{Y} \quad \text{y} \quad a_1 = \frac{\sum XY}{\sum X^2}$

Por lo tanto, la ecuación buscada de la recta de mínimos cuadrados es

$$Y = a_0 + a_1X \quad \text{o bien} \quad Y = \bar{Y} + \left( \frac{\sum XY}{\sum X^2} \right) X$$

c) Intercambiando  $X$  y  $Y$  o bien  $x$  y  $y$ , se puede demostrar como en el inciso a) que

$$x = \left( \frac{\sum xy}{\sum y^2} \right) y$$

d) De acuerdo con el inciso a), la recta de mínimos cuadrados es

$$y = \left( \frac{\sum xy}{\sum x^2} \right) x \quad (39)$$

De acuerdo con el inciso c), la recta de mínimos cuadrados es

$$x = \left( \frac{\sum xy}{\sum y^2} \right) y$$

o bien  $y = \left( \frac{\sum y^2}{\sum xy} \right) x \quad (40)$

Como en general  $\frac{\sum xy}{\sum x^2} \neq \frac{\sum y^2}{\sum xy}$

en general las rectas de mínimos cuadrados (39) y (40) son diferentes. Sin embargo, obsérvese que estas rectas se intersecan en  $x = 0$  y  $y = 0$  [es decir, en el punto  $(\bar{X}, \bar{Y})$ ].

**13.16** Si  $X' = X + A$  y  $Y' = Y + B$ , donde  $A$  y  $B$  son constantes cualesquiera, probar que

$$a_1 = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{N \sum X'Y' - (\sum X')(\sum Y')}{N \sum X'^2 - (\sum X')^2} = a'_1$$

### SOLUCIÓN

$$\begin{aligned} x' &= X' - \bar{X}' = (X + A) - (\bar{X} + A) = X - \bar{X} = x \\ y' &= Y' - \bar{Y}' = (Y + B) - (\bar{Y} + B) = Y - \bar{Y} = y \end{aligned}$$

Entonces

$$\frac{\sum xy}{\sum x^2} = \frac{\sum x'y'}{\sum x'^2}$$

y el resultado es consecuencia del problema 13.15. Un resultado similar es válido para  $b_1$ .

Este resultado es útil, pues permite simplificar los cálculos para obtener la recta de regresión sustyendo a las variables  $X$  y  $Y$  constantes adecuadas (ver el segundo método del problema 13.17).

*Nota:* Este resultado no es válido si  $X' = c_1X + A$  y  $Y' = c_2Y + B$ , a menos que  $c_1 = c_2$ .

**13.17** Ajustar una recta de mínimos cuadrados a los datos del problema 13.10 empleando: a)  $X$  como la variable independiente y b)  $X$  como variable dependiente.

### SOLUCIÓN

#### Primer método

a) De acuerdo con el problema 13.15a), la recta buscada es

$$y = \left( \frac{\sum xy}{\sum x^2} \right) x$$

donde  $x = X - \bar{X}$  y  $y = Y - \bar{Y}$ . Los cálculos de las sumas se pueden organizar como se muestra en la tabla 13.7. De acuerdo con las dos primeras columnas  $\bar{X} = 802/12 = 66.8$  y  $\bar{Y} = 1850/12 = 154.2$ . La última columna se incluyó para emplearla en el inciso b).

Tabla 13.7

| Estatura $X$     | Peso $Y$          | $x = X - \bar{X}$ | $y = Y - \bar{Y}$ | $xy$               | $x^2$               | $y^2$                |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| 70               | 155               | 3.2               | 0.8               | 2.56               | 10.24               | 0.64                 |
| 63               | 150               | -3.8              | -4.2              | 15.96              | 14.44               | 17.64                |
| 72               | 180               | 5.2               | 25.8              | 134.16             | 27.04               | 665.64               |
| 60               | 135               | -6.8              | -19.2             | 130.56             | 46.24               | 368.64               |
| 66               | 156               | -0.8              | 1.8               | -1.44              | 0.64                | 3.24                 |
| 70               | 168               | 3.2               | 13.8              | 44.16              | 10.24               | 190.44               |
| 74               | 178               | 7.2               | 23.8              | 171.36             | 51.84               | 566.44               |
| 65               | 160               | -1.8              | 5.8               | -10.44             | 3.24                | 33.64                |
| 62               | 132               | -4.8              | -22.2             | 106.56             | 23.04               | 492.84               |
| 67               | 145               | 0.2               | -9.2              | -1.84              | 0.04                | 84.64                |
| 65               | 139               | -1.8              | -15.2             | 27.36              | 3.24                | 231.04               |
| 68               | 152               | 1.2               | -2.2              | -2.64              | 1.44                | 4.84                 |
| $\sum X = 802$   | $\sum Y = 1850$   |                   |                   | $\sum xy = 616.32$ | $\sum x^2 = 191.68$ | $\sum y^2 = 2659.68$ |
| $\bar{X} = 66.8$ | $\bar{Y} = 154.2$ |                   |                   |                    |                     |                      |

La recta de mínimos cuadrados buscada es

$$y = \left( \frac{\sum xy}{\sum x^2} \right) x = \frac{616.32}{191.68} x = 3.22x$$

o bien  $Y - 154.2 = 3.22(X - 66.8)$ , lo que puede escribirse como  $Y = 3.22X - 60.9$ . A esta ecuación se le conoce como la *recta de regresión de  $Y$  sobre  $X$*  y sirve para estimar valores de  $Y$  a partir de valores dados de  $X$ .

b) Si  $X$  es la variable dependiente, la recta buscada es

$$x = \left( \frac{\sum xy}{\sum y^2} \right) y = \frac{616.32}{2659.68} y = 0.232y$$

la cual se puede escribir como  $X - 66.8 = 0.232(Y - 154.2)$ , o bien  $X = 31.0 + 0.232Y$ . A esta ecuación se le conoce como la *recta de regresión de  $X$  sobre  $Y$*  y se utiliza para estimar  $X$  a partir de valores dados de  $Y$ .

Obsérvese que, si se desea, también se puede emplear el método del problema 13.11.

#### Segundo método

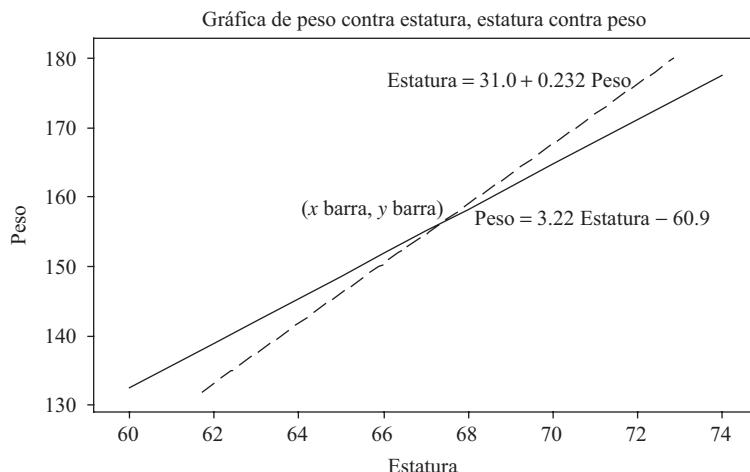
Empleando la fórmula del problema 13.16, de  $X$  y  $Y$  también se pueden sustraer cantidades adecuadas. Se sustraerá 65 a  $X$  y 150 a  $Y$ . Los cálculos se pueden organizar como en la tabla 13.7.

$$a_1 = \frac{N \sum X'Y' - (\sum X')(\sum Y')}{N \sum X'^2 - (\sum X')^2} = \frac{(12)(708) - (22)(50)}{(12)(232) - (22)^2} = 3.22$$

$$b_1 = \frac{N \sum X'Y' - (\sum Y')(\sum X')}{N \sum Y'^2 - (\sum Y')^2} = \frac{(12)(708) - (50)(22)}{(12)(2868) - (50)^2} = 0.232$$

Como  $\bar{X} = 65 + 22/12 = 66.8$  y  $\bar{Y} = 150 + 50/12 = 154.2$ , las ecuaciones de regresión son  $Y - 154.2 = 3.22(X - 66.8)$  y  $X - 66.8 = 0.232(Y - 154.2)$ ; es decir,  $Y = 3.22X - 60.9$  y  $X = 0.232Y + 31.0$ , en coincidencia con el primer método.

- 13.18 Resolver el problema 13.17 usando MINITAB. En un mismo conjunto de ejes, trazar la recta de regresión de pesos contra estaturas y la recta de regresión de estaturas contra pesos. Mostrar que el punto  $(\bar{X}, \bar{Y})$  satisface ambas ecuaciones. Estas rectas se intersecan en  $(\bar{X}, \bar{Y})$ .

**SOLUCIÓN**

**Figura 13-12** Tanto la recta de regresión de estatura contra peso como la recta de regresión del peso contra estatura pasan a través del punto ( $x$  barra,  $y$  barra).

$(\bar{X}, \bar{Y})$  es lo mismo que ( $x$  barra,  $y$  barra) y es igual a (66.83, 154.17). Obsérvese que peso =  $3.22(66.83) - 60.9 = 154.17$  y estatura =  $31.0 + 0.232(154.17) = 66.83$ . Por lo tanto, ambas rectas pasan a través de ( $x$  barra,  $y$  barra).

**Tabla 13.8**

| $X'$           | $Y'$ | $X'^2$         | $X'Y'$            | $Y'^2$             |
|----------------|------|----------------|-------------------|--------------------|
| 5              | 5    | 25             | 25                | 25                 |
| -2             | 0    | 4              | 0                 | 0                  |
| 7              | 30   | 49             | 210               | 900                |
| -5             | -15  | 25             | 75                | 225                |
| 1              | 6    | 1              | 6                 | 36                 |
| 5              | 18   | 25             | 90                | 324                |
| 9              | 28   | 81             | 252               | 784                |
| 0              | 10   | 0              | 0                 | 100                |
| -3             | -18  | 9              | 54                | 324                |
| 2              | -5   | 4              | -10               | 25                 |
| 0              | -11  | 0              | 0                 | 121                |
| 3              | 2    | 9              | 6                 | 4                  |
| $\sum X' = 22$ |      | $\sum Y' = 50$ | $\sum X'^2 = 232$ | $\sum X'Y' = 708$  |
|                |      |                |                   | $\sum Y'^2 = 2868$ |

**APLICACIONES PARA SERIES DE TIEMPO**

- 13.19** En la tabla 13.9 se presentan, en millones de dólares, las exportaciones agrícolas de Estados Unidos. Usar MINITAB para hacer lo siguiente:

**Tabla 13.9**

| Año            | 2000   | 2001   | 2002   | 2003   | 2004   | 2005   |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Valor total    | 51 246 | 53 659 | 53 115 | 59 364 | 61 383 | 62 958 |
| Código del año | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |

Fuente: The 2007 Statistical Abstract.

- Graficar los datos y mostrar la recta de regresión de mínimos cuadrados.
- Encontrar y graficar la recta de tendencia de los datos.
- Dar los *valores ajustados* y los *residuales* empleando los códigos de los años.
- Estimar el valor de las exportaciones agrícolas en 2006.

### SOLUCIÓN

- En la figura 13-13a) se muestran los datos y la recta de regresión. La gráfica que se muestra en la figura 13-13a) se obtiene empleando la secuencia **Stat** → **Regresión** → **Fitted line plot**.

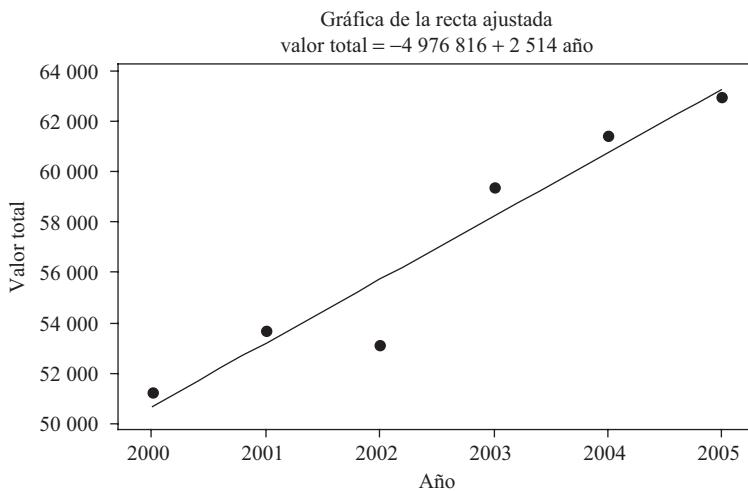


Figura 13-13 a) Recta de regresión de las exportaciones agrícolas de Estados Unidos dadas en millones de dólares.

- La gráfica que se muestra en la figura 13.13b) se obtiene empleando la secuencia **Stat** → **Time series** → **Trend Análisis**. Ésta es una manera diferente de ver los mismos datos. Tal vez sea un poco más fácil emplear los números índice (códigos de los años) en vez de los años.

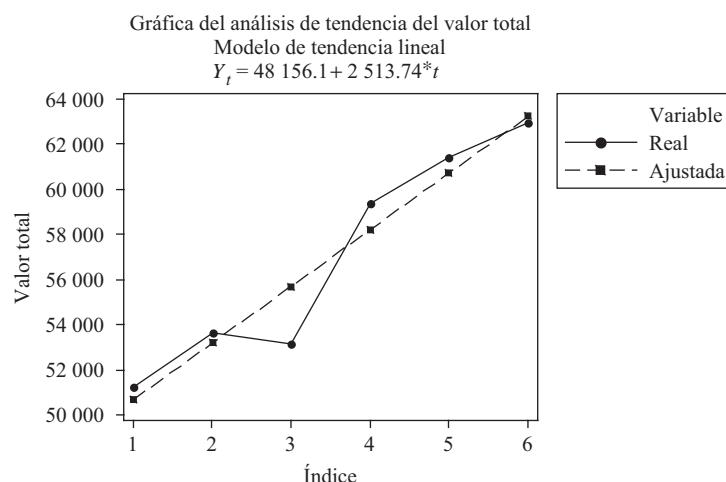


Figura 13-13 b) Recta de tendencia de las exportaciones agrícolas de Estados Unidos, dadas en millones de dólares.

- c) En la tabla 13.10 se dan los valores ajustados y los residuales de los datos que se presentan en la tabla 13.9; se emplean años codificados.

Tabla 13.10

| Año codificado | Valor total | Valor ajustado | Residual  |
|----------------|-------------|----------------|-----------|
| 1              | 51 246      | 50 669.8       | 576.19    |
| 2              | 53 659      | 53 183.6       | 475.45    |
| 3              | 53 115      | 55 697.3       | -2 582.30 |
| 4              | 59 364      | 58 211.0       | 1 152.96  |
| 5              | 61 383      | 60 724.8       | 658.22    |
| 6              | 62 958      | 63 238.5       | -280.52   |

- d) Empleando el año codificado, el valor estimado es  $Y_t = 48 156.1 + 2 513.74(7) = 65 752.3$ .

- 13.20** En la tabla 13.11 se presenta el poder de compra del dólar, medido a través de los precios al consumidor, de acuerdo con lo informado por la Oficina de Estadísticas Laborales de Estados Unidos.

Tabla 13.11

| Año                   | 2000  | 2001  | 2002  | 2003  | 2004  | 2005  |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Precios al consumidor | 0.581 | 0.565 | 0.556 | 0.544 | 0.530 | 0.512 |

Fuente: U. S. Bureau of Labor Statistics, Survey of Current Business.

- a) Graficar los datos y obtener la recta de tendencia usando MINITAB.
- b) Encontrar, a mano, la ecuación de la línea de tendencia.
- c) Estimar el precio al consumidor del 2008 suponiendo que la tendencia continúa tres años más.

### SOLUCIÓN

- a) En la figura 13-14, la línea continua es la gráfica de los datos de la tabla 13.11 y la línea punteada es la gráfica de la recta de mínimos cuadrados.

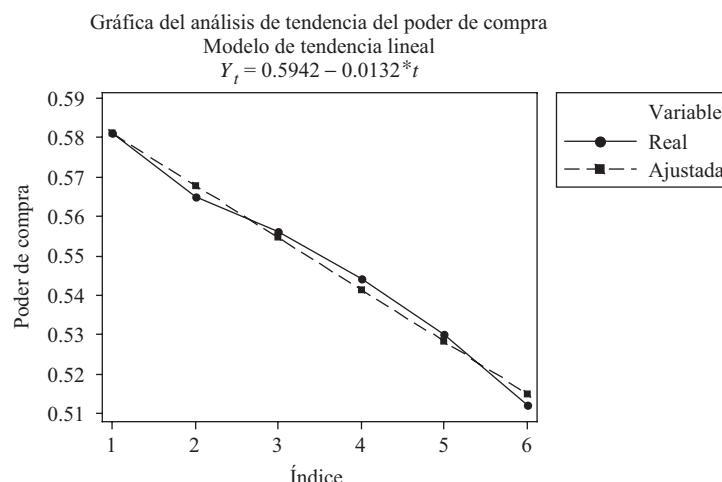


Figura 13-14 Línea de tendencia del poder de compra.

- b) En la tabla 13.12 se presentan los cálculos para hallar, a mano, la línea de tendencia. La ecuación es

$$y = \frac{\sum xy}{\sum x^2} x$$

donde  $x = X - \bar{X}$  y  $y = Y - \bar{Y}$ ; por lo que esta ecuación se puede escribir como  $Y - 0.548 = -0.0132(X - 3.5)$  o  $Y = -0.0132X + 0.5942$ . Como se ilustra con este problema, el trabajo que se ahorra empleando algún software para estadística es enorme.

Tabla 13.12

| Año  | X               | Y                  | $x = X - \bar{X}$ | $y = Y - \bar{Y}$ | $x^2$        | $xy$        |
|------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------|-------------|
| 2000 | 1               | 0.581              | -2.5              | 0.033             | 6.25         | -0.0825     |
| 2001 | 2               | 0.565              | -1.5              | 0.017             | 2.25         | -0.0255     |
| 2002 | 3               | 0.556              | -0.5              | 0.008             | 0.25         | -0.004      |
| 2003 | 4               | 0.544              | 0.5               | -0.004            | 0.25         | -0.002      |
| 2004 | 5               | 0.530              | 1.5               | -0.018            | 2.25         | -0.027      |
| 2005 | 6               | 0.512              | 2.5               | -0.036            | 6.25         | -0.09       |
|      | $\Sigma X = 21$ | $\Sigma Y = 3.288$ |                   |                   | $\Sigma x^2$ | $\Sigma xy$ |
|      | $\bar{X} = 3.5$ | $\bar{Y} = 0.548$  |                   |                   | 17.5         | -0.231      |

- c) El precio al consumidor estimado del 2008 se obtiene sustituyendo en la ecuación de la línea tendencia  $X = 9$ . El precio al consumidor estimado es  $0.5942 - 0.0132(9) = 0.475$ .

## ECUACIONES NO LINEALES REDUCIBLES A LA FORMA LINEAL

- 13.21** En la tabla 13.13 se dan los valores experimentales de la presión  $P$  de una masa dada de gas correspondientes a diversos valores del volumen  $V$ . De acuerdo con los principios de la termodinámica, entre estas variables existe una relación de la fórmula  $PV^\gamma = C$ , donde  $\gamma$  y  $C$  son constantes.

- a) Encontrar los valores de  $\gamma$  y de  $C$ .  
b) Escribir la ecuación que relaciona  $P$  y  $V$ .

Tabla 13.13

|   |      |      |      |      |       |       |
|---|------|------|------|------|-------|-------|
| Volumen $V$ en pulgadas cúbicas ( $\text{in}^3$ )               | 54.3 | 61.8 | 72.4 | 88.7 | 118.6 | 194.0 |
| Presión $P$ en libras por pulgada cuadrada ( $\text{lb/in}^2$ ) | 61.2 | 49.2 | 37.6 | 28.4 | 19.2  | 10.1  |

- c) Estimar  $P$  para  $V = 100.0$  ( $\text{lb/in}^2$ ).

## SOLUCIÓN

Como  $PV^\gamma = C$ , se tiene

$$\log P + \gamma \log V = \log C \quad \text{o bien} \quad \log P = \log C - \gamma \log V$$

Haciendo  $\log V = X$  y  $\log P = Y$ , la última ecuación puede escribirse como

$$Y = a_0 + a_1 X \tag{41}$$

donde  $a_0 = \log C$  y  $a_1 = -\gamma$ .

En la tabla 13.14 se dan los valores de  $X = \log V$  y de  $Y = \log P$ , correspondientes a los valores de  $V$  y  $P$  dados en la tabla 13.13, y se indican también los cálculos para obtener la recta (41) de mínimos cuadrados. Las ecuaciones normales correspondientes a la recta (41) de mínimos cuadrados son

$$\sum Y = a_0 N + a_1 \sum X \quad \text{y} \quad \sum XY = a_0 \sum X + a_1 \sum X^2$$

de donde

$$a_0 = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} = 4.20 \quad a_1 = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} = -1.40$$

Por lo tanto,  $Y = 4.20 - 1.40X$ .

- a) Como  $a_0 = 4.20 = \log C$  y  $a_1 = -1.40 = -\gamma$ ,  $C = 1.60 \times 10^4$  y  $\gamma = 1.40$ .
- b) La ecuación que se busca en términos de  $P$  y  $V$  se puede escribir como  $PV^{1.40} = 16\ 000$ .
- c) Para  $V = 100$ ,  $X = \log V = 2$  y  $Y = \log P = 4.20 - 1.40(2) = 1.40$ . Entonces  $P = \text{antilog } 1.40 = 25.1 \text{ lb/in}^2$ .

**Tabla 13.14**

| $X = \log V$       | $Y = \log P$      | $X^2$                | $XY$                |
|--------------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| 1.7348             | 1.7868            | 3.0095               | 3.0997              |
| 1.7910             | 1.6946            | 3.2077               | 3.0350              |
| 1.8597             | 1.5752            | 3.4585               | 2.9294              |
| 1.9479             | 1.4533            | 3.7943               | 2.8309              |
| 2.0741             | 1.2833            | 4.3019               | 2.6617              |
| 2.2878             | 1.0043            | 5.2340               | 2.2976              |
| $\sum X = 11.6953$ | $\sum Y = 8.7975$ | $\sum X^2 = 23.0059$ | $\sum XY = 16.8543$ |

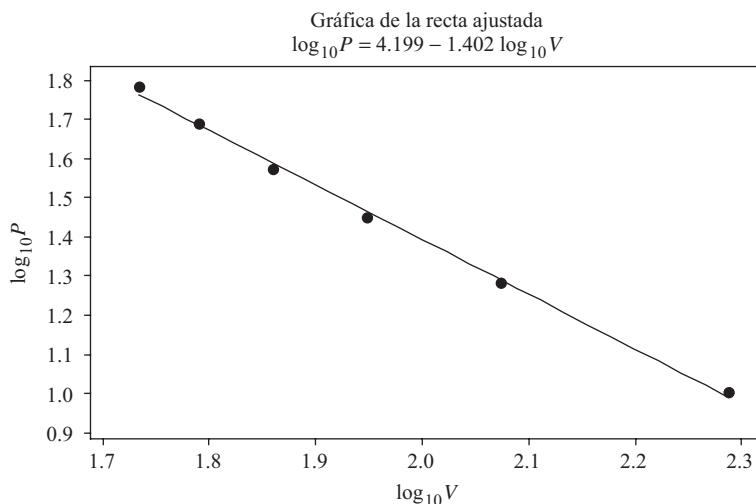
### 13.22 Usar MINITAB para resolver el problema 13.21.

#### SOLUCIÓN

Las transformaciones  $X = \log_{10}(V)$  y  $Y = \log_{10}(P)$  convierten el problema en un problema de ajuste lineal. Para encontrar los logaritmos comunes del volumen y de la presión se emplea la calculadora de MINITAB. En las columnas C1 a C4 de la hoja de cálculo de MINITAB se tendrá:

| $V$   | $P$  | $\text{Log}10V$ | $\text{Log}10P$ |
|-------|------|-----------------|-----------------|
| 54.3  | 61.2 | 1.73480         | 1.78675         |
| 61.8  | 49.2 | 1.79099         | 1.69197         |
| 72.4  | 37.6 | 1.85974         | 1.57519         |
| 88.7  | 28.4 | 1.94792         | 1.45332         |
| 118.6 | 19.2 | 2.07408         | 1.28330         |
| 194.0 | 10.1 | 2.28780         | 1.00432         |

El ajuste por mínimos cuadrados da:  $\text{log}_{10}(P) = 4.199 - 1.402 \text{ log}_{10}(V)$ . Ver la figura 13-15.  $a_0 = \log C$  y  $a_1 = -\gamma$ . Sacando antilogaritmos se obtiene  $C = 10^{a_0}$  y  $\gamma = -a_1$  o  $C = 15\ 812$  y  $\gamma = 1.402$ . La ecuación no lineal es  $PV^{1.402} = 15\ 812$ .

**Figura 13-15 Reducción de una ecuación no lineal a la forma lineal.**

- 13.23** En la tabla 13.15 se da, en millones, la población de Estados Unidos desde 1960 hasta 2005. A estos datos, ajustar una recta y una parábola y analizar los dos ajustes. Usar ambos modelos para predecir la población que tendrá Estados Unidos en 2010.

**Tabla 13.15**

| Año       | 1960 | 1965 | 1970 | 1975 | 1980 | 1985 | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Población | 181  | 194  | 205  | 216  | 228  | 238  | 250  | 267  | 282  | 297  |

Fuente: U.S. Bureau of Census.

### SOLUCIÓN

A continuación se presenta parte de los resultados que da MINITAB para la recta de mínimos cuadrados y para la parábola de mínimos cuadrados.

| Año  | Población | $x$ | $x^2$ |
|------|-----------|-----|-------|
| 1960 | 181       | 1   | 1     |
| 1965 | 194       | 2   | 4     |
| 1970 | 205       | 3   | 9     |
| 1975 | 216       | 4   | 16    |
| 1980 | 228       | 5   | 25    |
| 1985 | 238       | 6   | 36    |
| 1990 | 250       | 7   | 49    |
| 1995 | 267       | 8   | 64    |
| 2000 | 282       | 9   | 81    |
| 2005 | 297       | 10  | 100   |

El modelo para la recta es el siguiente:

La ecuación de regresión es

$$\text{Población} = 166 + 12.6 x$$

El modelo cuadrático es el siguiente:

La ecuación de regresión es

$$\text{Población} = 174 + 9.3 x - 0.326 x^2$$

En la tabla 13.16 se dan los valores ajustados y los residuales del ajuste a los datos mediante la recta.

Tabla 13.16

| Año  | Población | Valor ajustado | Residual |
|------|-----------|----------------|----------|
| 1960 | 181       | 179.018        | 1.98182  |
| 1965 | 194       | 191.636        | 2.36364  |
| 1970 | 205       | 204.255        | 0.74545  |
| 1975 | 216       | 216.873        | -0.87273 |
| 1980 | 228       | 229.491        | -1.49091 |
| 1985 | 238       | 242.109        | -4.10909 |
| 1990 | 250       | 254.727        | -4.72727 |
| 1995 | 267       | 267.345        | -0.34545 |
| 2000 | 282       | 279.964        | 2.03636  |
| 2005 | 297       | 292.582        | 4.41818  |

En la tabla 13.17 se dan los valores ajustados y los residuales correspondientes al ajuste parabólico a los datos. La suma de los cuadrados de los residuales en el caso de la recta es 76.073 y la suma de los cuadrados de los residuales en el caso de la parábola es 20.042. Parece que, en general, la parábola se ajusta mejor que la recta a estos datos.

Tabla 13.17

| Año  | Población | Valor ajustado | Residual |
|------|-----------|----------------|----------|
| 1960 | 181       | 182.927        | -1.92727 |
| 1965 | 194       | 192.939        | 1.06061  |
| 1970 | 205       | 203.603        | 1.39697  |
| 1975 | 216       | 214.918        | 1.08182  |
| 1980 | 228       | 226.885        | 1.11515  |
| 1985 | 238       | 239.503        | -1.50303 |
| 1990 | 250       | 252.773        | -2.77273 |
| 1995 | 267       | 266.694        | 0.30606  |
| 2000 | 282       | 281.267        | 0.73333  |
| 2005 | 297       | 296.491        | 0.50909  |

Para predecir cuál será la población en el año 2010, obsérvese que el código para 2010 es 11. El valor que se obtiene con el modelo de la recta es población =  $166 + 12.6x = 166 + 138.6 = 304.6$  millones y con el modelo de la parábola es población =  $174 + 9.03x + 0.326x^2 = 174 + 99.33 + 39.446 = 312.776$ .

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### LÍNEAS RECTAS

- 13.24** Si  $3X + 2Y = 18$ , encontrar: *a)* el valor de  $X$  para  $Y = 3$ , *b)* el valor de  $Y$  para  $X = 2$ , *c)* el valor de  $X$  para  $Y = -5$ , *d)* el valor de  $Y$  para  $X = -1$ , *e)* la intersección con el eje  $X$ , *f)* la intersección con el eje  $Y$ .
- 13.25** En un mismo conjunto de ejes, trazar la gráfica de las ecuaciones: *a)*  $Y = 3X - 5$  y *b)*  $X + 2Y = 4$ . ¿En qué punto se intersectan?
- 13.26** *a)* Encontrar la ecuación de la recta que pasa por los puntos  $(3, -2)$  y  $(-1, 6)$ .  
*b)* Determinar las intersecciones de la recta del inciso *a)* con el eje  $X$  y con el eje  $Y$ .  
*c)* Encontrar el valor de  $Y$  que corresponde a  $X = 3$  y a  $X = 5$ .  
*d)* A partir de la gráfica, verificar sus respuestas a los incisos *a), b) y c)*.
- 13.27** Encontrar la ecuación de la recta cuya pendiente es  $\frac{2}{3}$  y cuya intersección con el eje  $Y$  es  $-3$ .
- 13.28** *a)* Encontrar la pendiente y la intersección con el eje  $Y$  de la recta cuya ecuación es  $3X - 5Y = 20$ .  
*b)* ¿Cuál es la ecuación de la recta paralela a la recta del inciso *a)* y qué pasa por el punto  $(2, -1)$ ?
- 13.29** Encontrar: *a)* la pendiente, *b)* la intersección con el eje  $Y$  y *c)* la ecuación de la recta que pasa por los puntos  $(5, 4)$  y  $(2, 8)$ .
- 13.30** Encontrar la ecuación de la recta cuyas intersecciones con los ejes  $X$  y  $Y$  son  $3$  y  $-5$ , respectivamente.

- 13.31** La temperatura de  $100$  grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) corresponde a  $212$  grados Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ), en tanto que la temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$  corresponde a  $32^{\circ}\text{F}$ . Suponiendo que existe una relación lineal entre temperaturas Celsius y temperaturas Fahrenheit, encontrar: *a)* la ecuación que relaciona temperaturas Celsius y temperaturas Fahrenheit, *b)* la temperatura Fahrenheit que corresponde a  $80^{\circ}\text{C}$  y *c)* la temperatura Celsius que corresponde  $68^{\circ}\text{F}$ .

### LA RECTA DE MÍNIMOS CUADRADOS

- 13.32** Ajustar una recta de mínimos cuadrados a los datos de la tabla 13.18 usando: *a)*  $X$  como la variable independiente y *b)*  $X$  como la variable dependiente. Graficar los datos de estas rectas de mínimos cuadrados en un mismo eje de coordenadas.

**Tabla 13.18**

|     |   |   |   |   |   |    |
|-----|---|---|---|---|---|----|
| $X$ | 3 | 5 | 6 | 8 | 9 | 11 |
| $Y$ | 2 | 3 | 4 | 6 | 5 | 8  |

- 13.33** Dados los datos del problema 13.32, hallar: *a)* el valor de  $Y$  para  $X = 12$  y *b)* el valor de  $X$  para  $Y = 7$ .

- 13.34** *a)* Empleando el método a mano, obtener una ecuación de la recta que se ajuste a los datos del problema 13.32.  
*b)* Empleando el resultado del inciso *a)*, resolver el problema 13.33.

- 13.35** En la tabla 13.19 se muestran las calificaciones finales de álgebra y de física de diez estudiantes, tomados en forma aleatoria de un grupo grande.
- a)* Graficar los datos.  
*b)* Encontrar la recta de mínimos cuadrados que se ajusta a los datos, usando  $X$  como la variable independiente.

- c) Encontrar la recta de mínimos cuadrados que se ajusta a los datos, usando  $Y$  como la variable independiente.
- d) Si la calificación de un estudiante en álgebra es 75, ¿cuál es la calificación que se espera que obtenga en física?
- e) Si la calificación de un estudiante en física es 95, ¿cuál es la calificación que se espera que obtenga en álgebra?

**Tabla 13.19**

|                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Álgebra ( $X$ ) | 75 | 80 | 93 | 65 | 87 | 71 | 98 | 68 | 84 | 77 |
| Física ( $Y$ )  | 82 | 78 | 86 | 72 | 91 | 80 | 95 | 72 | 89 | 74 |

- 13.36** En la tabla 13.20 se muestra la tasa de nacimiento por cada mil personas desde 1998 hasta 2004.

- a) Graficar estos datos.
- b) Hallar la recta de mínimos cuadrados que se ajusta a estos datos. Asignar a los años 1998 a 2004 los números 1 a 7.
- c) Calcular los valores de tendencia (valores ajustados) y los residuales.
- d) Indicar cuál será la tasa de nacimiento en 2010, suponiendo que la tendencia actual continúa.

**Tabla 13.20**

|                                    |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Año                                | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
| Tasa de nacimientos por cada 1 000 | 14.3 | 14.2 | 14.4 | 14.1 | 13.9 | 14.1 | 14.0 |

Fuente: U.S. National Center for Health Statistics, Vital Statistics of the United States, annual; Nacional Vital Statistics Reports y datos inéditos.

- 13.37** En la tabla 13.21 se presenta, en miles, la población de Estados Unidos de 85 o más años, desde 1999 hasta 2005.

- a) Graficar estos datos.
- b) Encontrar la recta de mínimos cuadrados que se ajusta a estos datos. Asignar a los años 1999 a 2005 los números 1 a 7.
- c) Calcular los valores de tendencia (valores ajustados) y los residuales.
- d) Suponiendo que la tendencia actual continúe, indicar cuál será el número de personas de 85 años o más en el 2010.

**Tabla 13.21**

|          |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Año      | 1999  | 2000  | 2001  | 2002  | 2003  | 2004  | 2005  |
| 85 o más | 4 154 | 4 240 | 4 418 | 4 547 | 4 716 | 4 867 | 5 096 |

Fuente: U.S. Bureau of Census.

## CURVAS DE MÍNIMOS CUADRADOS

- 13.38** Ajustar una parábola de mínimos cuadrados,  $Y = a_0 + a_1X + a_2X^2$ , a los datos de la tabla 13.22.

**Tabla 13.22**

|     |     |     |     |     |     |      |      |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| $X$ | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5    | 6    |
| $Y$ | 2.4 | 2.1 | 3.2 | 5.6 | 9.3 | 14.6 | 21.9 |

- 13.39** El tiempo requerido para llevar un automóvil al alto total a partir de que se percibe un peligro es el tiempo de reacción (el tiempo entre el reconocimiento del peligro y la aplicación del freno) más el tiempo de frenado (el tiempo necesario para que el automóvil se detenga después de la aplicación del freno). En la tabla 13.23 se da la distancia de frenado  $D$  (en pies, ft) de un automóvil que va a una velocidad  $V$  (en millas por hora, mi/h).

- Graficar  $D$  contra  $V$ .
- Ajustar a estos datos una parábola de mínimos cuadrados de la forma  $D = a_0 + a_1V + a_2V^2$ .
- Estimar  $D$  para  $V = 45$  mi/h y  $80$  mi/h.

**Tabla 13.23**

|                               |    |    |     |     |     |     |
|-------------------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Velocidad $V$ (mi/h)          | 20 | 30 | 40  | 50  | 60  | 70  |
| Distancia de frenado $D$ (ft) | 54 | 90 | 138 | 206 | 292 | 396 |

- 13.40** En la tabla 13.24 se presenta, en millones, la población de hombres y de mujeres en Estados Unidos, desde 1940 hasta 2005. Se presentan también los números dados como códigos a los años y la diferencia de hombres menos mujeres.

- Graficar los datos y la recta de mejor ajuste por mínimos cuadrados.
- Graficar los datos y el mejor ajuste cuadrático por mínimos cuadrados.
- Graficar los datos y el mejor ajuste cúbico por mínimos cuadrados.
- Con cada uno de los tres modelos, dar el valor ajustado y los residuales, así como la suma de los cuadrados de los residuales.
- Emplear cada uno de los tres modelos para predecir la población que habrá en el año 2010.

**Tabla 13.24**

| Año        | 1940 | 1950 | 1960 | 1970  | 1980  | 1990  | 2000  | 2005  |
|------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Código     | 0    | 1    | 2    | 3     | 4     | 5     | 6     | 6.5   |
| Hombres    | 66.1 | 75.2 | 88.3 | 98.9  | 110.1 | 121.2 | 138.1 | 146.0 |
| Mujeres    | 65.6 | 76.1 | 91.0 | 104.3 | 116.5 | 127.5 | 143.4 | 150.4 |
| Diferencia | 0.5  | -0.9 | -2.7 | -5.4  | -6.4  | -6.3  | -5.3  | -4.4  |

Fuente: U.S. Bureau of Census.

- 13.41** Resolver el problema 13.40 empleando, en lugar de las diferencias, la proporción entre mujeres y hombres.

- 13.42** Resolver el problema 13.40 ajustando una parábola de mínimos cuadrados a las diferencias.

- 13.43** En la tabla 13.25 se presenta la cuenta bacteriana  $Y$ , por unidad de volumen en un cultivo, después de  $X$  horas.

**Tabla 13.25**

|   |    |    |    |    |     |     |     |
|---|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| Número de horas ( $X$ )                         | 0  | 1  | 2  | 3  | 4   | 5   | 6   |
| Cuenta bacteriana por unidad de volumen ( $Y$ ) | 32 | 47 | 65 | 92 | 132 | 190 | 275 |

- Graficar los datos en papel semilogarítmico usando la escala logarítmica para  $Y$  y la escala aritmética para  $X$ .
- Ajustar a los datos una curva de mínimos cuadrados de la forma  $Y = ab^x$  y explicar por qué esta ecuación dará buenos resultados.
- Comparar los valores de  $Y$  que se obtienen con esta ecuación con los valores reales.
- Estimar el valor de  $Y$  para  $X = 7$ .

- 13.44** En el problema 13.43 mostrar cómo usar una gráfica en papel semilogarítmico para obtener la ecuación buscada sin emplear el método de mínimos cuadrados.

# TEORÍA DE LA CORRELACIÓN

# 14

## CORRELACIÓN Y REGRESIÓN

En el capítulo 13 se consideró el problema de la *regresión*, o *estimación* de una variable (la variable dependiente) a partir de una o más variables (las variables independientes). En este capítulo se hará referencia a un problema relacionado con el de la *correlación* o grado de relación entre las variables, en el que se busca determinar *qué tan bien* una ecuación lineal, o de otro tipo, describe o explica la relación entre las variables.

Si todos los valores de las variables satisfacen con exactitud una ecuación, se dice que las variables están en *perfecta correlación* o que hay una *correlación perfecta* entre ellas. Así, las circunferencias  $C$  y los radios  $r$  de todos los círculos están perfectamente correlacionados, ya que  $C = 2\pi r$ . Cuando se lanzan 100 veces dos dados en forma simultánea entre los puntos que aparecen en cada uno de ellos no hay relación alguna (a menos que estén cargados); es decir, no están *correlacionados*. Sin embargo, variables como el peso y la estatura de una persona muestran *cierta correlación*.

Cuando intervienen sólo dos variables se habla de *correlación simple* y de *regresión simple*. Cuando intervienen más de dos variables, se habla de *correlación múltiple* y de *regresión múltiple*. En este capítulo sólo se considerará la correlación simple. En el capítulo 15 se consideran la correlación y la regresión múltiples.

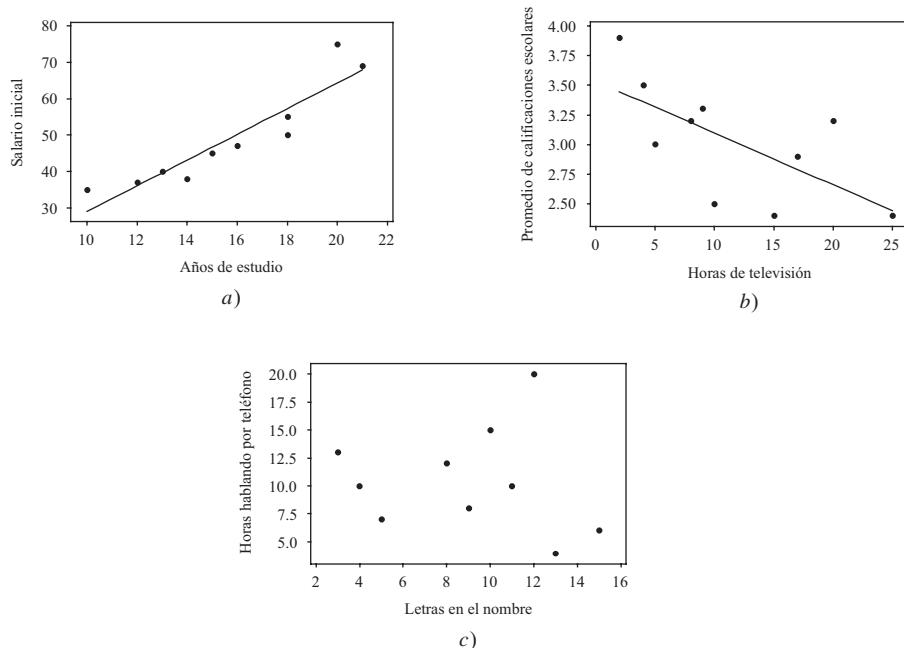
## CORRELACIÓN LINEAL

Si  $X$  y  $Y$  son las dos variables en consideración, un *diagrama de dispersión* sirve para mostrar la localización de los puntos  $(X, Y)$  en un sistema de coordenadas rectangulares. Si en este diagrama de dispersión todos los puntos parecen encontrarse cerca de una línea recta, como en las figuras 14-1a) y 14-1b), a la correlación se le llama *lineal*. En estos casos, como se vio en el capítulo 13, una ecuación lineal es lo apropiado con el propósito de regresión (o estimación).

Si  $Y$  tiende a aumentar a medida que  $X$  aumenta, como en la figura 14-1a), se dice que la correlación es una *correlación positiva* o *directa*. Si  $Y$  tiende a disminuir a medida que  $X$  aumenta, como en la figura 14-1b), se dice que es una *correlación negativa* o *inversa*.

Si todos los puntos parecen encontrarse en una curva, esta correspondencia se llama *no lineal*, y según se vio en el capítulo 13, lo apropiado para la regresión es una ecuación no lineal. Es claro que la correlación no lineal puede ser algunas veces positiva y otras veces negativa.

Si no parece haber relación entre las variables, como en la figura 14-1c), se dice que *no hay relación* entre ellas (es decir, están *descorrelacionadas*).



**Figura 14-1 Ejemplos de correlación positiva, correlación negativa y ninguna correlación. a) El salario inicial y los años de estudio se correlacionan en forma positiva; b) el promedio de las calificaciones escolares y las horas que se pasa viendo la televisión se correlacionan negativamente; c) entre la cantidad de horas que se habla por teléfono y el número de letras que tiene el nombre de una persona no hay correlación.**

## MEDIDAS DE LA CORRELACIÓN

Mediante observación directa se puede determinar de manera *cualitativa* que también una recta o una curva describe la relación entre las variables. Por ejemplo, se ve que una línea recta es mucho más útil para describir la relación entre  $X$  y  $Y$  en el caso de los datos de la figura 14-1a) que en el caso de los datos de la figura 14-1b), debido a que en la figura 14-1a) hay menos dispersión con relación a la recta.

Para ocuparse de manera *cuantitativa* del problema de la dispersión de los datos muestrales respecto a una línea o a una curva, es necesario encontrar una medida de la correlación.

## LAS RECTAS DE REGRESIÓN DE MÍNIMOS CUADRADOS

Primero se considerará el problema de qué tan bien una línea recta explica la relación entre dos variables. Para esto, se necesitarán las ecuaciones de las rectas de regresión por mínimos cuadrados obtenidas en el capítulo 13. Como se ha visto, la recta de regresión por mínimos cuadrados de  $Y$  sobre  $X$  es

$$Y = a_0 + a_1 X \quad (I)$$

donde  $a_0$  y  $a_1$  se obtienen de las ecuaciones normales

$$\begin{aligned}\sum Y &= a_0 N + a_1 \sum X \\ \sum XY &= a_0 \sum X + a_1 \sum X^2\end{aligned}\quad (2)$$

que dan

$$\begin{aligned}a_0 &= \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \\ a_1 &= \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}\end{aligned}\quad (3)$$

De igual manera, la recta de regresión de  $X$  sobre  $Y$  es

$$X = b_0 + b_1 Y \quad (4)$$

donde  $b_0$  y  $b_1$  se obtienen de las ecuaciones normales

$$\begin{aligned}\sum X &= b_0 N + b_1 \sum Y \\ \sum XY &= b_0 \sum X + b_1 \sum Y^2\end{aligned}\quad (5)$$

que dan

$$\begin{aligned}b_0 &= \frac{(\sum X)(\sum Y^2) - (\sum Y)(\sum XY)}{N \sum Y^2 - (\sum Y)^2} \\ b_1 &= \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum Y^2 - (\sum Y)^2}\end{aligned}\quad (6)$$

Las ecuaciones (1) y (4) pueden expresarse, respectivamente, como

$$y = \left( \frac{\sum xy}{\sum x^2} \right) x \quad y \quad x = \left( \frac{\sum xy}{\sum y^2} \right) y \quad (7)$$

donde  $x = X - \bar{X}$  y  $y = Y - \bar{Y}$ .

Las ecuaciones de regresión son idénticas si y sólo si todos los puntos del diagrama de dispersión se encuentran en una recta. En tales casos, existe una *correlación lineal perfecta* entre  $X$  y  $Y$ .

## EL ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN

Si  $\hat{Y}_{\text{est}}$  es el valor estimado para  $Y$ , empleando la ecuación (1), para un valor dado de  $X$ , una medida de la dispersión respecto a la recta de regresión de  $Y$  sobre  $X$  es la cantidad

$$s_{Y.X} = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y}_{\text{est}})^2}{N}} \quad (8)$$

a la que se le llama *error estándar de estimación de  $Y$  sobre  $X$* .

Empleando la recta de regresión (4), el error estándar de estimación análogo, de  $X$  sobre  $Y$ , es

$$s_{X.Y} = \sqrt{\frac{\sum (X - X_{\text{est}})^2}{N}} \quad (9)$$

En general,  $s_{Y.X} \neq s_{X.Y}$ .

La ecuación (8) también puede expresarse en la forma

$$s_{Y.X}^2 = \frac{\sum Y^2 - a_0 \sum Y - a_1 \sum XY}{N} \quad (10)$$

que puede ser más apropiada para hacer los cálculos (ver problema 14.3). Para la ecuación (9) existe una expresión similar.

El error estándar de estimación tiene propiedades análogas a la desviación estándar. Por ejemplo, si se trazan rectas paralelas a la recta de regresión de  $Y$  sobre  $X$  a las distancias verticales  $s_{Y.X}$ ,  $2s_{Y.X}$  y  $3s_{Y.X}$ , se hallará, si  $N$  es suficientemente grande, que entre estas rectas se encuentra 68%, 95% y 99.7% de los puntos muestrales, respectivamente.

Así como la desviación estándar modificada, que es

$$\hat{s} = \sqrt{\frac{N}{N-1}} s$$

se emplea para muestras pequeñas, también el error estándar de estimación modificado está dado por

$$\hat{s}_{Y.X} = \sqrt{\frac{N}{N-2}} s_{Y.X}$$

A esto se debe que algunos especialistas en estadística prefieren definir las ecuaciones (8) y (9) empleando  $N - 2$  en el denominador en lugar de  $N$ .

## VARIACIÓN EXPLICADA Y NO EXPLICADA

La *variación total* de  $Y$  se define como  $\sum (Y - \bar{Y})^2$ ; es decir, la suma de los cuadrados de las desviaciones de  $Y$  respecto a la media  $\bar{Y}$ . Como se muestra en el problema 14.7, esta expresión se puede expresar como

$$\sum (Y - \bar{Y})^2 = \sum (Y - Y_{\text{est}})^2 + \sum (Y_{\text{est}} - \bar{Y})^2 \quad (II)$$

En la ecuación (II), al primer término del lado derecho se le llama *variación no explicada*, en tanto que al segundo término se le llama *variación explicada*; se les llama así debido a que las desviaciones  $Y_{\text{est}} - \bar{Y}$  tienen un patrón definido; en cambio, las desviaciones  $Y - Y_{\text{est}}$  son aleatorias o impredecibles. Para la variable  $X$  existe una fórmula similar.

## COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

Al cociente de la variación explicada entre la variación total se le llama *coeficiente de determinación*. Si hay cero variación explicada (es decir, si la variación total es sólo variación no explicada), este cociente es 0. Si hay 0 variación no explicada (es decir, si la variación total es sólo variación explicada), este cociente es 1. En los demás casos, este cociente se encuentra entre 0 y 1; como siempre es no negativo, se denota  $r^2$ . A la cantidad  $r$  se le llama *coeficiente de correlación*; está dado por

$$r = \pm \sqrt{\frac{\text{variación explicada}}{\text{variación total}}} = \pm \sqrt{\frac{\sum (Y_{\text{est}} - \bar{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (12)$$

y varía entre  $-1$  y  $+1$ . Los signos  $+$  y  $-$  se usan para correlación lineal positiva y correlación lineal negativa, respectivamente. Obsérvese que  $r$  es una cantidad adimensional; es decir, no depende de las unidades que se empleen.

Utilizando las ecuaciones (8) y (11) y el hecho de que la desviación estándar de  $Y$  es

$$s_Y = \sqrt{\frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{N}} \quad (13)$$

se encuentra que la ecuación (12) puede expresarse, sin hacer caso del signo, como

$$r = \sqrt{1 - \frac{s_{Y.X}^2}{s_Y^2}} \quad \text{o bien} \quad s_{Y.X} = s_Y \sqrt{1 - r^2} \quad (14)$$

Si se intercambian  $X$  y  $Y$  se obtienen ecuaciones similares.

En el caso de la correlación lineal, la cantidad  $r$  es la misma, ya sea que se considere a  $X$  o a  $Y$  como la variable independiente. Por lo tanto  $r$  es una muy buena medida de la correlación lineal entre dos variables.

## OBSERVACIONES ACERCA DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

Las definiciones del coeficiente de correlación dadas en las ecuaciones (12) y (14) son muy generales y pueden emplearse tanto para relaciones no lineales como para relaciones lineales; la única diferencia es que  $\hat{Y}_{\text{est}}$  se calcula a partir de una ecuación de regresión no lineal y no a partir de una ecuación de regresión lineal, y que los signos  $+$  y  $-$  se omiten. En estos casos la ecuación (8), que define el error estándar de estimación, es perfectamente general. Sin embargo, la ecuación (10) que se emplea únicamente para regresión lineal, debe ser modificada. Si, por ejemplo, la ecuación de estimación es

$$Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \cdots + a_{n-1} X^{n-1} \quad (15)$$

la ecuación (10) se reemplaza por

$$s_{Y.X}^2 = \frac{\sum Y^2 - a_0 \sum Y - a_1 \sum XY - \cdots - a_{n-1} \sum X^{n-1} Y}{N} \quad (16)$$

En este caso, el *error estándar de estimación modificado* (antes visto en este capítulo) es

$$\hat{s}_{Y.X} = \sqrt{\frac{N}{N-n} s_{Y.X}}$$

en donde a la cantidad  $N - n$  se le conoce como *número de grados de libertad*.

Hay que subrayar que en todos los casos, el valor calculado para  $r$  mide el grado de relación respecto al tipo de ecuación que se emplee. Así, si se utiliza una ecuación lineal y con la ecuación (12) o (14) dan un valor de  $r$  cercano a cero, esto significa que entre las variables casi no hay *correlación lineal*. Pero esto no significa que no haya correlación alguna, pues entre estas variables puede haber una fuerte *correlación no lineal*. En otras palabras, el coeficiente de correlación mide la bondad de ajuste entre: 1) la ecuación empleada y 2) los datos. A menos que se especifique otra cosa, el término *coeficiente de correlación* se emplea con el significado de *coeficiente de correlación lineal*.

Hay que hacer notar también que un coeficiente de correlación elevado (es decir, cercano a 1 o a  $-1$ ) no necesariamente indica que haya dependencia directa entre las variables. Así, por ejemplo, puede haber correlación elevada entre la cantidad de libros publicados anualmente y cantidades número de tormentas eléctricas por año. A los ejemplos de este tipo o se le conoce como *correlaciones sin sentido o espurias*.

## FÓRMULA PRODUCTO-MOMENTO PARA EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL

Si se supone que entre dos variables existe una relación lineal, la ecuación (12) se convierte en

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}} \quad (17)$$

donde  $x = X - \bar{X}$  y  $y = Y - \bar{Y}$  (ver el problema 14.10). Esta fórmula, que automáticamente da el signo adecuado de  $r$  se conoce como *fórmula del producto-momento* y permite ver claramente la simetría entre  $X$  y  $Y$ .

Si se escribe

$$s_{XY} = \frac{\sum xy}{N} \quad s_X = \sqrt{\frac{\sum x^2}{N}} \quad s_Y = \sqrt{\frac{\sum y^2}{N}} \quad (18)$$

entonces  $s_X$  y  $s_Y$  se reconocerán como las desviaciones estándar de  $X$  y de  $Y$ , respectivamente, y  $s_X^2$  y  $s_Y^2$  son las varianzas. La nueva cantidad  $s_{XY}$  es la *covarianza* de  $X$  y  $Y$ . En términos de la fórmula (18), la fórmula (17) puede expresarse como

$$r = \frac{s_{XY}}{s_X s_Y} \quad (19)$$

Obsérvese que  $r$  no sólo es independiente de las unidades de  $X$  y de  $Y$ , sino también de la elección del origen.

## FÓRMULAS SIMPLIFICADAS PARA EL CÁLCULO

La fórmula (17) puede expresarse de la siguiente manera equivalente

$$r = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (20)$$

con frecuencia empleada para el cálculo de  $r$ .

Para datos agrupados como los de una *tabla de frecuencias bivariadas* o *distribución de frecuencias bivariadas* (ver problema 14.17), conviene emplear un *método de compilación* como los de capítulos anteriores. En ese caso, la fórmula (20) puede expresarse

$$r = \frac{N \sum fu_X u_Y - (\sum f_X u_X)(\sum f_Y u_Y)}{\sqrt{[N \sum f_X u_X^2 - (\sum f_X u_X)^2][N \sum f_Y u_Y^2 - (\sum f_Y u_Y)^2]}} \quad (21)$$

(ver problema 14.18). Cuando se emplea esta fórmula, para facilitar los cálculos se emplea una *tabla de correlación* (ver problema 14.19).

En el caso de datos agrupados, las fórmulas (18) se pueden expresar como

$$s_{XY} = c_X c_Y \left[ \frac{\sum fu_X u_Y}{N} - \left( \frac{\sum f_X u_X}{N} \right) \left( \frac{\sum f_Y u_Y}{N} \right) \right] \quad (22)$$

$$s_X = c_X \sqrt{\frac{\sum f_X u_X^2}{N} - \left( \frac{\sum f_X u_X}{N} \right)^2} \quad (23)$$

$$s_Y = c_Y \sqrt{\frac{\sum f_Y u_Y^2}{N} - \left( \frac{\sum f_Y u_Y}{N} \right)^2} \quad (24)$$

donde  $c_X$  y  $c_Y$  son las amplitudes de los intervalos de clase (que se suponen constantes) correspondientes a las variables  $X$  y  $Y$ , respectivamente. Obsérvese que las fórmulas (23) y (24) son equivalentes a la fórmula (11) del capítulo 4.

Empleando las fórmulas (22) y (24), la fórmula (19) parece ser equivalente a la fórmula (21).

## RECTAS DE REGRESIÓN Y EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL

La ecuación de la recta de regresión por mínimos cuadrados  $Y = a_0 + a_1X$ , la recta de regresión de  $Y$  sobre  $X$ , puede expresarse como

$$Y - \bar{Y} = \frac{rs_Y}{s_X} (X - \bar{X}) \quad \text{o bien} \quad y = \frac{rs_Y}{s_X} x \quad (25)$$

De igual manera, la recta de regresión de  $X$  sobre  $Y$ ,  $X = b_0 + b_1Y$ , puede expresarse como

$$X - \bar{X} = \frac{rs_X}{s_Y} (Y - \bar{Y}) \quad \text{o bien} \quad x = \frac{rs_X}{s_Y} y \quad (26)$$

Las pendientes de las rectas de regresión (25) y (26) son iguales si y sólo si  $r = \pm 1$ . En esos casos las dos rectas son idénticas y existe una perfecta correlación entre  $X$  y  $Y$ . Si  $r = 0$ , las rectas forman ángulos rectos y no hay correlación lineal entre  $X$  y  $Y$ . Por lo tanto, el coeficiente de correlación lineal mide qué tanto se apartan las dos rectas de regresión.

Obsérvese que si las ecuaciones (25) y (26) se expresan como  $Y = a_0 + a_1X$  y  $X = b_0 + b_1Y$ , respectivamente, entonces  $a_1b_1 = r^2$  (ver problema 14.22).

## CORRELACIÓN DE SERIES DE TIEMPO

Si las variables  $X$  y  $Y$  dependen del tiempo, es posible que entre  $X$  y  $Y$  exista una relación, aunque esta relación no sea, necesariamente, de dependencia directa y produzca una “correlación sin sentido”. El coeficiente de correlación se obtiene considerando los pares de valores  $(X, Y)$  correspondientes a los distintos tiempos y procediendo como de costumbre, haciendo uso de las fórmulas anteriores (ver problema 14.28).

También se puede tratar de correlacionar los valores de una variable  $X$  en cierto tiempo con los correspondientes valores de  $X$  en un tiempo anterior. A esta correlación se le llama *autocorrelación*.

## CORRELACIÓN DE ATRIBUTOS

Los métodos descritos en este capítulo no permiten considerar la correlación entre variables, por naturaleza, no numéricas; por ejemplo, *atributos* de individuos (como color de pelo, color de ojos, etc.). La correlación de atributos se analiza en el capítulo 12.

## TEORÍA MUESTRAL DE LA CORRELACIÓN

Los  $N$  pares de valores  $(X, Y)$  de dos variables pueden considerarse como muestras de una población que consta de todos estos pares. Como hay dos variables, a esta población se le llama *población bivariada*, la que se supondrá tiene una *distribución normal bivariada*.

Se puede pensar que existe un coeficiente de correlación poblacional teórico, denotado  $\rho$ , que se estima por el coeficiente de correlación muestral  $r$ . Las pruebas de significancia o de hipótesis relacionadas con los diferentes valores de  $\rho$  requieren del conocimiento de la distribución muestral de  $r$ . Para  $\rho = 0$  esta distribución es simétrica y se usa un estadístico que implica la distribución de Student. Para  $\rho \neq 0$  esta distribución es sesgada; en ese caso, una transformación desarrollada por Fischer da un estadístico que está distribuido en forma aproximadamente normal. Las pruebas siguientes resumen los procedimientos empleados:

1. **Prueba de hipótesis  $\rho = 0$ .** Aquí se emplea el hecho de que el estadístico

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (27)$$

tiene una distribución de Student con  $\nu = N - 2$  grados de libertad (ver problemas 14.31 y 14.32).

2. **Prueba de hipótesis**  $\rho = \rho_0 \neq 0$ . Aquí se emplea el hecho de que el estadístico

$$Z = \frac{1}{2} \log_e \left( \frac{1+r}{1-r} \right) = 1.1513 \log_{10} \left( \frac{1+r}{1-r} \right) \quad (28)$$

donde  $e = 2.71828\dots$ , está distribuido de manera casi normal, con media y desviación estándar dadas por

$$\mu_Z = \frac{1}{2} \log_e \left( \frac{1+\rho_0}{1-\rho_0} \right) = 1.1513 \log_{10} \left( \frac{1+\rho_0}{1-\rho_0} \right) \quad \sigma_Z = \frac{1}{\sqrt{N-3}} \quad (29)$$

Las ecuaciones (28) y (29) también pueden usarse para hallar los límites de confianza para los coeficientes de correlación (ver problemas 14.33 y 14.34). La ecuación (28) se llama *transformación Z de Fischer*.

3. **Significancia de una diferencia entre coeficientes de correlación.** Para determinar si dos coeficientes de correlación  $r_1$  y  $r_2$ , obtenidos de muestras de tamaños  $N_1$  y  $N_2$ , respectivamente, difieren de manera notable uno de otro, empleando la ecuación (28) se calculan los valores  $Z_1$  y  $Z_2$  correspondientes a  $r_1$  y  $r_2$ . Despues se usa el hecho de que el estadístico de prueba

$$z = \frac{Z_1 - Z_2 - \mu_{Z_1-Z_2}}{\sigma_{Z_1-Z_2}} \quad (30)$$

donde

$$\mu_{Z_1-Z_2} = \mu_{Z_1} - \mu_{Z_2}$$

y

$$\sigma_{Z_1-Z_2} = \sqrt{\sigma_{Z_1}^2 + \sigma_{Z_2}^2} = \sqrt{\frac{1}{N_1-3} + \frac{1}{N_2-3}}$$

está distribuido en forma normal (ver problema 14.35).

## TEORÍA MUESTRAL DE LA REGRESIÓN

La ecuación de regresión  $Y = a_0 + a_1X$  se obtiene basándose en datos muestrales. Se desea conocer la correspondiente ecuación de regresión para la población de la que se obtuvo la muestra. A continuación se presentan tres pruebas relacionadas con esta población:

1. **Prueba de hipótesis**  $a_1 = A_1$ . Para probar la hipótesis de que el coeficiente de regresión  $a_1$  es igual a algún valor dado  $A_1$ , se emplea el hecho de que el estadístico

$$t = \frac{a_1 - A_1}{s_{Y,X}/s_X} \sqrt{N-2} \quad (31)$$

tiene una distribución de Student con  $N - 2$  grados de libertad. Esto también se puede emplear para hallar intervalos de confianza para los coeficientes de regresión poblacional a partir de valores muestrales (ver los problemas 14.36 y 14.37).

2. **Prueba de la hipótesis para valores pronosticados.** Sea  $Y_0$  el valor pronosticado para  $Y$ , correspondiente a  $X = X_0$ , mediante la ecuación de regresión muestral (es decir,  $Y_0 = a_0 + a_1X_0$ ). Sea  $Y_p$  el valor pronosticado para  $Y$  que corresponde a  $X = X_0$  en la población. Entonces, el estadístico

$$t = \frac{Y_0 - Y_p}{s_{Y,X} \sqrt{N+1 + (X_0 - \bar{X})^2/s_X^2}} \sqrt{N-2} = \frac{Y_0 - Y_p}{\hat{s}_{X,Y} \sqrt{1 + 1/N + (X_0 - \bar{X})^2/(Ns_X^2)}} \quad (32)$$

tiene una distribución de Student con  $N - 2$  grados de libertad. A partir de esta fórmula se pueden hallar límites de confianza para valores poblacionales pronosticados (ver el problema 14.38).

3. **Prueba de hipótesis para valores pronosticados para la media.** Sea  $Y_0$  el valor pronosticado para  $Y$ , correspondiente a  $X = X_0$ , empleando la ecuación de regresión muestral (es decir,  $Y_0 = a_0 + a_1X_0$ ). Sea  $\bar{Y}_p$  el *valor medio* pronosticado de  $Y$  que corresponde a  $X = X_0$  en la población. Entonces el estadístico

$$t = \frac{Y_0 - \bar{Y}_p}{s_{Y.X} \sqrt{1 + (X_0 - \bar{X})^2 / s_X^2}} \quad (33)$$

$$= \frac{Y_0 - \bar{Y}_p}{\hat{s}_{Y.X} \sqrt{1/N + (X_0 - \bar{X})^2 / (Ns_X^2)}}$$

tiene una distribución de Student con  $N - 2$  grados de libertad. A partir de esta fórmula se pueden hallar límites de confianza para valores pronosticados para la media poblacional (ver el problema 14.39).

## PROBLEMAS RESUELTOS

### DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN Y RECTAS DE REGRESIÓN

- 14.1** En la tabla 14.1  $X$  y  $Y$  son las estaturas de 12 padres y de sus hijos mayores.

- a) Con estos datos, construir un diagrama de dispersión.
- b) Resolviendo las ecuaciones normales, encontrar la línea de regresión de mínimos cuadrados correspondiente a la estatura del padre sobre la estatura del hijo. También encontrar esta línea empleando SPSS.
- c) Resolviendo las ecuaciones normales, encontrar la línea de regresión de mínimos cuadrados correspondiente a la estatura del hijo sobre la estatura del padre. Encontrar también esta línea empleando STATISTIX.

Tabla 14.1

|                              |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Estatura $X$ del parent (in) | 65 | 63 | 67 | 64 | 68 | 62 | 70 | 66 | 68 | 67 | 69 | 71 |
| Estatura $Y$ del hijo (in)   | 68 | 66 | 68 | 65 | 69 | 66 | 68 | 65 | 71 | 67 | 68 | 70 |

### SOLUCIÓN

- a) El diagrama de dispersión se obtiene graficando los puntos  $(X, Y)$  en un sistema de coordenadas rectangulares, como el que se muestra en la figura 14-2.

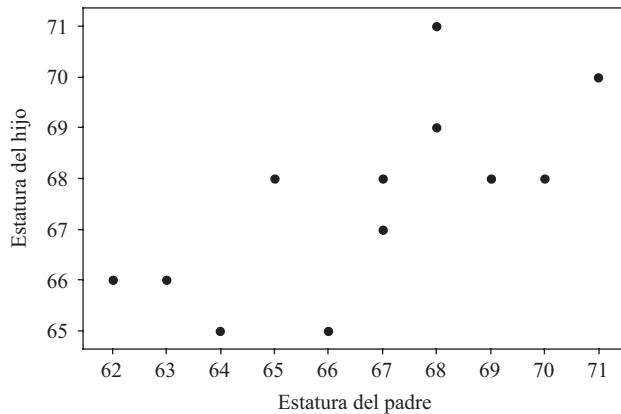


Figura 14-2 Diagrama de dispersión de los datos de la tabla 14.1.

- b) La recta de regresión de  $Y$  sobre  $X$  es  $Y = a_0 + a_1X$ , donde  $a_0$  y  $a_1$  se obtienen resolviendo las ecuaciones normales.

$$\sum Y = a_0N + a_1 \sum X$$

$$\sum XY = a_0 \sum X + a_1 \sum X^2$$

En la tabla 14.2 se presentan las sumas a partir de las cuales las ecuaciones normales son

$$\begin{aligned} 12a_0 + 800a_1 &= 811 \\ 800a_0 + 53\,418a_1 &= 54\,107 \end{aligned}$$

de donde se encuentra que  $a_0 = 35.82$  y  $a_1 = 0.476$ , con lo que  $Y = 35.82 + 0.476X$ .

A continuación se presenta parte del resultado que se obtiene con la secuencia **Analyze → Regresión → Linear** de SPSS.

| Modelo                    | Coeficientes sin estandarizar |                |      | t              | Sig          |
|---------------------------|-------------------------------|----------------|------|----------------|--------------|
|                           | B                             | Error estándar | Beta |                |              |
| 1 (Constante)<br>Estpadre | 35.825<br>.476                | 10.178<br>.153 | .703 | 3.520<br>3.123 | .006<br>.011 |

<sup>a</sup>Variable dependiente: Esthijo.

Delante de la palabra (Constante) se encuentra el valor de  $a_0$  y delante de la palabra Estpadre se encuentra el valor de  $a_1$ .

Tabla 14.2

| X              | Y              | $X^2$                | XY                  | $Y^2$                |
|----------------|----------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 65             | 68             | 4 225                | 4 420               | 4 624                |
| 63             | 66             | 3 969                | 4 158               | 4 356                |
| 67             | 68             | 4 489                | 4 556               | 4 624                |
| 64             | 65             | 4 096                | 4 160               | 4 225                |
| 68             | 69             | 4 624                | 4 692               | 4 761                |
| 62             | 66             | 3 844                | 4 092               | 4 356                |
| 70             | 68             | 4 900                | 4 760               | 4 624                |
| 66             | 65             | 4 356                | 4 290               | 4 225                |
| 68             | 71             | 4 624                | 4 828               | 5 041                |
| 67             | 67             | 4 489                | 4 489               | 4 489                |
| 69             | 68             | 4 761                | 4 692               | 4 624                |
| 71             | 70             | 5 041                | 4 970               | 4 900                |
| $\sum X = 800$ | $\sum Y = 811$ | $\sum X^2 = 53\,418$ | $\sum XY = 54\,107$ | $\sum Y^2 = 54\,849$ |

- c) La recta de regresión de X sobre Y es  $X = b_0 + b_1Y$ , donde  $b_0$  y  $b_1$  se obtienen resolviendo las ecuaciones normales

$$\begin{aligned} \sum X &= b_0N + b_1 \sum Y \\ \sum XY &= b_0 \sum Y + b_1 \sum Y^2 \end{aligned}$$

Empleando las sumas de la tabla 14.2 estas ecuaciones son:

$$12b_0 + 811b_1 = 800$$

$$811b_0 + 54\,849b_1 = 54\,107$$

de las cuales se encuentra que  $b_0 = -3.38$  y  $b_1 = 1.036$ , por lo que  $X = -3.38 + 1.036Y$

A continuación se presenta parte del resultado que se obtiene con la secuencia **Statistics** → **Linear models** → **Linear regression** de STATISTIX:

| Statistix 8.0  |          |             |           |       |        |
|--|----------|-------------|-----------|-------|--------|
| Unweighted Least Squares Linear Regression of Htfather |          |             |           |       |        |
| Predictor  | Variable | Coefficient | Std Error | T     | P      |
| Constant   |          | -3.37687    | 22.4377   | -0.15 | 0.8834 |
| Htson  |          | 1.03640     | 0.33188   | 3.12  | 0.0108 |

Delante de la palabra **constant** se encuentra el valor  $b_0 = -3.37687$  y delante de la palabra **Esthi** se encuentra el valor  $b_1 = 1.0364$ .

- 14.2** Resolver el problema 14.1 usando MINITAB. Construir tablas en las que se den los valores ajustados,  $Y_{\text{est}}$ , y los residuales. Encontrar la suma de los cuadrados de los residuales correspondientes a estas dos rectas de regresión.

### SOLUCIÓN

Primero se hallará la línea de regresión por mínimos cuadrados de  $Y$  sobre  $X$ . A continuación se muestran parte de los resultados que da MINITAB. En la tabla 14.3 se dan los valores ajustados, los residuales y los cuadrados de los residuales correspondientes a la línea de regresión de  $Y$  sobre  $X$ .

Tabla 14.3

| X  | Y  | Valor ajustado<br>$Y_{\text{est}}$ | Residual<br>$Y - Y_{\text{est}}$ | Cuadrado del<br>residual |
|----|----|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 65 | 68 | 66.79                              | 1.21                             | 1.47                     |
| 63 | 66 | 65.84                              | 0.16                             | 0.03                     |
| 67 | 68 | 67.74                              | 0.26                             | 0.07                     |
| 64 | 65 | 66.31                              | -1.31                            | 1.72                     |
| 68 | 69 | 68.22                              | 0.78                             | 0.61                     |
| 62 | 66 | 65.36                              | 0.64                             | 0.41                     |
| 70 | 68 | 69.17                              | -1.17                            | 1.37                     |
| 66 | 65 | 67.27                              | -2.27                            | 5.13                     |
| 68 | 71 | 68.22                              | 2.78                             | 7.74                     |
| 67 | 67 | 67.74                              | -0.74                            | 0.55                     |
| 69 | 68 | 68.69                              | -0.69                            | 0.48                     |
| 71 | 70 | 69.65                              | 0.35                             | 0.12                     |
|    |    |                                    | Suma = 0                         | Suma = 19.70             |

MTB > Regress 'Y' on 1 predictor 'X'

#### Análisis de regresión

La ecuación de regresión es  $Y = 35.8 + 0.476 X$

El resultado que da MINITAB al hallar la línea de regresión por mínimos cuadrados de  $X$  sobre  $Y$  es el siguiente:

MTB > Regress 'X' on 1 predictor 'Y'

#### Análisis de regresión

La ecuación de regresión es  $X = -3.4 + 1.04 Y$

En la tabla 14.4 se dan los valores ajustados, los residuales y los cuadrados de los residuales correspondientes a la línea de regresión de  $X$  sobre  $Y$ .

Tabla 14.4

| $X$ | $Y$ | Valor ajustado<br>$X_{\text{est}}$ | Residual<br>$X - X_{\text{est}}$ | Cuadrado del<br>residual |
|-----|-----|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 65  | 68  | 67.10                              | -2.10                            | 4.40                     |
| 63  | 66  | 65.03                              | -2.03                            | 4.10                     |
| 67  | 68  | 67.10                              | -0.10                            | 0.01                     |
| 64  | 65  | 63.99                              | 0.01                             | 0.00                     |
| 68  | 69  | 68.13                              | -0.13                            | 0.02                     |
| 62  | 66  | 65.03                              | -3.03                            | 9.15                     |
| 70  | 68  | 67.10                              | 2.90                             | 8.42                     |
| 66  | 65  | 63.99                              | 2.01                             | 4.04                     |
| 68  | 71  | 70.21                              | -2.21                            | 4.87                     |
| 67  | 67  | 66.06                              | 0.94                             | 0.88                     |
| 69  | 68  | 67.10                              | 1.90                             | 3.62                     |
| 71  | 70  | 69.17                              | 1.83                             | 3.34                     |
|     |     |                                    | Suma = 0                         | Suma = 42.85             |

Comparando la suma de cuadrados de los residuales se ve que el ajuste de la recta de regresión de mínimos cuadrados de  $Y$  sobre  $X$  es mucho mejor que el ajuste de la recta de regresión de mínimos cuadrados de  $X$  sobre  $Y$ . Recuérdese que cuanto menor sea la suma de los cuadrados de los residuales, el modelo de regresión se ajusta mejor a los datos. La estatura del padre es mejor predictor de la estatura del hijo que la estatura del hijo de la estatura del padre.

## ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN

- 14.3 Si la línea de regresión de  $Y$  sobre  $X$  está dada por  $Y = a_0 + a_1X$ , probar que el error estándar de estimación  $s_{Y.X}$  está dado por

$$s_{Y.X}^2 = \frac{\sum Y^2 - a_0 \sum Y - a_1 \sum XY}{N}$$

### SOLUCIÓN

Los valores estimados para  $Y$ , de acuerdo con la línea de regresión, están dados por  $Y_{\text{est}} = a_0 + a_1X$ . Por lo tanto,

$$\begin{aligned} s_{Y.X}^2 &= \frac{\sum (Y - Y_{\text{est}})^2}{N} = \frac{\sum (Y - a_0 - a_1X)^2}{N} \\ &= \frac{\sum Y(Y - a_0 - a_1X) - a_0 \sum (Y - a_0 - a_1X) - a_1 \sum X(Y - a_0 - a_1X)}{N} \end{aligned}$$

Pero

$$\sum (Y - a_0 - a_1X) = \sum Y - a_0N - a_1 \sum X = 0$$

y

$$\sum X(Y - a_0 - a_1X) = \sum XY - a_0 \sum X - a_1 \sum X^2 = 0$$

ya que de acuerdo con las ecuaciones normales

$$\begin{aligned} \sum Y &= a_0N + a_1 \sum X \\ \sum XY &= a_0 \sum X + a_1 \sum X^2 \end{aligned}$$

Por lo tanto,

$$s_{Y.X}^2 = \frac{\sum Y(Y - a_0 - a_1X)}{N} = \frac{\sum Y^2 - a_0 \sum Y - a_1 \sum XY}{N}$$

Este resultado puede extenderse a ecuaciones de regresión no lineales.

- 14.4** Si  $x = X - \bar{X}$  y  $y = Y - \bar{Y}$ , mostrar que la ecuación del problema 14.3 puede expresarse

$$s_{Y.X}^2 = \frac{\sum y^2 - a_1 \sum xy}{N}$$

### SOLUCIÓN

De acuerdo con el problema 14.3, si  $X = x + \bar{X}$  y  $Y = y + \bar{Y}$ , se tiene

$$\begin{aligned} Ns_{Y.X}^2 &= \sum Y^2 - a_0 \sum Y - a_1 \sum XY = \sum (y + \bar{Y})^2 - a_0 \sum (y + \bar{Y}) - a_1 \sum (x + \bar{X})(y + \bar{Y}) \\ &= \sum (y^2 + 2y\bar{Y} + \bar{Y}^2) - a_0(\sum y + N\bar{Y}) - a_1 \sum (xy + \bar{X}y + x\bar{Y} + \bar{X}\bar{Y}) \\ &= \sum y^2 + 2\bar{Y} \sum y + N\bar{Y}^2 - a_0N\bar{Y} - a_1 \sum xy - a_1\bar{X} \sum y - a_1\bar{Y} \sum x - a_1N\bar{X}\bar{Y} \\ &= \sum y^2 + N\bar{Y}^2 - a_0N\bar{Y} - a_1 \sum xy - a_1N\bar{X}\bar{Y} \\ &= \sum y^2 - a_1 \sum xy + N\bar{Y}(\bar{Y} - a_0 - a_1\bar{X}) \\ &= \sum y^2 - a_1 \sum xy \end{aligned}$$

donde se han empleado los resultados  $\sum x = 0$ ,  $\sum y = 0$  y  $\bar{Y} = a_0 + a_1\bar{X}$  (que se obtienen al dividir entre  $N$  ambos lados de la ecuación normal  $\sum Y = a_0N + a_1 \sum X$  por  $N$ ).

- 14.5** Dados los datos del problema 14.1, calcular el error estándar de estimación  $s_{Y.X}$  empleando: a) la definición y b) la ecuación obtenida en el problema 14.4.

### SOLUCIÓN

- a) De acuerdo con el problema 14.1b), la recta de regresión de  $Y$  sobre  $X$  es  $Y = 35.82 + 0.476X$ . En la tabla 14.5 se dan los valores reales de  $Y$  (tomados de la tabla 14.1) y los valores estimados de  $Y$ , que se denotan  $Y_{\text{est}}$ , obtenidos empleando la recta de regresión; por ejemplo, para  $X = 65$  se tiene  $Y_{\text{est}} = 35.82 + 0.476(65) = 66.76$ . También se dan los valores  $Y - Y_{\text{est}}$ , que se necesitan para calcular  $s_{Y.X}$ :

$$s_{Y.X}^2 = \frac{\sum (Y - Y_{\text{est}})^2}{N} = \frac{(1.24)^2 + (0.19)^2 + \cdots + (0.38)^2}{12} = 1.642$$

$$\text{y } s_{Y.X} = \sqrt{1.642} = 1.28 \text{ in.}$$

- b) De acuerdo con los problemas 14.1, 14.2 y 14.4

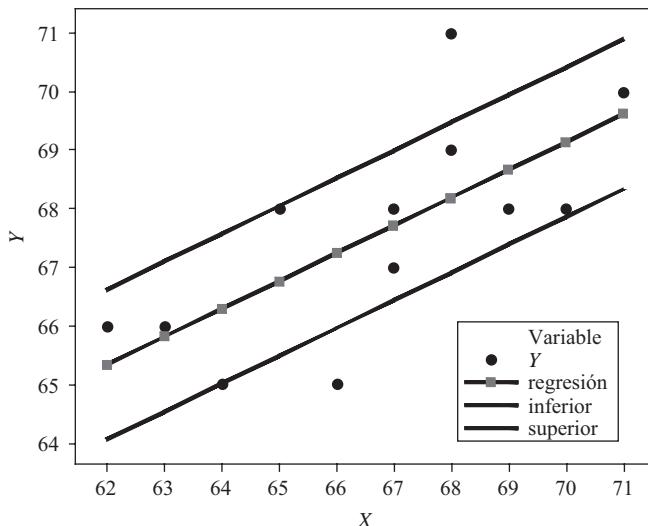
$$s_{Y.X}^2 = \frac{\sum y^2 - a_1 \sum xy}{N} = \frac{38.92 - 0.476(40.34)}{12} = 1.643$$

$$\text{y } s_{Y.X} = \sqrt{1.643} = 1.28 \text{ in.}$$

Tabla 14.5

|                      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $X$                  | 65    | 63    | 67    | 64    | 68    | 62    | 70    | 66    | 68    | 67    | 69    | 71    |
| $Y$                  | 68    | 66    | 68    | 65    | 69    | 66    | 68    | 65    | 71    | 67    | 68    | 70    |
| $Y_{\text{est}}$     | 66.76 | 65.81 | 67.71 | 66.28 | 68.19 | 65.33 | 69.14 | 67.24 | 68.19 | 67.71 | 68.66 | 69.62 |
| $Y - Y_{\text{est}}$ | 1.24  | 0.19  | 0.29  | -1.28 | 0.81  | 0.67  | -1.14 | -2.24 | 2.81  | -0.71 | -0.66 | 0.38  |

- 14.6** a) Construir dos rectas que sean paralelas a la recta de regresión del problema 14.1 y que se encuentren a una distancia vertical  $s_{Y.X}$  de ella.  
 b) Determinar el porcentaje de los datos que caen entre estas dos líneas.

**SOLUCIÓN**

**Figura 14-3** De los datos, el 66% se encuentra a una distancia no mayor a  $S_{Y,X}$  de la línea de regresión.

- La recta de regresión  $Y = 35.82 + 0.476X$ , obtenida en el problema 14.1, es la recta que aparece marcada con los rombos. Es la recta de enmedio de las tres rectas que aparecen en la figura 14-3; hay otras dos rectas que se encuentran cada una a una distancia  $S_{Y,X} = 1.28$  de la recta de regresión. A estas rectas se les llama rectas inferior y superior.
- En la figura 14-3, los datos aparecen como círculos en negro. Ocho de los 12 datos, es decir el 66.7%, se encuentran entre las rectas inferior y superior. Dos datos se encuentran fuera de estas rectas y otros dos se hallan sobre estas rectas.

**VARIACIÓN EXPLICADA Y VARIACIÓN NO EXPLICADA**

**14.7** Probar que  $\sum (Y - \bar{Y})^2 = \sum (Y - Y_{\text{est}})^2 + \sum (Y_{\text{est}} - \bar{Y})^2$ .

**SOLUCIÓN**

Elevando al cuadrado ambos lados de  $Y - \bar{Y} = (Y - Y_{\text{est}}) + (Y_{\text{est}} - \bar{Y})$  y sumando después, se tiene

$$\sum (Y - \bar{Y})^2 = \sum (Y - Y_{\text{est}})^2 + \sum (Y_{\text{est}} - \bar{Y})^2 + 2 \sum (Y - Y_{\text{est}})(Y_{\text{est}} - \bar{Y})$$

La ecuación buscada se obtiene inmediatamente si se demuestra que la última suma es cero; en el caso de la regresión lineal, esto es así debido a que

$$\begin{aligned} \sum (Y - Y_{\text{est}})(Y_{\text{est}} - \bar{Y}) &= \sum (Y - a_0 - a_1X)(a_0 + a_1X - \bar{Y}) \\ &= a_0 \sum (Y - a_0 - a_1X) + a_1 \sum X(Y - a_0 - a_1X) - \bar{Y} \sum (Y - a_0 - a_1X) = 0 \end{aligned}$$

y por las ecuaciones normales,  $\sum (Y - a_0 - a_1X) = 0$  y  $\sum X(Y - a_0 - a_1X) = 0$ .

De igual manera, empleando la curva de mínimos cuadrados dada por  $Y_{\text{est}} = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \cdots + a_nX^n$ , puede mostrarse que este resultado también es válido para la regresión no lineal.

**14.8** Dados los datos del problema 14.1, calcular: *a)* la variación total, *b)* la variación no explicada y *c)* la variación explicada.

**SOLUCIÓN**

La recta de regresión por mínimos cuadrados es  $Y_{\text{est}} = 35.8 + 0.476X$ . En la tabla 14.6 se ve que la variación total  $= \sum (Y - \bar{Y})^2 = 38.917$ , la variación no explicada  $= \sum (Y - Y_{\text{est}})^2 = 19.703$  y la variación explicada  $= \sum (Y_{\text{est}} - \bar{Y})^2 = 19.214$ .

Tabla 14.6

| $Y$                 | $Y_{\text{est}}$ | $(Y - \bar{Y})^2$ | $(Y - Y_{\text{est}})^2$ | $(Y_{\text{est}} - \bar{Y})^2$ |
|---------------------|------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 68                  | 66.7894          | 0.1739            | 1.46562                  | 0.62985                        |
| 66                  | 65.8366          | 2.5059            | 0.02669                  | 3.04986                        |
| 68                  | 67.7421          | 0.1739            | 0.06650                  | 0.02532                        |
| 65                  | 66.3130          | 6.6719            | 1.72395                  | 1.61292                        |
| 69                  | 68.2185          | 2.0079            | 0.61074                  | 0.40387                        |
| 66                  | 65.3602          | 2.5059            | 0.40930                  | 4.94068                        |
| 68                  | 69.1713          | 0.1739            | 1.37185                  | 2.52257                        |
| 65                  | 67.2657          | 6.6719            | 5.13361                  | 0.10065                        |
| 71                  | 68.2185          | 11.6759           | 7.73672                  | 0.40387                        |
| 67                  | 67.7421          | 0.3399            | 0.55075                  | 0.02532                        |
| 68                  | 68.6949          | 0.1739            | 0.48286                  | 1.23628                        |
| 70                  | 69.6476          | 5.8419            | 0.12416                  | 4.26273                        |
| $\bar{Y} = 67.5833$ |                  | Suma = 38.917     | Suma = 19.703            | Suma = 19.214                  |

Los siguientes resultados de MINITAB dan las mismas sumas de cuadrados. Estas sumas aparecen en negritas. Obsérvese la enorme cantidad de cálculos que este software le ahorra al usuario.

```
MTB > Regress 'Y' 1 'X';
SUBC> Constant;
SUBC> Brief 1.
```

#### Análisis de regresión

The regression equation is  
 $Y = 35.8 + 0.476 X$

#### Analysis of Variance

| Source         | DF | SS            | MS     | F    | P     |
|----------------|----|---------------|--------|------|-------|
| Regression     | 1  | <b>19.214</b> | 19.214 | 9.75 | 0.011 |
| Residual Error | 10 | <b>19.703</b> | 1.970  |      |       |
| Total          | 11 | <b>38.917</b> |        |      |       |

## COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

- 14.9** Usar los resultados del problema 14.8 para hallar: *a)* el coeficiente de determinación y *b)* el coeficiente de correlación.

#### SOLUCIÓN

*a)* Coeficiente de determinación =  $r^2 = \frac{\text{variación explicada}}{\text{variación total}} = \frac{19.214}{38.917} = 0.4937$

*b)* Coeficiente de correlación =  $r = \pm \sqrt{0.4937} = \pm 0.7027$

Como  $X$  y  $Y$  se relacionan en forma directa, se elige el signo positivo. A dos lugares decimales  $r = 0.70$ .

- 14.10** Probar que para la regresión lineal, el coeficiente de correlación entre las variables  $X$  y  $Y$  puede expresarse como

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}}$$

donde  $x = X - \bar{X}$  y  $y = Y - \bar{Y}$ .

**SOLUCIÓN**

La recta de regresión por mínimos cuadrados de  $Y$  sobre  $X$  puede expresarse  $Y_{\text{est}} = a_0 + a_1X$  o bien  $y_{\text{est}} = a_1x$ , donde [ver problema 13.15a)]

$$a_1 = \frac{\sum xy}{\sum x^2} \quad y \quad y_{\text{est}} = Y_{\text{est}} - \bar{Y}$$

Entonces

$$\begin{aligned} r^2 &= \frac{\text{variación explicada}}{\text{variación total}} = \frac{\sum (Y_{\text{est}} - \bar{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2} = \frac{\sum y_{\text{est}}^2}{\sum y^2} \\ &= \frac{\sum a_1^2 x^2}{\sum y^2} = \frac{a_1^2 \sum x^2}{\sum y^2} = \left( \frac{\sum xy}{\sum x^2} \right)^2 \frac{\sum x^2}{\sum y^2} = \frac{(\sum xy)^2}{(\sum x^2)(\sum y^2)} \end{aligned}$$

y

$$r = \pm \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}}$$

Sin embargo, como la cantidad

$$\frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}}$$

es positiva cuando  $y_{\text{est}}$  aumenta a medida que  $x$  aumenta (es decir, correlación lineal positiva) y negativa cuando  $y_{\text{est}}$  disminuye a medida que  $x$  aumenta (es decir, correlación lineal negativa), esta expresión tiene *automáticamente* el signo correcto. Por lo tanto, el coeficiente de correlación lineal se define como

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}}$$

A esta expresión se le conoce como *fórmula producto-momento* para el coeficiente de correlación lineal.

### FÓRMULA PRODUCTO-MOMENTO PARA EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL

**14.11** Encontrar el coeficiente de correlación lineal entre las variables  $X$  y  $Y$  que se presentan en la tabla 14.7.

Tabla 14.7

|     |   |   |   |   |   |   |    |    |
|-----|---|---|---|---|---|---|----|----|
| $X$ | 1 | 3 | 4 | 6 | 8 | 9 | 11 | 14 |
| $Y$ | 1 | 2 | 4 | 4 | 5 | 7 | 8  | 9  |

**SOLUCIÓN**

Para facilitar los cálculos se elabora la tabla 14.8.

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}} = \frac{84}{\sqrt{(132)(56)}} = 0.977$$

Esto indica que existe una correlación lineal muy elevada entre estas variables, como ya se observó en los problemas 13.8 y 13.12.

Tabla 14.8

| $X$                  | $Y$ | $x = X - \bar{X}$    | $y = Y - \bar{Y}$ | $x^2$            | $xy$           | $y^2$           |
|----------------------|-----|----------------------|-------------------|------------------|----------------|-----------------|
| 1                    | 1   | -6                   | -4                | 36               | 24             | 16              |
| 3                    | 2   | -4                   | -3                | 16               | 12             | 9               |
| 4                    | 4   | -3                   | -1                | 9                | 3              | 1               |
| 6                    | 4   | -1                   | -1                | 1                | 1              | 1               |
| 8                    | 5   | 1                    | 0                 | 1                | 0              | 0               |
| 9                    | 7   | 2                    | 2                 | 4                | 4              | 4               |
| 11                   | 8   | 4                    | 3                 | 16               | 12             | 9               |
| 14                   | 9   | 7                    | 4                 | 49               | 28             | 16              |
| $\sum X = 56$        |     | $\sum Y = 40$        |                   | $\sum x^2 = 132$ | $\sum xy = 84$ | $\sum y^2 = 56$ |
| $\bar{X} = 56/8 = 7$ |     | $\bar{Y} = 40/8 = 5$ |                   |                  |                |                 |

- 14.12** Con objeto de investigar la relación entre el promedio de calificaciones y la cantidad de horas por semana que se ve televisión, se recolectan los datos que se muestran en la tabla 14.9 y en la figura 14-4, y se emplea EXCEL para obtener un diagrama de dispersión de los datos. La información corresponde a 10 estudiantes de secundaria,  $X$  es la cantidad de horas por semana que el estudiante ve televisión (horas de TV) y  $Y$  es su promedio de calificaciones.

Tabla 14.9

| Horas de TV | Promedio de calificaciones |
|-------------|----------------------------|
| 20          | 2.35                       |
| 5           | 3.8                        |
| 8           | 3.5                        |
| 10          | 2.75                       |
| 13          | 3.25                       |
| 7           | 3.4                        |
| 13          | 2.9                        |
| 5           | 3.5                        |
| 25          | 2.25                       |
| 14          | 2.75                       |

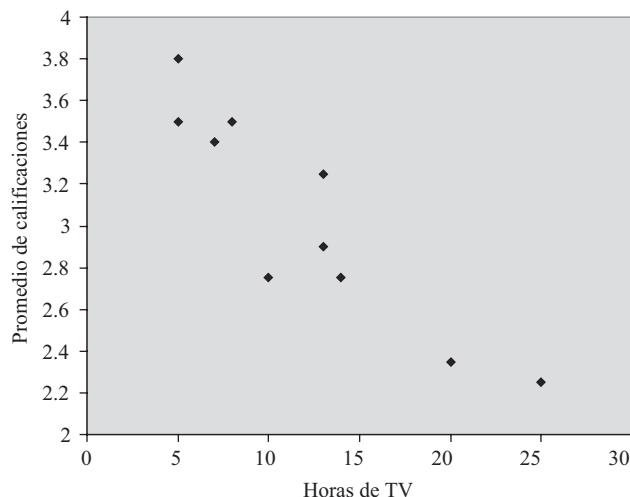


Figura 14-4 EXCEL, diagrama de dispersión de datos del problema 14.12.

Usar EXCEL para calcular el coeficiente de correlación de estas dos variables y verificar empleando la fórmula de producto-momento.

### SOLUCIÓN

Para hallar el coeficiente de correlación se emplea la función de EXCEL =CORREL( E2 : E11 , F2 : F11 ), ingresando en las celdas E2 : E11 las horas de televisión y en las celdas F2 : F11 los promedios de calificaciones. El coeficiente de correlación es -0.9097. El signo negativo indica que las dos variables están inversamente correlacionadas. Es decir, cuanto mayor es la cantidad de horas que se ve televisión, menor es el promedio de calificaciones.

- 14.13** En un estudio se registran los salarios iniciales (en miles),  $Y$ , y los años de estudio,  $X$ , de 10 empleados. En la tabla 14.10 y en la figura 14-5 se presentan los datos y una gráfica de dispersión empleando SPSS.

Tabla 14.10

| Salario inicial | Años de estudio |
|-----------------|-----------------|
| 35              | 12              |
| 46              | 16              |
| 48              | 16              |
| 50              | 15              |
| 40              | 13              |
| 65              | 19              |
| 28              | 10              |
| 37              | 12              |
| 49              | 17              |
| 55              | 14              |

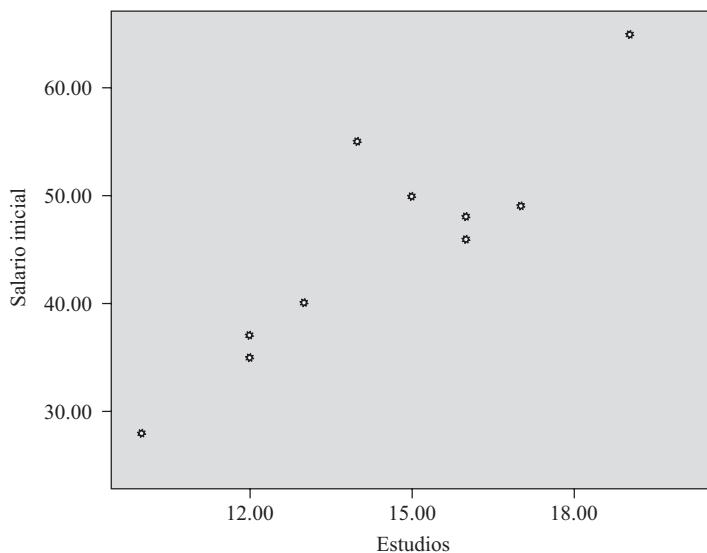


Figura 14-5 SPSS, diagrama de dispersión del problema 14.13.

Usar SPSS para calcular el coeficiente de correlación de estas dos variables y verificar usando la fórmula del producto-momento.

### SOLUCIÓN

Correlaciones

|                 |                        | salario inicial | estudios |
|-----------------|------------------------|-----------------|----------|
| salario inicial | Correlación de Pearson | 1               | .891**   |
|                 | Sig. (2 colas)         |                 | .001     |
|                 | N                      | 10              | 10       |
| estudios        | Correlación de Pearson | .891**          | 1        |
|                 | Sig. (2 colas)         | .001            |          |
|                 | N                      | 10              | 10       |

\*\*Correlación significativa al nivel 0.001 (2 colas).

La secuencia **Analyze → Correlate → Bivariate** de SPSS da la correlación empleando la fórmula del producto-momento. A esta fórmula también se le llama correlación de Pearson.

El resultado da el coeficiente de correlación  $r = 0.891$ .

- 14.14** En un estudio realizado con 10 estudiantes se registró la cantidad de horas por semana que emplean su teléfono celular,  $Y$ , y la cantidad de letras en su nombre,  $X$ . En la tabla 14.11 y en la figura 14-6 se presentan los datos y el diagrama de dispersión obtenido con STATISTIX.

Tabla 14.11

| Horas de celular | Letras en el nombre |
|------------------|---------------------|
| 6                | 13                  |
| 6                | 11                  |
| 3                | 12                  |
| 17               | 7                   |
| 19               | 14                  |
| 14               | 4                   |
| 15               | 4                   |
| 3                | 13                  |
| 13               | 4                   |
| 7                | 9                   |

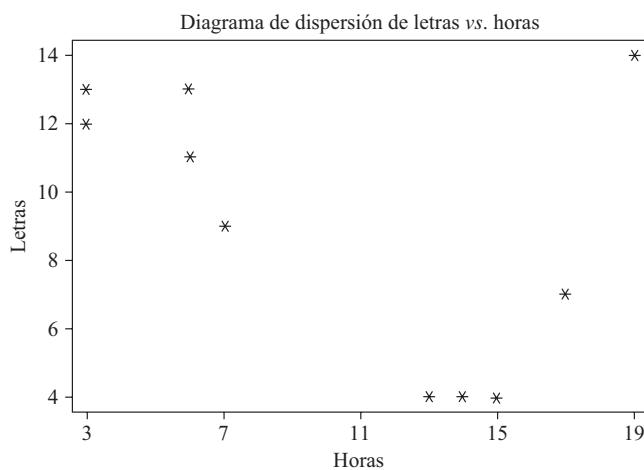


Figura 14-6 STATISTIX, diagrama de dispersión de los datos de la tabla 14.11.

Usar STATISTIX para calcular el coeficiente de correlación de las dos variables y verificar usando la fórmula del producto-momento.

### SOLUCIÓN

Con la secuencia “**Statistics → Linear models → correlations(Pearson)**” se obtiene el resultado siguiente:

```
Statistix 8.0
Correlations (Pearson)

          Hours
Letters      -0.4701
P-VALUE     0.1704
```

El coeficiente de correlación es  $r = -0.4701$ . Entre estas dos variables no existe una correlación significativa.

- 14.15** Mostrar que el coeficiente de correlación lineal está dado por

$$r = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

### SOLUCIÓN

Si se escribe  $x = X - \bar{X}$  y  $y = Y - \bar{Y}$  en la fórmula del problema 14.10, se tiene

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{[\sum (X - \bar{X})^2][\sum (Y - \bar{Y})^2]}} \quad (34)$$

Pero

$$\begin{aligned} \sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y}) &= \sum (XY - \bar{X}Y - X\bar{Y} + \bar{X}\bar{Y}) = \sum XY - \bar{X} \sum Y - \bar{Y} \sum X + N\bar{X}\bar{Y} \\ &= \sum XY - N\bar{X}\bar{Y} - N\bar{Y}\bar{X} + N\bar{X}\bar{Y} = \sum XY - N\bar{X}\bar{Y} \\ &= \sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{N} \end{aligned}$$

ya que  $\bar{X} = (\sum X)/N$  y  $\bar{Y} = (\sum Y)/N$ . De igual manera,

$$\begin{aligned} \sum (X - \bar{X})^2 &= \sum (X^2 - 2X\bar{X} + \bar{X}^2) = \sum X^2 - 2\bar{X} \sum X + N\bar{X}^2 \\ &= \sum X^2 - \frac{2(\sum X)^2}{N} + \frac{(\sum X)^2}{N} = \sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N} \\ \text{y} \quad \sum (Y - \bar{Y})^2 &= \sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{N} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la ecuación (34) se convierte en

$$r = \frac{\sum XY - (\sum X)(\sum Y)/N}{\sqrt{[\sum X^2 - (\sum X)^2/N][\sum Y^2 - (\sum Y)^2/N]}} = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

- 14.16** Se estudió la relación entre el exceso de peso y la presión sanguínea alta en adultos obesos. En la tabla 14.12 se presentan exceso de peso, en libras, y unidades superiores a 80 en la presión diastólica. En la figura 14-7 se presenta el diagrama de dispersión obtenido con SAS.

Tabla 14.12

| Exceso de peso en libras | Unidades superiores a 80 |
|--------------------------|--------------------------|
| 75                       | 15                       |
| 86                       | 13                       |
| 88                       | 10                       |
| 125                      | 27                       |
| 75                       | 20                       |
| 30                       | 5                        |
| 47                       | 8                        |
| 150                      | 31                       |
| 114                      | 78                       |
| 68                       | 22                       |

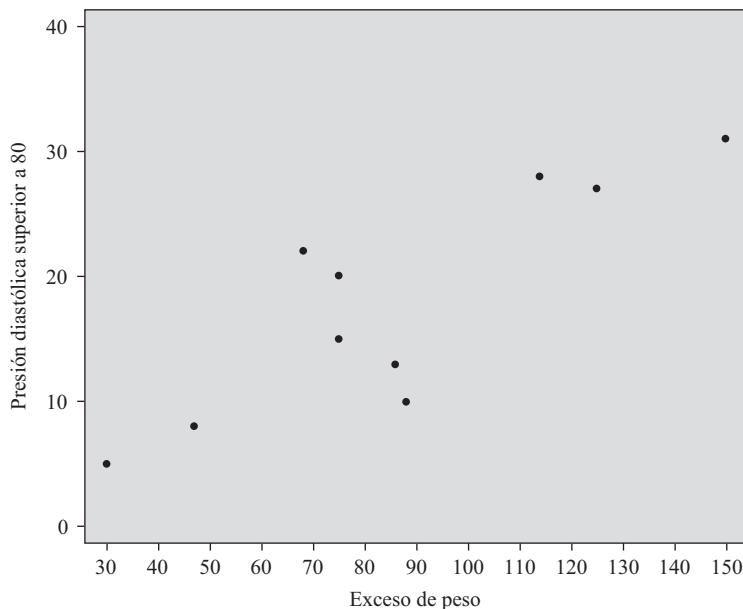


Figura 14-7 SAS, diagrama de dispersión para el problema 14.16.

Usar SAS para calcular el coeficiente de correlación de estas dos variables y verificar usando la fórmula del producto-momento.

### SOLUCIÓN

Con la secuencia **Statistics → Descriptive → Correlations** de SAS se obtiene el procedimiento para la correlación, una parte del cual se muestra a continuación.

| The CORR Procedure |         |         |
|--------------------|---------|---------|
| Overwt             |         | Over80  |
| Overwt             | 1.00000 | 0.85536 |
| Overwt             |         | 0.0016  |
| Over80             | 0.85536 | 1.00000 |
| Over80             | 0.0016  |         |

El coeficiente de correlación dado en estos resultados es 0.85536. Existe una correlación significativa entre el exceso de peso de una persona y una presión diastólica superior a 80.

### COEFICIENTE DE CORRELACIÓN PARA DATOS AGRUPADOS

**14.17** En la tabla 14.13 se muestran las distribuciones de frecuencias de las calificaciones finales en matemáticas y en física de 100 estudiantes. De acuerdo con esta tabla determinar.

- El número de estudiantes que en matemáticas obtuvo una calificación entre 70 y 79, y en física una calificación entre 80 y 89.
- El porcentaje de estudiantes cuya calificación en matemáticas es menor a 70.
- El número de estudiantes que tiene 70 o más en física y menos de 80 en matemáticas.
- El porcentaje de estudiantes que aprueba por lo menos una de estas dos materias, suponiendo que la calificación para aprobar es 60.

**SOLUCIÓN**

- a) En la tabla 14.13 se desciende por la columna cuyo encabezado es 70-79 (calificación en matemáticas) hasta el renglón marcado 80-89 (calificación en física), donde la entrada es 4, que es el número de estudiantes buscado.

**Tabla 14.13**

|                        |       | Calificación en matemáticas |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        |       | 40-49                       | 50-59 | 60-69 | 70-79 | 80-89 | 90-99 | Total |
| Calificación en física | 90-99 |                             |       |       | 2     | 4     | 4     | 10    |
|                        | 80-89 |                             |       | 1     | 4     | 6     | 5     | 16    |
|                        | 70-79 |                             |       | 5     | 10    | 8     | 1     | 24    |
|                        | 60-69 | 1                           | 4     | 9     | 5     | 2     |       | 21    |
|                        | 50-59 | 3                           | 6     | 6     | 2     |       |       | 17    |
|                        | 40-49 | 3                           | 5     | 4     |       |       |       | 12    |
|                        | Total | 7                           | 15    | 25    | 23    | 20    | 10    | 100   |

- b) El número de estudiantes cuya calificación en matemáticas es menor de 70 es el número de estudiantes cuya calificación corresponde a 40-49 + el número de estudiantes cuya calificación está en 50-59 + el número de estudiantes cuya calificación se halla en 60-69 = 7 + 15 + 25 = 47. Por lo tanto, el porcentaje buscado es  $47/100 = 47\%$ .  
 c) El número buscado de estudiantes es la suma de las entradas en la tabla 14.14 (que presenta parte de las entradas de la tabla 14.13). Por lo tanto, el número buscado de estudiantes es  $1 + 5 + 2 + 4 + 10 = 22$ .  
 d) En la tabla 14.15 (tomada de la tabla 14.13) se muestra el número de alumnos que tiene una calificación menor a 60 en física o en matemáticas o en ambas materias, que es  $3 + 3 + 6 + 5 = 17$ . Por lo tanto, el número de estudiantes con una calificación de 60 o más en física o en matemáticas, o en ambas, es  $100 - 17 = 83$ . El porcentaje buscado es  $83/100 = 83\%$ .

**Tabla 14.14**

|                          |       | Calificaciones en matemáticas |       |
|--------------------------|-------|-------------------------------|-------|
|                          |       | 60-69                         | 70-79 |
| Calificaciones en física | 90-99 |                               | 2     |
|                          | 80-89 | 1                             | 4     |
|                          | 70-79 | 5                             | 10    |

**Tabla 14.15**

|                          |       | Calificaciones en matemáticas |       |
|--------------------------|-------|-------------------------------|-------|
|                          |       | 40-49                         | 50-59 |
| Calificaciones en física | 50-59 | 3                             | 6     |
|                          | 40-49 | 3                             | 5     |

La tabla 14.13 a veces se denomina *tabla de frecuencias bivariada* o *distribución de frecuencias bivariada*. Cada cuadro de la tabla se llama *celda* y corresponde a un par de clases o intervalos de clase. El número indicado en la celda se conoce como *frecuencia de celda*. Por ejemplo, en la parte a) el número 4 es la frecuencia de la celda que corresponde al par de intervalos de clase 70-79 en matemáticas y 80-89 en física.

Los totales indicados en la última fila y la última columna se denominan *totales marginales* o *frecuencias marginales*. Corresponden, respectivamente, a las frecuencias de clase de las distribuciones de frecuencias separadas de las calificaciones de matemáticas y de física.

- 14.18** Mostrar cómo modificar la fórmula del problema 14.15 en el caso de datos agrupados, como en la tabla de frecuencias bivariada (tabla 14.13).

### SOLUCIÓN

En el caso de datos agrupados se puede considerar que los valores de las variables  $X$  y  $Y$  coinciden con las marcas de clase y que  $f_X$  y  $f_Y$  son las correspondientes frecuencias de clase, o frecuencias marginales, que se muestran en el último renglón y en la última columna de la tabla de frecuencias bivariada. Si  $f$  representa las diversas frecuencias de celda que corresponden a los pares de marcas de clase ( $X, Y$ ), entonces la fórmula del problema 14.15 puede reemplazarse por la fórmula

$$r = \frac{N \sum fXY - (\sum f_X X)(\sum f_Y Y)}{\sqrt{[N \sum f_X X^2 - (\sum f_X X)^2][N \sum f_Y Y^2 - (\sum f_Y Y)^2]}} \quad (35)$$

Si  $X = A + c_X u_X$  y  $Y = B + c_Y u_Y$ , donde  $c_X$  y  $c_Y$  son las amplitudes de los intervalos de clase (que se suponen constantes) y  $A$  y  $B$  son dos marcas de clase cualesquiera que corresponden a estas variables, la fórmula (35) se convierte en la fórmula (21) de este capítulo:

$$r = \frac{N \sum fu_X u_Y - (\sum f_X u_X)(\sum f_Y u_Y)}{\sqrt{[N \sum f_X u_X^2 - (\sum f_X u_X)^2][N \sum f_Y u_Y^2 - (\sum f_Y u_Y)^2]}} \quad (21)$$

Éste es el *método de codificación* empleado en capítulos anteriores como método abreviado para el cálculo de medias, desviaciones estándar y momentos superiores.

- 14.19** Encontrar el coeficiente de correlación lineal correspondiente a las calificaciones de matemáticas y de física del problema 14.17.

### SOLUCIÓN

Se usará la fórmula (21). Para facilitar los cálculos se elabora la tabla 14.16, a la que se le llama *tabla de correlación*. Las sumas  $\sum f_X$ ,  $\sum f_X u_X$ ,  $\sum f_X u_X^2$ ,  $\sum f_Y$ ,  $\sum f_Y u_Y$  y  $\sum f_Y u_Y^2$  se obtienen empleando el método de codificación, como en capítulos anteriores.

En la tabla 14.16, el número que aparece en la esquina de cada celda representa el producto  $fu_X u_Y$ , donde  $f$  es la frecuencia de celda. La suma de estos números de las esquinas en cada renglón se indica en el renglón correspondiente de la última columna. La suma de estos números de las esquinas en cada columna se indica en la columna correspondiente del último renglón. Los totales finales del último renglón y de la última columna son iguales y representan  $\sum fu_X u_Y$ .

De acuerdo con la tabla 14.16, se tiene

$$\begin{aligned} r &= \frac{N \sum fu_X u_Y - (\sum f_X u_X)(\sum f_Y u_Y)}{\sqrt{[N \sum f_X u_X^2 - (\sum f_X u_X)^2][N \sum f_Y u_Y^2 - (\sum f_Y u_Y)^2]}} \\ &= \frac{(100)(125) - (64)(-55)}{\sqrt{[(100)(236) - (64)^2][(100)(253) - (-55)^2]}} = \frac{16\,020}{\sqrt{(19\,504)(22\,275)}} = 0.7686 \end{aligned}$$

- 14.20** Empleando la tabla 14.16 calcular: a)  $s_X$ , b)  $s_Y$  y c)  $s_{XY}$  y verificar la fórmula  $r = s_{XY}/(s_X s_Y)$ .

### SOLUCIÓN

$$a) \quad s_X = c_X \sqrt{\frac{\sum f_X u_X^2}{N} - \left(\frac{\sum f_X u_X}{N}\right)^2} = 10 \sqrt{\frac{236}{100} - \left(\frac{64}{100}\right)^2} = 13.966$$

$$b) \quad s_Y = c_Y \sqrt{\frac{\sum f_Y u_Y^2}{N} - \left(\frac{\sum f_Y u_Y}{N}\right)^2} = 10 \sqrt{\frac{253}{100} - \left(\frac{-55}{100}\right)^2} = 14.925$$

$$c) \quad s_{XY} = c_X c_Y \left[ \frac{\sum fu_X u_Y}{N} - \left( \frac{\sum f_X u_X}{N} \right) \left( \frac{\sum f_Y u_Y}{N} \right) \right] = (10)(10) \left[ \frac{125}{100} - \left( \frac{64}{100} \right) \left( \frac{-55}{100} \right) \right] = 160.20$$

Por lo tanto, la desviación estándar de las calificaciones de matemáticas y de física son 14.0 y 14.9, respectivamente, y la covarianza es 160.2. Por lo tanto, el coeficiente de correlación  $r$  es

Tabla 14.16

|   |      | Calificaciones en matemáticas $X$ |           |           |          |           |           |                                 | $f_Y$ | $f_Y u_Y$            | $f_Y u_y^2$            | Suma de los números en las esquinas de cada renglón |     |     |     |
|---|------|-----------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|---------------------------------|-------|----------------------|------------------------|---|-----|-----|-----|
| Calificaciones en física $Y$                        | $X$  | 44.5                              | 54.5      | 64.5      | 74.5     | 84.5      | 94.5      | $u_X$                           | $u_Y$ | $-2$                 | $-1$                   | $0$   | $1$ | $2$ | $3$ |
|   | 94.5 | 2                                 |           |           |          | 2<br>[4]  | 4<br>[16] | 4<br>[24]                       |       | 10                   | 20                     | 40  | 44  |     |     |
|   | 84.5 | 1                                 |           |           | 1<br>[0] | 4<br>[4]  | 6<br>[12] | 5<br>[15]                       |       | 16                   | 16                     | 16  | 31  |     |     |
|   | 74.5 | 0                                 |           |           | 5<br>[0] | 10<br>[0] | 8<br>[0]  | 1<br>[0]                        |       | 24                   | 0                      | 0   | 0   |     |     |
|   | 64.5 | -1                                | 1<br>[2]  | 4<br>[4]  | 9<br>[0] | 5<br>[-5] | 2<br>[-4] |                                 |       | 21                   | -21                    | 21  | -3  |     |     |
|   | 54.5 | -2                                | 3<br>[12] | 6<br>[12] | 6<br>[0] | 2<br>[-4] |           |                                 |       | 17                   | -34                    | 68  | 20  |     |     |
|   | 44.5 | -3                                | 3<br>[18] | 5<br>[15] | 4<br>[0] |           |           |                                 |       | 12                   | -36                    | 108   | 33  |     |     |
| $f_X$   |      | 7                                 | 15        | 25        | 23       | 20        | 10        | $\sum f_X = \sum f_Y = N = 100$ |       | $\sum f_Y u_Y = -55$ | $\sum f_Y u_y^2 = 253$ | $\sum f_X u_Y = 125$                                |     |     |     |
| $f_X u_X$   |      | -14                               | -15       | 0         | 23       | 40        | 30        | $\sum f_X u_X = 64$             |       |                      |                        |   |     |     |     |
| $f_X u_X^2$   |      | 28                                | 15        | 0         | 23       | 80        | 90        | $\sum f_X u_X^2 = 236$          |       |                      |                        |   |     |     |     |
| Suma de los números en las esquinas de cada columna |      | 32                                | 31        | 0         | -1       | 24        | 39        | $\sum f u_X u_Y = 125$          |       |                      |                        |   |     |     |     |

$$r = \frac{s_{XY}}{s_X s_Y} = \frac{160.20}{(13.966)(14.925)} = 0.7686$$

que coincide con el valor obtenido en el problema 14.19.

## RECTAS DE REGRESIÓN Y EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

- 14.21** Probar que las rectas de regresión de  $Y$  sobre  $X$  y de  $X$  sobre  $Y$  son, respectivamente, a)  $Y - \bar{Y} = (rs_Y/s_X)(X - \bar{X})$  y b)  $X - \bar{X} = (rs_X/s_Y)(Y - \bar{Y})$ .

### SOLUCIÓN

- a) De acuerdo con el problema 13.15a), la ecuación de la recta de regresión de  $Y$  sobre  $X$  es

$$y = \left( \frac{\sum xy}{\sum x^2} \right) x \quad \text{o bien} \quad Y - \bar{Y} = \left( \frac{\sum xy}{\sum x^2} \right) (X - \bar{X})$$

Entonces, como

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}} \quad (\text{ver problema 14.10})$$

Comprobación

se tiene

$$\frac{\sum xy}{\sum x^2} = \frac{r\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}}{\sum x^2} = \frac{r\sqrt{\sum y^2}}{\sqrt{\sum x^2}} = \frac{rs_Y}{s_X}$$

de donde resulta la fórmula buscada.

- b) La fórmula buscada se obtiene intercambiando  $X$  y  $Y$  en el inciso a).

- 14.22** Si las rectas de regresión de  $Y$  sobre  $X$  y de  $X$  sobre  $Y$  son, respectivamente,  $Y = a_0 + a_1X$  y  $X = b_0 + b_1Y$ , probar que  $a_1b_1 = r^2$ .

### SOLUCIÓN

De acuerdo con el problema 14.21, incisos a) y b),

$$a_1 = \frac{rs_Y}{s_X} \quad \text{y} \quad b_1 = \frac{rs_X}{s_Y}$$

Por lo tanto,

$$a_1b_1 = \left(\frac{rs_Y}{s_X}\right)\left(\frac{rs_X}{s_Y}\right) = r^2$$

Esta fórmula puede tomarse como el punto de partida para la definición del coeficiente de correlación lineal.

- 14.23** Emplear la fórmula obtenida en el problema 14.22 para hallar el coeficiente de correlación lineal correspondiente a los datos del problema 14.1.

### SOLUCIÓN

De acuerdo con el problema 14.1 [incisos b) y c), respectivamente]  $a_1 = 484/1016 = 0.476$  y  $b_1 = 484/467 = 1.036$ . Por lo tanto,  $Y^2 = a_1b_1 = (384/1016)(484/467)$  y  $r = 0.7027$ .

- 14.24** Dados los datos del problema 14.19, escribir las ecuaciones de las rectas de regresión de: a)  $Y$  sobre  $X$  y b)  $X$  sobre  $Y$ .

### SOLUCIÓN

De acuerdo con la tabla de correlación (tabla 14.16) del problema 14.19, se tiene

$$\begin{aligned}\bar{X} &= A + c_X \frac{\sum f_X u_X}{N} = 64.5 + \frac{(10)(64)}{100} = 70.9 \\ \bar{Y} &= B + c_Y \frac{\sum f_Y u_Y}{N} = 74.5 + \frac{(10)(-55)}{100} = 69.0\end{aligned}$$

De acuerdo con los resultados del problema 14.20,  $s_X = 13.966$ ,  $s_Y = 14.925$  y  $r = 0.7686$ . Ahora, empleando el problema 14.21, incisos a) y b), se obtienen las ecuaciones de las rectas de regresión.

$$a) \quad Y - \bar{Y} = \frac{rs_Y}{s_X} (X - \bar{X}) \quad Y - 69.0 = \frac{(0.7686)(14.925)}{13.966} (X - 70.9) = 0.821(X - 70.9)$$

$$b) \quad X - \bar{X} = \frac{rs_X}{s_Y} (Y - \bar{Y}) \quad X - 70.9 = \frac{(0.7686)(13.966)}{14.925} (Y - 69.0) = 0.719(Y - 69.0)$$

- 14.25** Dados los datos del problema 14.19, calcular los errores estándar de estimación: a)  $s_{Y,X}$  y b)  $s_{X,Y}$ . Usar los resultados del problema 14.20.

### SOLUCIÓN

$$a) \quad s_{Y,X} = s_Y \sqrt{1 - r^2} = 14.925 \sqrt{1 - (0.7686)^2} = 9.548$$

$$b) \quad s_{X,Y} = s_X \sqrt{1 - r^2} = 13.966 \sqrt{1 - (0.7686)^2} = 8.934$$

- 14.26** En la tabla 14.17 se presentan los índices de precios al consumidor para alimentos y atención médica, de Estados Unidos, desde 2000 hasta 2006, comparados con los precios de los años base, 1982 a 1984 (tomando la media como 100). Calcular el coeficiente de correlación entre estos dos índices de precios y dar el cálculo de este coeficiente empleando MINITAB.

**Tabla 14.17**

| Año          | 2000  | 2001  | 2002  | 2003  | 2004  | 2005  | 2006  |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alimentos    | 167.8 | 173.1 | 176.2 | 180.0 | 186.2 | 190.7 | 195.2 |
| Medicamentos | 260.8 | 272.8 | 285.6 | 297.1 | 310.1 | 323.2 | 336.2 |

Fuente: Bureau of Labor Statistics.

## SOLUCIÓN

Estos índices para alimentos y para atención médica se denotan  $X$  y  $Y$ , respectivamente, y los cálculos del coeficiente de correlación se organizan en la tabla 14.18. (Obsérvese que el año se usa únicamente para especificar los valores correspondientes a  $X$  y  $Y$ .)

**Tabla 14.18**

| $X$               | $Y$               | $x = X - \bar{X}$ | $y = Y - \bar{Y}$ | $x^2$         | $xy$           | $y^2$           |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|----------------|-----------------|
| 167.8             | 260.8             | -13.5             | -37.2             | 182.25        | 502.20         | 1 383.84        |
| 173.1             | 272.8             | -8.2              | -25.2             | 67.24         | 206.64         | 635.04          |
| 176.2             | 285.6             | -5.1              | -12.4             | 26.01         | 63.24          | 153.76          |
| 180.0             | 297.1             | -1.3              | -0.9              | 1.69          | 1.17           | 0.81            |
| 186.2             | 310.1             | 4.9               | 12.1              | 24.01         | 59.29          | 46.41           |
| 190.7             | 323.2             | 9.4               | 25.2              | 88.36         | 236.88         | 635.04          |
| 195.2             | 336.2             | 13.9              | 38.2              | 193.21        | 530.98         | 1 459.24        |
| $\bar{X} = 181.3$ | $\bar{Y} = 298.0$ |                   |                   | Suma = 582.77 | Suma = 1 600.4 | Suma = 4 414.14 |

Entonces, mediante la fórmula del producto-momento

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}} = \frac{1 600.4}{\sqrt{(582.77)(4 414.14)}} = 0.998$$

Después de ingresar los valores de  $X$  en C1 y los valores de  $Y$  en C2, con el comando de MINITAB **correlation C1 C2**, se obtiene el coeficiente de correlación, que es igual al calculado antes.

```
Correlations: X, Y
Pearson correlation of X and Y = 0.998
P-Value=0.000
```

## CORRELACIÓN NO LINEAL

- 14.27** Ajustar una parábola de mínimos cuadrados de la forma  $Y = a_0 + a_1X + a_2X^2$  al conjunto de datos de la tabla 14.19. Dar también la solución empleando MINITAB.

**SOLUCIÓN**

Las ecuaciones normales (23) del capítulo 13 son

$$\begin{aligned}\sum Y &= a_0 N + a_1 \sum X + a_2 \sum X^2 \\ \sum XY &= a_0 \sum X + a_1 \sum X^2 + a_2 \sum X^3 \\ \sum X^2 Y &= a_0 \sum X^2 + a_1 \sum X^3 + a_2 \sum X^4\end{aligned}\tag{36}$$

**Tabla 14.19**

|          |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>X</i> | 1.2 | 1.8 | 3.1 | 4.9 | 5.7 | 7.1 | 8.6 | 9.8 |
| <i>Y</i> | 4.5 | 5.9 | 7.0 | 7.8 | 7.2 | 6.8 | 4.5 | 2.7 |

Para facilitar el cálculo de las sumas se elabora la tabla 14.20. Entonces, como  $N = 8$ , las ecuaciones normales (36) se convierten en

$$\begin{aligned}8a_0 + 42.2a_1 + 291.20a_2 &= 46.4 \\ 42.2a_0 + 291.20a_1 + 2275.35a_2 &= 230.42 \\ 291.20a_0 + 2275.35a_1 + 18971.92a_2 &= 1449.00\end{aligned}\tag{37}$$

Resolviendo,  $a_0 = 2.588$ ,  $a_1 = 2.056$  y  $a_2 = -0.2110$ , de manera que la ecuación de la parábola de mínimos cuadrados buscada es

$$Y = 2.588 + 2.065X - 0.2110X^2$$

**Tabla 14.20**

| <i>X</i>             | <i>Y</i>             | $X^2$                    | $X^3$                     | $X^4$                      | $XY$                    | $X^2Y$                     |
|----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1.2                  | 4.5                  | 1.44                     | 1.73                      | 2.08                       | 5.40                    | 6.48                       |
| 1.8                  | 5.9                  | 3.24                     | 5.83                      | 10.49                      | 10.62                   | 19.12                      |
| 3.1                  | 7.0                  | 9.61                     | 29.79                     | 92.35                      | 21.70                   | 67.27                      |
| 4.9                  | 7.8                  | 24.01                    | 117.65                    | 576.48                     | 38.22                   | 187.28                     |
| 5.7                  | 7.2                  | 32.49                    | 185.19                    | 1 055.58                   | 41.04                   | 233.93                     |
| 7.1                  | 6.8                  | 50.41                    | 357.91                    | 2 541.16                   | 48.28                   | 342.79                     |
| 8.6                  | 4.5                  | 73.96                    | 636.06                    | 5 470.12                   | 38.70                   | 332.82                     |
| 9.8                  | 2.7                  | 96.04                    | 941.19                    | 9 223.66                   | 26.46                   | 259.31                     |
| $\sum X$<br>$= 42.2$ | $\sum Y$<br>$= 46.4$ | $\sum X^2$<br>$= 291.20$ | $\sum X^3$<br>$= 2275.35$ | $\sum X^4$<br>$= 18971.92$ | $\sum XY$<br>$= 230.42$ | $\sum X^2Y$<br>$= 1449.00$ |

Los valores de  $Y$  se ingresan en C1, los valores de  $X$  se ingresan en C2, y los valores de  $X^2$  se ingresan en C3. Se da la secuencia **Stat** → **Regresión** → **Regression** de MINITAB. La parábola de mínimos cuadrados dada como parte de los resultados es la siguiente:

La ecuación de regresión es  $Y = 2.59 + 2.06 X - 0.211 X_{\text{cuadrada}}$

Que es la misma ecuación obtenida resolviendo las ecuaciones normales.

- 14.28** Usar la parábola de mínimos cuadrados del problema 14.27 para estimar el valor de  $Y$  para los valores dados de  $X$ .

**SOLUCIÓN**

Para  $X = 1.2$ ,  $Y_{\text{est}} = 2.588 + 2.065(1.2) - 0.2110(1.2)^2 = 4.762$ . Los demás valores estimados se obtienen de manera similar. Los resultados se muestran en la tabla 14.21 junto con los valores reales de  $Y$ .

**Tabla 14.21**

|                  |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $Y_{\text{est}}$ | 4.762 | 5.621 | 6.962 | 7.640 | 7.503 | 6.613 | 4.741 | 2.561 |
| $Y$              | 4.5   | 5.9   | 7.0   | 7.8   | 7.2   | 6.8   | 4.5   | 2.7   |

- 14.29** a) Encontrar el coeficiente de correlación lineal entre las variables  $X$  y  $Y$  del problema 14.27.  
 b) Encontrar el coeficiente de correlación no lineal entre las variables  $X$  y  $Y$  del problema 14.27, asumiendo la relación parabólica obtenida en el problema 14.27.  
 c) Explicar la diferencia entre los coeficientes de correlación obtenidos en los incisos a) y b).  
 d) ¿Qué porcentaje de la variación total queda no explicada si se supone que la relación entre  $X$  y  $Y$  es la relación parabólica?

**SOLUCIÓN**

- a) Empleando los cálculos ya realizados en la tabla 14.20 y el hecho de que  $\sum Y^2 = 290.52$ , se encuentra que

$$\begin{aligned} r &= \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \\ &= \frac{(8)(230.42) - (42.2)(46.4)}{\sqrt{[(8)(291.20) - (42.2)^2][(8)(290.52) - (46.4)^2]}} = -0.3743 \end{aligned}$$

- b) De acuerdo con la tabla 14.20,  $\bar{Y} = (\sum Y)/N = 46.4/8 = 5.80$ ; por lo tanto, la variación total es  $\sum (Y - \bar{Y})^2 = 21.40$ . De acuerdo con la tabla 14.21, la variación explicada es  $\sum (Y_{\text{est}} - \bar{Y})^2 = 21.02$ . Por lo tanto,

$$r^2 = \frac{\text{variación explicada}}{\text{variación total}} = \frac{21.02}{21.40} = 0.9822 \quad \text{y} \quad r = 0.9911 \quad \text{o bien} \quad 0.99$$

- c) El hecho de que en el inciso a) la correlación lineal sea de sólo  $-0.3743$  indica que prácticamente no hay ninguna *relación lineal* entre  $X$  y  $Y$ . Sin embargo, hay una muy buena *relación no lineal* dada por la parábola del problema 14.27, como lo indica el hecho de que en el inciso b) el coeficiente de correlación sea 0.99.

d)

$$\frac{\text{Variación no explicada}}{\text{Variación total}} = 1 - r^2 = 1 - 0.9822 = 0.0178$$

Por lo tanto, 1.78% de la variación total queda no explicada. Esto puede deberse a fluctuaciones aleatorias o a otras variables que no hayan sido tomadas en consideración.

- 14.30** Dados los datos del problema 14.27, encontrar: a)  $s_Y$  y b)  $s_{Y.X}$ .

**SOLUCIÓN**

- a) De acuerdo con el problema 14.29a),  $\sum (Y - \bar{Y})^2 = 21.40$ . Por lo tanto, la desviación estándar de  $Y$  es

$$s_Y = \sqrt{\frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{N}} = \sqrt{\frac{21.40}{8}} = 1.636 \quad \text{o bien} \quad 1.64$$

**b) Primer método**

Empleando el inciso *a*) y el problema 14.29*b*), el error estándar de estimación de *Y* sobre *X* es

$$s_{Y.X} = s_Y \sqrt{1 - r^2} = 1.636 \sqrt{1 - (0.9911)^2} = 0.218 \quad \text{o bien} \quad 0.22$$

**Segundo método**

Usando el problema 14.29,

$$s_{Y.X} = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_{\text{est}})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\text{variación no explicada}}{N}} = \sqrt{\frac{21.40 - 21.02}{8}} = 0.218 \quad \text{o bien} \quad 0.22$$

**Tercer método**

Usando el problema 14.27 y el cálculo adicional  $\sum Y^2 = 290.52$ , se tiene

$$s_{Y.X} = \sqrt{\frac{\sum Y^2 - a_0 \sum Y - a_1 \sum XY - a_2 \sum X^2 Y}{N}} = 0.218 \quad \text{o bien} \quad 0.22$$

## TEORÍA MUESTRAL DE LA CORRELACIÓN

- 14.31** En una muestra de tamaño 18, el coeficiente de correlación encontrado es 0.32. ¿Puede concluirse, a los niveles de significancia: *a*) 0.05 y *b*) 0.01, que el coeficiente de correlación poblacional correspondiente difiere de cero?

**SOLUCIÓN**

Se debe decidir entre las hipótesis  $H_0: \rho = 0$  y  $H_1: \rho > 0$ .

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{0.32\sqrt{18-2}}{\sqrt{1-(0.32)^2}} = 1.35$$

- a)* Empleando una prueba de una cola con la distribución de Student al nivel 0.05,  $H_0$  se rechaza si  $t > t_{.95} = 1.75$  para  $(18 - 2) = 16$  grados de libertad. Por lo tanto, al nivel 0.05, no se rechaza  $H_0$ .
- b)* Como al nivel 0.05 no se rechaza  $H_0$ , seguramente tampoco se rechazaría al nivel 0.01.

- 14.32** ¿Cuál será el mínimo tamaño de muestra necesario para que se pueda concluir, al nivel 0.05, que un coeficiente de correlación 0.32 difiere significativamente de cero?

**SOLUCIÓN**

Empleando una prueba de una cola con la distribución de Student al nivel 0.05, el valor mínimo de *N* debe ser tal que

$$\frac{0.32\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-(0.32)^2}} = t_{.95}$$

para  $N - 2$  grados de libertad. Para un número infinito de grados de libertad  $t_{.95} = 1.64$  y por lo tanto,  $N = 25.6$ .

$$\text{Para } N = 26: \quad \nu = 24 \quad t_{.95} = 1.71 \quad t = 0.32\sqrt{24}/\sqrt{1-(0.32)^2} = 1.65$$

$$\text{Para } N = 27: \quad \nu = 25 \quad t_{.95} = 1.71 \quad t = 0.32\sqrt{25}/\sqrt{1-(0.32)^2} = 1.69$$

$$\text{Para } N = 28: \quad \nu = 26 \quad t_{.95} = 1.71 \quad t = 0.32\sqrt{26}/\sqrt{1-(0.32)^2} = 1.72$$

Por lo tanto, el tamaño mínimo de la muestra es  $N = 28$ .

- 14.33** En una muestra de tamaño 24, el coeficiente de correlación encontrado es  $r = 0.75$ . Al nivel de significancia 0.05, ¿se puede rechazar la hipótesis de que el coeficiente de correlación poblacional sea tan pequeño como:  
 a)  $\rho = 0.60$  y b)  $\rho = 0.50$ ?

**SOLUCIÓN**

$$a) \quad Z = 1.1513 \log \left( \frac{1 + 0.75}{1 - 0.75} \right) = 0.9730 \quad \mu_Z = 1.1513 \log \left( \frac{1 + 0.60}{1 - 0.60} \right) = 0.6932$$

$$y \quad \sigma_Z = \frac{1}{\sqrt{N-3}} = \frac{1}{\sqrt{21}} = 0.2182$$

$$\text{Por lo tanto, } z = \frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{0.9730 - 0.6932}{0.2182} = 1.28$$

Empleando la distribución normal para una prueba de una cola al nivel de significancia 0.05, la hipótesis sólo se podrá rechazar si  $z$  es mayor que 1.64. Por lo tanto, en este caso no se puede rechazar la hipótesis de que el coeficiente de correlación poblacional sea tan pequeño como 0.60.

- b) Si  $\rho = 0.50$ , entonces  $\mu_Z = 1.1513 \log 3 = 0.5493$  y  $z = (0.9730 - 0.5493)/0.2182 = 1.94$ . Por lo tanto, la hipótesis de que el coeficiente de correlación poblacional sea tan pequeño como  $\rho = 0.50$  al nivel 0.05 puede rechazarse.

- 14.34** Se calcula que el coeficiente de correlación entre las calificaciones finales en física y matemáticas de un grupo de 21 estudiantes es 0.80. Encontrar límites de confianza de 95% para este coeficiente.

**SOLUCIÓN**

Como  $r = 0.80$  y  $N = 21$ , los límites de confianza del 95% para  $\mu_z$  están dados por

$$Z \pm 1.96\sigma_Z = 1.1513 \log \left( \frac{1 + r}{1 - r} \right) \pm 1.96 \left( \frac{1}{\sqrt{N-3}} \right) = 1.0986 \pm 0.4620$$

Por lo tanto,  $\mu_Z$  tiene el intervalo de confianza de 95% siguiente: 0.5366 a 1.5606. Ahora, si

$$\mu_Z = 1.1513 \log \left( \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \right) = 0.5366 \quad \text{entonces} \quad \rho = 0.4904$$

$$\text{y si} \quad \mu_Z = 1.1513 \log \left( \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \right) = 1.5606 \quad \text{entonces} \quad \rho = 0.9155$$

Por lo tanto, los límites de confianza de 95% para  $\rho$  son 0.49 y 0.92.

- 14.35** A partir de dos muestras de tamaño  $N_1 = 28$  y  $N_2 = 35$  se obtuvieron los coeficientes de correlación  $r_1 = 0.50$  y  $r_2 = 0.30$ , respectivamente. Al nivel de significancia 0.05, ¿existe una diferencia significativa entre estos dos coeficientes?

**SOLUCIÓN**

$$Z_1 = 1.1513 \log \left( \frac{1 + r_1}{1 - r_1} \right) = 0.5493 \quad Z_2 = 1.1513 \log \left( \frac{1 + r_2}{1 - r_2} \right) = 0.3095$$

$$\text{y} \quad \sigma_{Z_1-Z_2} = \sqrt{\frac{1}{N_1-3} + \frac{1}{N_2-3}} = 0.2669$$

Se debe decidir entre las hipótesis  $H_0: \mu_{Z_1} = \mu_{Z_2}$  y  $H_1: \mu_{Z_1} \neq \mu_{Z_2}$ . Bajo la hipótesis  $H_0$ ,

$$z = \frac{Z_1 - Z_2 - (\mu_{Z_1} - \mu_{Z_2})}{\sigma_{Z_1-Z_2}} = \frac{0.5493 - 0.3095 - 0}{0.2669} = 0.8985$$

Empleando la distribución normal para una prueba de dos colas,  $H_0$  se rechazará sólo si  $z > 1.96$  o  $z < -1.96$ . Por lo tanto, no se puede rechazar  $H_0$ , y se concluye que al nivel de significancia 0.05 los resultados no son notablemente diferentes.

## TEORÍA MUESTRAL DE LA REGRESIÓN

- 14.36** En el problema 14.1 se encontró que la ecuación de regresión de  $Y$  sobre  $X$  era  $Y = 35.82 + 0.476X$ . Al nivel de significancia 0.05, probar la hipótesis nula de que el coeficiente de regresión de la ecuación de regresión poblacional es 0.180 contra la hipótesis alternativa de que este coeficiente de regresión es mayor a 0.180. Realizar esta prueba sin ayuda de un software para estadística, así como con la ayuda de MINITAB.

### SOLUCIÓN

$$t = \frac{a_1 - A_1}{S_{Y,X}/S_X} \sqrt{N-2} = \frac{0.476 - 0.180}{1.28/2.66} \sqrt{12-2} = 1.95$$

como  $S_{Y,X} = 1.28$  (calculado en el problema 14.5) y  $S_X = \sqrt{(\sum x^2)/N} = \sqrt{84.68/12} = 2.66$ . Empleando una prueba de una cola con la distribución de Student al nivel 0.05, la hipótesis de que el coeficiente de regresión es 0.180 se rechazará si  $t > t_{95} = 1.81$  para  $(12 - 2) = 10$  grados de libertad. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula.

Los resultados de MINITAB para este problema son los siguientes:

```
MTB > Regress 'Y' 1 'X';
SUBC> Constant;
SUBC> Predict C7.
```

#### Análisis de regresión

La ecuación de regresión es

$$Y = 35.8 + 0.476 X$$

| Predictor | Coef   | StDev  | T    | P     |
|-----------|--------|--------|------|-------|
| Constant  | 35.82  | 10.18  | 3.52 | 0.006 |
| X         | 0.4764 | 0.1525 | 3.12 | 0.011 |

$$S = 1.404 \quad R-Sq = 49.4\% \quad R-Sq(adj) = 44.3\%$$

#### Análisis de varianza

| Source         | DF | SS     | MS     | F    | P     |
|----------------|----|--------|--------|------|-------|
| Regression     | 1  | 19.214 | 19.214 | 9.75 | 0.011 |
| Residual Error | 10 | 19.703 | 1.970  |      |       |
| Total          | 11 | 38.917 |        |      |       |

#### Predicted Values

| Fit    | StDev Fit | 95.0% CI         | 95.0% PI         |
|--------|-----------|------------------|------------------|
| 66.789 | 0.478     | (65.724, 67.855) | (63.485, 70.094) |
| 69.171 | 0.650     | (67.723, 70.620) | (65.724, 72.618) |

El siguiente fragmento de los resultados proporciona la información necesaria para realizar la prueba de hipótesis.

| Predictor | Coef   | StDev  | T    | P     |
|-----------|--------|--------|------|-------|
| Constant  | 35.82  | 10.18  | 3.52 | 0.006 |
| X         | 0.4764 | 0.1525 | 3.12 | 0.011 |

El estadístico de prueba calculado se encuentra como sigue:

$$t = \frac{0.4764 - 0.180}{0.1525} = 1.94$$

El valor calculado para  $t$ , **3.12**, que se muestra en los resultados de MINITAB, sirve para probar la hipótesis nula de que el coeficiente de regresión es 0. Para probar cualquier otro valor del coeficiente de regresión se necesita hacer un cálculo

como el anterior. Para probar que el coeficiente de regresión es 0.25, por ejemplo, el valor calculado para el estadístico de prueba será igual a

$$t = \frac{0.4764 - 0.25}{0.1525} = 1.48$$

La hipótesis nula de que el coeficiente de regresión es igual a 0.25 no se rechazará.

- 14.37** Encontrar los límites de confianza de 95% para el coeficiente de regresión del problema 14.36. Establecer el intervalo de confianza sin ayuda de un software para estadística, así como con ayuda de MINITAB.

### SOLUCIÓN

El intervalo de confianza puede expresarse como

$$a_1 \pm \frac{t}{\sqrt{N-2}} \left( \frac{S_{Y,X}}{S_X} \right)$$

Por lo tanto, los límites de confianza de 95% para  $A_1$  (obtenidos haciendo  $t = \pm t_{.975} = \pm 2.23$  para  $12 - 2 = 10$  grados de libertad) están dados por

$$a_1 \pm \frac{2.23}{\sqrt{12-2}} \left( \frac{S_{Y,X}}{S_X} \right) = 0.476 \pm \frac{2.23}{\sqrt{10}} \left( \frac{1.28}{2.66} \right) = 0.476 \pm 0.340$$

Es decir, se tiene una confianza de 95% de que  $A_1$  se encuentre entre 0.136 y 0.816.

En el siguiente fragmento de los resultados obtenidos con MINITAB para el problema 14.36 aparece la información necesaria para establecer el intervalo de confianza de 95%.

| Predictor | Coef          | StDev         | T           | P     |
|-----------|---------------|---------------|-------------|-------|
| Constant  | 35.82         | 10.18         | 3.52        | 0.006 |
| X         | <b>0.4764</b> | <b>0.1525</b> | <b>3.12</b> | 0.011 |

El término

$$\frac{1}{\sqrt{N-2}} \left( \frac{S_{Y,X}}{S_X} \right)$$

se conoce como el error estándar correspondiente al coeficiente de regresión estimado. En los resultados de MINITAB este error estándar es **0.1525**. Para hallar el intervalo de confianza de 95%, se multiplica este error estándar por  $t_{.975}$ , y después este término se suma y se resta a  $a_1 = 0.476$ , con lo que se obtiene el siguiente intervalo de confianza para  $A_1$ :

$$0.476 \pm 2.23(0.1525) = 0.476 \pm 0.340$$

- 14.38** En el problema 14.1, encontrar los límites de confianza de 95% para las estaturas de los hijos cuyos padres tienen una estatura de: a) 65.0 y b) 70.0 in. Encontrar el intervalo de confianza sin ayuda de software, así como con ayuda de MINITAB.

### SOLUCIÓN

Como  $t_{.975} = 2.23$  para  $(12 - 2) = 10$  grados de libertad, los límites de confianza de 95% para  $Y_P$  están dados por

$$Y_0 \pm \frac{2.23}{\sqrt{N-2}} S_{Y,X} \sqrt{N + 1 + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{S_X^2}}$$

donde  $Y_0 = 35.82 + 0.476X_0$ ,  $S_{Y,X} = 1.28$ ,  $S_X = 2.66$  y  $N = 12$ .

- a) Si  $X_0 = 65.0$ , entonces  $Y_0 = 66.76$  in. Además,  $(X_0 - \bar{X})^2 = (65.0 - 66.67)^2 = 2.78$ . De manera que los límites de confianza de 95% son

$$66.76 \pm \frac{2.23}{\sqrt{10}} (1.28) \sqrt{12 + 1 + \frac{2.78}{2.66^2}} = 66.76 \pm 3.30 \text{ in}$$

Es decir, se puede tener una confianza de 95% de que las estaturas de los hijos están entre 63.46 y 70.06 in.

- b) Si  $X_0 = 70.0$ , entonces  $Y_0 = 69.14$  in. Además,  $(X_0 - \bar{X})^2 = (70.0 - 66.67)^2 = 11.09$ . De manera que los límites de confianza de 95% son  $69.14 \pm 3.45$  in; es decir, se puede tener una confianza de 95% de que las estaturas de los hijos estén entre 65.69 y 72.59 in.

En el siguiente fragmento de los resultados obtenidos con MINITAB para el problema 14.36 aparecen los límites de confianza para las estaturas de los hijos.

| Predicted Values |           |                  |                  |  |
|------------------|-----------|------------------|------------------|--|
| Fit              | StDev Fit | 95.0% CI         | 95.0% PI         |  |
| 66.789           | 0.478     | (65.724, 67.855) | (63.485, 70.094) |  |
| 69.171           | 0.650     | (67.723, 70.620) | (65.724, 72.618) |  |

A los intervalos de confianza para individuos se les conoce como intervalos de predicción. Los intervalos de predicción del 95% aparecen en negritas. Estos intervalos coinciden con los antes calculados, salvo errores de redondeo.

- 14.39** En el problema 14.1, encontrar los límites de confianza de 95% para la estatura media de los hijos cuyos padres tienen una estatura de: a) 65.0 y b) 70.0 in. Establecer el intervalo de confianza sin ayuda de software, así como con ayuda de MINITAB.

### SOLUCIÓN

Como  $t_{.975} = 2.23$  para 10 grados de libertad, los límites de confianza de 95% para  $\bar{Y}_P$  están dados por

$$Y_0 \pm \frac{2.23}{\sqrt{10}} S_{Y.X} \sqrt{1 + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{S_X^2}}$$

donde  $Y_0 = 35.82 + 0.476X_0$ ,  $S_{Y.X} = 1.28$ ,  $S_X = 2.66$ .

- a) Para  $X_0 = 65.0$ , los límites de confianza serán  $66.76 \pm 1.07$  o bien 65.7 y 67.8.
- b) Para  $X_0 = 70.0$ , los límites de confianza serán  $69.14 \pm 1.45$  o bien 67.7 y 70.6.

En el siguiente fragmento de los resultados obtenidos con MINITAB para el problema 14.36 aparecen los límites de confianza para las estaturas medias.

| Predicted Values |           |                  |                  |  |
|------------------|-----------|------------------|------------------|--|
| Fit              | StDev Fit | 95.0% CI         | 95.0% PI         |  |
| 66.789           | 0.478     | (65.724, 67.855) | (63.485, 70.094) |  |
| 69.171           | 0.650     | (67.723, 70.620) | (65.724, 72.618) |  |

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### REGRESIÓN LINEAL Y CORRELACIÓN

- 14.40** En la tabla 14.22 se presentan las calificaciones (denotadas  $X$  y  $Y$ , respectivamente) de 10 estudiantes en dos primeros exámenes de biología.
- a) Construir un diagrama de dispersión.
  - b) Encontrar la recta de regresión de mínimos cuadrados de  $Y$  sobre  $X$ .
  - c) Encontrar la recta de regresión de mínimos cuadrados de  $X$  sobre  $Y$ .
  - d) Graficar las dos de rectas de regresión de los incisos b) y c) en el diagrama de dispersión del inciso a).
- 14.41** Dados los datos de la tabla 14.22, encontrar: a)  $s_{Y.X}$  y b)  $s_{X.Y}$ .

Tabla 14.22

|   |   |   |   |    |   |   |    |   |   |   |
|---|---|---|---|----|---|---|----|---|---|---|
| Calificación en el primer examen ( $X$ )  | 6 | 5 | 8 | 8  | 7 | 6 | 10 | 4 | 9 | 7 |
| Calificación en el segundo examen ( $Y$ ) | 8 | 7 | 7 | 10 | 5 | 8 | 10 | 6 | 8 | 6 |

- 14.42** Dados los datos del problema 14.40, calcular: *a)* la variación total de  $Y$ , *b)* la variación no explicada de  $Y$  y *c)* la variación explicada de  $Y$ .
- 14.43** Empleando los resultados del problema 14.42, encontrar el coeficiente de correlación entre los dos conjuntos de calificaciones del problema 14.40.
- 14.44** Empleando la fórmula del producto-momento encontrar el coeficiente de correlación entre los dos conjuntos de calificaciones del problema 14.40; comparar el resultado con el coeficiente de correlación dado por SPSS, SAS, STATISTIX, MINITAB y EXCEL.
- 14.45** Dados los datos del problema 14.40*a*), encontrar la covarianza: *a)* directamente y *b)* usando la fórmula  $s_{XY} = rs_X s_Y$  y los resultados de los problemas 14.43 y 14.44.

**14.46** En la tabla 14.23 se presenta la edad  $X$  y la presión sistólica  $Y$  de 12 mujeres.

- a)* Encontrar el coeficiente de correlación entre  $X$  y  $Y$  empleando la fórmula del producto-momento, EXCEL, MINITAB, SAS, SPSS y STATISTIX.
- b)* Determinar la ecuación de regresión por mínimos cuadrados de  $Y$  sobre  $X$  resolviendo las ecuaciones normales y empleando EXCEL, MINITAB, SAS, SPSS y STATISTIX.
- c)* Estimar la presión sanguínea de una mujer de 45 años de edad.

Tabla 14.23

|                           |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Edad ( $X$ )              | 56  | 42  | 72  | 36  | 63  | 47  | 55  | 49  | 38  | 42  | 68  | 60  |
| Presión sanguínea ( $Y$ ) | 147 | 125 | 160 | 118 | 149 | 128 | 150 | 145 | 115 | 140 | 152 | 155 |

**14.47** Encontrar los coeficientes de correlación para los datos: *a)* del problema 13.32 y *b)* del problema 13.35.

**14.48** El coeficiente de correlación entre dos variables  $X$  y  $Y$  es  $r = 0.60$ . Si  $s_X = 1.50$ ,  $s_Y = 2.00$ ,  $\bar{X} = 10$  y  $\bar{Y} = 20$ , hallar la ecuación de la recta de regresión: *a)* de  $Y$  sobre  $X$  y *b)* de  $X$  sobre  $Y$ .

**14.49** Dados los datos del problema 14.48, calcular: *a)*  $s_{Y.X}$  y *b)*  $s_{X.Y}$ .

**14.50** Si  $s_{Y.X} = 3$  y  $s_Y = 5$ , hallar  $r$ .

**14.51** Si el coeficiente de correlación entre  $X$  y  $Y$  es 0.50, ¿qué porcentaje de la variación total queda no explicada por la ecuación de regresión?

**14.52** *a)* Probar que la ecuación de la recta de regresión de  $Y$  sobre  $X$  puede expresarse como

$$Y - \bar{Y} = \frac{s_{XY}}{s_X^2} (X - \bar{X})$$

*b)* Escribir la ecuación análoga para la recta de regresión de  $X$  sobre  $Y$ .

- 14.53** a) Calcular el coeficiente de correlación entre los valores correspondientes de  $X$  y  $Y$  dados en la tabla 14.24.

Tabla 14.24

|     |    |    |    |   |   |    |
|-----|----|----|----|---|---|----|
| $X$ | 2  | 4  | 5  | 6 | 8 | 11 |
| $Y$ | 18 | 12 | 10 | 8 | 7 | 5  |

- b) Multiplicar por 2 cada uno de los valores de  $X$  que aparecen en la tabla y sumarles 6. Multiplicar por 3 cada uno de los valores de  $Y$  que aparecen en la tabla y restarles 15. Encontrar el coeficiente de correlación entre estos dos nuevos conjuntos de valores y explicar por qué sí, o por qué no, se obtienen los mismos resultados que en el inciso a).

- 14.54** a) Dados los datos del problema 14.53, incisos a) y b), encontrar las ecuaciones de regresión de  $Y$  sobre  $X$ .  
b) Analizar la relación entre estas dos ecuaciones de regresión.

- 14.55** a) Probar que el coeficiente de correlación entre  $X$  y  $Y$  se puede expresar como

$$r = \frac{\overline{XY} - \bar{X}\bar{Y}}{\sqrt{[\bar{X}^2 - \bar{X}^2][\bar{Y}^2 - \bar{Y}^2]}}$$

- b) Aplicar este método al problema 14.1.

- 14.56** Probar que el coeficiente de correlación es independiente de la elección del origen de las variables o de las unidades en las que estén expresadas. (Sugerencia: Suponga que  $X' = c_1X + A$  y  $Y' = c_2Y + B$  donde  $c_1, c_2, A$  y  $B$  son constantes cualesquiera, y probar que el coeficiente de correlación entre  $X'$  y  $Y'$  es el mismo que entre  $X$  y  $Y$ .)

- 14.57** a) Probar que, para la regresión lineal,

$$\frac{s_{Y,X}^2}{s_Y^2} = \frac{s_{X,Y}^2}{s_X^2}$$

- b) ¿Es válido este resultado para la regresión no lineal?

### COEFICIENTE DE CORRELACIÓN PARA DATOS AGRUPADOS

- 14.58** Encontrar el coeficiente de correlación entre las estaturas y los pesos de 300 hombres adultos, presentadas en la tabla 14.25, una tabla de frecuencias.

Tabla 14.25

|                |         | Estaturas $X$ (in) |       |       |       |       |
|----------------|---------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
|                |         | 59-62              | 63-66 | 67-70 | 71-74 | 75-78 |
| Pesos $Y$ (lb) | 90-109  | 2                  | 1     |       |       |       |
|                | 110-129 | 7                  | 8     | 4     | 2     |       |
|                | 130-149 | 5                  | 15    | 22    | 7     | 1     |
|                | 150-169 | 2                  | 12    | 63    | 19    | 5     |
|                | 170-189 |                    | 7     | 28    | 32    | 12    |
|                | 190-209 |                    | 2     | 10    | 20    | 7     |
|                | 210-229 |                    |       | 1     | 4     | 2     |

- 14.59** *a)* Dados los datos del problema 14.58, encontrar la ecuación de regresión por mínimos cuadrados de  $Y$  sobre  $X$ .  
*b)* Estimar los pesos de los hombres cuyas estaturas son 64 y 72 in, respectivamente.

- 14.60** Dados los datos del problema 14.58, encontrar: *a)*  $s_{Y,X}$  y *b)*  $s_{X,Y}$ .

- 14.61** Establecer la fórmula (21) de este capítulo para el coeficiente de correlación de datos agrupados.

### CORRELACIÓN DE SERIES DE TIEMPO

- 14.62** En la tabla 14.26 se presenta el gasto anual promedio, por consumidor, en atención a la salud y el ingreso per cápita desde 1999 hasta 2004. Encontrar el coeficiente de correlación.

**Tabla 14.26**

| Año                             | 1999   | 2000   | 2001   | 2002   | 2003   | 2004   |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Costo de la atención a la salud | 1 959  | 2 066  | 2 182  | 2 350  | 2 416  | 2 574  |
| Ingreso per cápita              | 27 939 | 29 845 | 30 574 | 30 810 | 31 484 | 33 050 |

Fuente: Bureau of Laboral Statistics and U.S. Bureau of Economic Analysis.

- 14.63** En la tabla 14.27 se muestran temperatura y precipitación promedio durante el mes de julio en una ciudad, desde 2000 hasta 2006. Hallar el coeficiente de correlación.

**Tabla 14.27**

| Año                | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Temperatura (°F)   | 78.1 | 71.8 | 75.6 | 72.7 | 75.3 | 73.6 | 75.1 |
| Precipitación (in) | 6.23 | 3.64 | 3.42 | 2.84 | 1.83 | 2.82 | 4.04 |

### TEORÍA MUESTRAL DE LA CORRELACIÓN

- 14.64** En una muestra de tamaño 27, el coeficiente de correlación calculado es 0.40. ¿Puede concluirse a los niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01, que el coeficiente de correlación poblacional correspondiente sea distinto de cero?

- 14.65** En una muestra de tamaño 35, el coeficiente de correlación calculado es 0.50. ¿Puede concluirse al nivel de significancia 0.05 que el coeficiente de correlación poblacional sea: *a)* tan pequeño como  $\rho = 0.30$  y *b)* tan grande como  $\rho = 0.70$ ?

- 14.66** Encontrar los límites de confianza de: *a)* 95% y *b)* 99% para un coeficiente de correlación que se ha calculado que es 0.60 a partir de una muestra de tamaño 28.

- 14.67** Resolver el problema 14.66 si la muestra es de tamaño 52.

- 14.68** Encontrar los límites de confianza de 95% para el coeficiente de correlación calculado: *a)* en el problema 14.46 y *b)* en el problema 14.58.

- 14.69** Los coeficientes de correlación obtenidos a partir de dos muestras, una de tamaño 23 y otra de tamaño 28, fueron 0.80 y 0.95, respectivamente. ¿Puede concluirse a los niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01, que existe una diferencia significativa entre estos dos coeficientes?

**TEORÍA MUESTRAL DE LA REGRESIÓN**

- 14.70** Basándose en una muestra de tamaño 27, la ecuación de regresión de  $Y$  sobre  $X$  encontrada es  $Y = 25.0 + 2.00X$ . Si  $s_{Y,X} = 1.50$ ,  $s_{Y,X} = 1.50$ ,  $s_X = 3.00$  y  $\bar{X} = 7.50$ , encontrar los límites de confianza de *a)* 95% y *b)* 99% para el coeficiente de regresión.
- 14.71** Dados los datos del problema 14.70, al nivel de significancia 0.01, probar la hipótesis de que el coeficiente de regresión poblacional es: *a)* tan bajo como 1.70 y *b)* tan alto como 2.20.
- 14.72** Dados los datos del problema 14.70, encontrar los límites de confianza: *a)* de 95% y *b)* de 99% para  $Y$  cuando  $X = 6.00$ .
- 14.73** Dados los datos del problema 14.70, encontrar los límites de confianza: *a)* de 95% y *b)* de 99% para la media de todos los valores de  $Y$  correspondientes a  $X = 6.00$ .
- 14.74** Dados los datos del problema 14.46, encontrar los límites de confianza de 95% para: *a)* el coeficiente de regresión de  $Y$  sobre  $X$ , *b)* las presiones sanguíneas de todas las mujeres cuya edad es de 45 años y *c)* la media de las presiones sanguíneas de todas las mujeres de 45 años.

# CORRELACIÓN MÚLTIPLE Y CORRELACIÓN PARCIAL

# 15

## CORRELACIÓN MÚLTIPLE

Al grado de relación que existe entre tres o más variables se le conoce como *correlación múltiple*. Los principios fundamentales relacionados con los problemas de correlación múltiple son análogos a los de los problemas de correlación simple, tratados en el capítulo 14.

## NOTACIÓN EMPLEANDO SUBÍNDICES

Para generalizar a un número mayor de variables conviene adoptar una notación con subíndices.

Sean  $X_1, X_2, X_3, \dots$  las variables en consideración. Entonces, con  $X_{11}, X_{12}, X_{13}, \dots$  se denotan los valores que asume la variable  $X_1$ , y  $X_{21}, X_{22}, X_{23}, \dots$  denotan los valores que asume la variable  $X_2$ , y así sucesivamente. Con esta notación, una suma como  $X_{21} + X_{22} + X_{23} + \dots + X_{2N}$  puede expresarse como  $\sum_{j=1}^N X_{2j}$ ,  $\sum_j X_{2j}$  o simplemente  $\sum X_2$ . Cuando no puede haber lugar a ambigüedad, se usa la última notación. En este caso, la media de  $X_2$  se expresa:  $\bar{X}_2 = \sum X_{2j}/N$ .

## ECUACIONES DE REGRESIÓN Y PLANOS DE REGRESIÓN

Una *ecuación de regresión* es una ecuación que se utiliza para estimar una variable dependiente, por ejemplo  $X_1$ , a partir de las variables independientes  $X_2, X_3, \dots$  y se le llama *ecuación de regresión de  $X_1$  sobre  $X_2, X_3, \dots$* . Empleando la notación funcional esto puede expresarse brevemente como  $X_1 = F(X_2, X_3, \dots)$  (que se lee “ $X_1$  es una función de  $X_2, X_3$ , etcétera”).

En el caso de tres variables, la ecuación de regresión más simple de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$  tiene la forma siguiente:

$$X_1 = b_{1.23} + b_{12.3}X_2 + b_{13.2}X_3 \quad (I)$$

donde  $b_{1.23}$ ,  $b_{12.3}$  y  $b_{13.2}$  son constantes. Si en la ecuación (I)  $X_3$  se mantiene constante, la gráfica de  $X_1$  versus  $X_2$  es una línea recta cuya pendiente es  $b_{12.3}$ . Si  $X_2$  se mantiene constante, la gráfica de  $X_1$  versus  $X_3$  es una línea recta cuya pendiente es  $b_{13.2}$ . Como se ve, el subíndice después del punto indica la variable que se mantiene constante en cada caso.

Dado que  $X_1$  varía parcialmente debido a la variación de  $X_2$  y parcialmente debido a la variación de  $X_3$ , a  $b_{12.3}$  y  $b_{13.2}$  se les llama *coeficientes de regresión parcial* de  $X_1$  sobre  $X_2$  manteniendo  $X_3$  constante y de  $X_1$  sobre  $X_3$  manteniendo  $X_2$  constante, respectivamente.

A la ecuación (1) se le llama *ecuación de regresión lineal* de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$ . En un sistema rectangular tridimensional de coordenadas, esta ecuación representa un plano al que se le conoce como *plano de regresión*, que es una generalización de la recta de regresión para dos variables, considerada en el capítulo 13.

## ECUACIONES NORMALES PARA LOS PLANOS DE REGRESIÓN DE MÍNIMOS CUADRADOS

Así como existen rectas de regresión de mínimos cuadrados que aproximan un conjunto de puntos  $(X, Y)$  en un diagrama de dispersión bidimensional, también existen *planos de regresión de mínimos cuadrados* que se ajustan a un conjunto de  $N$  puntos  $(X_1, X_2, X_3)$  en un diagrama de dispersión tridimensional.

El plano de regresión de mínimos cuadrados de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$  tiene la ecuación (1), donde  $b_{1.23}$ ,  $b_{12.3}$  y  $b_{13.2}$  se determinan resolviendo simultáneamente las *ecuaciones normales*

$$\begin{aligned} \sum X_1 &= b_{1.23}N + b_{12.3} \sum X_2 + b_{13.2} \sum X_3 \\ \sum X_1 X_2 &= b_{1.23} \sum X_2 + b_{12.3} \sum X_2^2 + b_{13.2} \sum X_2 X_3 \\ \sum X_1 X_3 &= b_{1.23} \sum X_3 + b_{12.3} \sum X_2 X_3 + b_{13.2} \sum X_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Estas ecuaciones pueden obtenerse formalmente multiplicando, en cada caso, ambos lados de la ecuación (1) por 1, por  $X_2$  y por  $X_3$ , y sumando después ambos lados.

A menos que se especifique otra cosa, siempre que se haga referencia a una ecuación de regresión se entenderá que se está haciendo referencia a la ecuación de regresión de mínimos cuadrados.

Si  $x_1 = X_1 - \bar{X}_1$ ,  $x_2 = X_2 - \bar{X}_2$  y  $x_3 = X_3 - \bar{X}_3$ , la ecuación de regresión de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$  puede expresarse de manera más sencilla como

$$x_1 = b_{12.3}x_2 + b_{13.2}x_3 \quad (3)$$

donde  $b_{12.3}$  y  $b_{13.2}$  se obtienen resolviendo simultáneamente las ecuaciones

$$\begin{aligned} \sum x_1 x_2 &= b_{12.3} \sum x_2^2 + b_{13.2} \sum x_2 x_3 \\ \sum x_1 x_3 &= b_{12.3} \sum x_2 x_3 + b_{13.2} \sum x_3^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Estas ecuaciones, que son equivalentes a las ecuaciones normales (2), se obtienen formalmente multiplicando, de manera sucesiva, ambos lados de la ecuación (3) por  $x_2$  y por  $x_3$ , y después sumando ambos lados (ver problema 15.8).

## PLANOS DE REGRESIÓN Y COEFICIENTES DE CORRELACIÓN

Si los coeficientes de correlación entre las variables  $X_1$  y  $X_2$ ,  $X_1$  y  $X_3$ , y  $X_2$  y  $X_3$ , que se calcularon en el capítulo 14, se denotan respectivamente  $r_{12}$ ,  $r_{13}$  y  $r_{23}$  (también llamados *coeficientes de correlación de orden cero*), entonces la ecuación del plano de regresión de mínimos cuadrados tiene la ecuación

$$\frac{x_1}{s_1} = \left( \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2} \right) \frac{x_2}{s_2} + \left( \frac{r_{13} - r_{12}r_{23}}{1 - r_{23}^2} \right) \frac{x_3}{s_3} \quad (5)$$

donde  $x_1 = X_1 - \bar{X}_1$ ,  $x_2 = X_2 - \bar{X}_2$  y  $x_3 = X_3 - \bar{X}_3$ , y donde  $s_1$ ,  $s_2$  y  $s_3$  son, respectivamente, las desviaciones estándar de  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$  (ver problema 15.9).

Obsérvese que si la variable  $X_3$  no existe y si  $X_1 = Y$  y  $X_2 = X$  entonces la ecuación (5) se reduce a la ecuación (25) del capítulo 14.

## ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN

Mediante una obvia generalización de la ecuación (8) del capítulo 14 se define el *error estándar de estimación* de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$  como

$$s_{1.23} = \sqrt{\frac{\sum(X_1 - X_{1,\text{est}})^2}{N}} \quad (6)$$

donde  $X_{1,\text{est}}$  indica los valores estimados de  $X_1$  obtenidos con las ecuaciones de regresión (1) o (5).

El error estándar de estimación también se puede calcular en términos de los coeficientes de correlación  $r_{12}$ ,  $r_{13}$  y  $r_{23}$ , empleando la fórmula

$$s_{1.23} = s_1 \sqrt{\frac{1 - r_{12}^2 - r_{13}^2 - r_{23}^2 + 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2}} \quad (7)$$

La interpretación muestral del error estándar de estimación para dos variables, dada en la página 313 para el caso en el que  $N$  es grande, puede extenderse a tres dimensiones reemplazando las rectas paralelas a la recta de regresión por planos paralelos al plano de regresión. La fórmula  $\hat{s}_{1.23} = \sqrt{N/(N-3)}s_{1.23}$  proporciona una mejor estimación del error estándar de estimación poblacional.

## COEFICIENTE DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE

El coeficiente de correlación múltiple se define mediante una extensión de la ecuación (12) o (14) del capítulo 14. En el caso de dos variables independientes, por ejemplo, el *coeficiente de correlación múltiple* está dado por

$$R_{1.23} = \sqrt{1 - \frac{s_{1.23}^2}{s_1^2}} \quad (8)$$

donde  $s_1$  es la desviación estándar de la variable  $X_1$ , y  $s_{1.23}$  está dado por la ecuación (6) o por la ecuación (7). La cantidad  $R_{1.23}^2$  se conoce como *coeficiente de determinación múltiple*.

Cuando se emplea una ecuación de regresión lineal, al coeficiente de correlación múltiple se le llama *coeficiente de correlación lineal múltiple*. A menos que se especifique otra cosa, el término correlación múltiple se empleará para correlación lineal múltiple.

La ecuación (8) también puede expresarse en términos de  $r_{12}$ ,  $r_{13}$  y  $r_{23}$  como

$$R_{1.23} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2}} \quad (9)$$

El valor de un coeficiente de correlación múltiple, como  $R_{1.23}$ , está entre 0 y 1, inclusive. Cuanto más cerca esté de 1, mejor es la relación lineal entre las variables. Cuanto más cerca esté de 0, peor será la relación lineal entre las variables. Si un coeficiente de correlación múltiple es 1, a esa correlación se le llama correlación *perfecta*. Aunque un coeficiente de correlación sea 0, esto indica que no hay relación lineal entre las variables, pero puede que exista una *relación no lineal*.

## CAMBIO DE LA VARIABLE DEPENDIENTE

Los resultados anteriores son válidos cuando  $X_1$  se considera la variable dependiente. Pero si en lugar de  $X_1$  quiere considerarse a  $X_3$  (por ejemplo) como la variable dependiente, lo único que hay que hacer es sustituir, en las fórmulas

ya obtenidas, el subíndice 1 por el subíndice 3 y el subíndice 3 por el subíndice 1. Por ejemplo, la ecuación de regresión de  $X_3$  sobre  $X_1$  y  $X_2$  es

$$\frac{x_3}{s_3} = \left( \frac{r_{23} - r_{13}r_{12}}{1 - r_{12}^2} \right) \frac{x_2}{s_2} + \left( \frac{r_{13} - r_{23}r_{12}}{1 - r_{12}^2} \right) \frac{x_1}{s_1} \quad (10)$$

de acuerdo con la ecuación (5) y empleando las igualdades  $r_{32} = r_{23}$ ,  $r_{31} = r_{13}$  y  $r_{21} = r_{12}$ .

## GENERALIZACIONES A MÁS DE TRES VARIABLES

Estas generalizaciones se obtienen por analogía con los resultados anteriores. Por ejemplo, la ecuación de regresión lineal de  $X_1$  sobre  $X_2$ ,  $X_3$  y  $X_4$  se expresa

$$X_1 = b_{1.234} + b_{12.34}X_2 + b_{13.24}X_3 + b_{14.23}X_4 \quad (11)$$

y representa un *hiperplano en el espacio de cuatro dimensiones*. Multiplicando sucesivamente ambos lados de la ecuación (11) por 1,  $X_2$ ,  $X_3$  y  $X_4$  y después sumando ambos lados se obtienen las ecuaciones normales con las que se determina  $b_{1.234}$ ,  $b_{12.34}$ ,  $b_{13.24}$  y  $b_{14.23}$ ; sustituyendo sus valores en la ecuación (11) se obtiene la *ecuación de regresión de mínimos cuadrados de  $X_1$  sobre  $X_2$ ,  $X_3$  y  $X_4$* . Esta ecuación de regresión de mínimos cuadrados se puede expresar en forma similar a la de la ecuación (5). (Ver problema 15.41.)

## CORRELACIÓN PARCIAL

También es importante medir la correlación entre una variable dependiente y determinada variable independiente cuando todas las demás variables permanecen constantes; es decir, cuando se eliminan los efectos de todas las demás variables. Esto se logra definiendo un *coeficiente de correlación parcial*, como la ecuación (12) del capítulo 14, salvo que deberán considerarse las variaciones explicadas y no explicadas que surgen con esa determinada variable independiente y sin ella.

Si  $r_{12.3}$  denota el coeficiente de correlación parcial entre  $X_1$  y  $X_2$  cuando  $X_3$  permanece constante, se encuentra que

$$r_{12.3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)}} \quad (12)$$

De manera similar, si  $r_{12.34}$  denota el coeficiente de correlación parcial entre  $X_1$  y  $X_2$  cuando  $X_3$  y  $X_4$  permanecen constantes, entonces

$$r_{12.34} = \frac{r_{12.4} - r_{13.4}r_{23.4}}{\sqrt{(1 - r_{13.4}^2)(1 - r_{23.4}^2)}} = \frac{r_{12.3} - r_{14.3}r_{24.3}}{\sqrt{(1 - r_{14.3}^2)(1 - r_{24.3}^2)}} \quad (13)$$

Estos resultados son útiles, pues mediante ellos puede hacerse que cualquier coeficiente de correlación parcial dependa finalmente de los coeficientes de correlación  $r_{12}$ ,  $r_{23}$ , etc. (es decir, de los *coeficientes de correlación de orden cero*).

Se vio que en el caso de dos variables,  $X$  y  $Y$ , si las ecuaciones de las dos rectas de regresión son  $Y = a_0 + a_1X$  y  $X = b_0 + b_1Y$ , se tiene que  $r^2 = a_1b_1$  (ver problema 14.22). Este resultado puede generalizarse. Por ejemplo, si

$$X_1 = b_{1.234} + b_{12.34}X_2 + b_{13.24}X_3 + b_{14.23}X_4 \quad (14)$$

$$\text{y} \quad X_4 = b_{4.123} + b_{41.23}X_1 + b_{42.13}X_2 + b_{43.12}X_3 \quad (15)$$

son, respectivamente, las ecuaciones de regresión lineal de  $X_1$  sobre  $X_2, X_3$  y  $X_4$  y de  $X_4$  sobre  $X_1, X_2$  y  $X_3$ , entonces

$$r_{14.23}^2 = b_{14.23}b_{41.23} \quad (16)$$

(ver problema 15.18). Esta fórmula puede tomarse como punto de partida para una definición de los coeficientes de correlación lineal parcial.

## RELACIONES ENTRE COEFICIENTES DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE Y COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PARCIAL

Se pueden encontrar resultados interesantes que relacionan los coeficientes de correlación múltiple. Por ejemplo, se encuentra que

$$1 - R_{1.23}^2 = (1 - r_{12}^2)(1 - r_{13.2}^2) \quad (17)$$

$$1 - R_{1.234}^2 = (1 - r_{12}^2)(1 - r_{13.2}^2)(1 - r_{14.23}^2) \quad (18)$$

Las generalizaciones de estos resultados son fáciles de efectuar.

## REGRESIÓN MÚLTIPLE NO LINEAL

Los resultados anteriores para la regresión lineal múltiple se pueden extender a la regresión no lineal múltiple. Los coeficientes de correlación parcial y de correlación múltiple pueden definirse mediante métodos similares a los proporcionados antes.

## PROBLEMAS RESUELTOS

### ECUACIONES DE REGRESIÓN CON TRES VARIABLES

- 15.1** Usando la notación adecuada mediante subíndices, dar la ecuación de regresión de: a)  $X_2$  sobre  $X_1$  y  $X_3$ ; b)  $X_3$  sobre  $X_1, X_2$  y  $X_4$ , y c)  $X_5$  sobre  $X_1, X_2, X_3$  y  $X_4$ .

#### SOLUCIÓN

- a)  $X_2 = b_{2.13} + b_{21.3}X_1 + b_{23.1}X_3$
- b)  $X_3 = b_{3.124} + b_{31.24}X_1 + b_{32.14}X_2 + b_{34.12}X_4$
- c)  $X_5 = b_{5.1234} + b_{51.234}X_1 + b_{52.134}X_2 + b_{53.124}X_3 + b_{54.123}X_4$

- 15.2** Dar las ecuaciones normales correspondientes a las ecuaciones a)  $X_3 = b_{3.12} + b_{31.2}X_1 + b_{32.1}X_2$  y b)  $X_1 = b_{1.234} + b_{12.34}X_2 + b_{13.24}X_3 + b_{14.23}X_4$ .

#### SOLUCIÓN

- a) La ecuación se multiplica, sucesivamente, por 1,  $X_1$  y  $X_2$  y se suma a ambos lados. Las ecuaciones normales son

$$\begin{aligned} \sum X_3 &= b_{3.12}N + b_{31.2}X_1 + b_{32.1}\sum X_2 \\ \sum X_1X_3 &= b_{3.12}\sum X_1 + b_{31.2}\sum X_1^2 + b_{32.1}\sum X_1X_2 \\ \sum X_2X_3 &= b_{3.12}\sum X_2 + b_{31.2}\sum X_1X_2 + b_{32.1}\sum X_2^2 \end{aligned}$$

- b) La ecuación se multiplica, sucesivamente, por 1,  $X_2$ ,  $X_3$  y  $X_4$  y se suma a ambos lados. Las ecuaciones normales son

$$\begin{aligned}\sum X_1 &= b_{1.234}N + b_{12.34}\sum X_2 + b_{13.24}\sum X_3 + b_{14.23}\sum X_4 \\ \sum X_1 X_2 &= b_{1.234}\sum X_2 + b_{12.34}\sum X_2^2 + b_{13.24}\sum X_2 X_3 + b_{14.23}\sum X_2 X_4 \\ \sum X_1 X_3 &= b_{1.234}\sum X_3 + b_{12.34}\sum X_2 X_3 + b_{13.24}\sum X_3^2 + b_{14.23}\sum X_3 X_4 \\ \sum X_1 X_4 &= b_{1.234}\sum X_4 + b_{12.34}\sum X_2 X_4 + b_{13.24}\sum X_3 X_4 + b_{14.23}\sum X_4^2\end{aligned}$$

Obsérvese que éstas no son deducciones de las ecuaciones normales, sino únicamente una manera formal para recordarlas.

El número de ecuaciones normales es igual al número de constantes desconocidas.

- 15.3** En la tabla 15.1 se presentan los pesos  $X_1$  dados a la libra (lb) más cercana, las estaturas  $X_2$  a la pulgada (in) más cercana y las edades  $X_3$  al año más cercano de 12 niños.

- a) Encontrar la ecuación de regresión de mínimos cuadrados de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$ .
- b) Determinar los valores estimados de  $X_1$  a partir de los valores dados de  $X_2$  y  $X_3$ .
- c) Estimar el peso de un niño de 9 años que mide 54 in.
- d) Encontrar la ecuación de regresión de mínimos cuadrados empleando EXCEL, MINITAB, SPSS y STATISTIX.

**Tabla 15.1**

|                    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Peso ( $X_1$ )     | 64 | 71 | 53 | 67 | 55 | 58 | 77 | 57 | 56 | 51 | 76 | 68 |
| Estatura ( $X_2$ ) | 57 | 59 | 49 | 62 | 51 | 50 | 55 | 48 | 52 | 42 | 61 | 57 |
| Edad ( $X_3$ )     | 8  | 10 | 6  | 11 | 8  | 7  | 10 | 9  | 10 | 6  | 12 | 9  |

### SOLUCIÓN

- a) La ecuación de regresión de mínimos cuadrados de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$  puede expresarse como

$$X_1 = b_{1.23} + b_{12.3}X_2 + b_{13.2}X_3$$

Las ecuaciones normales de la ecuación de regresión de mínimos cuadrados son

$$\begin{aligned}\sum X_1 &= b_{1.23}N + b_{12.3}\sum X_2 + b_{13.2}\sum X_3 \\ \sum X_1 X_2 &= b_{1.23}\sum X_2 + b_{12.3}\sum X_2^2 + b_{13.2}\sum X_2 X_3 \\ \sum X_1 X_3 &= b_{1.23}\sum X_3 + b_{12.3}\sum X_2 X_3 + b_{13.2}\sum X_3^2\end{aligned}\tag{19}$$

Para calcular las sumas se elabora la tabla 15.2. (Aunque la columna con el encabezado  $X_1^2$  no se necesita en este momento, se ha incluido para referencias futuras.) Empleando la tabla 15.2, las ecuaciones normales (19) se convierten en

$$\begin{aligned}12b_{1.23} + 643b_{12.3} + 106b_{13.2} &= 753 \\ 643b_{1.23} + 34\ 843b_{12.3} + 5\ 779b_{13.2} &= 40\ 830 \\ 106b_{1.23} + 5\ 779b_{12.3} + 976b_{13.2} &= 6\ 796\end{aligned}\tag{20}$$

Resolviendo,  $b_{1,23} = 3.6512$ ,  $b_{12,3} = 0.8546$  y  $b_{13,2} = 1.5063$ , con lo que la ecuación de regresión es

$$X_1 = 3.6512 + 0.8546X_2 + 1.5063X_3 \quad \text{o} \quad X_1 = 3.65 + 0.855X_2 + 1.506X_3 \quad (21)$$

Tabla 15.2

| $X_1$               | $X_2$               | $X_3$               | $X_1^2$                  | $X_2^2$                  | $X_3^2$               | $X_1X_2$                  | $X_1X_3$                 | $X_2X_3$                 |
|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 64                  | 57                  | 8                   | 4 096                    | 3 249                    | 64                    | 3 648                     | 512                      | 456                      |
| 71                  | 59                  | 10                  | 5 041                    | 3 481                    | 100                   | 4 189                     | 710                      | 590                      |
| 53                  | 49                  | 6                   | 2 809                    | 2 401                    | 36                    | 2 597                     | 318                      | 294                      |
| 67                  | 62                  | 11                  | 4 489                    | 3 844                    | 121                   | 4 154                     | 737                      | 682                      |
| 55                  | 51                  | 8                   | 3 025                    | 2 601                    | 64                    | 2 805                     | 440                      | 408                      |
| 58                  | 50                  | 7                   | 3 364                    | 2 500                    | 49                    | 2 900                     | 406                      | 350                      |
| 77                  | 55                  | 10                  | 5 929                    | 3 025                    | 100                   | 4 235                     | 770                      | 550                      |
| 57                  | 48                  | 9                   | 3 249                    | 2 304                    | 81                    | 2 736                     | 513                      | 432                      |
| 56                  | 52                  | 10                  | 3 136                    | 2 704                    | 100                   | 2 912                     | 560                      | 520                      |
| 51                  | 42                  | 6                   | 2 601                    | 1 764                    | 36                    | 2 142                     | 306                      | 252                      |
| 76                  | 61                  | 12                  | 5 776                    | 3 721                    | 144                   | 4 636                     | 912                      | 732                      |
| 68                  | 57                  | 9                   | 4 624                    | 3 249                    | 81                    | 3 876                     | 612                      | 513                      |
| $\sum X_1$<br>= 753 | $\sum X_2$<br>= 643 | $\sum X_3$<br>= 106 | $\sum X_1^2$<br>= 48 139 | $\sum X_2^2$<br>= 34 843 | $\sum X_3^2$<br>= 976 | $\sum X_1X_2$<br>= 40 830 | $\sum X_1X_3$<br>= 6 796 | $\sum X_2X_3$<br>= 5 779 |

En el problema 15.6 se presenta otro método en el que se evita tener que resolver ecuaciones simultáneas.

- b) Sustituyendo, en la ecuación de regresión (21),  $X_2$  y  $X_3$  por sus valores se obtienen los valores estimados para  $X_1$ , que se denotan  $X_{1,\text{est}}$ . Por ejemplo, sustituyendo en la ecuación (21)  $X_2 = 57$  y  $X_3 = 8$ , se obtiene  $X_{1,\text{est}} = 64.414$ . De manera similar se obtienen los demás valores estimados para  $X_1$ . Estos valores se dan en la tabla 15.3 junto con los valores muestrales de  $X_1$ .

Tabla 15.3

|                    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $X_{1,\text{est}}$ | 64.414 | 69.136 | 54.564 | 73.206 | 59.286 | 56.925 | 65.717 | 58.229 | 63.153 | 48.582 | 73.857 | 65.920 |
| $X_1$              | 64     | 71     | 53     | 67     | 55     | 58     | 77     | 57     | 56     | 51     | 76     | 68     |

- c) Haciendo  $X_2 = 54$  y  $X_3 = 9$  en la ecuación (21), se obtiene el peso estimado  $X_{1,\text{est}} = 63.356$ , o 63 lb, aproximadamente.  
d) En la figura 15-1 se muestra parte de los resultados obtenidos con EXCEL. Para obtener estos resultados se emplea la secuencia **Tools** → **Data analysis** → **Regression**. En los resultados, los coeficientes  $b_{1,23} = 3.6512$ ,  $b_{12,3} = 0.8546$  y  $b_{13,2} = 1.5063$  aparecen en negritas.

Parte de los resultados de MINITAB es la ecuación de regresión  $X_1 = 3.7 + 0.855X_2 + 1.51X_3$ . Una vez ingresados los datos en C1–C3 se emplea la secuencia **Stat** → **Regression** → **Regression**.

En la figura 15-2 se presenta una parte de los resultados de SPSS. Los resultados se obtienen empleando la secuencia **Analyze** → **Regression** → **Linear**. En los resultados, los coeficientes  $b_{1,23} = 3.651$ ,  $b_{12,3} = 0.855$  y  $b_{13,2} = 1.506$  aparecen en la columna titulada **Unstandardized Coefficients**.

En la figura 15-3 se presenta parte de los resultados de STATISTIX. Los resultados se obtienen empleando la secuencia **Statistics** → **Linear models** → **Linear Regression**.

|    |    |    | RESUMEN                             |          |
|----|----|----|-------------------------------------|----------|
|    |    |    | <i>Estadísticos de la regresión</i> |          |
| 64 | 57 | 8  | R <sup>2</sup> múltiple             | 0.841757 |
| 71 | 59 | 10 | R <sup>2</sup> cuadrado             | 0.708554 |
| 53 | 49 | 6  | R <sup>2</sup> ajustado             | 0.643789 |
| 67 | 62 | 11 | Error estándar                      | 5.363215 |
| 55 | 51 | 8  | Observaciones                       | 12       |
| 58 | 50 | 7  |                                     |          |
| 77 | 55 | 10 |                                     |          |
| 57 | 48 | 9  |                                     |          |
| 56 | 52 | 10 |                                     |          |
| 51 | 42 | 6  |                                     |          |
| 76 | 61 | 12 |                                     |          |
| 68 | 57 | 9  |                                     |          |
|    |    |    | ANÁLISIS DE VARIANZA                |          |
|    |    |    | <i>df</i>                           |          |
|    |    |    | Regresión                           | 2        |
|    |    |    | Residuos                            | 9        |
|    |    |    | Total                               | 11       |
|    |    |    | <b>Coefficientes</b>                |          |
|    |    |    | Intersección                        | 3.651216 |
|    |    |    | X2                                  | 0.85461  |
|    |    |    | X3                                  | 1.506332 |

Figura 15-1 EXCEL, resultados para el problema 15.3d).

| Modelo        | Coeficientes <sup>a</sup>      |                |      | t     | Sig. |  |  |
|---------------|--------------------------------|----------------|------|-------|------|--|--|
|               | Coeficientes desestandarizados |                | Beta |       |      |  |  |
|               | B                              | Error estándar |      |       |      |  |  |
| 1 (Constante) | 3.651                          | 16.168         |      | .226  | .826 |  |  |
| X2            | .855                           | .452           | .565 | 1.892 | .091 |  |  |
| X3            | 1.506                          | 1.414          | .318 | 1.065 | .315 |  |  |

<sup>a</sup>Variable dependiente: X1

Figura 15-2 SPSS, resultados para el problema 15.3d).

Statistix 8.0

**Regresión lineal de mínimos cuadrados de X1 de bajo peso**

| Variables<br>predichas | Coeficiente | Error estándar | T    | P      | VIF |
|------------------------|-------------|----------------|------|--------|-----|
| Constante              | 3.65122     | 16.1678        | 0.23 | 0.8264 |     |
| X2                     | 0.85461     | 0.45166        | 1.89 | 0.0910 | 2.8 |
| X3                     | 1.50633     | 1.41427        | 1.07 | 0.3146 | 2.8 |

Figura 15-3 STATISTIX, resultados para el problema 15.3d).

Las soluciones del software son las mismas que las de las ecuaciones normales.

- 15.4** Dados los datos del problema 15.3, calcular las desviaciones estándar: a)  $s_1$ , b)  $s_2$  y c)  $s_3$ .

**SOLUCIÓN**

- a) La cantidad  $s_1$  es la desviación estándar de la variable  $X_1$ . Entonces, empleando la tabla 15.2 del problema 15.3 y los métodos del capítulo 4, se encuentra

$$s_1 = \sqrt{\frac{\sum X_1^2}{N} - \left(\frac{\sum X_1}{N}\right)^2} = \sqrt{\frac{48139}{12} - \left(\frac{753}{12}\right)^2} = 8.6035 \quad u \quad 8.6 \text{ lb}$$

$$b) s_2 = \sqrt{\frac{\sum X_2^2}{N} - \left(\frac{\sum X_2}{N}\right)^2} = \sqrt{\frac{34843}{12} - \left(\frac{643}{12}\right)^2} = 5.6930 \quad o \text{ bien} \quad 5.7 \text{ in}$$

$$c) s_3 = \sqrt{\frac{\sum X_3^2}{N} - \left(\frac{\sum X_3}{N}\right)^2} = \sqrt{\frac{976}{12} - \left(\frac{106}{12}\right)^2} = 1.8181 \quad o \text{ bien} \quad 1.8 \text{ años}$$

- 15.5** Dados los datos del problema 15.3, calcular: *a)*  $r_{12}$ , *b)*  $r_{13}$ , *c)*  $r_{23}$ . Calcular las tres correlaciones empleando EXCEL, MINITAB y STATISTIX.

### SOLUCIÓN

- a)* La cantidad  $r_{12}$  es el coeficiente de correlación lineal entre las variables  $X_1$  y  $X_2$ , ignorando a la variable  $X_3$ . Por lo tanto, empleando los métodos del capítulo 14, se tiene

$$\begin{aligned} r_{12} &= \frac{N \sum X_1 X_2 - (\sum X_1)(\sum X_2)}{\sqrt{[N \sum X_1^2 - (\sum X_1)^2][N \sum X_2^2 - (\sum X_2)^2]}} \\ &= \frac{(12)(40,830) - (753)(643)}{\sqrt{[(12)(48,139) - (753)^2][(12)(34,843) - (643)^2]}} = 0.8196 \quad \text{o bien} \quad 0.82 \end{aligned}$$

*b)* y *c)* Empleando las fórmulas correspondientes se obtiene  $r_{12} = 0.7698$ , o bien 0.77, y  $r_{23} = 0.7984$ , o bien 0.80.

- d)* Usando EXCEL se tiene:

| A  | B  | C  | D        | E                      |
|----|----|----|----------|------------------------|
| X1 | X2 | X3 | 0.819645 | =CORREL(A2:A13,B2:B13) |
| 64 | 57 | 8  | 0.769817 | =CORREL(A2:A13,C2:C13) |
| 71 | 59 | 10 | 0.798407 | =CORREL(B2:B13,C2:C13) |
| 53 | 49 | 6  |          |                        |
| 67 | 62 | 11 |          |                        |
| 55 | 51 | 8  |          |                        |
| 58 | 50 | 7  |          |                        |
| 77 | 55 | 10 |          |                        |
| 57 | 48 | 9  |          |                        |
| 56 | 52 | 10 |          |                        |
| 51 | 42 | 6  |          |                        |
| 76 | 61 | 12 |          |                        |
| 68 | 57 | 9  |          |                        |

Como se ve,  $r_{12}$  está en D1,  $r_{13}$  está en D2 y  $r_{23}$  está en D3. En E1, E2 y E3 aparecen las funciones de EXCEL empleadas para obtener los resultados.

Usando MINITAB, la secuencia **Stat → Basic Statistics → Correlation** da el resultado siguiente.

```
Correlaciones: X1, X2, X3
      X1          X2
X2    0.820
      0.001
      X3    0.770    0.798
      0.003    0.002
Cell Contents: Pearson correlation
               P-Value
```

La correlación  $r_{12}$  está en la intersección de X1 y X2 y es 0.820. El valor debajo de él, 0.001, es el valor  $p$  para probar que no hay correlación poblacional entre X1 y X2. Como este valor  $p$  es menor de 0.05, se rechaza la hipótesis nula de que no hay correlación poblacional entre la estatura (X2) y el peso (X1). Las demás correlaciones con sus valores  $p$  se leen de manera similar.

Empleando en SPSS la secuencia **Analyze** → **Correlate** → **Bivariate** da el siguiente resultado que se lee de manera similar al de MINITAB.

**Correlaciones**

|    |                        | X1     | X2     | X3     |
|----|------------------------|--------|--------|--------|
| X1 | Correlación de Pearson | 1      | .820** | .770** |
|    | Sig. (2 colas)         |        | .001   | .003   |
|    | N                      | 12     | 12     | 12     |
| X2 | Correlación de Pearson | .820** | 1      | .798** |
|    | Sig. (2 colas)         | .001   |        | .002   |
|    | N                      | 12     | 12     | 12     |
| X3 | Correlación de Pearson | .770** | .798** | 1      |
|    | Sig. (2 colas)         | .003   | .002   |        |
|    | N                      | 12     | 12     | 12     |

\*\*La correlación es significativa al nivel 0.01 (2 colas).

Empleando STATISTIX, la secuencia **Statstistics** → **Linear models** → **Correlation** da el resultado siguiente, que es similar al de los otros software.

```
Statistix 8.0
Correlations (Pearson)
      x1          x2
X2    0.8196
P-VALUE 0.0011
      x3          x2
X3    0.7698    0.7984
      0.0034    0.0018
```

Una vez más se ve la cantidad de tiempo que se ahorra con un software que realiza los cálculos para el usuario.

- 15.6** Repetir el problema 15.3a) empleando la ecuación (5) de este capítulo y los resultados de los problemas 15.4 y 15.5.

### SOLUCIÓN

Multiplicando ambos lados de la ecuación (5) por  $s_1$ , la ecuación de regresión de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$  es,

$$x_1 = \left( \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2} \right) \left( \frac{s_1}{s_2} \right) x_2 + \left( \frac{r_{13} - r_{12}r_{23}}{1 - r_{23}^2} \right) \left( \frac{s_1}{s_3} \right) x_3 \quad (22)$$

donde  $x_1 = X_1 - \bar{X}_1$ ,  $x_2 = X_2 - \bar{X}_2$  y  $x_3 = X_3 - \bar{X}_3$ . Empleando los resultados de los problemas 15.4 y 15.5, la ecuación (22) se convierte en

$$x_1 = 0.8546x_2 + 1.5063x_3$$

Dado que  $\bar{X}_1 = \frac{\sum X_1}{N} = \frac{753}{12} = 62.750$        $\bar{X}_2 = \frac{\sum X_2}{N} = 53.583$       y       $\bar{X}_3 = 8.833$

(de acuerdo con la tabla 15.2 del problema 15.3), la ecuación buscada puede expresarse como

$$X_1 - 62.750 = 0.8546(X_2 - 53.583) + 1.506(X_3 - 8.833)$$

que coincide con el resultado del problema 15.3a).

- 15.7** Dados los datos del problema 15.3, determinar: *a)* el promedio de incremento en el peso por pulgada de incremento en la altura de niños de una misma edad, y *b)* el promedio de incremento en el peso por año en niños de una misma estatura.

### SOLUCIÓN

De acuerdo con la ecuación de regresión obtenida en el problema 15.3*a*) o 15.6, se encuentra que la respuesta para *a*) es 0.8546, o bien 0.9 lb, y la respuesta para *b*) es 1.5063, o bien 1.5 lb, aproximadamente.

- 15.8** Mostrar que las ecuaciones (3) y (4) de este capítulo se obtienen de las ecuaciones (1) y (2).

### SOLUCIÓN

De acuerdo con la primera de las ecuaciones (2), dividiendo ambos lados entre  $N$  se tiene

$$\bar{X}_1 = b_{1,23} + b_{12,3}\bar{X}_2 + b_{13,2}\bar{X}_3 \quad (23)$$

Restando la ecuación (23) de la ecuación (1) se obtiene

$$X_1 - \bar{X}_1 = b_{12,3}(X_2 - \bar{X}_2) + b_{13,2}(X_3 - \bar{X}_3)$$

o bien

$$x_1 = b_{12,3}x_2 + b_{13,2}x_3 \quad (24)$$

que es la ecuación (3).

Sean  $X_1 = x_1 + \bar{X}_1$ ,  $X_2 = x_2 + \bar{X}_2$  y  $X_3 = x_3 + \bar{X}_3$  en la segunda y tercera ecuación de las ecuaciones (2). Entonces, después de algunas simplificaciones algebraicas y empleando los resultados  $\sum x_1 = \sum x_2 = \sum x_3 = 0$ , estas ecuaciones se convierten en

$$\sum x_1 x_2 = b_{12,3} \sum x_2^2 + b_{13,2} \sum x_2 x_3 + N\bar{X}_2[b_{1,23} + b_{12,3}\bar{X}_2 + b_{13,2}\bar{X}_3 - \bar{X}_1] \quad (25)$$

$$\sum x_1 x_3 = b_{12,3} \sum x_2 x_3 + b_{13,2} \sum x_3^2 + N\bar{X}_3[b_{1,23} + b_{12,3}\bar{X}_2 + b_{13,2}\bar{X}_3 - \bar{X}_1] \quad (26)$$

las cuales se reducen a las ecuaciones (4) debido a que las cantidades que se encuentran entre corchetes en el lado derecho de las ecuaciones (25) y (26) son cero de acuerdo con la ecuación (1).

- 15.9** Deducir la ecuación (5) que se repite a continuación:

$$\frac{x_1}{s_1} = \left( \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2} \right) \frac{x_2}{s_2} + \left( \frac{r_{13} - r_{12}r_{23}}{1 - r_{23}^2} \right) \frac{x_3}{s_3} \quad (5)$$

### SOLUCIÓN

De acuerdo con las ecuaciones (25) y (26)

$$\begin{aligned} b_{12,3} \sum x_2^2 + b_{13,2} \sum x_2 x_3 &= \sum x_1 x_2 \\ b_{12,3} \sum x_2 x_3 + b_{13,2} \sum x_3^2 &= \sum x_1 x_3 \end{aligned} \quad (27)$$

Como

$$s_2^2 = \frac{\sum x_2^2}{N} \quad \text{y} \quad s_3^2 = \frac{\sum x_3^2}{N}$$

$\sum x_2^2 = Ns_2^2$  y  $\sum x_3^2 = Ns_3^2$ . Dado que

$$r_{23} = \frac{\sum x_2 x_3}{\sqrt{(\sum x_2^2)(\sum x_3^2)}} = \frac{\sum x_2 x_3}{Ns_2 s_3}$$

$\sum x_2 x_3 = Ns_2 s_3 r_{23}$ . De igual manera,  $\sum x_1 x_2 = Ns_1 s_2 r_{12}$  y  $\sum x_1 x_3 = Ns_1 s_3 r_{13}$ .

Sustituyendo en la ecuación (27) y simplificando, se encuentra

$$\begin{aligned} b_{12.3}s_2 + b_{13.2}s_3r_{23} &= s_1r_{12} \\ b_{12.3}s_2r_{23} + b_{13.2}s_3 &= s_1r_{13} \end{aligned} \quad (28)$$

Resolviendo las ecuaciones simultáneas (28), se tiene

$$b_{12.3} = \left( \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2} \right) \left( \frac{s_1}{s_2} \right) \quad \text{y} \quad b_{13.2} = \left( \frac{r_{13} - r_{12}r_{23}}{1 - r_{23}^2} \right) \left( \frac{s_1}{s_3} \right)$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación  $x_1 = b_{12.3}x_2 + b_{13.2}x_3$  [ecuación (24)] y dividiendo entre  $s_1$  se llega al resultado buscado.

## ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN

- 15.10** Dados los datos del problema 15.3, calcular el error estándar de estimación de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$ .

### SOLUCIÓN

De acuerdo con la tabla 15.3 del problema 15.3, se tiene

$$\begin{aligned} s_{1.23} &= \sqrt{\frac{\sum(X_1 - X_{1,\text{est}})^2}{N}} \\ &= \sqrt{\frac{(64 - 64.414)^2 + (71 - 69.136)^2 + \dots + (68 - 65.920)^2}{12}} = 4.6447 \quad \text{o bien} \quad 4.6 \text{ lb} \end{aligned}$$

El error estándar de estimación poblacional se estima mediante  $\hat{s}_{1.23} = \sqrt{N/(N-3)}s_{1.23} = 5.3$  lb en este caso.

- 15.11** Para obtener el resultado del problema 15.10, utilizar

$$s_{12.3} = s_1 \sqrt{\frac{1 - r_{12}^2 - r_{13}^2 - r_{23}^2 + 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2}}$$

### SOLUCIÓN

De acuerdo con los problemas 15.4a) y 15.5 se tiene

$$s_{1.23} = 8.6035 \sqrt{\frac{1 - (0.8196)^2 - (0.7698)^2 - (0.7984)^2 + 2(0.8196)(0.7698)(0.7984)}{1 - (0.7984)^2}} = 4.6 \text{ lb}$$

Obsérvese que con el método empleado en este problema se obtiene el error estándar de estimación sin necesidad de usar la ecuación de regresión.

## COEFICIENTE DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE

- 15.12** Dados los datos del problema 15.3, calcular el coeficiente de correlación lineal múltiple de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$ . Consultar los resultados de MINITAB dados en la solución del problema 15.3 para determinar el coeficiente de correlación lineal múltiple.

## SOLUCIÓN

### Primer método

De acuerdo con los resultados de los problemas 15.4a) y 15.10 se tiene

$$R_{1.23} = \sqrt{1 - \frac{s_{1.23}^2}{s_1^2}} = \sqrt{1 - \frac{(4.6447)^2}{(8.6035)^2}} = 0.8418$$

### Segundo método

De acuerdo con los resultados del problema 15.5 se tiene

$$R_{1.23} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2}} = \sqrt{\frac{(0.8196)^2 + (0.7698)^2 - 2(0.8196)(0.7698)(0.7984)}{1 - (0.7984)^2}} = 0.8418$$

Obsérvese que el coeficiente de correlación múltiple,  $R_{1.23}$ , es mayor que cualquiera de los coeficientes  $r_{12}$  o  $r_{13}$  (ver problema 15.5). Esto siempre es así y en realidad es de esperar, ya que al tomar en cuenta más variables independientes relevantes, se llega a una relación mejor entre las variables.

El fragmento siguiente de los resultados de MINITAB en la solución del problema 15.3, **R-Sq = 70.9%**, da el cuadrado del coeficiente de correlación lineal múltiple. El coeficiente de correlación lineal múltiple es la raíz cuadrada de esta cantidad. Es decir,  $R_{1.23} = \sqrt{0.709} = 0.842$ .

- 15.13** Dados los datos del problema 15.3, calcular el coeficiente de determinación múltiple de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$ . Consultar los resultados de MINITAB dados en la solución del problema 15.3 para determinar el coeficiente de determinación múltiple.

## SOLUCIÓN

El coeficiente de determinación múltiple de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$  es

$$R_{1.23}^2 = (0.8418)^2 = 0.7086$$

empleando el problema 15.12. Por lo tanto, cerca de 71% de la variación total en  $X_1$  se explica usando la ecuación de regresión.

El coeficiente de determinación múltiple se lee directamente en los resultados de MINITAB dados en la solución del problema 15.3, y es **R-Sq = 70.9%**.

- 15.14** Según los datos del problema 15.3, calcular: a)  $R_{2.13}$  y b)  $R_{3.12}$  y comparar estos valores con el valor de  $R_{1.23}$ .

## SOLUCIÓN

$$a) R_{2.13} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{13}^2}} = \sqrt{\frac{(0.8196)^2 + (0.7984)^2 - 2(0.8196)(0.7698)(0.7984)}{1 - (0.7698)^2}} = 0.8606$$

$$b) R_{3.12} = \sqrt{\frac{r_{13}^2 + r_{12}^2 - 2r_{13}r_{12}r_{23}}{1 - r_{12}^2}} = \sqrt{\frac{(0.7698)^2 + (0.8196)^2 - 2(0.8196)(0.7698)(0.7984)}{1 - (0.8196)^2}} = 0.8234$$

Este problema ilustra el hecho de que, en general,  $R_{2.13}$ ,  $R_{3.12}$  y  $R_{1.23}$  no son necesariamente iguales, como se puede ver en la comparación con el problema 15.12.

**15.15** Si  $R_{1.23} = 1$ , probar que: a)  $R_{2.13} = 1$  y b)  $R_{3.12} = 1$ .

### SOLUCIÓN

$$R_{1.23} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2}} \quad (29)$$

$$\text{y} \quad R_{2.13} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{13}^2}} \quad (30)$$

- a) Haciendo en la ecuación (29),  $R_{1.23} = 1$  y elevando al cuadrado ambos lados,  $r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23} = 1 - r_{23}^2$ . Entonces

$$r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23} = 1 - r_{13}^2 \quad \text{o bien} \quad \frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{13}^2} = 1$$

Es decir,  $R_{2.13}^2 = 1$  y  $R_{2.13} = 1$ , ya que el coeficiente de correlación múltiple se considera no negativo.

- b)  $R_{3.12} = 1$  sigue del inciso a) intercambiando los subíndices 2 y 3 en la fórmula para  $R_{2.13} = 1$ .

**15.16** Si  $R_{1.23} = 0$ , ¿implica necesariamente que  $R_{2.13} = 0$ ?

### SOLUCIÓN

De acuerdo con la ecuación (29),  $R_{2.13} = 0$  si y sólo si

$$r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23} = 0 \quad \text{o bien} \quad 2r_{12}r_{13}r_{23} = r_{12}^2 + r_{13}^2$$

Entonces, de acuerdo con la ecuación (30) se tienen

$$R_{2.13} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 - (r_{12}^2 + r_{13}^2)}{1 - r_{13}^2}} = \sqrt{\frac{r_{23}^2 - r_{13}^2}{1 - r_{13}^2}}$$

lo cual no es necesariamente igual a cero.

## CORRELACIÓN PARCIAL

**15.17** Dados los datos del problema 15.3, calcular los coeficientes de correlación lineal parcial  $r_{12.3}$ ,  $r_{13.2}$  y  $r_{23.1}$ . También determinar estos coeficientes empleando STATISTIX.

### SOLUCIÓN

$$r_{12.3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)}} \quad r_{13.2} = \frac{r_{13} - r_{12}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{12}^2)(1 - r_{23}^2)}} \quad r_{23.1} = \frac{r_{23} - r_{12}r_{13}}{\sqrt{(1 - r_{12}^2)(1 - r_{13}^2)}}$$

Empleando los resultados del problema 15.5, se encuentra que  $r_{12.3} = 0.5334$ ,  $r_{13.2} = 0.3346$  y  $r_{23.1} = 0.4580$ . Se concluye que entre los niños de una misma edad, el coeficiente de correlación entre peso y estatura es 0.53; entre los niños de una misma estatura el coeficiente de correlación entre peso y edad es 0.33. Como estos resultados se basan en una muestra pequeña, de sólo 12 niños, no son tan confiables como si se obtuviesen de una muestra mayor.

Con la secuencia **Statistics** → **Linear models** → **Partial Correlations** se obtiene el cuadro de diálogo de la figura 15-4. Este cuadro se llena como se indica en la figura. Se busca  $r_{12.3}$ . El resultado es el siguiente.

Statistix 8.

Partial Correlations with X1  
Controlled for X3

X2

0.5335

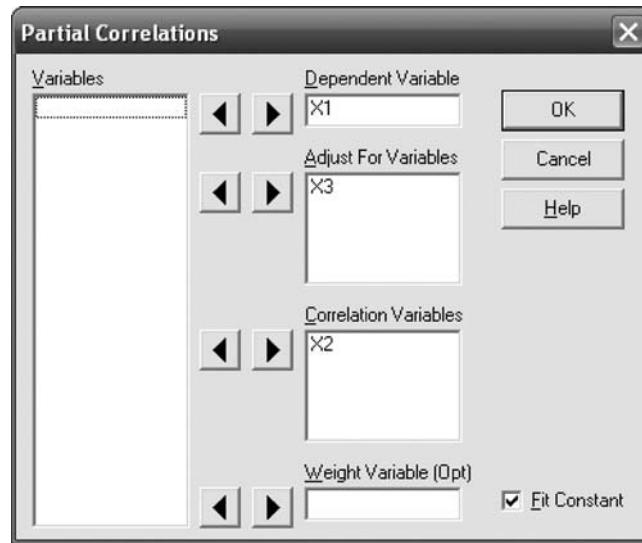


Figura 15-4 STATISTIX, cuadro de diálogo para el problema 15.17.

STATISTIX puede emplearse de manera similar para hallar las otras dos correlaciones parciales buscadas.

- 15.18** Si  $X_1 = b_{1.23} + b_{12.3}X_2 + b_{13.2}X_3$  y  $X_3 = b_{3.12} + b_{32.1}X_2 + b_{31.2}X_1$  son las ecuaciones de regresión de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$ , y de  $X_3$  sobre  $X_2$  y  $X_1$ , respectivamente, probar que  $r_{13.2}^2 = b_{13.2}b_{31.2}$ .

### SOLUCIÓN

La ecuación de regresión de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$  puede expresarse como [ver ecuación (5) de este capítulo]

$$X_1 = \bar{X}_1 = \left( \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2} \right) \left( \frac{s_1}{s_2} \right) (X_2 - \bar{X}_2) + \left( \frac{r_{13} - r_{12}r_{23}}{1 - r_{23}^2} \right) \left( \frac{s_1}{s_3} \right) (X_3 - \bar{X}_3) \quad (31)$$

La ecuación de regresión de  $X_3$  sobre  $X_2$  y  $X_1$  puede expresarse como [ver ecuación (10)]

$$X_3 - \bar{X}_3 = \left( \frac{r_{23} - r_{13}r_{12}}{1 - r_{12}^2} \right) \left( \frac{s_3}{s_2} \right) (X_2 - \bar{X}_2) + \left( \frac{r_{13} - r_{23}r_{12}}{1 - r_{12}^2} \right) \left( \frac{s_3}{s_1} \right) (X_1 - \bar{X}_1) \quad (32)$$

De acuerdo con las ecuaciones (31) y (32), los coeficientes de  $X_3$  y  $X_1$  son, respectivamente,

$$b_{13.2} = \left( \frac{r_{13} - r_{12}r_{23}}{1 - r_{23}^2} \right) \left( \frac{s_1}{s_3} \right) \quad \text{y} \quad b_{31.2} = \left( \frac{r_{13} - r_{23}r_{12}}{1 - r_{12}^2} \right) \left( \frac{s_3}{s_1} \right)$$

Por lo tanto  $b_{13.2}b_{31.2} = \frac{(r_{13} - r_{12}r_{23})^2}{(1 - r_{23}^2)(1 - r_{12}^2)} = r_{13.2}^2$

- 15.19** Si  $r_{12.3} = 0$ , probar que

$$a) \quad r_{13.2} = r_{13} \sqrt{\frac{1 - r_{23}^2}{1 - r_{12}^2}} \quad b) \quad r_{23.1} = r_{23} \sqrt{\frac{1 - r_{13}^2}{1 - r_{12}^2}}$$

### SOLUCIÓN

Si

$$r_{12.3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)}} = 0$$

se tiene que  $r_{12} = r_{13}r_{23}$ .

$$a) \quad r_{13.2} = \frac{r_{13} - r_{12}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{12}^2)(1 - r_{23}^2)}} = \frac{r_{13} - (r_{13}r_{23})r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{12}^2)(1 - r_{23}^2)}} = \frac{r_{13}(1 - r_{23}^2)}{\sqrt{(1 - r_{12}^2)(1 - r_{23}^2)}} = r_{13}\sqrt{\frac{1 - r_{23}^2}{1 - r_{12}^2}}$$

b) Se intercambian los subíndices 1 y 2 en el resultado del inciso a).

## CORRELACIÓN MÚLTIPLE Y CORRELACIÓN PARCIAL PARA CUATRO O MÁS VARIABLES

- 15.20** Un examen de ingreso a la universidad consta de tres partes: matemáticas, español y conocimientos generales. Para determinar si los resultados de este examen sirven para predecir el desempeño en el curso de estadística, se recolectan y se analizan los datos de una muestra de 200 estudiantes. Sea

$X_1$  = calificación en el curso de estadística       $X_3$  = calificación en el examen de español

$X_2$  = calificación en el examen de matemáticas       $X_4$  = calificación en el examen de conocimientos generales

Se obtienen los valores siguientes:

$$\begin{array}{llll} \bar{X}_1 = 75 & s_1 = 10 & \bar{X}_2 = 24 & s_2 = 5 \\ \bar{X}_3 = 15 & s_3 = 3 & \bar{X}_4 = 36 & s_4 = 6 \\ r_{12} = 0.90 & r_{13} = 0.75 & r_{14} = 0.80 & r_{23} = 0.70 & r_{24} = 0.70 & r_{34} = 0.85 \end{array}$$

Encontrar la ecuación de regresión de mínimos cuadrados de  $X_1$  sobre  $X_2$ ,  $X_3$  y  $X_4$ .

### SOLUCIÓN

Generalizando el resultado del problema 15.8, la ecuación de regresión de mínimos cuadrados de  $X_1$  sobre  $X_2$ ,  $X_3$  y  $X_4$  puede expresarse como

$$x_1 = b_{12.34}x_2 + b_{13.24}x_3 + b_{14.23}x_4 \quad (33)$$

donde  $b_{12.34}$ ,  $b_{13.24}$  y  $b_{14.23}$  se obtienen a partir de las ecuaciones normales

$$\begin{aligned} \sum x_1 x_2 &= b_{12.34} \sum x_2^2 + b_{13.24} \sum x_2 x_3 + b_{14.23} \sum x_2 x_4 \\ \sum x_1 x_3 &= b_{12.34} \sum x_2 x_3 + b_{13.24} \sum x_3^2 + b_{14.23} \sum x_3 x_4 \\ \sum x_1 x_4 &= b_{12.34} \sum x_2 x_4 + b_{13.24} \sum x_3 x_4 + b_{14.23} \sum x_4^2 \end{aligned} \quad (34)$$

y donde  $x_1 = X_1 - \bar{X}_1$ ,  $x_2 = X_2 - \bar{X}_2$ ,  $x_3 = X_3 - \bar{X}_3$  y  $x_4 = X_4 - \bar{X}_4$ .

A partir de los datos dados, se encuentra

$$\begin{array}{lll} \sum x_2^2 - Ns_2^2 = 5\,000 & \sum x_1 x_2 = Ns_1 s_2 r_{12} = 9\,000 & \sum x_2 x_3 = Ns_1 s_3 r_{23} = 2\,100 \\ \sum x_3^2 - Ns_3^2 = 1\,800 & \sum x_1 x_3 = Ns_1 s_3 r_{13} = 4\,500 & \sum x_2 x_4 = Ns_2 s_4 r_{24} = 4\,200 \\ \sum x_4^2 - Ns_4^2 = 7\,200 & \sum x_1 x_4 = Ns_1 s_4 r_{14} = 9\,600 & \sum x_3 x_4 = Ns_3 s_4 r_{34} = 3\,060 \end{array}$$

Sustituyendo estos valores en las ecuaciones (34) y resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtiene

$$b_{12.34} = 1.3333 \quad b_{13.24} = 0.0000 \quad b_{14.23} = 0.5556 \quad (35)$$

que al sustituirlos en la ecuación (33) dan la ecuación de regresión buscada

$$x_1 = 1.3333x_2 + 0.0000x_3 + 0.5556x_4$$

o bien

$$X_1 - 75 = 1.3333(X_2 - 24) + 0.5556(X_4 - 27) \quad (36)$$

o bien

$$X_1 = 22.9999 + 1.3333X_2 + 0.5556X_4$$

La solución exacta de la ecuación (34) da  $b_{12.34} = \frac{4}{3}$ ,  $b_{13.24} = 0$  y  $b_{14.23} = \frac{5}{9}$ , de manera que la ecuación de regresión también se puede expresar como

$$X_1 = 23 + \frac{4}{3}X_2 + \frac{5}{9}X_4 \quad (37)$$

Es interesante observar que en la ecuación de regresión no aparecen las calificaciones de español,  $X_3$ . Esto no significa que los conocimientos de español no sean importantes para el desempeño en estadística, sino que significa que la necesidad del español, en lo que se refiere a la predicción de la calificación en estadística, queda ampliamente reflejada por las calificaciones obtenidas en los otros exámenes.

- 15.21** Dos estudiantes que aprobaron el examen de admisión del problema 15.20 obtuvieron, respectivamente, las calificaciones siguientes: *a)* 30 en matemáticas, 18 en español y 32 en conocimientos generales y *b)* 18 en matemáticas, 20 en español y 36 en conocimientos generales. ¿Cuál será su calificación en estadística?

### SOLUCIÓN

- a)* Sustituyendo  $X_2 = 30$ ,  $X_3 = 18$  y  $X_4 = 32$  en la ecuación (37), la calificación en estadística será  $X_1 = 81$ .  
*b)* Procediendo como en el inciso *a)* con  $X_2 = 18$ ,  $X_3 = 20$  y  $X_4 = 36$ , se encuentra  $X_1 = 67$ .

- 15.22** Dados los datos del problema 15.20, encontrar los coeficientes de correlación parcial: *a)*  $r_{12.34}$ , *b)*  $r_{13.24}$  y *c)*  $r_{14.23}$ .

### SOLUCIÓN

$$a) \text{ y } b) \quad r_{12.4} = \frac{r_{12} - r_{14}r_{24}}{\sqrt{(1 - r_{14}^2)(1 - r_{24}^2)}} \quad r_{13.4} = \frac{r_{13} - r_{14}r_{34}}{\sqrt{(1 - r_{14}^2)(1 - r_{34}^2)}} \quad r_{23.4} = \frac{r_{23} - r_{24}r_{34}}{\sqrt{(1 - r_{24}^2)(1 - r_{34}^2)}}$$

Sustituyendo con los valores del problema 15.20, se obtiene  $r_{12.4} = 0.7935$ ,  $r_{13.4} = 0.2215$  y  $r_{23.4} = 0.2791$ . Por lo tanto,

$$r_{12.34} = \frac{r_{12.4} - r_{13.4}r_{23.4}}{\sqrt{(1 - r_{13.4}^2)(1 - r_{23.4}^2)}} = 0.7814 \quad \text{y} \quad r_{13.24} = \frac{r_{13.4} - r_{12.4}r_{23.4}}{\sqrt{(1 - r_{12.4}^2)(1 - r_{23.4}^2)}} = 0.0000$$

$$c) \quad r_{14.3} = \frac{r_{14} - r_{13}r_{34}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{34}^2)}} \quad r_{12.3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)}} \quad r_{24.3} = \frac{r_{24} - r_{23}r_{34}}{\sqrt{(1 - r_{23}^2)(1 - r_{34}^2)}}$$

Sustituyendo con los valores del problema 15.20, se obtiene  $r_{14.3} = 0.4664$ ,  $r_{12.3} = 0.7939$  y  $r_{24.3} = 0.2791$ . Por lo tanto

$$r_{14.23} = \frac{r_{14.3} - r_{12.3}r_{24.3}}{\sqrt{(1 - r_{12.3}^2)(1 - r_{24.3}^2)}} = 0.4193$$

- 15.23** Interpretar los coeficientes de correlación parcial: *a)*  $r_{12.4}$ , *b)*  $r_{13.4}$ , *c)*  $r_{12.34}$ , *d)*  $r_{14.3}$  y *e)*  $r_{14.23}$  obtenidos en el problema 15.22.

### SOLUCIÓN

- a)*  $r_{12.4} = 0.7935$  representa el coeficiente de correlación (lineal) entre las calificaciones en estadística y las calificaciones en matemáticas de estudiantes con una misma calificación en conocimientos generales. Para obtener este coeficiente no se toman en cuenta las calificaciones en español (así como otros factores tampoco considerados), como resulta evidente por el hecho de que se ha omitido el subíndice 3.

- b)  $r_{13.4} = 0.2215$  representa el coeficiente de correlación entre las calificaciones en estadística y las calificaciones en español de estudiantes que tienen la misma calificación en conocimientos generales. Aquí no se han considerado las calificaciones en matemáticas.
- c)  $r_{12.34} = 0.7814$  representa el coeficiente de correlación entre las calificaciones en estadística y las calificaciones en matemáticas de estudiantes con la misma calificación, tanto en español como en conocimientos generales.
- d)  $r_{14.3} = 0.4664$  representa el coeficiente de correlación entre las calificaciones en estadística y las calificaciones en conocimientos generales de estudiantes con la misma calificación en español.
- e)  $r_{14.23} = 0.4193$  representa el coeficiente de correlación entre las calificaciones en estadística y las calificaciones en conocimientos generales de estudiantes con la misma calificación tanto en matemáticas como en español.

- 15.24** a) Dados los datos del problema 15.20, mostrar que

$$\frac{r_{12.4} - r_{13.4}r_{23.4}}{\sqrt{(1 - r_{13.4}^2)(1 - r_{23.4}^2)}} = \frac{r_{12.3} - r_{14.3}r_{24.3}}{\sqrt{(1 - r_{14.3}^2)(1 - r_{24.3}^2)}} \quad (38)$$

- b) Explicar el significado de la igualdad del inciso a).

### SOLUCIÓN

- a) El lado izquierdo de la ecuación (38) fue evaluado en el problema 15.22a) dando como resultado 0.7814. Para evaluar el lado derecho de la ecuación (38), se usan los resultados del problema 15.22c); el resultado también es 0.7814. Por lo tanto, en este caso en especial, la igualdad es válida. Mediante manipulaciones algebraicas puede demostrarse que esta igualdad también es válida en general.
- b) El lado izquierdo de la ecuación (38) es  $r_{12.34}$  y el lado derecho es  $r_{12.43}$ . Como  $r_{12.34}$  es la correlación entre las variables  $X_1$  y  $X_2$  cuando  $X_3$  y  $X_4$  permanecen constantes, y  $r_{12.43}$  es la correlación entre las variables  $X_1$  y  $X_2$  cuando  $X_4$  y  $X_3$  permanecen constantes, resulta inmediatamente evidente que la igualdad debe ser válida.

- 15.25** Dados los datos del problema 15.20, encontrar: a) el coeficiente de correlación múltiple  $R_{1.234}$  y b) el error estándar de estimación  $s_{1.234}$ .

### SOLUCIÓN

a)  $1 - R_{1.234}^2 = (1 - r_{12}^2)(1 - r_{13.2}^2)(1 - r_{14.23}^2) \quad \text{o bien} \quad R_{1.234} = 0.9310$

dado que  $r_{12} = 0.90$  de acuerdo con el problema 15.20,  $r_{14.23} = 0.4193$ , de acuerdo con el problema 15.22c), y

$$r_{13.2} = \frac{r_{13} - r_{12}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{12}^2)(1 - r_{23}^2)}} = \frac{0.75 - (0.90)(0.70)}{\sqrt{[1 - (0.90)^2][1 - (0.70)^2]}} = 0.3855$$

#### Otro método

Intercambiando en la primera ecuación los subíndices 2 y 4 se obtiene

$$1 - R_{1.234}^2 = (1 - r_{14}^2)(1 - r_{13.4}^2)(1 - r_{12.34}^2) \quad \text{o bien} \quad R_{1.234} = 0.9310$$

donde se han empleado directamente los resultados del problema 15.22a).

b)  $R_{1.234} = \sqrt{\frac{1 - s_{1.234}^2}{s_1^2}} \quad \text{o bien} \quad s_{1.234} = s_1 \sqrt{1 - R_{1.234}^2} = 10 \sqrt{1 - (0.9310)^2} = 3.650$

Comparar con la ecuación (8) de este capítulo.

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### ECUACIONES DE REGRESIÓN CON TRES VARIABLES

- 15.26** Empleando la notación adecuada con subíndices, escribir las ecuaciones de regresión de: *a)*  $X_3$  sobre  $X_1$  y  $X_2$ , y *b)*  $X_4$  sobre  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  y  $X_5$ .
- 15.27** Escribir las ecuaciones normales correspondientes a la ecuación de regresión de: *a)*  $X_2$  sobre  $X_1$  y  $X_3$ , y *b)*  $X_5$  sobre  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  y  $X_4$ .
- 15.28** En la tabla 15.4 se presentan los valores de tres variables:  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$ .
- Encontrar la ecuación de regresión de mínimos cuadrados de  $X_3$  sobre  $X_1$  y  $X_2$ .
  - Estimar  $X_3$  para  $X_1 = 10$  y  $X_2 = 6$ .

**Tabla 15.4**

|       |    |    |    |    |    |    |
|-------|----|----|----|----|----|----|
| $X_1$ | 3  | 5  | 6  | 8  | 12 | 14 |
| $X_2$ | 16 | 10 | 7  | 4  | 3  | 2  |
| $X_3$ | 90 | 72 | 54 | 42 | 30 | 12 |

- 15.29** Un maestro de matemáticas quiere determinar la relación que hay entre las calificaciones del examen final y las calificaciones de dos exámenes parciales durante el semestre. Siendo  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$ , respectivamente, las calificaciones del primero y segundo exámenes parciales y del examen final, el profesor calcula los siguientes valores correspondientes a un total de 120 alumnos.

$$\begin{array}{lll} \bar{X}_1 = 6.8 & \bar{X}_2 = 7.0 & \bar{X}_3 = 74 \\ s_1 = 1.0 & s_2 = 0.80 & s_3 = 9.0 \\ r_{12} = 0.60 & r_{13} = 0.70 & r_{23} = 0.65 \end{array}$$

- Encontrar la ecuación de regresión de mínimos cuadrados de  $X_3$  sobre  $X_1$  y  $X_2$ .
  - Estimar la calificación final de dos estudiantes cuyas calificaciones en los dos exámenes parciales fueron: 1) 9 y 7, y 2) 4 y 8.
- 15.30** Los datos de la tabla 15.5 dan el precio en miles ( $X_1$ ), la cantidad de recámaras ( $X_2$ ) y la cantidad de baños ( $X_3$ ) de 10 casas. Usar las ecuaciones normales para hallar la ecuación de regresión de mínimos cuadrados de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$ . Usar EXCEL, MINITAB, SAS, SPSS y STATISTIX para encontrar la ecuación de regresión de mínimos cuadrados de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$ . Usar la ecuación de regresión de mínimos cuadrados de  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$  para estimar el precio de una casa que tenga cinco recámaras y cuatro baños.

**Tabla 15.5**

| Precio | Recámaras | Baños |
|--------|-----------|-------|
| 165    | 3         | 2     |
| 200    | 3         | 3     |
| 225    | 4         | 3     |
| 180    | 2         | 3     |
| 202    | 4         | 2     |
| 250    | 4         | 4     |
| 275    | 3         | 4     |
| 300    | 5         | 3     |
| 155    | 2         | 2     |
| 230    | 4         | 4     |

### ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN

- 15.31** Dados los datos del problema 15.28, encontrar el error estándar de estimación de  $X_3$  sobre  $X_1$  y  $X_2$ .
- 15.32** Dados los datos del problema 15.29, encontrar el error estándar de estimación de: a)  $X_3$  sobre  $X_1$  y  $X_2$  y b)  $X_1$  sobre  $X_2$  y  $X_3$ .

### COEFICIENTE DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE

- 15.33** Dados los datos del problema 15.28, calcular el coeficiente de correlación lineal múltiple de  $X_3$  sobre  $X_1$  y  $X_2$ .
- 15.34** Dados los datos del problema 15.29, calcular: a)  $R_{3,12}$ , b)  $R_{1,23}$  y c)  $R_{2,13}$ .

- 15.35** a) Si  $r_{12} = r_{13} = r_{23} = r \neq 1$ , mostrar que

$$R_{1,23} = R_{2,31} = R_{3,12} = \frac{r\sqrt{2}}{\sqrt{1+r}}$$

b) Analizar el caso  $r = 1$ .

- 15.36** Si  $R_{1,23} = 0$ , probar que  $|r_{23}| \geq |r_{12}|$  y  $|r_{23}| \geq |r_{13}|$  e interpretar.

### CORRELACIÓN PARCIAL

- 15.37** Dados los datos del problema 15.28, calcular los coeficientes de correlación lineal parcial  $r_{12,3}$ ,  $r_{13,2}$  y  $r_{23,1}$ . Calcularlos también usando STATISTIX.
- 15.38** Resolver el problema 15.37 con los datos del problema 15.29.

- 15.39** Si  $r_{12} = r_{13} = r_{23} = r \neq 1$ , mostrar que  $r_{12,3} = r_{13,2} = r_{23,1} = r/(1+r)$ . Analizar el caso  $r = 1$ .

- 15.40** Si  $r_{12,3} = 1$ , mostrar que: a)  $|r_{13,2}| = 1$ , b)  $|r_{23,1}| = 1$ , c)  $R_{1,23} = 1$  y d)  $s_{1,23} = 0$ .

### CORRELACIÓN MÚLTIPLE Y CORRELACIÓN PARCIAL CON CUATRO O MÁS VARIABLES

- 15.41** Mostrar que la ecuación de regresión de  $X_4$  sobre  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$  puede escribirse como

$$\frac{x_4}{s_4} = a_1 \left( \frac{x_1}{s_1} \right) + a_2 \left( \frac{x_2}{s_2} \right) + a_3 \left( \frac{x_3}{s_3} \right)$$

donde  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  se determinan resolviendo simultáneamente las ecuaciones

$$a_1 r_{11} + a_2 r_{12} + a_3 r_{13} = r_{14}$$

$$a_1 r_{21} + a_2 r_{22} + a_3 r_{23} = r_{24}$$

$$a_1 r_{31} + a_2 r_{32} + a_3 r_{33} = r_{34}$$

y donde  $x_j = X_j - \bar{X}_j$ ,  $r_{jj} = 1$  y  $j = 1, 2, 3$  y  $4$ . Generalizar al caso con más de cuatro variables.

- 15.42** Dados  $\bar{X}_1 = 20$ ,  $\bar{X}_2 = 36$ ,  $\bar{X}_3 = 12$ ,  $\bar{X}_4 = 80$ ,  $s_1 = 1.0$ ,  $s_2 = 2.0$ ,  $s_3 = 1.5$ ,  $s_4 = 6.0$ ,  $r_{12} = -0.20$ ,  $r_{13} = 0.40$ ,  $r_{23} = 0.50$ ,  $r_{14} = 0.40$ ,  $r_{24} = 0.30$  y  $r_{34} = -0.10$ , a) encontrar la ecuación de regresión de  $X_4$  sobre  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$ , y b) estimar  $X_4$  para  $X_1 = 15$ ,  $X_2 = 40$  y  $X_3 = 14$ .

- 15.43** Dados los datos del problema 15.42, encontrar: a)  $r_{41.23}$ , b)  $r_{42.13}$  y c)  $r_{43.12}$ .

- 15.44** Dados los datos del problema 15.42, encontrar: a)  $R_{4.123}$  y b)  $s_{4.123}$ .

- 15.45** Los gastos médicos anuales de quince hombres adultos se correlacionan con otros factores de salud. En un estudio se consideran gastos médicos anuales,  $Y$ , así como la información sobre las siguientes variables independientes,

$$X_1 = \begin{cases} 0, & \text{si es no fumador} \\ 1, & \text{si es fumador} \end{cases} \quad X_2 = \text{cantidad de dinero gastado semanalmente en alcohol},$$

$X_3$  = horas semanales de ejercicio,

$$X_4 = \begin{cases} 0, \text{ poco informado sobre la alimentación} \\ 1, \text{ informado medianamente sobre la alimentación} \\ 2, \text{ altamente informado sobre la alimentación} \end{cases}$$

$X_5$  = peso       $X_6$  = edad

La notación empleada en este problema se encuentra en muchos libros de estadística.  $Y$  se emplea como variable dependiente y  $X$ , con subíndices, como variables independientes. Empleando los datos de la tabla 15.6, encontrar, resolviendo las ecuaciones normales, la ecuación de regresión de  $Y$  sobre  $X_1$  a  $X_6$  y comparar esta solución con las soluciones dadas por EXCEL, MINITAB, SAS, SPSS y STATISTIX.

Tabla 15.6

| Gastos médicos | Fumador | Alcohol | Ejercicio | Alimentación | Peso | Edad |
|----------------|---------|---------|-----------|--------------|------|------|
| 2 100          | 0       | 20      | 5         | 1            | 185  | 50   |
| 2 378          | 1       | 25      | 0         | 1            | 200  | 42   |
| 1 657          | 0       | 10      | 10        | 2            | 175  | 37   |
| 2 584          | 1       | 20      | 5         | 2            | 225  | 54   |
| 2 658          | 1       | 25      | 0         | 1            | 220  | 32   |
| 1 842          | 0       | 0       | 10        | 1            | 165  | 34   |
| 2 786          | 1       | 25      | 5         | 0            | 225  | 30   |
| 2 178          | 0       | 10      | 10        | 1            | 180  | 41   |
| 3 198          | 1       | 30      | 0         | 1            | 225  | 31   |
| 1 782          | 0       | 5       | 10        | 0            | 180  | 45   |
| 2 399          | 0       | 25      | 12        | 2            | 225  | 45   |
| 2 423          | 0       | 15      | 15        | 0            | 220  | 33   |
| 3 700          | 1       | 25      | 0         | 1            | 275  | 43   |
| 2 892          | 1       | 30      | 5         | 1            | 230  | 42   |
| 2 350          | 1       | 30      | 10        | 1            | 245  | 40   |

# ANÁLISIS DE VARIANZA

# 16

## OBJETIVO DEL ANÁLISIS DE VARIANZA

En el capítulo 8 se usó la teoría del muestreo para probar la importancia de la diferencia entre dos medias muestrales y se supuso que las dos poblaciones de las que provenían las muestras tenían la misma varianza. Hay ocasiones que se necesita probar la importancia de la diferencia entre tres o más medias muestrales o, lo que es equivalente, probar la hipótesis nula de que todas estas medias muestrales son iguales.

**EJEMPLO 1** Supóngase que en un experimento agrícola se emplean cuatro diferentes tratamientos químicos para el suelo, y se obtienen, respectivamente, con los siguientes rendimientos medios de trigo: 28, 22, 18 y 24 bushels por acre. ¿Existe diferencia significativa entre estas medias o la dispersión observada se debe sólo a la casualidad?

Problemas como éste se resuelven empleando una técnica desarrollada por Fischer y que se denomina *análisis de varianza*. En esta técnica se usa la distribución  $F$ , ya vista en el capítulo 11.

## CLASIFICACIÓN EN UN SENTIDO O EXPERIMENTOS CON UN FACTOR

En un *experimento de un factor*, las mediciones (u observaciones) se hacen de  $a$  grupos independientes de muestras, y  $b$  es la cantidad de mediciones en cada muestra. Se habla de  $a$  *tratamientos*, cada uno con  $b$  *repeticiones* o  $b$  *réplicas*. En el ejemplo 1,  $a = 4$ .

Los resultados de un experimento de un factor se acostumbra presentarlos en una tabla con  $a$  renglones y  $b$  columnas, como la tabla 16.1. Aquí,  $X_{jk}$  denota la medición del renglón  $j$  y columna  $k$ , donde  $j = 1, 2, \dots, a$  y donde  $k = 1, 2, \dots, b$ . Por ejemplo,  $X_{35}$  significa la quinta medición del tercer tratamiento.

Tabla 16.1

|                 |                                 |                |
|-----------------|---------------------------------|----------------|
| Tratamiento 1   | $X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1b}$ | $\bar{X}_{1.}$ |
| Tratamiento 2   | $X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2b}$ | $\bar{X}_{2.}$ |
| $\vdots$        | $\vdots$                        | $\vdots$       |
| Tratamiento $a$ | $X_{a1}, X_{a2}, \dots, X_{ab}$ | $\bar{X}_{a.}$ |

La media de las mediciones en el renglón  $j$  se denota  $\bar{X}_j$ . Se tiene

$$\bar{X}_{j.} = \frac{1}{b} \sum_{k=1}^b X_{jk} \quad j = 1, 2, \dots, a \quad (I)$$

El punto que aparece en  $\bar{X}_{j\cdot}$  sirve para indicar que se suma sobre el índice  $k$ . A los valores  $X_{jk}$  se les llama *medias de grupo, medias de tratamiento o medias de renglón*. La *gran media o media general* es la media de todas las mediciones de todos los grupos y se denota  $\bar{X}$ :

$$\bar{X} = \frac{1}{ab} \sum_{j=1}^a \sum_{k=1}^b X_{jk} \quad (2)$$

## VARIACIÓN TOTAL, VARIACIÓN DENTRO DE TRATAMIENTOS Y VARIACIÓN ENTRE TRATAMIENTOS

La *variación total*, que se denota  $V$ , se define como la suma de los cuadrados de las desviaciones de cada medición respecto a la gran media  $\bar{X}$

$$\text{Variación total} = V = \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X})^2 \quad (3)$$

Expresando esta identidad como

$$X_{jk} - \bar{X} = (X_{jk} - \bar{X}_{j\cdot}) + (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X}) \quad (4)$$

y después elevando al cuadrado y sumando sobre  $j$  y  $k$ , se tiene (ver problema 16.1)

$$\sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X})^2 = \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X}_{j\cdot})^2 + \sum_{j,k} (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2 \quad (5)$$

$$\text{o} \quad \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X})^2 = \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X}_{j\cdot})^2 + b \sum_j (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2 \quad (6)$$

La primera suma que aparece en el lado derecho de las ecuaciones (5) y (6) es la *variación dentro de los tratamientos* (ya que se trata de los cuadrados de las desviaciones de las  $X_{jk}$  respecto a las medias de los tratamientos  $\bar{X}_{j\cdot}$ ) y se denota  $V_W$ . Por lo tanto,

$$V_W = \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X}_{j\cdot})^2 \quad (7)$$

La segunda suma que aparece en el lado derecho de las ecuaciones (5) y (6) es la *variación entre los tratamientos* (ya que se trata de los cuadrados de las desviaciones de las medias de los tratamientos  $\bar{X}_{j\cdot}$  respecto a la gran media  $\bar{X}$ ) y se denota  $V_B$ . Por lo tanto,

$$V_B = \sum_{j,k} (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2 = b \sum_j (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2 \quad (8)$$

Por lo tanto, las ecuaciones (5) y (6) se pueden expresar como

$$V = V_W + V_B \quad (9)$$

## MÉTODOS ABREVIADOS PARA OBTENER LAS VARIACIONES

Para simplificar el cálculo de las variaciones anteriores se emplean las fórmulas siguientes:

$$V = \sum_{j,k} X_{jk}^2 - \frac{T^2}{ab} \quad (10)$$

$$V_B = \frac{1}{b} \sum_j T_{j\cdot}^2 - \frac{T^2}{ab} \quad (11)$$

$$V_W = V - V_B \quad (12)$$

donde  $T$  es la suma de todos los valores  $X_{jk}$  y donde  $T_{j\cdot}$  es la suma de todos los valores del tratamiento  $j$ -ésimo:

$$T = \sum_{j,k} X_{jk} \quad T_{j\cdot} = \sum_k X_{jk} \quad (13)$$

En la práctica, conviene sustraer, de cada dato de la tabla, un valor fijo con objeto de simplificar los cálculos; esto no afecta el resultado final.

## MODELO MATEMÁTICO PARA EL ANÁLISIS DE VARIANZA

Cada renglón de la tabla 16.1 se considera como una muestra aleatoria de tamaño  $b$  tomada de la población de ese determinado tratamiento. Las  $X_{jk}$  difieren de la media poblacional  $\mu_j$  correspondiente al tratamiento  $j$  en un *error aleatorio* que se denota  $\varepsilon_{jk}$ ; por lo tanto,

$$X_{jk} = \mu_j + \varepsilon_{jk} \quad (14)$$

Se supone que estos errores están distribuidos de manera normal con media 0 y varianza  $\sigma^2$ . Si  $\mu$  es la media de la población de todos los tratamientos y si se denota  $\alpha_j = \mu_j - \mu$ , entonces  $\mu_j = \mu + \alpha_j$ , y la ecuación (14) se convierte en

$$X_{jk} = \mu + \alpha_j + \varepsilon_{jk} \quad (15)$$

donde  $\sum_j \alpha_j = 0$  (ver problema 16.18). De acuerdo con la ecuación (15) y con la suposición de que las  $\varepsilon_{jk}$  están distribuidas de manera normal con media 0 y varianza  $\sigma^2$ , se concluye que las  $X_{jk}$  se pueden considerar como variables aleatorias distribuidas en forma normal, con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ .

La hipótesis nula de que todas las medias de los tratamientos son iguales está dada por ( $H_0 : \alpha_j = 0; j = 1, 2, \dots, a$ ) o, lo que es equivalente, por ( $H_0 : \mu_j = \mu; j = 1, 2, \dots, a$ ). Si  $H_0$  es verdadera, todas las poblaciones de los tratamientos tendrán la misma distribución normal (es decir, con la misma media y varianza). En estos casos, sólo hay un tratamiento poblacional (es decir, todos los tratamientos son estadísticamente idénticos); en otras palabras, no hay diferencia significativa entre los tratamientos.

## VALORES ESPERADOS DE LAS VARIACIONES

Como se puede demostrar (ver problema 16.19), los valores esperados de  $V_W$ ,  $V_B$  y  $V$  están dados por

$$E(V_W) = a(b-1)\sigma^2 \quad (16)$$

$$E(V_B) = (a-1)\sigma^2 + b \sum_j \alpha_j^2 \quad (17)$$

$$E(V) = (ab-1)\sigma^2 + b \sum_j \alpha_j^2 \quad (18)$$

De acuerdo con la ecuación (16) se tiene

$$E\left[\frac{V_W}{a(b-1)}\right] = \sigma^2 \quad (19)$$

de manera que

$$\hat{S}_W^2 = \frac{V_W}{a(b-1)} \quad (20)$$

siempre es la mejor estimación (insesgada) de  $\sigma^2$ , sin importar si  $H_0$  es o no verdadera. Por otro lado, de acuerdo con las ecuaciones (17) y (18) se ve que sólo si  $H_0$  es verdadera (es decir,  $\alpha_j = 0$ ) se tendrá

$$E\left(\frac{V_B}{a-1}\right) = \sigma^2 \quad \text{y} \quad E\left(\frac{V}{ab-1}\right) = \sigma^2 \quad (21)$$

de manera que sólo en ese caso

$$\hat{S}_B^2 = \frac{V_B}{a-1} \quad \text{y} \quad \hat{S}^2 = \frac{V}{ab-1} \quad (22)$$

proporcionan una estimación insesgada de  $\sigma^2$ . Pero si  $H_0$  no es verdadera, entonces de acuerdo con la ecuación (17) se tiene

$$E(\hat{S}_B^2) = \sigma^2 + \frac{b}{a-1} \sum_j \alpha_j^2 \quad (23)$$

## DISTRIBUCIONES DE LAS VARIACIONES

Empleando la propiedad aditiva de  $\alpha_j$  cuadrada se pueden probar los siguientes teoremas fundamentales que se refieren a las distribuciones de las variaciones  $V_W$ ,  $V_B$  y  $V$ :

**Teorema 1:**  $V_W/\sigma^2$  tienen una distribución  $\chi^2$  con  $a(b-1)$  grados de libertad.

**Teorema 2:** Bajo la hipótesis nula  $H_0$ ,  $V_B/\sigma^2$  y  $V/\sigma^2$  tienen distribuciones  $\chi^2$  con  $a-1$  y  $ab-1$  grados de libertad, respectivamente.

Es importante subrayar que el teorema 1 es válido, ya sea que  $H_0$  sea o no verdadera, mientras que el teorema 2 sólo es válido bajo la suposición de que  $H_0$  es verdadera.

## PRUEBA F PARA LA HIPÓTESIS NULA DE MEDIAS IGUALES

Si la hipótesis nula  $H_0$  no es verdadera (es decir, si las medias de los tratamientos no son iguales), como se ve de acuerdo con la ecuación (23), se esperará que  $\hat{S}_B^2$  sea mayor que  $\sigma^2$ , y que este efecto se haga más pronunciado a medida que la discrepancia entre las medias aumente. Por otro lado, de acuerdo con las ecuaciones (19) y (20) puede esperarse que  $\hat{S}_W^2$  sea igual a  $\sigma^2$  sin importar si las medias son o no iguales. Se tiene, entonces, que un buen estadístico para probar la hipótesis  $H_0$  es el proporcionado por  $\hat{S}_B^2/\hat{S}_W^2$ . Si este estadístico es significativamente grande, se puede concluir que entre las medias de los tratamientos hay una diferencia significativa y, por lo tanto, se puede rechazar  $H_0$ ; si no es así, puede aceptarse  $H_0$  o posponer la decisión hasta hacer más análisis.

Para usar el estadístico  $\hat{S}_B^2/\hat{S}_W^2$  es preciso conocer su distribución muestral. Este conocimiento lo proporciona el teorema 3.

**Teorema 3:** El estadístico  $F = \hat{S}_B^2/\hat{S}_W^2$  tiene distribución  $F$  con  $a-1$  y  $a(b-1)$  grados de libertad.

El teorema 3 permite probar la hipótesis nula a determinado nivel de significancia, empleando la distribución  $F$  (estudiada en el capítulo 11) mediante una prueba de una cola.

## TABLAS PARA EL ANÁLISIS DE VARIANZA

En la tabla 16.2, llamada *tabla para el análisis de varianza*, se resumen los cálculos necesarios para la prueba anterior. En la práctica se calculan  $V$  y  $V_B$  empleando ya sea el método largo [ecuaciones (3) y (8)] o el método corto [ecuaciones (10) y (11)] y calculando después  $V_W = V - V_B$ . Debe notarse que el número de grados de libertad para la variación total (es decir,  $ab-1$ ) es igual a la suma de los grados de libertad para la variación entre los tratamientos más los grados de libertad para la variación dentro de los tratamientos.

Tabla 16.2

| Variación  | Grados de libertad | Cuadrado medio                    | $F$  |
|--|--------------------|-----------------------------------|--|
| Entre tratamientos,<br>$V_B = b \sum_j (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2$ | $a - 1$            | $\hat{S}_B^2 = \frac{V_B}{a - 1}$ | $\frac{\hat{S}_B^2}{\hat{S}_W^2}$<br>con $a - 1$ y $a(b - 1)$ grados de libertad |
| Dentro de tratamientos,<br>$V_W = V - V_B$                             |                    |                                   |  |
| Total<br>$V = V_B + V_W$<br>$= \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X})^2$        | $ab - 1$           |                                   |  |

## MODIFICACIONES PARA NÚMEROS DISTINTOS DE OBSERVACIONES

En caso de que los tratamientos  $1, \dots, a$  tengan números distintos de observaciones —iguales a  $N_1, \dots, N_a$ , respectivamente— los resultados anteriores pueden modificarse fácilmente. Así se obtiene

$$V = \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X})^2 = \sum_{j,k} X_{jk}^2 - \frac{T^2}{N} \quad (24)$$

$$V_B = \sum_{j,k} (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2 = \sum_j N_j (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2 = \sum_j \frac{T_{j\cdot}^2}{N_j} - \frac{T^2}{N} \quad (25)$$

$$V_W = V - V_B \quad (26)$$

donde  $\sum_{j,k}$  denota la sumatoria, primero sobre  $k$  desde 1 hasta  $N_j$  y después la sumatoria sobre  $j$  desde 1 hasta  $a$ . En este caso, la tabla para el análisis de varianza es la tabla 16.3.

Tabla 16.3

| Variación  | Grados de libertad | Cuadrado medio                    | $F$   |
|--|--------------------|-----------------------------------|---|
| Entre tratamientos,<br>$V_B = \sum_j N_j (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2$ | $a - 1$            | $\hat{S}_B^2 = \frac{V_B}{a - 1}$ | $\frac{\hat{S}_B^2}{\hat{S}_W^2}$<br>con $a - 1$ y $N - a$ grados de libertad |
| Dentro de tratamientos,<br>$V_W = V - V_B$                               |                    |                                   |   |
| Total,<br>$V = V_B + V_W$<br>$= \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X})^2$         | $N - 1$            |                                   |   |

## CLASIFICACIÓN EN DOS SENTIDOS O EXPERIMENTOS CON DOS FACTORES

Las ideas del análisis de varianza para clasificaciones en un sentido o experimentos con un factor pueden generalizarse. En el ejemplo 2 se ilustra el procedimiento para *clasificaciones en dos sentidos o experimentos con dos factores*.

**EJEMPLO 2** Supóngase que un experimento agrícola consiste en examinar los rendimientos por acre de cuatro variedades de trigo, cultivando cada variedad en cinco tipos de parcelas. Por lo tanto, se necesitarán  $(4)(5) = 20$  parcelas. En tales casos conviene reunir las parcelas en *bloques*, por ejemplo, bloques de cuatro parcelas, y cultivar una variedad diferente de trigo en cada parcela del bloque. Así, en este ejemplo se necesitarán 5 bloques.

En este caso se tienen dos clasificaciones, o dos factores, ya que las diferencias en el rendimiento por acre pueden deberse a: 1) el tipo de trigo cultivado, o 2) al bloque de que se trate (que pueden presentar diferencias en la fertilidad del suelo, etcétera).

Por analogía, con el experimento agrícola del ejemplo 2 se acostumbra referirse a los dos factores de un experimento como *tratamientos* y *bloques*, aunque por supuesto puede referirse a ellos simplemente como factor 1 y factor 2.

## NOTACIÓN PARA EXPERIMENTOS CON DOS FACTORES

Cuando se tienen  $a$  tratamientos y  $b$  bloques, se construye una tabla como la 16.4, donde se supone que para cada tratamiento y para cada bloque hay un valor experimental (por ejemplo, el rendimiento por acre).  $X_{jk}$  denota el tratamiento  $j$  y el bloque  $k$ . La media de las entradas en el renglón  $j$  se denota  $\bar{X}_{j\cdot}$ , donde  $j = 1, \dots, a$ , y la media de las entradas en la columna  $k$  se denota  $\bar{X}_{\cdot k}$ , donde  $k = 1, \dots, b$ . La media general, o gran media, se denota  $\bar{X}$ . En símbolos,

$$\bar{X}_{j\cdot} = \frac{1}{b} \sum_{k=1}^b X_{jk} \quad \bar{X}_{\cdot k} = \frac{1}{a} \sum_{j=1}^a X_{jk} \quad \bar{X} = \frac{1}{ab} \sum_{j,k} X_{jk} \quad (27)$$

Tabla 16.4

|                 | Bloque              |                     |     |                     |                    |
|-----------------|---------------------|---------------------|-----|---------------------|--------------------|
|                 | 1                   | 2                   | ... | $b$                 |                    |
| Tratamiento 1   | $X_{11}$            | $X_{12}$            | ... | $X_{1b}$            | $\bar{X}_{1\cdot}$ |
| Tratamiento 2   | $X_{21}$            | $X_{22}$            | ... | $X_{2b}$            | $\bar{X}_{2\cdot}$ |
| :               | :                   | :                   | ⋮   | ⋮                   | ⋮                  |
| Tratamiento $a$ | $X_{a1}$            | $X_{a2}$            | ... | $X_{ab}$            | $\bar{X}_{a\cdot}$ |
|                 | $\bar{X}_{\cdot 1}$ | $\bar{X}_{\cdot 2}$ |     | $\bar{X}_{\cdot b}$ |                    |

## VARIACIONES EN LOS EXPERIMENTOS CON DOS FACTORES

Como en el caso de los experimentos con un factor, se definen las variaciones en los experimentos con dos factores. Primero, como en la ecuación (3), se define la *variación total*, que es

$$V = \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X})^2 \quad (28)$$

Expresando la identidad

$$X_{jk} - \bar{X} = (X_{jk} - \bar{X}_{j\cdot} - \bar{X}_{\cdot k} + \bar{X}) + (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X}) + (\bar{X}_{\cdot k} - \bar{X}) \quad (29)$$

elevando al cuadrado y sumando después sobre  $j$  y  $k$  se puede mostrar que

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (30)$$

donde

$$V_E = \text{variación debida al error o a la casualidad} = \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X}_{j\cdot} - \bar{X}_{\cdot k} + \bar{X})^2$$

$$V_R = \text{variación entre renglones (tratamientos)} = b \sum_{j=1}^a (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2$$

$$V_C = \text{variación entre columnas (bloques)} = a \sum_{k=1}^b (\bar{X}_{\cdot k} - \bar{X})^2$$

La variación debida al error o a la casualidad se conoce también como *variación residual* o *variación aleatoria*.

Las fórmulas siguientes, análogas a las ecuaciones (10), (11) y (12), son las fórmulas de cálculo abreviadas.

$$V = \sum_{j,k} X_{jk}^2 - \frac{T^2}{ab} \quad (31)$$

$$V_R = \frac{1}{b} \sum_{j=1}^a T_{j\cdot}^2 - \frac{T^2}{ab} \quad (32)$$

$$V_C = \frac{1}{a} \sum_{k=1}^b T_{\cdot k}^2 - \frac{T^2}{ab} \quad (33)$$

$$V_E = V - V_R - V_C \quad (34)$$

donde  $T_{j\cdot}$  es el total (la suma) de las entradas en el renglón  $j$ -ésimo,  $T_{\cdot k}$  es el total (la suma) de las entradas en la columna  $k$ , y  $T$  es el total (la suma) de todas las entradas.

## ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EXPERIMENTOS CON DOS FACTORES

La generalización del modelo matemático para experimentos con un factor, dado por la ecuación (15), lleva a suponer que para experimentos con dos factores

$$X_{jk} = \mu + \alpha_j + \beta_k + \varepsilon_{jk} \quad (35)$$

donde  $\sum \alpha_j = 0$  y  $\sum \beta_k = 0$ . Aquí  $\mu$  es la gran media de la población,  $\alpha_j$  es la parte de  $X_{jk}$  atribuida a los diferentes tratamientos (también llamada *efectos del tratamiento*),  $\beta_k$  es la parte de  $X_{jk}$  atribuida a los diferentes bloques (también llamada *efectos de los bloques*) y  $\varepsilon_{jk}$  es la parte de  $X_{jk}$  atribuida a la casualidad o al error. Como antes, se supone que las  $\varepsilon_{jk}$  están distribuidas en forma normal con media 0 y varianza  $\sigma^2$ , de manera que las  $X_{jk}$  también están distribuidas en forma normal con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ .

Correspondiendo con los resultados (16), (17) y (18) puede probarse que las esperanzas de las variaciones están dadas por

$$E(V_E) = (a-1)(b-1)\sigma^2 \quad (36)$$

$$E(V_R) = (a-1)\sigma^2 + b \sum_j \alpha_j^2 \quad (37)$$

$$E(V_C) = (b-1)\sigma^2 + a \sum_k \beta_k^2 \quad (38)$$

$$E(V) = (ab-1)\sigma^2 + b \sum_j \alpha_j^2 + a \sum_k \beta_k^2 \quad (39)$$

Las hipótesis nulas que se quieren probar son dos:

$H_0^{(1)}$ : todas las medias de los tratamientos (renglones) son iguales; es decir,  $\alpha_j = 0$  y  $j = 1, \dots, a$ .

$H_0^{(2)}$ : todas las medias de los bloques (columnas) son iguales; es decir,  $\beta_k = 0$  y  $k = 1, \dots, b$ .

De acuerdo con la ecuación (36) se ve que, ya sea que  $H_0^{(1)}$  y  $H_0^{(2)}$ , sean o no verdaderas, una estimación insesgada de  $\sigma^2$  es la dada por

$$\hat{S}_E^2 = \frac{V_E}{(a-1)(b-1)} \quad \text{esto es,} \quad E(\hat{S}_E^2) = \sigma^2 \quad (40)$$

Además, si las hipótesis  $H_0^{(1)}$  y  $H_0^{(2)}$  son verdaderas, entonces

$$\hat{S}_R^2 = \frac{V_R}{a-1} \quad \hat{S}_C^2 = \frac{V_C}{b-1} \quad \hat{S}^2 = \frac{V}{ab-1} \quad (41)$$

serán estimaciones insesgadas de  $\sigma^2$ . Sin embargo, si  $H_0^{(1)}$  y  $H_0^{(2)}$  no son verdaderas, de acuerdo con las ecuaciones (37) y (38) se tiene, respectivamente

$$E(\hat{S}_R^2) = \sigma^2 + \frac{b}{a-1} \sum_j \alpha_j^2 \quad (42)$$

$$E(\hat{S}_C^2) = \sigma^2 + \frac{a}{b-1} \sum_k \beta_k^2 \quad (43)$$

Los teoremas siguientes son similares a los teoremas 1 y 2:

**Teorema 4:**  $V_E/\sigma^2$  es una distribución ji cuadrada con  $(a-1)(b-1)$  grados de libertad, independientemente de  $H_0^{(1)}$  o bien  $H_0^{(2)}$ .

**Teorema 5:** Si la hipótesis  $H_0^{(1)}$  es verdadera,  $V_R/\sigma^2$  tiene una distribución ji cuadrada con  $a-1$  grados de libertad. Si la hipótesis  $H_0^{(2)}$  es verdadera,  $V_C/\sigma^2$  tiene una distribución ji cuadrada con  $b-1$  grados de libertad. Si las dos hipótesis  $H_0^{(1)}$  y  $H_0^{(2)}$  son verdaderas,  $V/\sigma^2$  es una distribución ji cuadrada con  $ab-1$  grados de libertad.

Para probar la hipótesis  $H_0^{(1)}$ , es natural considerar el estadístico  $\hat{S}_R^2/\hat{S}_E^2$ , ya que, como se ve, de acuerdo con la ecuación (42),  $\hat{S}_R^2$  se espera que difiera significativamente de  $\sigma^2$  si las medias de los renglones (tratamientos) son significativamente diferentes. De manera similar, para probar la hipótesis  $H_0^{(2)}$ , se emplea el estadístico  $\hat{S}_C^2/\hat{S}_E^2$ . En el teorema 6 se dan las distribuciones de  $\hat{S}_R^2/\hat{S}_E^2$  y de  $\hat{S}_C^2/\hat{S}_E^2$ ; este teorema es análogo al teorema 3.

**Teorema 6:** Si la hipótesis  $H_0^{(1)}$  es verdadera, el estadístico  $\hat{S}_R^2/\hat{S}_E^2$  tiene una distribución  $F$  con  $a-1$  y  $(a-1)(b-1)$  grados de libertad. Si la hipótesis  $H_0^{(2)}$  es verdadera, el estadístico  $\hat{S}_C^2/\hat{S}_E^2$  tiene la distribución  $F$  con  $b-1$  y  $(a-1)(b-1)$  grados de libertad.

El teorema 6 permite aceptar o rechazar  $H_0^{(1)}$  y  $H_0^{(2)}$  a un nivel de significancia determinado. Para mayor claridad y facilidad, como en el caso de un factor, para el análisis de varianza se suele construir una tabla como la 16.5.

## EXPERIMENTOS CON DOS FACTORES CON REPLICACIÓN

En la tabla 16.4, para cada tratamiento y para cada bloque hay únicamente una entrada. Más información acerca de los factores puede obtenerse repitiendo el experimento, proceso que se llama *replicación*. En esos casos habrá más de una entrada para cada tratamiento y para cada bloque. Se supondrá que en cada posición hay  $c$  entradas; en el caso en que los números de repeticiones no sean iguales, se hacen las modificaciones apropiadas.

Debido a la replicación se necesita un modelo adecuado que sustituya al modelo dado por la ecuación (35). Se usa el modelo siguiente:

$$X_{jkl} = \mu + \alpha_j + \beta_k + \gamma_{jk} + \varepsilon_{jkl} \quad (44)$$

donde los subíndices  $j$ ,  $k$  y  $l$  de  $X_{jkl}$  corresponden, respectivamente, al  $j$ -ésimo renglón (o tratamientos), a la  $k$ -ésima columna (o bloque) y a la  $l$ -ésima repetición (o replicación). En la ecuación (44)  $\mu$ ,  $\alpha_j$  y  $\beta_k$  están definidos como antes;

Tabla 16.5

| Variación   | Grados de libertad | Cuadrado medio                             | $F$   |
|---|--------------------|--|---|
| Entre tratamientos,<br>$V_R = b \sum_j (\bar{X}_{j..} - \bar{X})^2$     | $a - 1$            | $\hat{S}_R^2 = \frac{V_R}{a - 1}$          | $\hat{S}_R^2 / \hat{S}_E^2$<br>con $a - 1$ y $(a - 1)(b - 1)$<br>grados de libertad |
| Entre bloques,<br>$V_C = a \sum_k (\bar{X}_{k..} - \bar{X})^2$          | $b - 1$            | $\hat{S}_C^2 = \frac{V_C}{b - 1}$          | $\hat{S}_C^2 / \hat{S}_E^2$<br>con $b - 1$ y $(a - 1)(b - 1)$<br>grados de libertad |
| Residual o aleatoria,<br>$V_E = V - V_R - V_C$                          | $(a - 1)(b - 1)$   | $\hat{S}_E^2 = \frac{V_E}{(a - 1)(b - 1)}$ |   |
| Total,<br>$V = V_R + V_C + V_E$<br>$= \sum_{j,k} (X_{jkl} - \bar{X})^2$ | $ab - 1$           |  |   |

$\varepsilon_{jkl}$  es un término aleatorio o un término de error, y  $\gamma_{jk}$  denota los *efectos de la interacción* renglón-columna (o tratamiento-bloque) que se conocen simplemente como *interacciones*. Se tienen las restricciones

$$\sum_j \alpha_j = 0 \quad \sum_k \beta_k = 0 \quad \sum_j \gamma_{jk} = 0 \quad \sum_k \gamma_{jk} = 0 \quad (45)$$

y se supone que las  $X_{jkl}$  están distribuidas de manera normal con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ .

Como antes, la variación  $V$  de todos los datos puede dividirse en variaciones debidas a los renglones  $V_R$ , variaciones debidas a las columnas  $V_C$ , interacciones  $V_I$  y un error aleatorio o residual  $V_E$ :

$$V = V_R + V_C + V_I + V_E \quad (46)$$

donde

$$V = \sum_{j,k,l} (X_{jkl} - \bar{X})^2 \quad (47)$$

$$V_R = bc \sum_{j=1}^a (\bar{X}_{j..} - \bar{X})^2 \quad (48)$$

$$V_C = ac \sum_{k=1}^b (\bar{X}_{.k.} - \bar{X})^2 \quad (49)$$

$$V_I = c \sum_{j,k} (\bar{X}_{jk.} - \bar{X}_{j..} - \bar{X}_{.k.} + \bar{X})^2 \quad (50)$$

$$V_E = \sum_{j,k,l} (X_{jkl} - \bar{X}_{jk.})^2 \quad (51)$$

En estos resultados, los puntos que aparecen en los subíndices tienen significados análogos a los dados antes; así, por ejemplo,

$$\bar{X}_{j..} = \frac{1}{bc} \sum_{k,l} X_{jkl} = \frac{1}{b} \sum_k \bar{X}_{jk.} \quad (52)$$

El valor esperado de las variaciones se encuentra como antes. Empleando, para cada fuente de variación, el número que le corresponde de grados de libertad, se puede elaborar una tabla para el análisis de varianza como la que se muestra

en la tabla 16.6. Los cocientes  $F$  que aparecen en la última columna de la tabla 16.6 se usan para probar las hipótesis nulas:

$H_0^{(1)}$ : todas las medias de los tratamientos (renglones) son iguales; es decir,  $\alpha_j = 0$ .

$H_0^{(2)}$ : todas las medias de los bloques (columnas) son iguales; es decir,  $\beta_k = 0$ .

$H_0^{(3)}$ : entre tratamientos y bloques no hay interacción; es decir,  $\gamma_{jk} = 0$ .

Tabla 16.6

| Variación                      | Grados de libertad | Cuadrado medio                             | $F$  |
|--------------------------------|--------------------|--|--|
| Entre tratamientos,<br>$V_R$   | $a - 1$            | $\hat{S}_R^2 = \frac{V_R}{a - 1}$          | $\hat{S}_R^2/\hat{S}_E^2$<br>con $a - 1$ y $ab(c - 1)$ grados de libertad          |
| Entre bloques,<br>$V_C$        | $b - 1$            | $\hat{S}_C^2 = \frac{V_C}{b - 1}$          | $\hat{S}_C^2/\hat{S}_E^2$<br>con $b - 1$ y $ab(c - 1)$ grados de libertad          |
| Interacción,<br>$V_I$          | $(a - 1)(b - 1)$   | $\hat{S}_I^2 = \frac{V_I}{(a - 1)(b - 1)}$ | $\hat{S}_I^2/\hat{S}_E^2$<br>con $(a - 1)(b - 1)$ y $ab(c - 1)$ grados de libertad |
| Residual o aleatoria,<br>$V_E$ | $ab(c - 1)$        | $\hat{S}_E^2 = \frac{V_E}{ab(c - 1)}$      |  |
| Total,<br>$V$                  | $abc - 1$          |  |  |

Desde un punto de vista práctico, hay que decidir primero si  $H_0^{(3)}$  puede o no ser rechazada a nivel de significancia apropiado usando el  $F$ -cociente  $\hat{S}_I^2/\hat{S}_E^2$  de la tabla 16.6. Pueden presentarse dos casos:

1.  **$H_0^{(3)}$  no puede ser rechazada.** En este caso se concluye que las interacciones no son muy grandes. Entonces, se pueden probar  $H_0^{(1)}$  y  $H_0^{(2)}$  empleando, respectivamente, los  $F$ -cocientes  $\hat{S}_R^2/\hat{S}_E^2$  y  $\hat{S}_C^2/\hat{S}_E^2$  como se muestra en la tabla 16.6. Algunos especialistas en estadística recomiendan que en este caso se junten las variaciones y se use el total  $V_I + V_E$  dividiéndolo entre la correspondiente suma de grados de libertad  $(a - 1)(b - 1) + ab(c - 1)$  y usando, en la prueba  $F$ , este valor en lugar de  $\hat{S}_E^2$ .
2.  **$H_0^{(3)}$  puede ser rechazada.** En este caso, se concluye que las interacciones son significativamente grandes. Entonces, las diferencias entre los factores sólo serán importantes si son grandes en comparación con estas interacciones. A esto se debe que muchos especialistas en estadística recomiendan probar  $H_0^{(1)}$  y  $H_0^{(2)}$  empleando los  $F$ -cocientes  $\hat{S}_R^2/\hat{S}_I^2$  y  $\hat{S}_C^2/\hat{S}_I^2$  en lugar de los dados en la tabla 16.6. Aquí también se usará este procedimiento alternativo.

El análisis de varianza con replicación puede realizarse más fácilmente sumando primero los valores de las repeticiones correspondientes a un tratamiento (renglón) y a un bloque (columna). Con esto se obtiene una tabla de dos factores con entrada sencilla, que se puede analizar como la tabla 16.5. Este procedimiento se ilustra en el problema 16.16.

## DISEÑO EXPERIMENTAL

Las técnicas de análisis de varianza vistas antes se emplean una vez que se han obtenido los resultados de un experimento. Sin embargo, con objeto de obtener tanta información como sea posible, es necesario que primero se planee

cuidadosamente el experimento; a esto se le conoce como *diseño del experimento*. Los siguientes son algunos ejemplos importantes de diseños de experimentos:

1. **Aleatorización completa.** Supóngase que se tiene un experimento agrícola como el del ejemplo 1. Para diseñar este experimento se puede dividir la tierra en  $4 \times 4 = 16$  parcelas (como se indica en la figura 16-1 mediante los cuadrados, aunque puede emplearse cualquier otra figura) y asignar cada tratamiento (indicados por las letras A, B, C y D) a cuatro bloques elegidos en forma completamente aleatoria. El propósito de la aleatorización es eliminar diversas fuentes de error, por ejemplo, la fertilidad del suelo.

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| D | A | C | C |
| B | D | B | A |
| D | C | B | D |
| A | B | C | A |

Figura 16-1 Aleatorización completa.

| Bloques | Tratamientos |   |   |   |
|---------|--------------|---|---|---|
|         | C            | B | A | D |
| I       |              |   |   |   |
| II      | A            | B | D | C |
| III     | B            | C | D | A |
| IV      | A            | D | C | B |

Figura 16-2 Bloques aleatorizados.

|          | Factor 1 |   |   |   |
|----------|----------|---|---|---|
|          | D        | B | C | A |
| Factor 2 | B        | D | A | C |
|          | C        | A | D | B |
|          | A        | C | B | D |

Figura 16-3 Cuadrado latino.

|            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|
| $B_\gamma$ | $A_\beta$  | $D_\delta$ | $C_\alpha$ |
| $A_\delta$ | $B_\alpha$ | $C_\gamma$ | $D_\beta$  |
| $D_\alpha$ | $C_\delta$ | $B_\beta$  | $A_\gamma$ |
| $C_\beta$  | $D_\gamma$ | $A_\alpha$ | $B_\delta$ |

Figura 16-4 Cuadrado grecolatino.

2. **Bloques aleatorizados.** Cuando se necesita todo un conjunto de tratamientos para cada bloque, como en el ejemplo 2, los tratamientos A, B, C y D se introducen en orden aleatorio en cada uno de los bloques I, II, III y IV (es decir, en los renglones de la figura 16-2), y por esta razón a los bloques se les llama *bloques aleatorizados*. Este tipo de diseño se emplea para controlar *una fuente de error o variabilidad*: a saber, la diferencia entre los bloques.
3. **Cuadrados latinos.** Para algunos fines es necesario controlar al mismo tiempo *dos fuentes de error o de variabilidad*, como las diferencias entre los renglones y las diferencias entre las columnas. Por ejemplo, en el experimento del ejemplo 1, los errores en los diferentes renglones y columnas pueden deberse a variaciones en la fertilidad del suelo en distintos lugares del terreno. En tales casos es necesario que cada tratamiento aparezca una vez en cada renglón y una vez en cada columna, como en la figura 16-3. A esta distribución se le llama *cuadrado latino* debido a que se emplean las letras A, B, C y D.
4. **Cuadrados grecolatinos.** Cuando es necesario controlar *tres fuentes de error o de variabilidad* se emplea un *cuadrado grecolatino*, como el que se muestra en la figura 16-4. Estos cuadrados son, en esencia, dos cuadrados latinos superpuestos uno sobre otro, usando las letras latinas A, B, C y D para uno de los cuadrados y las letras griegas  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\delta$  para el otro. Un requerimiento adicional por satisfacer es que cada letra griega debe usarse una y sólo una vez con cada letra latina; si se satisface esta condición se dice que el cuadrado es *ortogonal*.

## PROBLEMAS RESUELTOS

### CLASIFICACIÓN EN UN SENTIDO O EXPERIMENTOS CON UN FACTOR

**16.1** Probar que  $V = V_W + V_B$ ; es decir,

$$\sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X})^2 = \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X}_{j.})^2 + \sum_{j,k} (\bar{X}_{j.} - \bar{X})^2$$

#### SOLUCIÓN

Se tiene

$$X_{jk} - \bar{X} = (X_{jk} - \bar{X}_{j.}) + (\bar{X}_{j.} - \bar{X})$$

Elevando al cuadrado y sumando sobre  $j$  y  $k$ , se obtiene

$$\sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X})^2 = \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X}_{j.})^2 + \sum_{j,k} (\bar{X}_{j.} - \bar{X})^2 + 2 \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X}_{j.})(\bar{X}_{j.} - \bar{X})$$

Para probar el resultado deseado hay que mostrar que la última suma es cero. Para esto, se procede como sigue:

$$\begin{aligned} \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X}_{j.})(\bar{X}_{j.} - \bar{X}) &= \sum_{j=1}^a (\bar{X}_{j.} - \bar{X}) \left[ \sum_{k=1}^b (X_{jk} - \bar{X}_{j.}) \right] \\ &= \sum_{j=1}^a (\bar{X}_{j.} - \bar{X}) \left[ \left( \sum_{k=1}^b X_{jk} \right) - b\bar{X}_{j.} \right] = 0 \end{aligned}$$

ya que

$$\bar{X}_{j.} = \frac{1}{b} \sum_{k=1}^b X_{jk}$$

**16.2** Empleando la notación de la página 362, verificar que: a)  $T = ab\bar{X}$ , b)  $T_{j.} = b\bar{X}_{j.}$  y c)  $\sum_j T_{j.} = ab\bar{X}$ .

#### SOLUCIÓN

a)

$$T = \sum_{j,k} X_{jk} = ab \left( \frac{1}{ab} \sum_{j,k} X_{jk} \right) = ab\bar{X}$$

b)

$$T_{j.} = \sum_k X_{jk} = b \left( \frac{1}{b} \sum_k X_{jk} \right) = b\bar{X}_{j.}$$

c) Como  $T_{j.} = \sum_k X_{jk}$ , de acuerdo con el inciso a) se tiene

$$\sum_j T_{j.} = \sum_j \sum_k X_{jk} = T = ab\bar{X}$$

**16.3** Verificar las fórmulas abreviadas (10), (11) y (12) de este capítulo.

#### SOLUCIÓN

Se tiene

$$\begin{aligned} V &= \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X})^2 = \sum_{j,k} (X_{jk}^2 - 2\bar{X}X_{jk} + \bar{X}^2) \\ &= \sum_{j,k} X_{jk}^2 - 2\bar{X} \sum_{j,k} X_{jk} + ab\bar{X}^2 \\ &= \sum_{j,k} X_{jk}^2 - 2\bar{X}(ab\bar{X}) + ab\bar{X}^2 \\ &= \sum_{j,k} X_{jk}^2 - ab\bar{X}^2 \\ &= \sum_{j,k} X_{jk}^2 - \frac{T^2}{ab} \end{aligned}$$

empleando el problema 16.2a) para el tercero y último renglones anteriores. De igual manera,

$$\begin{aligned}
 V_B &= \sum_{j,k} (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2 = \sum_{j,k} (\bar{X}_{j\cdot}^2 - 2\bar{X}\bar{X}_{j\cdot} + \bar{X}^2) \\
 &= \sum_{j,k} \bar{X}_{j\cdot}^2 - 2\bar{X} \sum_{j,k} \bar{X}_{j\cdot} + ab\bar{X}^2 \\
 &= \sum_{j,k} \left(\frac{T_{j\cdot}}{b}\right)^2 - 2\bar{X} \sum_{j,k} \frac{T_{j\cdot}}{b} + ab\bar{X}^2 \\
 &= \frac{1}{b^2} \sum_{j=1}^a \sum_{k=1}^b T_{j\cdot}^2 - 2\bar{X}(ab\bar{X}) + ab\bar{X}^2 \\
 &= \frac{1}{b} \sum_{j=1}^a T_{j\cdot}^2 - ab\bar{X}^2 \\
 &= \frac{1}{b} \sum_{j=1}^a T_{j\cdot}^2 - \frac{T^2}{ab}
 \end{aligned}$$

empleando el problema 16.2b) para el tercer renglón y el problema 16.2a) para el último renglón. Por último, la ecuación (12) se obtiene a partir de que  $V = V_W + V_B$  o bien  $V_W = V - V_B$ .

- 16.4** La tabla 16.7 muestra los rendimientos, en bushels por acre, de cierta variedad de trigo cultivado en un tipo especial de suelo tratado con los agentes químicos A, B o C. Encontrar: a) el rendimiento medio con los distintos tratamientos, b) la gran media de todos los tratamientos, c) la variación total, d) la variación entre los tratamientos y e) la variación dentro de los tratamientos. Utilizar el método largo. f) Proporcionar el análisis de EXCEL para los datos que se muestran en la tabla 16.7.

Tabla 16.7

|   |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|
| A | 48 | 49 | 50 | 49 |
| B | 47 | 49 | 48 | 48 |
| C | 49 | 51 | 50 | 50 |

Tabla 16.8

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 3 | 4 | 5 | 4 |
| 2 | 4 | 3 | 3 |
| 4 | 6 | 5 | 5 |

### SOLUCIÓN

Para simplificar los cálculos se puede sustraer una cantidad adecuada, por ejemplo 45, de cada uno de los datos sin que esto afecte los valores de las variaciones. Así se obtienen los datos de la tabla 16.8.

- a) Las medias de tratamiento (renglón) en la tabla 16.8 son, respectivamente,

$$\bar{X}_{1\cdot} = \frac{1}{4}(3+4+5+4) = 4 \quad \bar{X}_{2\cdot} = \frac{1}{4}(2+4+3+3) = 3 \quad \bar{X}_{3\cdot} = \frac{1}{4}(4+6+5+5) = 5$$

Y los rendimientos medios, que se obtienen sumando 45 a estos valores, son 49, 48 y 50 bushels por acre, respectivamente, para A, B y C.

- b) La gran media de todos los tratamientos es

$$\bar{X} = \frac{1}{12}(3+4+5+4+2+4+3+3+4+6+5+5) = 4$$

Por lo tanto, la gran media del conjunto de los datos originales es  $45 + 4 = 49$  bushels por acre.

- c) La variación total es

$$\begin{aligned}
 V &= \sum_{j,k} (X_{jk} - X)^2 = (3-4)^2 + (4-4)^2 + (5-4)^2 + (4-4)^2 + (2-4)^2 + (4-4)^2 \\
 &\quad + (3-4)^2 + (3-4)^2 + (4-4)^2 + (6-4)^2 + (5-4)^2 + (5-4)^2 = 14
 \end{aligned}$$

d) La variación entre tratamientos es

$$V_B = b \sum_j (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2 = 4[(4-4)^2 + (3-4)^2 + (5-4)^2] = 8$$

e) La variación dentro de los tratamientos es

$$V_W = V - V_B = 14 - 8 = 6$$

#### Otro método

$$\begin{aligned} V_W &= \sum_{j,k} (X_{jk} - X_{j\cdot})^2 = (3-4)^2 + (4-4)^2 + (5-4)^2 + (4-4)^2 + (2-3)^2 + (4-3)^2 \\ &\quad + (3-3)^2 + (3-3)^2 + (4-5)^2 + (6-5)^2 + (5-5)^2 + (5-5)^2 = 6 \end{aligned}$$

*Nota:* La tabla 16.9 es para el análisis de varianza de los problemas 16.4, 16.5 y 16.6.

**Tabla 16.9**

| Variación   | Grados de libertad              | Cuadrado medio                            | F   |
|---|---------------------------------|---|---|
| Entre tratamientos<br>$V_B = 8$                                 | $a - 1 = 2$                     | $\hat{S}_B^2 = \frac{8}{2} = 4$           | $\frac{\hat{S}_B^2}{\hat{S}_W^2} = \frac{4}{2/3} = 6$ |
| Dentro de los tratamientos<br>$V_W = V - V_B$<br>$= 14 - 8 = 6$ | $a(b - 1) = (3)(3) = 9$         | $\hat{S}_W^2 = \frac{6}{9} = \frac{2}{3}$ | con 2 y 9 grados de libertad                          |
| Total<br>$V = 14$   | $ab - 1 = (3)(4) - 1$<br>$= 11$ |   |   |

f) Empleando EXCEL, la secuencia **Tools** → **Data analysis** → **Anova single factor** da el análisis que se presenta a continuación. El valor  $p$  indica que  $\alpha = 0.05$ , las medias de las tres variedades son diferentes.

| A  | B  | C  |
|----|----|----|
| 48 | 47 | 49 |
| 49 | 49 | 51 |
| 50 | 48 | 50 |
| 49 | 48 | 50 |

#### Análisis de varianza de un factor

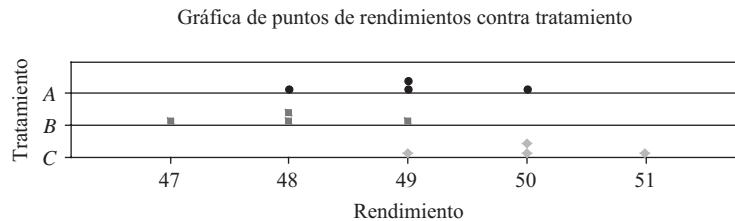
#### RESUMEN

| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza |
|--------|--------|------|----------|----------|
| A      | 4      | 196  | 49       | 0.666667 |
| B      | 4      | 192  | 48       | 0.666667 |
| C      | 4      | 200  | 50       | 0.666667 |

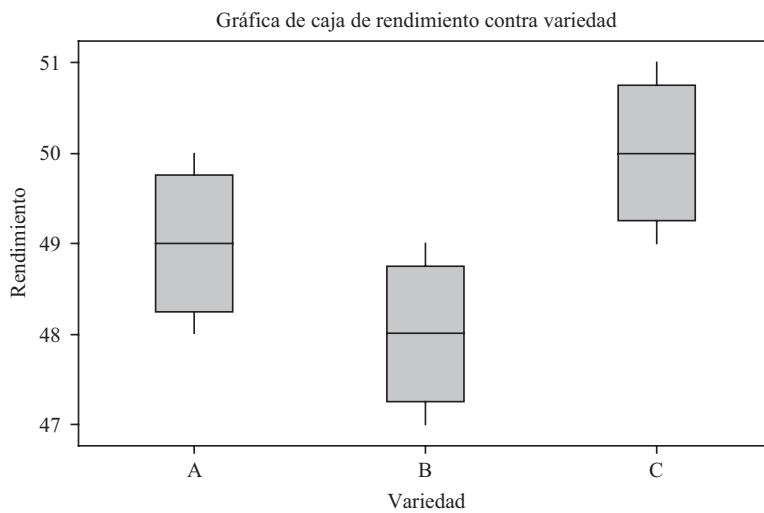
#### ANÁLISIS DE VARIANZA

| Origen de las variaciones | SS | df | MS       | F | Valor p  |
|---------------------------|----|----|----------|---|----------|
| Entre grupos              | 8  | 2  | 4        | 6 | 0.022085 |
| Dentro de los grupos      | 6  | 9  | 0.666667 |   |          |
| Total                     | 14 | 11 |          |   |          |

La figura 16-5 muestra una gráfica de puntos de MINITAB dando los rendimientos de las tres variedades de trigo. La figura 16-6 muestra una gráfica de caja de MINITAB dando los rendimientos de las tres variedades de trigo. El análisis de EXCEL y las gráficas de MINITAB indican que la variedad C supera significativamente los rendimientos de la variedad B.



**Figura 16-5** MINITAB, gráfica de puntos de los rendimientos de las tres variedades de trigo.



**Figura 16-6** MINITAB, gráfica de caja de los rendimientos de las tres variedades de trigo.

- 16.5** Volver al problema 16.4, encontrar una estimación insesgada de la varianza poblacional  $\sigma^2$  a partir de: *a)* la variación entre tratamientos bajo la hipótesis nula de medias de tratamiento iguales y *b)* la variación dentro de los tratamientos. *c)* Consultar los resultados de EXCEL dados en la solución del problema 16.4, localizar las estimaciones de las varianzas calculadas en los incisos *a)* y *b)*.

### SOLUCIÓN

$$a) \hat{S}_B^2 = \frac{V_B}{a-1} = \frac{8}{3-1} = 4$$

$$b) \hat{S}_W^2 = \frac{V_W}{a(b-1)} = \frac{6}{3(4-1)} = \frac{2}{3}$$

- c)* La estimación de varianza  $\hat{S}_B^2$ , en los resultados de EXCEL, es MS entre grupos y es 4, que es igual al valor encontrado.  
La estimación de  $\hat{S}_W^2$ , en los resultados de EXCEL, es MS dentro de los grupos y es 0.666667, que es igual al valor encontrado.

- 16.6** Dados los datos del problema 16.4, a los niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01, ¿puede rechazarse la hipótesis nula de medias iguales? *c)* Consultar los resultados de EXCEL dados en la solución del problema 16.4, para probar la hipótesis nula de varianzas iguales.

**SOLUCIÓN**

Se tiene

$$F = \frac{\hat{S}_B^2}{\hat{S}_W^2} = \frac{4}{2/3} = 6$$

con  $a - 1 = 3 - 1$  grados de libertad y  $a(b - 1) = 3(4 - 1) = 9$  grados de libertad.

- a) En el apéndice V, para  $\nu_1 = 2$  y  $\nu_2 = 9$ , se encuentra que  $F_{.95} = 4.26$ . Como  $F = 6 > F_{.95}$ , la hipótesis nula de medias iguales puede rechazarse al nivel 0.05.
- b) En el apéndice VI, para  $\nu_1 = 2$  y  $\nu_2 = 9$ , se encuentra que  $F_{.99} = 8.02$ . Como  $F = 6 < F_{.99}$ , la hipótesis nula de medias iguales no se puede rechazar al nivel 0.01.
- c) Consultando los resultados de EXCEL dados en el problema 16.4, se encuentra que el valor  $F$  es 6 y el valor  $p$  es 0.022. Por lo tanto, el menor nivel de significancia predeterminado al que puede rechazarse la hipótesis nula es 0.022. De manera que la hipótesis nula se rechazará al nivel de significancia 0.05, pero no al nivel de significancia 0.01.

- 16.7** Dados los datos del problema 16.4, emplear las fórmulas abreviadas (10), (11) y (12) para obtener: a) la variación total, b) la variación entre los tratamientos y c) la variación dentro de los tratamientos. Además, utilizar MINITAB con los datos, a los que se les restó 45 a cada valor, para obtener la tabla del análisis de varianza.

**SOLUCIÓN**

Conviene ordenar los datos como en la tabla 16.10.

**Tabla 16.10**

|                             |         | $T_{j\cdot}$                 | $T_{j\cdot}^2$              |
|-----------------------------|---------|------------------------------|-----------------------------|
| A                           | 3 4 5 4 | 16                           | 256                         |
| B                           | 2 4 3 3 | 12                           | 144                         |
| C                           | 4 6 5 5 | 20                           | 400                         |
| $\sum_{j,k} X_{jk}^2 = 206$ |         | $T = \sum_j T_{j\cdot} = 48$ | $\sum_j T_{j\cdot}^2 = 800$ |

- a) Usando la fórmula (10), se tiene

$$\sum_{j,k} X_{jk}^2 = 9 + 16 + 25 + 16 + 4 + 16 + 9 + 9 + 16 + 36 + 25 + 25 = 206$$

y

$$T = 3 + 4 + 5 + 4 + 2 + 4 + 3 + 3 + 4 + 6 + 5 + 5 = 48$$

Por lo tanto,

$$V = \sum_{j,k} X_{jk}^2 - \frac{T^2}{ab} = 206 - \frac{(48)^2}{(3)(4)} = 206 - 192 = 14$$

- b) Los totales (suma) de los renglones son

$$T_{1\cdot} = 3 + 4 + 5 + 4 = 16 \quad T_{2\cdot} = 2 + 4 + 3 + 3 = 12 \quad T_{3\cdot} = 4 + 6 + 5 + 5 = 20$$

y

$$T = 16 + 12 + 20 = 48$$

Por lo tanto, empleando la fórmula (11), se tiene

$$V_B = \frac{1}{b} \sum_j T_{j\cdot}^2 - \frac{T^2}{ab} = \frac{1}{4} (16^2 + 12^2 + 20^2) - \frac{(48)^2}{(3)(4)} = 200 - 192 = 8$$

- c) Empleando la fórmula (12), se tiene

$$V_W = V - V_B = 14 - 8 = 6$$

Estos resultados coinciden con los obtenidos en el problema 16.4 y se procede como antes.

Con la secuencia **Stat → Anova → Oneway** se obtiene el resultado siguiente. Obsérvense las diferencias en la terminología empleada. A la variación dentro de los tratamientos se le llama en EXCEL Dentro de los grupos y en MINITAB Error. A la variación entre tratamientos en EXCEL se le llama Entre los grupos y en MINITAB Factor. El usuario debe acostumbrarse a las diferentes terminologías empleadas en los diversos paquetes de software.

#### One-way ANOVA: A, B, C

| Source | DF | SS       | MS          | F    | P                |
|--------|----|----------|-------------|------|------------------|
| Factor | 2  | 8.000    | 4.000       | 6.00 | 0.022            |
| Error  | 9  | 6.00     | 0.667       |      |                  |
| Total  | 11 | 14.000   |             |      |                  |
|        |    | S=0.8165 | R-Sq=57.14% |      | R-Sq(adj)=47.62% |

- 16.8** Una empresa quiere comprar una de cinco máquinas *A, B, C, D o E*. En un experimento destinado a probar si hay diferencia en el rendimiento de estas máquinas, uno de cada cinco operadores experimentados trabaja durante la misma cantidad de tiempo en cada máquina. En la tabla 16.11 se muestra la cantidad de unidades producidas con cada máquina. A los niveles de significancia: *a) 0.05 y b) 0.01*, probar la hipótesis de que no hay diferencia entre las máquinas. *c) Proporcionar la solución de STATISTIX a este problema, y empleando el método del valor *p*, probar la hipótesis de que no hay diferencia entre las máquinas. Usar  $\alpha = 0.05$ .*

Tabla 16.11

|          |    |    |    |    |    |
|----------|----|----|----|----|----|
| <i>A</i> | 68 | 72 | 77 | 42 | 53 |
| <i>B</i> | 72 | 53 | 63 | 53 | 48 |
| <i>C</i> | 60 | 82 | 64 | 75 | 72 |
| <i>D</i> | 48 | 61 | 57 | 64 | 50 |
| <i>E</i> | 64 | 65 | 70 | 68 | 53 |

Tabla 16.12

|          | $T_j$                    | $T_j^2$  |
|----------|--------------------------|----------|
| <i>A</i> | 8 12 17 -18 -7           | 12 144   |
| <i>B</i> | 12 -7 3 -7 -12           | -11 121  |
| <i>C</i> | 0 22 4 15 12             | 53 2 809 |
| <i>D</i> | -12 1 -3 4 -10           | -20 400  |
| <i>E</i> | 4 5 10 8 -7              | 20 400   |
|          | $\sum X_{jk}^2 = 2\ 658$ | 54 3 874 |

#### SOLUCIÓN

A cada dato se le resta un número adecuado, por ejemplo 60, y se obtiene la tabla 16.12. Entonces

$$V = 2\ 658 - \frac{(54)^2}{(5)(5)} = 2\ 658 - 116.64 = 2\ 541.36$$

$$\text{y } V_B = \frac{3\ 874}{5} - \frac{(54)^2}{(5)(4)} = 774.8 - 116.64 = 658.16$$

Ahora se elabora la tabla 16.13. Para 4 y 20 grados de libertad, se tiene  $F_{.95} = 2.87$ . De esta manera, al nivel 0.05 no se puede rechazar la hipótesis nula y, por lo tanto, tampoco al nivel 0.01.

Con la secuencia **Statistics → One, two, multi-sample tests → One-way Anova** se obtiene el resultado siguiente.

Statistix 8.

**One-Way AOV for: A B C D E**

| <b>Source</b>   | <b>DF</b>   | <b>SS</b> | <b>MS</b> | <b>F</b> | <b>P</b> |
|-----------------|-------------|-----------|-----------|----------|----------|
| Between         | 4           | 658.16    | 164.540   | 1.75     | 0.1792   |
| Within          | 20          | 1883.20   | 94.160    |          |          |
| Total           | 24          | 2541.36   |           |          |          |
| Grand Mean      | 62.160      | CV 15.61  |           |          |          |
| <b>Variable</b> | <b>Mean</b> |           |           |          |          |
| A               | 62.400      |           |           |          |          |
| B               | 57.800      |           |           |          |          |
| C               | 70.600      |           |           |          |          |
| D               | 56.000      |           |           |          |          |
| E               | 64.000      |           |           |          |          |

El valor  $p$  es 0.1792. No hay diferencia significativa entre las medias poblacionales.

**Tabla 16.13**

| Variación                                   | Grados de libertad       | Cuadrado medio                              | $F$                               |
|---|--------------------------|---|-----------------------------------|
| Entre tratamientos,<br>$V_B = 658.2$        | $a - 1 = 4$              | $\hat{S}_B^2 = \frac{658.2}{4} = 164.5$     | $F = \frac{164.55}{94.16} = 1.75$ |
| Dentro de tratamientos,<br>$V_W = 1\ 883.2$ | $a(b - 1) = (5)(4) = 20$ | $\hat{S}_W^2 = \frac{1\ 883.2}{20} = 94.16$ |                                   |
| Total,<br>$V = 2\ 514.4$                    | $ab - 1 = 24$            |   |                                   |

**MODIFICACIONES PARA NÚMEROS DISTINTOS DE OBSERVACIONES**

- 16.9** En la tabla 16.14 se presentan las duraciones, en horas, de muestras de tres diferentes tipos de cinescopios producidos por una empresa. Usando el método largo, a los niveles de significancia: a) 0.05 y b) 0.01, determinar si hay alguna diferencia entre los tres tipos de cinescopios.

**Tabla 16.14**

|           |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| Muestra 1 | 407 | 411 | 409 |     |
| Muestra 2 | 404 | 406 | 408 | 405 |
| Muestra 3 | 410 | 408 | 406 | 408 |

**SOLUCIÓN**

Para facilitar los cálculos se resta de cada dato un número apropiado, por ejemplo 400, obteniendo así la tabla 16.15. En esta tabla se dan los totales de los renglones, las medias muestrales (o grupales) y la gran media. De esta manera se tiene

$$V = \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X})^2 = (7-7)^2 + (11-7)^2 + \cdots + (8-7)^2 = 72$$

$$V_B = \sum_{j,k} (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2 = \sum_j N_j (\bar{X}_{j\cdot} - \bar{X})^2 = 3(9-7)^2 + 5(7-5)^2 + 4(8-7)^2 = 36$$

$$V_W = V - V_B = 72 - 36 = 36$$

$V_W$  también puede obtenerse directamente observando que es igual a

$$(7-9)^2 + (11-9)^2 + (9-9)^2 + (4-5)^2 + (6-5)^2 + (8-5)^2 + (5-5)^2 \\ + (2-5)^2 + (10-8)^2 + (8-8)^2 + (6-8)^2 + (8-8)^2$$

Tabla 16.15

|   |    |    |   |   | Total | Media |
|---|----|----|---|---|-------|-------|
| Muestra 1   | 7  | 11 | 9 |   | 27    | 9     |
| Muestra 2   | 4  | 6  | 8 | 5 | 25    | 5     |
| Muestra 3   | 10 | 8  | 6 | 8 | 32    | 8     |
| $\bar{X} = \text{gran media} = \frac{84}{12} = 7$ |    |    |   |   |       |       |

Los datos pueden resumirse como en la tabla 16.16, la tabla para el análisis de varianza. Para 2 y 9 grados de libertad, en el apéndice V se encuentra que  $F_{.95} = 4.26$  y en el apéndice VI que  $F_{.99} = 8.02$ . Por lo tanto, la hipótesis de que las medias son iguales (es decir, que no hay diferencia entre los tres tipos de cinescopios) puede rechazarse al nivel de significancia 0.05, pero no al nivel de significancia 0.01.

Tabla 16.16

| Variación  | Grados de libertad | Cuadrado medio                    | F  |
|------------|--------------------|-----------------------------------|--|
| $V_B = 36$ | $a - 1 = 2$        | $\hat{S}_B^2 = \frac{36}{2} = 18$ | $\frac{\hat{S}_B^2}{\hat{S}_W^2} = \frac{18}{4}$ |
| $V_W = 36$ | $N - a = 9$        | $\hat{S}_W^2 = \frac{36}{9} = 4$  | $= 4.5$  |

- 16.10** Resolver el problema 16.9 empleando las fórmulas abreviadas (24), (25) y (26). Además, proporcionar la solución al problema empleando SAS.

### SOLUCIÓN

De acuerdo con la tabla 16.15, se tiene  $N_1 = 3, N_2 = 5, N_3 = 4, N = 12, T_1 = 27, T_2 = 25, T_3 = 32$  y  $T = 84$ . Por lo tanto, se tiene

$$V = \sum_{j,k} X_{jk}^2 - \frac{T^2}{N} = 7^2 + 11^2 + \cdots + 6^2 + 8^2 - \frac{(84)^2}{12} = 72$$

$$V_B = \sum_j \frac{T_{j\cdot}^2}{N_j} - \frac{T^2}{N} = \frac{(27)^2}{3} + \frac{(25)^2}{5} + \frac{(32)^2}{4} - \frac{(84)^2}{12} = 36$$

$$V_W = V - V_B = 36$$

Empleando estos valores, el análisis de varianza procede entonces como en el problema 16.9.

Empleando SAS, con la secuencia **Statistics → ANOVA → Oneway ANOVA** se obtienen los resultados siguientes.

The ANOVA Procedure

| Class Level Information |        |        |
|-------------------------|--------|--------|
| Class                   | Levels | Values |
| Sample_                 | 3      | 1 2 3  |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Number of Observations Read | 12 |
| Number of Observations Used | 12 |

The ANOVA Procedure

Dependent Variable: lifetime

| Source          | DF | Sum of Squares | Mean Square | F value  | Pr > F        |
|-----------------|----|----------------|-------------|----------|---------------|
| Model           | 2  | 36.00000000    | 18.00000000 | 4.50     | 0.0442        |
| Error           | 9  | 36.00000000    | 4.00000000  |          |               |
| Corrected Total | 11 | 72.00000000    |             |          |               |
|                 |    | R-Square       | coeff Var   | Root MSE | lifetime Mean |
|                 |    | 0.500000       | 0.491400    | 2.000000 | 407.0000      |
| Source          | DF | Anova SS       | Mean Square | F Value  | Pr > F        |
| Sample_         | 2  | 36.00000000    | 18.00000000 | 4.50     | 0.0442        |

Obsérvese que en SAS a la variación entre tratamientos se le llama `model` (modelo) y a la variación dentro de los tratamientos se le dice `error`. Al estadístico de prueba se le llama valor  $F$  y es igual a 4.50. El valor  $p$  es  $Pr > F$  y es igual a 0.0442. A  $\alpha = 0.05$  se declarará que las duraciones no son iguales.

## CLASIFICACIÓN EN DOS SENTIDOS O EXPERIMENTOS CON DOS FACTORES

- 16.11** En la tabla 16.17 se presenta la producción por acre en cuatro cultivos diferentes empleando tres tipos diferentes de fertilizantes. Usando el método largo, determinar, al nivel de significancia 0.01, si hay diferencias en la producción por acre: *a)* debidas a los fertilizantes y *b)* debidas a los cultivos. *c)* Proporcionar la solución que da MINITAB a este experimento de dos factores.

### SOLUCIÓN

Como se muestra en la tabla 16.18, se calculan los totales de los renglones, las medias de los renglones, los totales de las columnas, las medias de las columnas, el gran total y la gran media. Según esta tabla se obtiene:

La variación de las medias de los renglones respecto a la gran media es

$$V_R = 4[(6.2 - 6.8)^2 + (8.3 - 6.8)^2 + (5.9 - 6.8)^2] = 13.68$$

La variación de las medias de las columnas respecto a la gran media es

$$V_C = 3[(6.4 - 6.8)^2 + (7.0 - 6.8)^2 + (7.5 - 6.8)^2 + (6.3 - 6.8)^2] = 2.82$$

Tabla 16.17

|                | Cultivo I | Cultivo II | Cultivo III | Cultivo IV |
|----------------|-----------|------------|-------------|------------|
| Fertilizante A | 4.5       | 6.4        | 7.2         | 6.7        |
| Fertilizante B | 8.8       | 7.8        | 9.6         | 7.0        |
| Fertilizante C | 5.9       | 6.8        | 5.7         | 5.2        |

Tabla 16.18

|                     | Cultivo I | Cultivo II | Cultivo III | Cultivo IV | Total del renglón | Media del renglón |
|---------------------|-----------|------------|-------------|------------|-------------------|-------------------|
| Fertilizante A      | 4.5       | 6.4        | 7.2         | 6.7        | 24.8              | 6.2               |
| Fertilizante B      | 8.8       | 7.8        | 9.6         | 7.0        | 33.2              | 8.3               |
| Fertilizante C      | 5.9       | 6.8        | 5.7         | 5.2        | 23.6              | 5.9               |
| Total de la columna | 19.2      | 21.0       | 22.5        | 18.9       | Gran total = 81.6 |                   |
| Media de la columna | 6.4       | 7.0        | 7.5         | 6.3        | Gran media = 6.8  |                   |

La variación total es

$$\begin{aligned}
 V &= (4.5 - 6.8)^2 + (6.4 - 6.8)^2 + (7.2 - 6.8)^2 + (6.7 - 6.8)^2 \\
 &\quad + (8.8 - 6.8)^2 + (7.8 - 6.8)^2 + (9.6 - 6.8)^2 + (7.0 - 6.8)^2 \\
 &\quad + (5.9 - 6.8)^2 + (6.8 - 6.8)^2 + (5.7 - 6.8)^2 + (5.2 - 6.8)^2 = 23.08
 \end{aligned}$$

La variación aleatoria es

$$V_E = V - V_R - V_C = 6.58$$

Esto conduce al análisis de varianza de la tabla 16.19.

Tabla 16.19

| Variación     | Grados de libertad | Cuadrado medio        | F  |
|---------------|--------------------|-----------------------|--|
| $V_R = 13.68$ | 2                  | $\hat{S}_R^2 = 6.84$  | $\hat{S}_R^2/\hat{S}_E^2 = 6.24$<br>con 2 y 6 grados de libertad |
| $V_C = 2.82$  | 3                  | $\hat{S}_C^2 = 0.94$  | $\hat{S}_C^2/\hat{S}_E^2 = 0.86$<br>con 3 y 6 grados de libertad |
| $V_E = 6.58$  | 6                  | $\hat{S}_E^2 = 1.097$ |  |
| $V = 23.08$   | 11                 |                       |  |

- a) Al nivel de significancia 0.05 con 2 y 6 grados de libertad,  $F_{.95} = 5.14$ . Entonces, como  $6.24 > 5.14$ , se puede rechazar la hipótesis de que las medias de los renglones sean iguales y concluir que al nivel de significancia 0.05 existe, en la producción, una diferencia significativa debida a los fertilizantes.
- b) Como el valor F correspondiente a las diferencias en las medias de las columnas es menor que 1, se concluye que debido a los cultivos no hay diferencia significativa en la producción.
- c) Primero se da la estructura que deben tener los datos en la hoja de cálculo de MINITAB, y a continuación el análisis de MINITAB para este experimento de dos factores.

| Row | Crop | Fertilizer | Yield |
|-----|------|------------|-------|
| 1   | 1    | 1          | 4.5   |
| 2   | 1    | 2          | 8.8   |
| 3   | 1    | 3          | 5.9   |
| 4   | 2    | 1          | 6.4   |
| 5   | 2    | 2          | 7.8   |
| 6   | 2    | 3          | 6.8   |
| 7   | 3    | 1          | 7.2   |
| 8   | 3    | 2          | 9.6   |
| 9   | 3    | 3          | 5.7   |
| 10  | 4    | 1          | 6.7   |
| 11  | 4    | 2          | 7.0   |
| 12  | 4    | 3          | 5.2   |

```
MTB > Twoway 'Yield' 'Crop' 'Fertilizer';
SUBC > Means 'Crop' 'Fertilizer'.
```

### Two-way Analysis of Variance

#### Analysis of Variance for Yield

| Source   | DF | SS    | MS   | F    | P     |
|----------|----|-------|------|------|-------|
| Crop     | 3  | 2.82  | 0.94 | 0.86 | 0.512 |
| Fertiliz | 2  | 13.68 | 6.84 | 6.24 | 0.034 |
| Error    | 6  | 6.58  | 1.10 |      |       |
| Total    | 11 | 23.08 |      |      |       |

#### Individual 95% CI

| Crop | Mean | 5.00   | 6.00                                   | 7.00                         | 8.00               |
|------|------|--|--|------------------------------|--------------------|
| 1    | 6.40 | (-----* -----)</td <td></td> <td></td> <td></td> |  |                              |                    |
| 2    | 7.00 |  | (-----* -----)</td <td></td> <td></td> |                              |                    |
| 3    | 7.50 |  |  | (-----* -----)</td <td></td> |                    |
| 4    | 6.30 |  |  |                              | (-----* -----)</td |

#### Individual 95% CI

| Fertiliz | Mean | 4.80   | 6.00                                   | 7.20                         | 8.40 |
|----------|------|--|--|------------------------------|------|
| 1        | 6.20 | (-----* -----)</td <td></td> <td></td> <td></td> |  |                              |      |
| 2        | 8.30 |  | (-----* -----)</td <td></td> <td></td> |                              |      |
| 3        | 5.90 |  |  | (-----* -----)</td <td></td> |      |

La estructura de los datos en la hoja de cálculo debe corresponder exactamente a la estructura de los datos en la tabla 16.17. El primer renglón, 1 1 4 .5, corresponde a Cultivo 1, Fertilizante 1 y Rendimiento 4.5; el segundo renglón, 1 2 8 .8, corresponde a Cultivo 1, Fertilizante 2 y Rendimiento 8.8, etc. Un error frecuente al usar software para estadística es que en la hoja de cálculo se dé una estructura incorrecta de los datos. Hay que asegurarse de que los datos dados en una tabla como la 16.17 y la estructura de los datos en la hoja de cálculo se correspondan uno a uno. Obsérvese que la tabla para el análisis de varianza en dos sentidos, dada en los resultados de MINITAB, contiene la información de la tabla 16.19. Los valores *p* que aparecen en los resultados de MINITAB permiten al investigador probar la hipótesis de interés sin tener que consultar las tablas de la distribución *F* para hallar los valores críticos. El valor *p* para los cultivos es 0.512. Éste es el nivel de significancia mínimo al que se puede rechazar que haya diferencia en la producción media de los cultivos. Las producciones medias de los cuatro cultivos no son estadísticamente significativas a 0.05 o bien 0.01. El valor *p* para los fertilizantes es 0.034. Esto indica que las producciones medias con los tres fertilizantes son estadísticamente diferentes a 0.05 pero no a 0.01.

Los intervalos de confianza para las medias de los cuatro cultivos dados en los resultados de MINITAB refuerzan la conclusión de que no hay diferencia en las producciones medias de los cuatro diferentes cultivos. Los intervalos de confianza para los tres fertilizantes indican que posiblemente con el fertilizante *B* se obtenga una producción media más alta que con cualquiera de los fertilizantes *A* o bien *C*.

- 16.12** Usar la fórmula de cálculo abreviada para resolver el problema 16.11. Además, proporcionar la solución a este problema empleando SPSS.

### SOLUCIÓN

De acuerdo con la tabla 16.18, se tiene

$$\sum_{j,k} X_{jk}^2 = (4.5)^2 + (6.4)^2 + \dots + (5.2)^2 = 577.96$$

$$T = 24.8 + 33.2 + 23.6 = 81.6$$

$$\sum T_{j.}^2 = (24.8)^2 + (33.2)^2 + (23.6)^2 = 2\,274.24$$

$$\sum T_{.k}^2 = (19.2)^2 + (21.0)^2 + (22.5)^2 + (18.9)^2 = 1\,673.10$$

Entonces

$$V = \sum_{j,k} X_{jk}^2 - \frac{T^2}{ab} = 577.96 - \frac{81.6^2}{3 \cdot 4} = 23.08$$

$$V_R = \frac{1}{b} \sum T_{j.}^2 - \frac{T^2}{ab} = \frac{1}{4} (2\,274.24) - \frac{81.6^2}{3 \cdot 4} = 13.68$$

$$V_C = \frac{1}{a} \sum T_{.k}^2 - \frac{T^2}{ab} = \frac{1}{3} (1\,673.10) - \frac{81.6^2}{3 \cdot 4} = 2.82$$

$$V_E = V - V_R - V_C = 23.08 - 13.68 - 2.82 = 6.58$$

Lo cual coincide con los resultados del problema 16.11.

Con la secuencia **Analyze** → **General Linear Model** → **Univariate** de SPSS se obtienen los resultados siguientes:

#### Pruebas de efectos entre temas

Variable dependiente: rendimiento

| Origen          | Tipo 1: suma de cuadrados | df | Cuadrado medio | F       | Sig. |
|-----------------|---------------------------|----|----------------|---------|------|
| Modelo correcto | 16.500 <sup>a</sup>       | 5  | 3.300          | 3.009   | .106 |
| Intercepción    | 554.880                   | 1  | 554.880        | 505.970 | .000 |
| Cultivo         | 2.820                     | 3  | .940           | .857    | .512 |
| Fertilizante    | 13.680                    | 2  | 6.840          | 6.237   | .034 |
| Error           | 6.580                     | 6  |                |         |      |
| Total           | 577.960                   | 12 |                |         |      |
| Total corregido | 23.080                    | 11 |                |         |      |

<sup>a</sup>R cuadrada = .715 (R cuadrada ajustada = .477)

Obsérvese que el estadístico de prueba está dado por F y que para los cultivos el valor F es 0.857 y el correspondiente valor *p* es 0.512. El valor F para fertilizante es 6.237 y el correspondiente valor *p* es 0.034. Estos valores corresponden a los valores de la tabla 16.19, así como a los resultados dados por MINITAB en el problema 16.11.

### EXPERIMENTOS CON DOS FACTORES CON REPLICACIÓN

- 16.13** Un fabricante desea determinar la efectividad de cuatro tipos de máquinas (*A*, *B*, *C* y *D*) en la producción de tornillos. Para esto, obtiene la cantidad de tornillos defectuosos producidos por cada máquina durante los días de una semana determinada en cada uno de los dos turnos; los resultados se muestran en la tabla 16.20. Realizar

un análisis de varianza para determinar, al nivel de significancia 0.05, si existe alguna diferencia: *a*) entre las máquinas y *b*) entre los turnos. *c*) Utilizar también MINITAB para realizar el análisis de varianza y probar las diferencias entre las máquinas y entre los turnos usando un valor *p* apropiado.

Tabla 16.20

| Máquina | Primer turno |        |           |        |         | Segundo turno |        |           |        |         |
|---------|--------------|--------|-----------|--------|---------|---------------|--------|-----------|--------|---------|
|         | Lunes        | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Lunes         | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes |
| A       | 6            | 4      | 5         | 5      | 4       | 5             | 7      | 4         | 6      | 8       |
| B       | 10           | 8      | 7         | 7      | 9       | 7             | 9      | 12        | 8      | 8       |
| C       | 7            | 5      | 6         | 5      | 9       | 9             | 7      | 5         | 4      | 6       |
| D       | 8            | 4      | 6         | 5      | 5       | 5             | 7      | 9         | 7      | 10      |

## SOLUCIÓN

Los datos también se pueden organizar de manera equivalente, como en la tabla 16.21. En esta tabla se indican los dos factores principales: la máquina y el turno. Obsérvese que se han indicado dos turnos por cada máquina. Los días de la semana pueden considerarse como réplicas (o repeticiones) del desempeño de cada máquina en los dos turnos. La variación total de todos los datos de la tabla 16.21 es

$$V = 6^2 + 4^2 + 5^2 + \dots + 7^2 + 10^2 - \frac{(268)^2}{40} = 1946 - 1795.6 = 150.4$$

Tabla 16.21

| Factor I:<br>Máquina | Factor II:<br>Turno | Réplicas |        |           |        |         | Total |
|----------------------|---------------------|----------|--------|-----------|--------|---------|-------|
|                      |                     | Lunes    | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes |       |
| A                    | { 1<br>2            | 6        | 4      | 5         | 5      | 4       | 24    |
|                      |                     | 5        | 7      | 4         | 6      | 8       | 30    |
| B                    | { 1<br>2            | 10       | 8      | 7         | 7      | 9       | 41    |
|                      |                     | 7        | 9      | 12        | 8      | 8       | 44    |
| C                    | { 1<br>2            | 7        | 5      | 6         | 5      | 9       | 32    |
|                      |                     | 9        | 7      | 5         | 4      | 6       | 31    |
| D                    | { 1<br>2            | 8        | 4      | 6         | 5      | 5       | 28    |
|                      |                     | 5        | 7      | 9         | 7      | 10      | 38    |
| Total                |                     | 57       | 51     | 54        | 47     | 59      | 268   |

Con el fin de considerar los dos factores principales (la máquina y el turno), se concentra la atención en la suma de los valores de las réplicas correspondientes a cada combinación de los factores. Éstas se presentan en la tabla 16.22, que es, por lo tanto, una tabla de dos factores con entradas sencillas. La variación total en la tabla 16.22, a la que se le llamará *variación subtotal*  $V_S$ , está dada por

$$\begin{aligned} V_S &= \frac{(24)^2}{5} + \frac{(41)^2}{5} + \frac{(32)^2}{5} + \frac{(28)^2}{5} + \frac{(30)^2}{5} + \frac{(44)^2}{5} + \frac{(31)^2}{5} + \frac{(38)^2}{5} - \frac{(268)^2}{40} \\ &= 1861.2 - 1795.6 = 65.6 \end{aligned}$$

La variación entre renglones está dada por

$$V_R = \frac{(54)^2}{10} + \frac{(85)^2}{10} + \frac{(63)^2}{10} + \frac{(66)^2}{10} - \frac{(268)^2}{40} = 1846.6 - 1795.6 = 51.0$$

**Tabla 16.22**

| Máquina | Primer turno | Segundo turno | Total |
|---------|--------------|---------------|-------|
| A       | 24           | 30            | 54    |
| B       | 41           | 44            | 85    |
| C       | 32           | 31            | 63    |
| D       | 28           | 38            | 66    |
| Total   | 125          | 143           | 268   |

La variación entre columnas está dada por

$$V_C = \frac{(125)^2}{20} + \frac{(143)^2}{20} - \frac{(268)^2}{40} = 1803.7 - 1795.6 = 8.1$$

Si de la variación subtotal  $V_S$  se resta ahora la suma de las variaciones entre renglones y las variaciones entre columnas ( $V_R + V_C$ ), se obtiene la variación debida a la *interacción* entre renglones y columnas, la cual está dada por

$$V_I = V_S - V_R - V_C = 65.6 - 51.0 - 8.1 = 6.5$$

Por último, se obtiene la variación residual, que puede considerarse como una variación aleatoria o variación por error  $V_E$  (siempre que se crea que los diferentes días de la semana no ocasionan diferencia importante), esta variación se encuentra restando la variación subtotal (es decir, la suma de las variaciones de renglón, de columna y de interacción) de la variación total  $V$ . Esto da

$$V_E = V - (V_R + V_C + V_I) = V - V_S = 150.4 - 65.6 = 84.8$$

Estas variaciones se muestran en la tabla 16.23, la tabla para el análisis de varianza. En esta tabla también se da el número de grados de libertad que corresponde a cada tipo de variación. Por lo tanto, dado que en la tabla 16.22 hay cuatro

**Tabla 16.23**

| Variación                             | Grados de libertad | Cuadrado medio        | F                            |
|---------------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|
| Renglones (máquinas),<br>$V_R = 51.0$ | 3                  | $\hat{S}_R^2 = 17.0$  | $\frac{17.0}{2.65} = 6.42$   |
| Columnas (turnos),<br>$V_C = 8.1$     | 1                  | $\hat{S}_C^2 = 8.1$   | $\frac{8.1}{2.65} = 3.06$    |
| Interacción,<br>$V_I = 6.5$           | 3                  | $\hat{S}_I^2 = 2.167$ | $\frac{2.167}{2.65} = 0.817$ |
| Subtotal,<br>$V_S = 65.6$             | 7                  |                       |                              |
| Aleatoria o residual,<br>$V_E = 84.8$ | 32                 | $\hat{S}_E^2 = 2.65$  |                              |
| Total,<br>$V = 150.4$                 | 39                 |                       |                              |

renglones, la variación debida a los renglones tiene  $4 - 1 = 3$  grados de libertad, la variación debida a las dos columnas tiene  $2 - 1 = 1$  grado de libertad. Para hallar los grados de libertad debidos a la interacción, se observa que en la tabla 16.22 hay ocho entradas; por lo tanto, el total de grados de libertad es  $8 - 1 = 7$ . Como 3 de estos 7 grados de libertad se deben a los renglones y 1 se debe a las columnas, el resto  $[7 - (3 + 1) = 3]$  se debe a la interacción. Dado que en la tabla original 16.21 hay 40 entradas, el total de grados de libertad es  $40 - 1 = 39$ . De esta manera, los grados de libertad debidos a la variación aleatoria o residual son  $39 - 7 = 32$ .

Primero debe determinarse si hay alguna interacción significativa. El valor crítico interpolado de la distribución  $F$  con 3 y 32 grados de libertad es 2.90. El valor  $F$  calculado para la interacción es 0.817 y no es significativo. Entre las máquinas hay una diferencia significativa, ya que el valor  $F$  calculado para las máquinas es 6.42 y el valor crítico es 2.90. El valor crítico para los turnos es 4.15. El valor  $F$  calculado para los turnos es 3.06. No hay diferencia en los defectos debida a los turnos.

A continuación se muestra la estructura que deben tener los datos en la hoja de cálculo de MINITAB. Compárese la estructura de los datos con los de la tabla 16.21 para ver la relación entre los dos conjuntos de datos.

| Row | Machine | Shift | Defects |
|-----|---------|-------|---------|
| 1   | 1       | 1     | 6       |
| 2   | 1       | 1     | 4       |
| 3   | 1       | 1     | 5       |
| 4   | 1       | 1     | 5       |
| 5   | 1       | 1     | 4       |
| 6   | 1       | 2     | 5       |
| 7   | 1       | 2     | 7       |
| 8   | 1       | 2     | 4       |
| 9   | 1       | 2     | 6       |
| 10  | 1       | 2     | 8       |
| 11  | 2       | 1     | 10      |
| 12  | 2       | 1     | 8       |
| 13  | 2       | 1     | 7       |
| 14  | 2       | 1     | 7       |
| 15  | 2       | 1     | 9       |
| 16  | 2       | 2     | 7       |
| 17  | 2       | 2     | 9       |
| 18  | 2       | 2     | 12      |
| 19  | 2       | 2     | 8       |
| 20  | 2       | 2     | 8       |
| 21  | 3       | 1     | 7       |
| 22  | 3       | 1     | 5       |
| 23  | 3       | 1     | 6       |
| 24  | 3       | 1     | 5       |
| 25  | 3       | 1     | 9       |
| 26  | 3       | 2     | 9       |
| 27  | 3       | 2     | 7       |
| 28  | 3       | 2     | 5       |
| 29  | 3       | 2     | 4       |
| 30  | 3       | 2     | 6       |
| 31  | 4       | 1     | 8       |
| 32  | 4       | 1     | 4       |
| 33  | 4       | 1     | 6       |
| 34  | 4       | 1     | 5       |
| 35  | 4       | 1     | 5       |
| 36  | 4       | 2     | 5       |
| 37  | 4       | 2     | 7       |
| 38  | 4       | 2     | 9       |
| 39  | 4       | 2     | 7       |
| 40  | 4       | 2     | 10      |

Con el comando MTB < Twoway 'Defects' 'Machine' 'Shifts' se obtiene el análisis de varianza en dos sentidos. El valor  $p$  para la interacción es 0.494. Éste es el nivel de significancia mínimo para rechazar la hipótesis nula; es claro que no hay una interacción significativa entre turnos y máquinas. Para los turnos, el valor  $p$  es 0.090; como este valor es mayor que 0.050, la cantidad media de defectos en los dos turnos no es significativamente diferente. Para las máquinas,

el valor  $p$  es 0.002; al nivel de significancia 0.050, las cantidades medias de defectos en las cuatro máquinas son notablemente diferentes.

MTB > Twoway 'Defects' 'Machine' 'Shift'

#### Two-way Analysis of Variance

##### Analysis of Variance for Defects

| Source      | DF | SS     | MS    | F    | P     |
|-------------|----|--------|-------|------|-------|
| Machine     | 3  | 51.00  | 17.00 | 6.42 | 0.002 |
| Shift       | 1  | 8.10   | 8.10  | 3.06 | 0.090 |
| Interaction | 3  | 6.50   | 2.17  | 0.82 | 0.494 |
| Error       | 32 | 84.80  | 2.65  |      |       |
| Total       | 39 | 150.40 |       |      |       |

En la figura 16-7 se presenta la gráfica de la interacción entre turnos y máquinas. La gráfica indica que hay una posible interacción entre turnos y máquinas. Sin embargo, en la tabla del análisis de varianza el valor  $p$  de esta interacción indica que no hay una interacción significativa. Cuando no hay interacción, las gráficas del turno 1 y del turno 2 son paralelas. En la figura 16-8, las gráficas de los efectos principales indican que, en este experimento, la máquina 1 fue la que produjo en promedio menos tornillos defectuosos y la máquina 2 fue la que produjo más tornillos defectuosos; se produjeron más defectuosos en el turno 2 que en el turno 1. Sin embargo, el análisis de varianza indica que esta diferencia no es significativa.

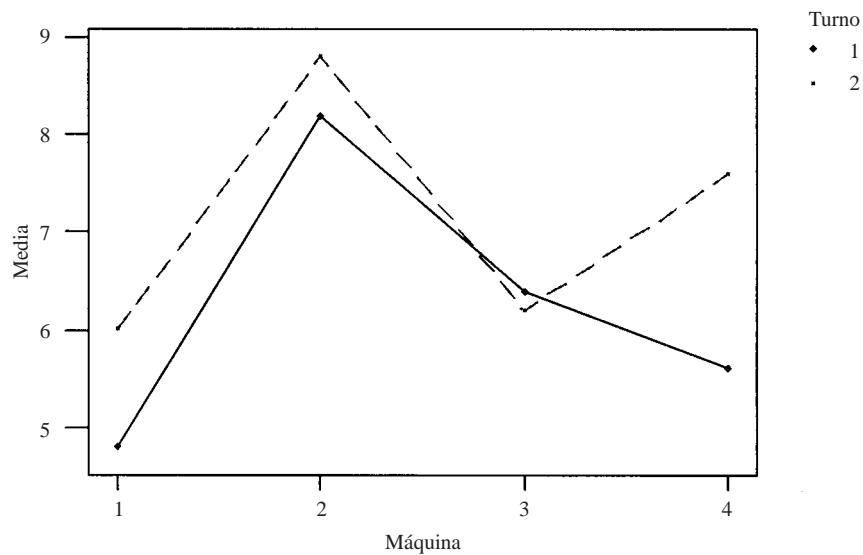


Figura 16-7 Gráfica de la interacción: medias de los datos para defectuosos.

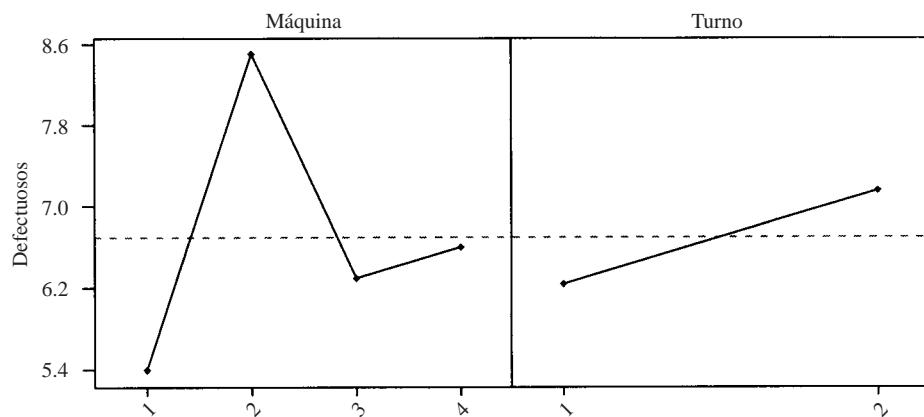


Figura 16-8 Gráfica de los efectos principales: medias de los datos para defectuosos.

**16.14** Resolver el problema 16.13 empleando EXCEL.

### SOLUCIÓN

| A      | B        | C        | D        | E        |
|--------|----------|----------|----------|----------|
|        | máquina1 | máquina2 | máquina3 | máquina4 |
| turno1 | 6        | 10       | 7        | 8        |
| turno1 | 4        | 8        | 5        | 4        |
| turno1 | 5        | 7        | 6        | 6        |
| turno1 | 5        | 7        | 5        | 5        |
| turno1 | 4        | 9        | 9        | 5        |
| turno2 | 5        | 7        | 9        | 5        |
| turno2 | 7        | 9        | 7        | 7        |
| turno2 | 4        | 12       | 5        | 9        |
| turno2 | 6        | 8        | 4        | 7        |
| turno2 | 8        | 8        | 6        | 10       |

Análisis de varianza de dos factores con una sola muestra por grupo

| RESUMEN                          | máquina1 | máquina2 | máquina3 | máquina4 | Total    |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <i>turno1</i>                    |          |          |          |          |          |
| Cuenta                           | 5        | 5        | 5        | 5        | 20       |
| Suma                             | 24       | 41       | 32       | 28       | 125      |
| Promedio                         | 4.8      | 8.2      | 6.4      | 5.6      | 6.25     |
| Varianza                         | 0.7      | 1.7      | 2.8      | 2.3      | 3.25     |
| <i>turno2</i>                    |          |          |          |          |          |
| Cuenta                           | 5        | 5        | 5        | 5        | 20       |
| Suma                             | 30       | 44       | 31       | 38       | 143      |
| Promedio                         | 6        | 8.8      | 6.2      | 7.6      | 7.15     |
| Varianza                         | 2.5      | 3.7      | 3.7      | 3.8      | 4.239474 |
| <i>Total</i>                     |          |          |          |          |          |
| Cuenta                           | 10       | 10       | 10       | 10       | 40       |
| Suma                             | 54       | 85       | 63       | 66       | 270      |
| Promedio                         | 5.4      | 8.5      | 6.3      | 6.6      | 7.15     |
| Varianza                         | 1.822222 | 2.5      | 2.9      | 3.822222 | 2.822222 |
| ANÁLISIS DE VARIANZA             |          |          |          |          |          |
| <i>Origen de las variaciones</i> | SS       | df       | MS       | F        | Valor p  |
| Muestra                          | 8.1      | 1        | 8.1      | 3.056604 | 0.089999 |
| Columnas                         | 51       | 3        | 17       | 6.415094 | 0.001584 |
| Interacción                      | 6.5      | 3        | 2.166667 | 0.81761  | 0.49371  |
| Dentro del grupo                 | 84.8     | 32       | 2.65     |          |          |
| Total                            | 150.4    | 39       |          |          |          |

\*SS, Suma de cuadrados; df, grados de libertad; MS, promedio de los cuadrados; F, probabilidad.

Los datos se ingresan en la hoja de cálculo de EXCEL, como se muestra. Con la secuencia **Tools → Data analysis → Anova: Two-Factor with Replication** se obtiene el cuadro de diálogo de la figura 16-9 que se llena como se muestra en la figura.

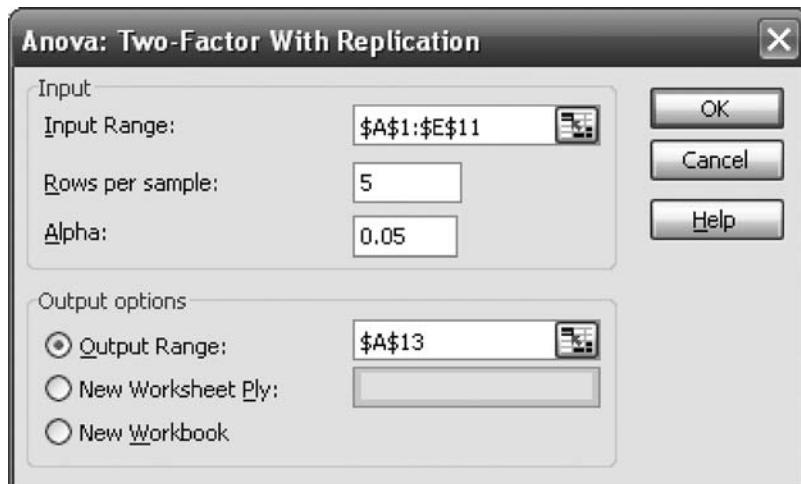


Figura 16-9 EXCEL, cuadro de diálogo para el problema 16.14.

En el análisis de varianza, muestra corresponde a turnos, y columna a máquinas. Comparar estos resultados con los obtenidos con MINITAB en el problema 16.13.

### CUADRADOS LATINOS

- 16.15** Un granjero desea probar los efectos de cuatro fertilizantes (*A*, *B*, *C* y *D*) en la producción de trigo. Con objeto de eliminar las fuentes de error debidas a la variabilidad de la fertilidad del suelo, distribuye los fertilizantes en un cuadrado latino, como se muestra en la tabla 16.24, en donde los números indican la producción en bushels por unidad de área. Hacer un análisis de varianza para determinar, a los niveles de significancia *a)* 0.05 y *b)* 0.01, si hay diferencia entre los fertilizantes. *c)* Proporcionar la solución de MINITAB para este diseño de cuadrado latino. *d)* Proporcionar la solución de STATISTIX para este diseño de cuadrado latino.

### SOLUCIÓN

Primero, como se muestra en la tabla 16.25, se obtienen los totales de los renglones y los totales de las columnas. También se obtiene la producción total obtenida con cada uno de los fertilizantes, como se muestra en la tabla 16.26. Después, como es costumbre, se obtienen la variación total y las variaciones de los renglones, de las columnas y de los tratamientos. Se encuentra que:

La variación total es

$$V = (18)^2 + (21)^2 + (25)^2 + \dots + (10)^2 + (17) - \frac{(295)^2}{16} \\ = 5\ 769 - 5\ 439.06 = 329.94$$

Tabla 16.24

| <i>A</i> 18 | <i>C</i> 21 | <i>D</i> 25 | <i>B</i> 11 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <i>D</i> 22 | <i>B</i> 12 | <i>A</i> 15 | <i>C</i> 19 |
| <i>B</i> 15 | <i>A</i> 20 | <i>C</i> 23 | <i>D</i> 24 |
| <i>C</i> 22 | <i>D</i> 21 | <i>B</i> 10 | <i>A</i> 17 |

Tabla 16.25

|             | <i>A</i> 18 | <i>C</i> 21 | <i>D</i> 25 | <i>B</i> 11 | Total |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| <i>A</i> 18 | 77          | 74          | 73          | 71          | 295   |
| <i>D</i> 22 | 75          | 68          | 82          | 70          |       |
| <i>B</i> 15 | 70          | 82          | 68          | 75          |       |
| <i>C</i> 22 | 70          | 75          | 75          | 72          |       |
| Total       | 295         | 295         | 295         | 295         |       |

Tabla 16.26

|       | A  | B  | C  | D  |     |
|-------|----|----|----|----|-----|
| Total | 70 | 48 | 85 | 92 | 295 |

La variación entre los renglones es

$$V_R = \frac{(75)^2}{4} + \frac{(68)^2}{4} + \frac{(82)^2}{4} + \frac{(70)^2}{4} - \frac{(295)^2}{16} \\ = 5\,468.25 - 5\,439.06 = 29.19$$

La variación entre las columnas es

$$V_C = \frac{(77)^2}{4} + \frac{(74)^2}{4} + \frac{(73)^2}{4} + \frac{(71)^2}{4} - \frac{(295)^2}{16} \\ = 5\,443.75 - 5\,439.06 = 4.69$$

La variación entre los tratamientos es

$$V_B = \frac{(70)^2}{4} + \frac{(48)^2}{4} + \frac{(85)^2}{4} + \frac{(92)^2}{4} - \frac{(295)^2}{16} = 5\,723.25 - 5\,439.06 = 284.19$$

En la tabla 16.27 se muestra el análisis de varianza.

Tabla 16.27

| Variación            | Grados de libertad | Cuadrado medio | F    |
|----------------------|--------------------|----------------|------|
| Renglones, 29.19     | 3                  | 9.73           | 4.92 |
| Columnas, 4.69       | 3                  | 1.563          | 0.79 |
| Tratamientos, 284.19 | 3                  | 94.73          | 47.9 |
| Residuales, 11.87    | 6                  | 1.978          |      |
| Total, 329.94        | 15                 |                |      |

- a) Como  $F_{.95,3,6} = 4.76$ , la hipótesis de que las medias de los renglones son iguales puede rechazarse al nivel de significancia 0.05. Al nivel 0.05 existe diferencia en la fertilidad del suelo entre un renglón y otro.  
 Como el valor F para las columnas es menor a 1, se concluye que en las columnas no hay diferencia en la fertilidad del suelo.  
 Como el valor F para los tratamientos es  $47.9 > 4.76$ , se concluye que hay diferencia entre los fertilizantes.
- b) Como  $F_{.99,3,6} = 9.78$ , al nivel de significancia 0.01 se puede aceptar la hipótesis de que no hay diferencia en la fertilidad del suelo en los renglones (o en las columnas). Sin embargo, al nivel de significancia 0.01 se sigue concluyendo que hay diferencia entre los fertilizantes.

c) Primero se presenta la estructura que deben tener los datos en la hoja de cálculo de MINITAB.

| Row | Rows | Columns | Treatment | Yield |
|-----|------|---------|-----------|-------|
| 1   | 1    | 1       | 1         | 18    |
| 2   | 1    | 2       | 3         | 21    |
| 3   | 1    | 3       | 4         | 25    |
| 4   | 1    | 4       | 2         | 11    |
| 5   | 2    | 1       | 4         | 22    |
| 6   | 2    | 2       | 2         | 12    |
| 7   | 2    | 3       | 1         | 15    |
| 8   | 2    | 4       | 3         | 19    |
| 9   | 3    | 1       | 2         | 15    |
| 10  | 3    | 2       | 1         | 20    |
| 11  | 3    | 3       | 3         | 23    |
| 12  | 3    | 4       | 4         | 24    |
| 13  | 4    | 1       | 3         | 22    |
| 14  | 4    | 2       | 4         | 21    |
| 15  | 4    | 3       | 2         | 10    |
| 16  | 4    | 4       | 1         | 17    |

Obsérvese que los renglones y las columnas se han numerado del 1 al 4. Los fertilizantes A a D de la tabla 16.24 han sido codificados en la hoja de cálculo 1 al 4, respectivamente. Con la secuencia de MINITAB **Stat → ANOVA → General Linear Model** se obtiene el resultado siguiente.

Modelo lineal general: rendimiento versus filas, columnas, tratamiento

| Factor    | Type  | Levels | Values     |
|-----------|-------|--------|------------|
| Rows      | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |
| Columns   | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |
| Treatment | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |

#### Analysis of Variance for Yield, using Adjusted SS for Tests

| Source    | DF | Seq SS  | Adj SS  | Adj MS | F     | P     |
|-----------|----|---------|---------|--------|-------|-------|
| Rows      | 3  | 29.188  | 29.188  | 9.729  | 4.92  | 0.047 |
| Columns   | 3  | 4.688   | 4.687   | 1.562  | 0.79  | 0.542 |
| Treatment | 3  | 284.188 | 284.188 | 94.729 | 47.86 | 0.000 |
| Error     | 6  | 11.875  | 11.875  | 1.979  |       |       |
| Total     | 15 | 329.938 |         |        |       |       |

$$S = 1.40683 \quad R-Sq = 96.40\% \quad R-sq(adj) = 91.00\%$$

Los resultados de MINITAB coinciden con los antes obtenidos a mano. Estos resultados indican que hay diferencia en la fertilidad de un renglón a otro, al nivel de significancia 0.05, pero no al nivel 0.01. No hay diferencia en la fertilidad de una columna a otra. Hay diferencia entre los cuatro fertilizantes al nivel de significancia 0.01.

d) Con la secuencia **Statistics → Linear Models → Analysis of Variance → Latin Square Design** de STATISTIX se obtiene el resultado siguiente.

Statistix 8.0

#### Latin Square AOV Table for Yield

| Source    | DF | SS      | MS      | F     | P      |
|-----------|----|---------|---------|-------|--------|
| Rows      | 3  | 29.188  | 9.7292  |       |        |
| Columns   | 3  | 4.688   | 1.5625  |       |        |
| Treatment | 3  | 284.188 | 94.7292 | 47.86 | 0.0001 |
| Error     | 6  | 11.875  | 1.9792  |       |        |
| Total     | 15 | 329.938 |         |       |        |

## CUADRADOS GRECOLATINOS

- 16.16** Se quiere determinar si hay una diferencia significativa entre las gasolinas  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  en su rendimiento por galón. Diseñar un experimento en el que se usen cuatro conductores distintos, cuatro automóviles distintos y cuatro carreteras distintas.

### SOLUCIÓN

Como el número de gasolinas, de conductores, de automóviles y de carreteras es el mismo (cuatro), puede emplearse un cuadrado grecolatino. Supóngase que los diferentes automóviles están representados por los renglones y los diferentes conductores por las columnas, como se muestra en la tabla 16.28. Después, las gasolinas ( $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$ ) se asignan en forma aleatoria a los renglones y a las columnas, sujetas a la condición de que cada letra aparezca sólo una vez en cada renglón y una vez en cada columna. Por lo tanto, cada conductor tendrá la oportunidad de conducir cada uno de los automóviles y usar cada uno de los tipos de gasolina, y ningún automóvil será conducido dos veces con el mismo tipo de gasolina.

Ahora se asignan en forma aleatoria las cuatro carreteras, denotadas  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\delta$ , sujetándolas a la misma condición impuesta a los cuadrados latinos. Por lo tanto, cada conductor tendrá también la oportunidad de conducir por cada una de las carreteras. En la tabla 16.28 se muestra una posible distribución.

Tabla 16.28

|             | Conductor  |            |            |            |
|-------------|------------|------------|------------|------------|
|             | 1          | 2          | 3          | 4          |
| Automóvil 1 | $B_\gamma$ | $A_\beta$  | $D_\delta$ | $C_\alpha$ |
| Automóvil 2 | $A_\delta$ | $B_\alpha$ | $C_\gamma$ | $D_\beta$  |
| Automóvil 3 | $D_\alpha$ | $C_\delta$ | $B_\beta$  | $A_\gamma$ |
| Automóvil 4 | $C_\beta$  | $D_\gamma$ | $A_\alpha$ | $B_\delta$ |

- 16.17** Supóngase que al llevar a cabo el experimento del problema 16.16, las millas por galón son las indicadas en la tabla 16.29. Utilizar el análisis de varianza para determinar si al nivel de significancia 0.05 hay diferencias. Usar MINITAB para obtener la tabla del análisis de varianza y usar los valores  $p$  dados por MINITAB para probar si existen diferencias al nivel de significancia 0.05.

Tabla 16.29

|             | Conductor     |               |               |               |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|             | 1             | 2             | 3             | 4             |
| Automóvil 1 | $B_\gamma$ 19 | $A_\beta$ 16  | $D_\delta$ 16 | $C_\alpha$ 14 |
| Automóvil 2 | $A_\delta$ 15 | $B_\alpha$ 18 | $C_\gamma$ 11 | $D_\beta$ 15  |
| Automóvil 3 | $D_\alpha$ 14 | $C_\delta$ 11 | $B_\beta$ 21  | $A_\gamma$ 16 |
| Automóvil 4 | $C_\beta$ 16  | $D_\gamma$ 16 | $A_\alpha$ 15 | $B_\delta$ 23 |

**SOLUCIÓN**

Primero se obtienen los totales de los renglones y de las columnas, como se muestra en la tabla 16.30. Después se obtienen los totales correspondientes a cada letra latina y a cada letra griega como se indica a continuación:

$$\text{Total } A: 15 + 16 + 15 + 16 = 62$$

$$\text{Total } B: 19 + 18 + 21 + 23 = 81$$

$$\text{Total } C: 16 + 11 + 11 + 14 = 52$$

$$\text{Total } D: 14 + 16 + 16 + 15 = 61$$

$$\text{Total } \alpha: 14 + 18 + 15 + 14 = 61$$

$$\text{Total } \beta: 16 + 16 + 21 + 15 = 68$$

$$\text{Total } \gamma: 19 + 16 + 11 + 16 = 62$$

$$\text{Total } \delta: 15 + 11 + 16 + 23 = 65$$

Ahora, se calculan las variaciones correspondientes, usando el método abreviado:

$$\text{Renglones: } \frac{(65)^2}{4} + \frac{(59)^2}{4} + \frac{(62)^2}{4} + \frac{(70)^2}{4} - \frac{(256)^2}{16} = 4\ 112.50 - 4\ 096 = 16.50$$

$$\text{Columnas: } \frac{(64)^2}{4} + \frac{(61)^2}{4} + \frac{(63)^2}{4} + \frac{(68)^2}{4} - \frac{(256)^2}{16} = 4\ 102.50 - 4\ 096 = 6.50$$

$$\text{Gasolinas } (A, B, C, D): \frac{(62)^2}{4} + \frac{(81)^2}{4} + \frac{(52)^2}{4} + \frac{(61)^2}{4} - \frac{(256)^2}{16} = 4\ 207.50 - 4\ 096 = 111.50$$

$$\text{Carreteras } (\alpha, \beta, \gamma, \delta): \frac{(61)^2}{4} + \frac{(68)^2}{4} + \frac{(62)^2}{4} + \frac{(65)^2}{4} - \frac{(256)^2}{16} = 4\ 103.50 - 4\ 096 = 7.50$$

La variación total es

$$(19)^2 + (16)^2 + (16)^2 + \cdots + (15)^2 + (23)^2 - \frac{(256)^2}{16} = 4\ 244 - 4\ 096 = 148.00$$

de manera que la variación debida al error es

$$148.00 - 16.50 - 6.50 - 111.50 - 7.50 = 6.00$$

Los resultados se muestran en la tabla 16.31, la tabla del análisis de varianza. El número total de grados de libertad es  $N^2 - 1$ , ya que se trata de un cuadrado de  $N \times N$ . Cada uno de los renglones, de las columnas, de las letras latinas y de las letras griegas tiene  $N - 1$  grados de libertad. Por lo tanto, los grados de libertad para el error son  $N^2 - 1 - 4(N - 1) = (N - 1)(N - 3)$ . En este caso,  $N = 4$ .

**Tabla 16.30**

|               |               |               |               | Total |
|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| $B_\gamma$ 19 | $A_\beta$ 16  | $D_\delta$ 16 | $C_\alpha$ 14 | 65    |
| $A_\delta$ 15 | $B_\alpha$ 18 | $C_\gamma$ 11 | $D_\beta$ 15  | 59    |
| $D_\alpha$ 14 | $C_\delta$ 11 | $B_\beta$ 21  | $A_\gamma$ 16 | 62    |
| $C_\beta$ 16  | $D_\gamma$ 16 | $A_\alpha$ 15 | $B_\delta$ 23 | 70    |
| Total         | 64            | 61            | 63            | 256   |

Tabla 16.31

| Variación   | Grados de libertad | Cuadrado medio | F                             |
|---|--------------------|----------------|-------------------------------|
| Renglones (automóviles), 16.50                          | 3                  | 5.500          | $\frac{5.500}{2.000} = 2.75$  |
| Columnas (conductores), 6.50                            | 3                  | 2.167          | $\frac{2.167}{2.000} = 1.08$  |
| Gasolinas (A, B, C y D), 111.50                         | 3                  | 37.167         | $\frac{37.167}{2.000} = 18.6$ |
| Carreteras ( $\alpha, \beta, \gamma$ y $\delta$ ), 7.50 | 3                  | 2.500          | $\frac{2.500}{2.000} = 1.25$  |
| Error, 6.00   | 3                  | 2.000          |                               |
| Total, 148.00   | 15                 |                |                               |

Se tiene que  $F_{.95,3,3} = 9.28$  y  $F_{.99,3,3} = 29.5$ . Por lo tanto, la hipótesis de que las gasolinas son iguales puede rechazarse al nivel 0.05, pero no al nivel 0.01.

Primero se presenta la estructura que deben tener los datos en la hoja de cálculo de MINITAB.

| Row | Car | Driver | Gasoline | Road | MPG |
|-----|-----|--------|----------|------|-----|
| 1   | 1   | 1      | 2        | 3    | 19  |
| 2   | 1   | 2      | 1        | 2    | 16  |
| 3   | 1   | 3      | 4        | 4    | 16  |
| 4   | 1   | 4      | 3        | 1    | 14  |
| 5   | 2   | 1      | 1        | 4    | 15  |
| 6   | 2   | 2      | 2        | 1    | 18  |
| 7   | 2   | 3      | 3        | 3    | 11  |
| 8   | 2   | 4      | 4        | 2    | 15  |
| 9   | 3   | 1      | 4        | 1    | 14  |
| 10  | 3   | 2      | 3        | 4    | 11  |
| 11  | 3   | 3      | 2        | 2    | 21  |
| 12  | 3   | 4      | 1        | 3    | 16  |
| 13  | 4   | 1      | 3        | 2    | 16  |
| 14  | 4   | 2      | 4        | 3    | 16  |
| 15  | 4   | 3      | 1        | 1    | 15  |
| 16  | 4   | 4      | 2        | 4    | 23  |

Obsérvese que los automóviles y los conductores están numerados en la hoja de cálculo de MINITAB igual que en la tabla 16.29. Las gasolinas en la tabla 16.29 van de la A a la D, y en la hoja de cálculo de MINITAB se han codificado del 1 al 4, respectivamente. Las carreteras son  $\alpha, \beta, \gamma$  y  $\delta$  en la tabla 16.29, en la hoja de cálculo de MINITAB se han codificado 1, 2, 3 y 4. Con la secuencia **Stat → ANOVA → General Linear Model** de MINITAB se obtienen los resultados siguientes.

Modelo lineal general: millas por galón versus automóvil, conductor, gasolina, carretera

| Factor   | Type  | Levels | Values     |
|----------|-------|--------|------------|
| Car      | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |
| Driver   | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |
| Gasoline | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |
| Road     | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |

## Analysis of Variance for MPG, using Adjusted SS for Tests

| Source   | DF | Seq SS  | Adj SS  | Adj MS | F     | P     |
|----------|----|---------|---------|--------|-------|-------|
| Car      | 3  | 16.500  | 16.500  | 5.500  | 2.75  | 0.214 |
| Driver   | 3  | 6.500   | 6.500   | 2.167  | 1.08  | 0.475 |
| Gasoline | 3  | 111.500 | 111.500 | 37.167 | 18.58 | 0.019 |
| Road     | 3  | 7.500   | 7.500   | 2.500  | 1.25  | 0.429 |
| Error    | 3  | 6.000   | 6.000   | 2.000  |       |       |
| Total    | 15 | 148.000 |         |        |       |       |

La columna titulada Seq SS en los resultados de MINITAB corresponde a la columna titulada Mean Square en la tabla 16.31. Los valores  $F$  calculados en los resultados de MINITAB son los mismos que los de la tabla 16.31. Los valores  $p$  para automóviles, conductores, marcas de gasolina y carreteras son 0.214, 0.475, 0.019 y 0.429, respectivamente. Recuérdese que un valor  $p$  es el mínimo valor para un nivel de significancia preestablecido al que puede rechazarse la hipótesis de medias iguales de un factor. Los valores  $p$  indican que no hay diferencia entre los automóviles, conductores o carreteras a los niveles 0.01 o 0.05. Las medias de las marcas de gasolina son estadísticamente diferentes al nivel 0.05, pero no al nivel 0.01. Posteriores investigaciones sobre las medias de las marcas de gasolina pueden indicar cómo éstas difieren.

## PROBLEMAS DIVERSOS

**16.18** Probar [ecuación (15) de este capítulo] que  $\sum_j \alpha_j = 0$ .

## SOLUCIÓN

Las medias de la población de los tratamientos  $\mu_j$  y la media de la población total  $\mu$  se relacionan mediante

$$\mu = \frac{1}{a} \sum_j \mu_j \quad (53)$$

Entonces, como  $\alpha_j = \mu_j - \mu$ , empleando la ecuación (53) se tiene,

$$\sum_j \alpha_j = \sum_j (\mu_j - \mu) = \sum_j \mu_j - a\mu = 0 \quad (54)$$

**16.19** Deducir: a) la ecuación (16) y b) la ecuación (17) de este capítulo.

## SOLUCIÓN

a) Por definición, se tiene

$$V_W = \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X}_{j.})^2 = b \sum_{j=1}^a \left[ \frac{1}{b} \sum_{k=1}^b (X_{jk} - \bar{X}_{j.})^2 \right] = b \sum_{j=1}^a S_j^2$$

donde  $S_j^2$  es la varianza muestral correspondiente al tratamiento  $j$ . Entonces, como el tamaño de la muestra es  $b$ ,

$$E(V_W) = b \sum_{j=1}^a E(S_j^2) = b \sum_{j=1}^a \left( \frac{b-1}{b} \sigma^2 \right) = a(b-1)\sigma^2$$

b) Por definición

$$V_B = b \sum_{j=1}^a (\bar{X}_{j.} - \bar{X})^2 = b \sum_{j=1}^a \bar{X}_{j.}^2 - 2b\bar{X} \sum_{j=1}^a \bar{X}_{j.} + ab\bar{X}^2 = b \sum_{j=1}^a \bar{X}_{j.}^2 - ab\bar{X}^2$$

ya que  $\bar{X} = (\sum_j \bar{X}_{j.})/a$ . Entonces, omitiendo el índice de sumación se tiene

$$E(V_B) = b \sum_j E(\bar{X}_{j.}^2) - abE(\bar{X}^2) \quad (55)$$

Ahora para cualquier variable aleatoria  $U$ ,  $E(U^2) = \text{var}(U) + [E(U)]^2$ , donde  $\text{var}(U)$  denota la varianza de  $U$ . Por lo tanto,

$$E(\bar{X}_{j.}^2) = \text{var}(\bar{X}_{j.}) + [E(\bar{X}_{j.})]^2 \quad (56)$$

$$E(\bar{X}^2) = \text{var}(\bar{X}) + [E(\bar{X})]^2 \quad (57)$$

Pero como las poblaciones de los tratamientos son normales, con media  $\mu_j = \mu + \alpha_j$ , se tiene

$$\text{var}(\bar{X}_{j.}) = \frac{\sigma^2}{b} \quad (58)$$

$$\text{var}(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{ab} \quad (59)$$

$$E(\bar{X}_{j.}) = \mu_j = \mu + \alpha_j \quad (60)$$

$$E(\bar{X}) = \mu \quad (61)$$

Usando las ecuaciones (56) a (61) junto con la ecuación (55), se tiene

$$\begin{aligned} E(V_B) &= b \sum \left[ \frac{\sigma^2}{b} + (\mu + \alpha_j)^2 \right] - ab \left[ \frac{\sigma^2}{ab} + \mu^2 \right] \\ &= a\sigma^2 + b \sum (\mu + \alpha_j)^2 - \sigma^2 - ab\mu^2 \\ &= (a-1)\sigma^2 + ab\mu^2 + 2b\mu \sum \alpha_j + b \sum \alpha_j^2 + ab\mu^2 \\ &= (a-1)\sigma^2 + b \sum \alpha_j^2 \end{aligned}$$

### 16.20 Probar el teorema 1 de este capítulo.

#### SOLUCIÓN

Como se muestra en el problema 16.19,

$$V_W = b \sum_{j=1}^a S_j^2 \quad \text{o bien} \quad \frac{V_W}{\sigma^2} = \sum_{j=1}^a \frac{bS_j^2}{\sigma^2}$$

donde  $S_j^2$  es la varianza muestral de muestras de tamaño  $b$  obtenidas de la población del tratamiento  $j$ . Se ve que  $bS_j^2/\sigma^2$  tiene una distribución ji cuadrada con  $b-1$  grados de libertad. Por lo tanto, como las varianzas  $S_j^2$  son independientes, se concluye, de acuerdo con la página 299, que  $V_W/\sigma^2$  tiene una distribución ji cuadrada con  $a(b-1)$  grados de libertad.

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### CLASIFICACIÓN EN UN SENTIDO O EXPERIMENTOS CON UN FACTOR

Se aconseja al lector que todos estos ejercicios los haga primero “a mano”, empleando las ecuaciones dadas en este capítulo, antes de usar el software sugerido. Esto le ayudará a comprender mejor la técnica ANOVA, así como a apreciar la potencia del software.

- 16.21** Se realiza un experimento para determinar el rendimiento de cinco tipos diferentes de trigo: *A, B, C, D* y *E*. A cada variedad se le asignan cuatro parcelas; los rendimientos (en bushels por acre) se muestran en la tabla 16.32. Suponiendo que las parcelas tengan una fertilidad semejante y que las variedades de trigo se asignen a las parcelas en forma aleatoria, a los niveles de significancia *a) 0.05* y *b) 0.01*, determinar si hay diferencia entre los rendimientos. *c) Proporcionar el análisis que se obtiene para esta clasificación en un sentido o experimento de un factor empleando MINITAB.*

**Tabla 16.32**

|          |    |    |    |    |
|----------|----|----|----|----|
| <i>A</i> | 20 | 12 | 15 | 19 |
| <i>B</i> | 17 | 14 | 12 | 15 |
| <i>C</i> | 23 | 16 | 18 | 14 |
| <i>D</i> | 15 | 17 | 20 | 12 |
| <i>E</i> | 21 | 14 | 17 | 18 |

- 16.22** Una empresa quiere probar cuatro tipos de neumáticos: *A, B, C* y *D*. En la tabla 16.33 se da (en miles de millas) la duración de estos neumáticos, determinada por el dibujo, donde cada tipo de neumático ha sido probado en seis automóviles similares asignados, a los neumáticos, en forma aleatoria. A los niveles de significancia: *a) 0.05* y *b) 0.01*, determinar si hay alguna diferencia significativa entre los neumáticos. *c) Proporcionar el análisis que se obtiene para esta clasificación en un sentido o experimento de un factor empleando STATISTIX.*

**Tabla 16.33**

|          |    |    |    |    |    |    |
|----------|----|----|----|----|----|----|
| <i>A</i> | 33 | 38 | 36 | 40 | 31 | 35 |
| <i>B</i> | 32 | 40 | 42 | 38 | 30 | 34 |
| <i>C</i> | 31 | 37 | 35 | 33 | 34 | 30 |
| <i>D</i> | 29 | 34 | 32 | 30 | 33 | 31 |

- 16.23** Un maestro quiere probar tres métodos de enseñanza: I, II y III. Para esto se eligen en forma aleatoria tres grupos, cada uno de cinco estudiantes y con cada grupo se emplea uno de estos tres métodos de enseñanza. A todos los estudiantes se les aplica un mismo examen. En la tabla 16.34 se presentan las calificaciones que obtuvieron. A los niveles de significancia: *a) 0.05* y *b) 0.01*, determinar si hay diferencia entre estos tres métodos de enseñanza. *c) Proporcionar el análisis que se obtiene empleando EXCEL para esta clasificación en un sentido o experimento de un factor.*

**Tabla 16.34**

|            |    |    |    |    |    |
|------------|----|----|----|----|----|
| Método I   | 75 | 62 | 71 | 58 | 73 |
| Método II  | 81 | 85 | 68 | 92 | 90 |
| Método III | 73 | 79 | 60 | 75 | 81 |

## MODIFICACIONES PARA NÚMEROS DISTINTOS DE OBSERVACIONES

- 16.24** En la tabla 16.35 se dan las cifras en millas por galón obtenidas en automóviles similares usando cinco marcas de gasolina. A los niveles de significancia: *a*) 0.05 y *b*) 0.01, determinar si hay diferencia entre las marcas. *c*) Proporcionar el análisis que se obtiene para esta clasificación en un sentido o experimento de un factor empleando SPSS.

**Tabla 16.35**

|         |    |    |    |    |    |
|---------|----|----|----|----|----|
| Marca A | 12 | 15 | 14 | 11 | 15 |
| Marca B | 14 | 12 | 15 |    |    |
| Marca C | 11 | 12 | 10 | 14 |    |
| Marca D | 15 | 18 | 16 | 17 | 14 |
| Marca E | 10 | 12 | 14 | 12 |    |

**Tabla 16.36**

|             |    |    |    |    |
|-------------|----|----|----|----|
| Matemáticas | 72 | 80 | 83 | 75 |
| Ciencias    | 81 | 74 | 77 |    |
| Inglés      | 88 | 82 | 90 | 87 |
| Economía    | 74 | 71 | 77 | 70 |

- 16.25** En la tabla 16.36 se presentan las calificaciones obtenidas durante un semestre por un estudiante. A los niveles de significancia: *a*) 0.05 y *b*) 0.01, determinar si hay diferencia significativa entre las calificaciones de este estudiante. *c*) Proporcionar el análisis que se obtiene para esta clasificación en un sentido o experimento de un factor empleando SAS.

## CLASIFICACIÓN EN DOS SENTIDOS O EXPERIMENTOS CON DOS FACTORES

- 16.26** Los artículos que produce una empresa son fabricados por tres operadores que usan tres máquinas diferentes. La empresa desea determinar si hay diferencia: *a*) entre los operadores y *b*) entre las máquinas. Se realiza un experimento para determinar la cantidad de artículos por día producidos por cada operador usando cada máquina; en la tabla 16.37 se muestran los resultados. Empleando MINITAB al nivel de significancia 0.05, proporcionar la información buscada.

**Tabla 16.37**

|           | Operador |    |    |
|-----------|----------|----|----|
|           | 1        | 2  | 3  |
| Máquina A | 23       | 27 | 24 |
| Máquina B | 34       | 30 | 28 |
| Máquina C | 28       | 25 | 27 |

**Tabla 16.38**

|          | Tipo de trigo |    |     |    |
|----------|---------------|----|-----|----|
|          | I             | II | III | IV |
| Bloque A | 12            | 15 | 10  | 14 |
| Bloque B | 15            | 19 | 12  | 11 |
| Bloque C | 14            | 18 | 15  | 12 |
| Bloque D | 11            | 16 | 12  | 16 |
| Bloque E | 16            | 17 | 11  | 14 |

- 16.27** Resolver el problema 16.26 usando EXCEL y el nivel de significancia 0.01.

- 16.28** Se plantan semillas de cuatro tipos diferentes de trigo en cinco bloques. Cada bloque se divide en cuatro parcelas que después se asignan en forma aleatoria a los cuatro tipos de trigo. Al nivel de significancia 0.05, determinar si los rendimientos, en bushels por acre, que se presentan en la tabla 16.38, varían en forma significativa con respecto a: *a*) el suelo (es decir, a los cinco bloques) y *b*) el tipo de trigo. Usar SPSS para construir una tabla de ANOVA.

- 16.29** Resolver el problema 16.28 usando STATISTIX y el nivel de significancia 0.01 para construir ANOVA.

- 16.30** Supóngase que en el problema 16.22 la primera observación con cada tipo de neumático se haga usando determinado tipo de automóvil, la segunda observación se haga usando un segundo tipo de automóvil, y así sucesivamente. Determinar al

nivel de significancia 0.05 si hay diferencia: *a*) entre los tipos de neumáticos y *b*) entre los tipos de automóviles. Usar SAS para construir la tabla de ANOVA.

- 16.31** Resolver el problema 16.30 usando MINITAB y el nivel de significancia 0.01.
- 16.32** Supóngase que en el problema 16.23 la primera entrada para cada método de enseñanza corresponde a un estudiante de determinada escuela, la segunda a un estudiante de otra escuela, y así sucesivamente. Probar la hipótesis de que al nivel de significancia 0.05 hay diferencia: *a*) entre los métodos de enseñanza y *b*) entre las escuelas. Para construir una tabla de ANOVA usar STATISTIX.
- 16.33** Se realiza un experimento para probar si el color de pelo y la estatura de las estudiantes de Estados Unidos tiene alguna relación con los logros escolares. En la tabla 16.39 se presentan los resultados, donde los números indican la cantidad de personas en el 10% superior de esta evaluación. Analizar el experimento al nivel de significancia 0.05. Para construir una tabla de ANOVA utilizar EXCEL.

**Tabla 16.39**

|         | Pelirroja | Rubia | Castaña |
|---------|-----------|-------|---------|
| Alta    | 75        | 78    | 80      |
| Mediana | 81        | 76    | 79      |
| Baja    | 73        | 75    | 77      |

**Tabla 16.40**

|   |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|
| A | 16 | 18 | 20 | 23 |
| B | 15 | 17 | 16 | 19 |
| C | 21 | 19 | 18 | 21 |
| D | 18 | 22 | 21 | 23 |
| E | 17 | 18 | 24 | 20 |

- 16.34** Resolver el problema 16.33 al nivel de significancia 0.01. Usar SPSS para obtener la tabla de ANOVA y comparar los resultados con los de EXCEL dados en el problema 16.33.

### EXPERIMENTOS CON DOS FACTORES CON REPLICACIÓN

- 16.35** Supóngase que el experimento del problema 16.21 se llevó a cabo en el sur y que las columnas de la tabla 16.32 indican ahora cuatro tipos de fertilizantes, y que un experimento similar se lleva a cabo en el oeste dando los resultados que se muestran en la tabla 16.40. Al nivel de significancia 0.05, determinar si hay diferencia en los rendimientos que se deban a: *a*) los fertilizantes y *b*) el lugar. Usar MINITAB para elaborar la tabla de ANOVA.
- 16.36** Resolver el problema 16.35 al nivel de significancia 0.01. Para elaborar la tabla de ANOVA emplear STATISTIX y comparar los resultados con los dados por MINITAB en el problema 16.35.
- 16.37** En la tabla 16.41 se dan las cantidades de artículos producidos, en cada uno de los días de la semana, por cuatro operadores que trabajan con dos tipos de máquinas, I y II. Al nivel de significancia 0.05, determinar si hay diferencias significativas: *a*) entre los operadores y *b*) entre las máquinas. Construir una tabla de ANOVA usando SAS y otra usando MINITAB.

**Tabla 16.41**

|            | Máquina I |        |           |        |         | Máquina II |        |           |        |         |
|------------|-----------|--------|-----------|--------|---------|------------|--------|-----------|--------|---------|
|            | Lunes     | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Lunes      | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes |
| Operador A | 15        | 18     | 17        | 20     | 12      | 14         | 16     | 18        | 17     | 15      |
| Operador B | 12        | 16     | 14        | 18     | 11      | 11         | 15     | 12        | 16     | 12      |
| Operador C | 14        | 17     | 18        | 16     | 13      | 12         | 14     | 16        | 14     | 11      |
| Operador D | 19        | 16     | 21        | 23     | 18      | 17         | 15     | 18        | 20     | 17      |

## CUADRADOS LATINOS

- 16.38** Se realiza un experimento para probar los efectos sobre la producción de trigo de cuatro fertilizantes ( $A, B, C$  y  $D$ ) y de las variaciones en el suelo en dos direcciones perpendiculares. Se obtiene el cuadrado latino de la tabla 16.42, donde los números corresponden a la producción de trigo por unidad de área. Al nivel de significancia 0.01, probar la hipótesis de que no hay diferencia entre: *a)* los fertilizantes y *b)* las variaciones en el suelo. Usar STATISTIX para elaborar la tabla de ANOVA.

**Tabla 16.42**

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| C 8  | A 10 | D 12 | B 11 |
| A 14 | C 12 | B 11 | D 15 |
| D 10 | B 14 | C 16 | A 10 |
| B 7  | D 16 | A 14 | C 12 |

**Tabla 16.43**

|      |      |      |
|------|------|------|
| E 75 | W 78 | M 80 |
| M 81 | E 76 | W 79 |
| W 73 | M 75 | E 77 |

- 16.39** Resolver el problema 16.38 al nivel de significancia 0.05. Para construir la tabla ANOVA utilizar MINITAB y comparar los resultados con los de STATISTIX del problema 16.38.

- 16.40** Volviendo al problema 16.33, suponer que se introduce un factor más, dado por el área  $E, M$  o  $W$  de Estados Unidos en la que nació la estudiante, como se muestran en la tabla 16.43. Al nivel de significancia 0.05, determinar si hay diferencia significativa en los logros académicos de las estudiantes debido a: *a)* la estatura, *b)* el color de pelo y *c)* el lugar de nacimiento. Usar SPSS para elaborar la tabla de ANOVA.

## CUADRADOS GRECOLATINOS

- 16.41** Con objeto de producir un tipo mejor de alimento para gallinas, a los ingredientes básicos se les agregan cuatro cantidades distintas de cada una de dos sustancias químicas. Las diferentes cantidades de la primera sustancia química se indican como  $A, B, C$  y  $D$ , en tanto que las cantidades de la segunda sustancia química se indican como  $\alpha, \beta, \gamma$  y  $\delta$ . El alimento es suministrado a pollitos recién nacidos agrupados de acuerdo con cuatro pesos iniciales ( $W_1, W_2, W_3$  y  $W_4$ ) y a cuatro especies diferentes ( $S_1, S_2, S_3$  y  $S_4$ ). En el cuadro grecolatino de la tabla 16.44 se da el aumento de peso por unidad de tiempo. Efectuar un análisis de varianza de este experimento al nivel de significancia 0.05 y brindar las conclusiones que se obtengan. Para elaborar la tabla de ANOVA, usar MINITAB.

**Tabla 16.44**

|       | $W_1$        | $W_2$         | $W_3$         | $W_4$        |
|-------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| $S_1$ | $C_\gamma 8$ | $B_\beta 6$   | $A_\alpha 5$  | $D_\delta 6$ |
| $S_2$ | $A_\delta 4$ | $D_\alpha 3$  | $C_\beta 7$   | $B_\gamma 3$ |
| $S_3$ | $D_\beta 5$  | $A_\gamma 6$  | $B_\delta 5$  | $C_\alpha 6$ |
| $S_4$ | $B_\alpha 6$ | $C_\delta 10$ | $D_\gamma 10$ | $A_\beta 8$  |

- 16.42** Cada una de cuatro empresas ( $C_1, C_2, C_3$  y  $C_4$ ) fabrica cuatro tipos distintos de cable ( $T_1, T_2, T_3$  y  $T_4$ ). Cuatro operadores ( $A, B, C$  y  $D$ ) emplean cuatro máquinas diferentes ( $\alpha, \beta, \gamma$  y  $\delta$ ) para medir la resistencia de los cables. Las resistencias

promedio encontradas se presentan en el cuadro grecolatino de la tabla 16.45. Al nivel de significancia 0.05, hacer un análisis de varianza y proporcionar las conclusiones. Usar SPSS para elaborar la tabla de ANOVA.

### PROBLEMAS DIVERSOS

- 16.43** En la tabla 16.46 se dan los datos del óxido acumulado sobre hierro tratado con las sustancias químicas  $A$ ,  $B$  y  $C$ , respectivamente. A los niveles de significancia: *a*) 0.05 y *b*) 0.01, determinar si hay diferencia significativa entre los tratamientos. Usar EXCEL para elaborar la tabla de ANOVA.

Tabla 16.45

|       | $C_1$          | $C_2$          | $C_3$          | $C_4$          |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $T_1$ | $A_\beta$ 164  | $B_\gamma$ 181 | $C_\alpha$ 193 | $D_\delta$ 160 |
| $T_2$ | $C_\delta$ 171 | $D_\alpha$ 162 | $A_\gamma$ 183 | $B_\beta$ 145  |
| $T_3$ | $D_\gamma$ 198 | $C_\beta$ 212  | $B_\delta$ 207 | $A_\alpha$ 188 |
| $T_4$ | $B_\alpha$ 157 | $A_\delta$ 172 | $D_\beta$ 166  | $C_\gamma$ 136 |

Tabla 16.46

|     |   |   |   |   |
|-----|---|---|---|---|
| $A$ | 3 | 5 | 4 | 4 |
| $B$ | 4 | 2 | 3 | 3 |
| $C$ | 6 | 4 | 5 | 5 |

- 16.44** En un experimento se mide el coeficiente intelectual (CI) de estudiantes adultos de estaturas baja, media y alta. En la tabla 16.47 se dan los resultados. A los niveles de significancia: *a*) 0.05 y *b*) 0.01, determinar si hay diferencia en los CI de acuerdo con las distintas estaturas. Usar MINITAB para elaborar la tabla de ANOVA.

Tabla 16.47

|       |     |     |     |     |    |
|-------|-----|-----|-----|-----|----|
| Alta  | 110 | 105 | 118 | 112 | 90 |
| Baja  | 95  | 103 | 115 | 107 |    |
| Media | 108 | 112 | 93  | 104 | 96 |

- 16.45** Probar las ecuaciones (10), (11) y (12) de este capítulo.

- 16.46** Se hace un examen para determinar, entre veteranos y no veteranos con diferente CI, quiénes tienen mejor desempeño. Las puntuaciones obtenidas se muestran en la tabla 16.48. Al nivel de significancia 0.05, determinar si hay diferencias en las puntuaciones debidas a diferencias en: *a*) ser o no veterano y *b*) el CI. Usar SPSS para elaborar una tabla de ANOVA.

Tabla 16.48

|             | Puntuación en la prueba |          |         |
|-------------|-------------------------|----------|---------|
|             | CI alto                 | CI medio | CI bajo |
| Veterano    | 90                      | 81       | 74      |
| No veterano | 85                      | 78       | 70      |

- 16.47** Usar STATISTIX para resolver el problema 16.46 al nivel de significancia 0.01.
- 16.48** En la tabla 16.49 se presentan las puntuaciones que obtuvieron en un examen estudiantes de distintas partes de un país y con diferente CI. Analizar esta tabla al nivel de significancia 0.05 y dar las conclusiones. Usar MINITAB para elaborar la tabla de ANOVA.
- 16.49** Usar SAS para resolver el problema 16.48 al nivel de significancia 0.01.
- 16.50** En el problema 16.37, ¿se puede determinar si hay diferencia significativa en la cantidad de artículos producidos en los distintos días de la semana? Explicar.

**Tabla 16.49**

|                | Puntuación en el examen |          |         |
|----------------|-------------------------|----------|---------|
|                | CI alto                 | CI medio | CI bajo |
| Este           | 88                      | 80       | 72      |
| Oeste          | 84                      | 78       | 75      |
| Sur            | 86                      | 82       | 70      |
| Norte y centro | 80                      | 75       | 79      |

- 16.51** Se sabe que en los cálculos del análisis de varianza a cada entrada se le puede sumar o restar una constante adecuada sin que esto afecte las conclusiones. ¿Pasa lo mismo si cada entrada se multiplica o se divide entre una constante adecuada? Justificar la respuesta.
- 16.52** Deducir las ecuaciones (24), (25) y (26) para cantidades desiguales de observaciones.
- 16.53** Suponer que los resultados en la tabla 16.46 del problema 16.43 corresponden al noreste de Estados Unidos y que para el oeste, los resultados correspondientes son los dados en la tabla 16.50. Al nivel de significancia 0.05, determinar si hay diferencias que se deban a: *a)* la sustancias químicas y *b)* la ubicación. Usar MINITAB para elaborar la tabla de ANOVA.

**Tabla 16.50**

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| A | 5 | 4 | 6 | 3 |
| B | 3 | 4 | 2 | 3 |
| C | 5 | 7 | 4 | 6 |

**Tabla 16.51**

|   |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|
| A | 17 | 14 | 18 | 12 |
| B | 20 | 10 | 20 | 15 |
| C | 18 | 15 | 16 | 17 |
| D | 12 | 11 | 14 | 11 |
| E | 15 | 12 | 19 | 14 |

- 15.54** Volviendo a los problemas 16.21 y 16.35, suponer que se lleva a cabo otro experimento en el noreste y se obtienen los resultados dados en la tabla 16.51. Al nivel de significancia 0.05, determinar si hay diferencias entre los rendimientos debidas a: *a)* los fertilizantes y *b)* las tres ubicaciones. Emplear STATISTIX para elaborar la tabla de ANOVA.

**16.55** Resolver el problema 16.54 al nivel de significancia 0.01. Usar MINITAB para elaborar la tabla de ANOVA.

**16.56** Al nivel de significancia 0.05, hacer un análisis de varianza del cuadrado latino de la tabla 16.52 y proporcionar las conclusiones. Usar SPSS para construir la tabla de ANOVA.

**Tabla 16.52**

| Factor 1 |      |      |      |
|----------|------|------|------|
| Factor 2 | B 16 | C 21 | A 15 |
|          | A 18 | B 23 | C 14 |
|          | C 15 | A 18 | B 12 |

**16.57** Estructurar un experimento que lleve al cuadrado latino de la tabla 16.52.

**16.58** Al nivel de significancia 0.05, realizar el análisis de varianza del cuadrado grecolatino de la tabla 16.53 y proporcionar las conclusiones. Usar SPSS para elaborar la tabla de ANOVA.

**Tabla 16.53**

| Factor 1 |                   |                   |                   |                   |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Factor 2 | A <sub>γ</sub> 6  | B <sub>β</sub> 12 | C <sub>δ</sub> 4  | D <sub>α</sub> 18 |
|          | B <sub>δ</sub> 3  | A <sub>α</sub> 8  | D <sub>γ</sub> 15 | C <sub>β</sub> 14 |
|          | D <sub>β</sub> 15 | C <sub>γ</sub> 20 | B <sub>α</sub> 9  | A <sub>δ</sub> 5  |
|          | C <sub>α</sub> 16 | D <sub>δ</sub> 6  | A <sub>β</sub> 17 | B <sub>γ</sub> 7  |

**16.59** Diseñar un experimento que conduzca al cuadrado grecolatino de la tabla 16.53.

**16.60** Describir cómo usar el análisis de varianza en un experimento de tres factores con replicaciones.

**16.61** Diseñar y resolver un problema que ilustre el procedimiento del problema 16.60.

**16.62** Probar: *a)* la ecuación (30) y *b)* las ecuaciones (31) a (34) de este capítulo.

**16.63** En la práctica, ¿se esperaría hallar: *a)* un cuadrado latino  $2 \times 2$  y *b)* un cuadrado grecolatino de  $3 \times 3$ ? Explicar.

# PRUEBAS NO PARAMÉTRICAS

# 17

## INTRODUCCIÓN

La mayor parte de las pruebas de hipótesis y significancia (o reglas de decisión), vistas en los capítulos anteriores, requieren varias suposiciones acerca de la población de la que se toma la muestra. Por ejemplo, en la clasificación en un sentido del capítulo 16 se requiere que las poblaciones tengan una distribución normal y desviaciones estándar iguales.

En la práctica, hay situaciones en las que tales suposiciones no se justifican o en las que se duda que se satisfagan, como es el caso de poblaciones muy sesgadas. Debido a esto, se han desarrollado diversas pruebas y métodos que son independientes tanto de la distribución de las poblaciones como de sus correspondientes parámetros. Estas pruebas se conocen como *pruebas no paramétricas*.

Las pruebas no paramétricas se emplean como sustitutos sencillos de pruebas más complicadas; son especialmente útiles cuando se tienen datos no numéricos, como en el caso de consumidores que ordenan cereales u otros productos, de acuerdo con su preferencia.

## LA PRUEBA DE LOS SIGNOS

Considérese la tabla 17.1 en la que se muestran las cantidades de tornillos defectuosos producidos en 12 días consecutivos con dos máquinas (I y II); se supone que las dos máquinas tienen la misma producción total diaria. Se desea probar la hipótesis  $H_0$  de que no hay diferencia entre las máquinas: que las diferencias observadas entre las máquinas, en términos de cantidades de tornillos defectuosos producidos, son resultado de la casualidad, lo que equivale a decir que las muestras provienen de la misma población.

Tabla 17.1

| Día        | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Máquina I  | 47 | 56 | 54 | 49 | 36 | 48 | 51 | 38 | 61 | 49 | 56 | 52 |
| Máquina II | 71 | 63 | 45 | 64 | 50 | 55 | 42 | 46 | 53 | 57 | 75 | 60 |

Una sencilla prueba no paramétrica para muestras por pares es la *prueba de los signos*. Esta prueba consiste en calcular las diferencias entre las cantidades de tornillos defectuosos producidos por día y anotar únicamente el *signo* de cada diferencia, por ejemplo, el día 1 la diferencia es 47-71, que es negativa. De esta manera, a partir de la tabla 17.1 se obtiene la secuencia de signos siguiente.

— — + — — — + — + — — — (I)

(es decir, 3 signos más y 9 signos menos). Si es igualmente probable obtener un + que un -, se esperaría que se obtuvieran 6 de cada uno. La prueba  $H_0$  es, entonces, equivalente a preguntarse si una moneda está o no cargada, si en 12 lanzamientos de la moneda se obtienen 3 caras (+) y 9 cruces (-). Esto implica la distribución binomial vista en el capítulo 7. En el problema 17.1 se muestra que empleando una prueba de dos colas con esta distribución, al nivel de significancia 0.05, no se puede rechazar  $H_0$ ; es decir, a este nivel no hay diferencia entre las máquinas.

**Nota 1:** Si algún día las máquinas producen la misma cantidad de tornillos defectuosos, una diferencia en la secuencia (*I*) será *cero*. En este caso, se eliminan esos valores muestrales y se usan 11 en vez de 12 observaciones.

**Nota 2:** También puede usarse una aproximación normal a la distribución binomial empleando la corrección por continuidad (ver problema 17.2).

Aunque la prueba de los signos es especialmente útil para muestras por pares, como la muestra de la tabla 17.1, también puede usarse para problemas con muestras sencillas (no pares) (ver los problemas 17.3 y 17.4).

## LA PRUEBA *U* DE MANN-WHITNEY

Considérese la tabla 17.2, en la que se dan las resistencias de cables hechos de dos aleaciones distintas, I y II. En esta tabla se tienen dos muestras: 8 cables de la aleación I, y 10 cables de la aleación II. Se quiere decidir si hay diferencia entre las muestras o, lo que es lo mismo, si provienen o no de la misma población. Aunque este problema se puede resolver empleando la prueba *t* del capítulo 11, también puede utilizarse una prueba no paramétrica llamada la *prueba U de Mann-Whitney*. Esta prueba consta de los pasos siguientes:

Tabla 17.2

| Aleación I |      |      |      | Aleación II |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|
| 18.3       | 16.4 | 22.7 | 17.8 | 12.6        | 14.1 | 20.5 | 10.7 | 15.9 |
| 18.9       | 25.3 | 16.1 | 24.2 | 19.6        | 12.9 | 15.2 | 11.8 | 14.7 |

*Paso 1.* Se combinan todos los valores muestrales, se ordenan de menor a mayor, y a cada uno de los valores se le asigna una posición o rango (en este caso del 1 al 18). Si dos o más valores muestrales son idénticos (es decir, si hay *puntuaciones empata*, o *empates*), a cada uno de los valores muestrales se les asigna una posición (o rango) igual a la *media* de las posiciones que les tocaría ocupar. Si en la tabla 17.2 la entrada 18.9 fuera 18.3, las posiciones 12 y 13 estarían ocupadas por dos valores idénticos, de manera que la posición (o rango) asignada a cada uno sería  $\frac{1}{2}(12 + 13) = 12.5$ .

*Paso 2.* Se obtiene la suma de los rangos de cada muestra. Estas sumas se denotan  $R_1$  y  $R_2$ , siendo  $N_1$  y  $N_2$  los respectivos tamaños muestrales. Por conveniencia se elige como  $N_1$  la muestra más pequeña, si éstas no son iguales, de manera que  $N_1 \leq N_2$ . Una diferencia significativa entre las sumas de los rangos  $R_1$  y  $R_2$  implica una diferencia significativa entre las muestras.

*Paso 3.* Para probar la diferencia entre las sumas de los rangos, se usa el estadístico

$$U = N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (2)$$

que corresponde a la muestra 1. La distribución muestral de  $U$  es simétrica y tiene media y varianza dadas, respectivamente, por las fórmulas

$$\mu_U = \frac{N_1 N_2}{2} \quad \sigma_U^2 = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12} \quad (3)$$

Si tanto  $N_1$  como  $N_2$  son por lo menos igual a 8, entonces la distribución de  $U$  es aproximadamente normal, de manera que

$$z = \frac{U - \mu_U}{\sigma_U} \quad (4)$$

tiene una distribución normal con media 0 y desviación estándar 1. Empleando el apéndice II se puede, entonces, decidir si las muestras son o no significativamente diferentes. En el problema 17.5 se muestra que, al nivel de significancia 0.05, hay una diferencia significativa entre los cables.

**Nota 3:** Un valor de  $U$  correspondiente a la muestra 2 es el dado por el estadístico

$$U = N_1 N_2 + \frac{N_2(N_2 + 1)}{2} - R_2 \quad (5)$$

y tiene la misma distribución muestral que el estadístico (2), siendo su media y su varianza las dadas por la fórmula (3). El estadístico (5) se relaciona con el estadístico (2), ya que si  $U_1$  y  $U_2$  son los valores correspondientes a los estadísticos (2) y (5), respectivamente, entonces se tiene

$$U_1 + U_2 = N_1 N_2 \quad (6)$$

También se tiene

$$R_1 + R_2 = \frac{N(N + 1)}{2} \quad (7)$$

donde  $N = N_1 + N_2$ . La fórmula (7) puede servir como verificación de los cálculos.

**Nota 4:** En la ecuación (2), el estadístico  $U$  es el número de veces que los valores de la muestra 1 preceden a los valores de la muestra 2, cuando todos los valores han sido ordenados en forma creciente de magnitud. Esto proporciona un *método alternativo de conteo para hallar  $U$* .

## LA PRUEBA $H$ DE KRUSKAL-WALLIS

La prueba  $U$  es una prueba no paramétrica para decidir si dos muestras provienen o no de una misma población. Una generalización de esta prueba para  $k$  muestras es la *prueba  $H$  de Kruskal-Wallis* o simplemente *prueba  $H$* .

Esta prueba se puede describir de la manera siguiente: supóngase que se tienen  $k$  muestras, cuyos tamaños son  $N_1, N_2, \dots, N_k$ , por lo que el tamaño de todas estas muestras juntas será  $N = N_1 + N_2 + \dots + N_k$ . Supóngase además que todas estas muestras se juntan y sus valores se ordenan de menor a mayor asignándoles un rango, y que las sumas de los rangos, de cada una de las  $k$  muestras, son  $R_1, R_2, \dots, R_k$ , respectivamente. Se define el estadístico como

$$H = \frac{12}{N(N + 1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{N_j} - 3(N + 1) \quad (8)$$

se puede demostrar que la distribución muestral de  $H$  es aproximadamente una *distribución chi cuadrada* con  $k - 1$  grados de libertad, siempre que cada uno de los  $N_1, N_2, \dots, N_k$ , sean por lo menos de 5.

La prueba  $H$  proporciona un método no paramétrico de *análisis de varianza* para clasificaciones en un sentido o experimentos de un factor, pudiéndose hacer generalizaciones.

## PRUEBA $H$ CORREGIDA PARA EMPATES

Cuando hay demasiados empates entre las observaciones de los datos muestrales, el valor de  $H$  dado por el estadístico (8) es menor de lo que debiera ser. El valor correcto de  $H$ , que se denota  $H_c$ , se obtiene dividiendo el valor dado por el estadístico (8) entre el factor de corrección

$$1 - \frac{\sum (T^3 - T)}{N^3 - N} \quad (9)$$

donde  $T$  es la cantidad de empates que corresponden a cada observación y donde la suma se toma sobre todas las observaciones. Si no hay empates, entonces  $T = 0$  y el factor (9) se reduce a 1, de manera que no se necesita ninguna corrección. En la práctica, la corrección suele ser despreciable (es decir, no es suficiente para garantizar que haya un cambio de decisión).

## PRUEBA DE LAS RACHAS PARA ALEATORIEDAD

Aunque la palabra “aleatorio” se ha usado muchas veces en este libro, en ninguno de los capítulos anteriores se ha dado una prueba para aleatoriedad. La *teoría de las rachas* proporciona una prueba no paramétrica para aleatoriedad.

Para entender qué es una racha, considérese una secuencia formada por dos símbolos,  $a$  y  $b$ , por ejemplo,

$$a\ a\ | b\ b\ b\ | a\ | b\ b\ | a\ a\ a\ a\ a\ | b\ b\ b\ | a\ a\ a\ a\ | \quad (10)$$

Por ejemplo, en el lanzamiento de una moneda,  $a$  puede representar “cara” y  $b$  puede ser “cruz”; o al muestrear los tornillos producidos con una máquina,  $a$  puede corresponder a “defectuoso” y  $b$  a “no defectuoso”.

Una *racha* se define como un conjunto de símbolos idénticos (o semejantes) que se encuentran entre dos símbolos diferentes o entre ningún símbolo (como el principio y el final de la secuencia). Si se lee la secuencia (10) de izquierda a derecha, la primera racha, cuyo fin está señalado por una línea vertical, consta de dos  $a$ ; de manera similar, la segunda racha consta de tres  $b$ ; la tercera racha consta de una  $a$ , etc. En total hay siete rachas.

Parece claro que debe existir alguna relación entre aleatoriedad y cantidad de rachas. Así, en la secuencia

$$a\ | b\ | a\ | b\ | \quad (11)$$

se observa un *patrón cíclico*, en el que aparece una  $a$  y luego una  $b$ , otra vez una  $a$  y luego una  $b$ , etc., que sería difícil pensar que fuera aleatorio. En este caso, se tienen *demasiadas* rachas (en realidad, se tiene la cantidad máxima posible, dada la cantidad de letras  $a$  y letras  $b$ ).

Por otro lado, en la secuencia

$$a\ a\ a\ a\ a\ a\ | b\ b\ b\ b\ | a\ a\ a\ a\ a\ | b\ b\ b\ | \quad (12)$$

parece haber un *patrón de tendencia* en el que se agrupan (o acumulan) las letras  $a$  y las letras  $b$ . En este caso hay *muy pocas* rachas y no se puede considerar que esta secuencia sea aleatoria.

Por lo tanto, se considerará que una secuencia no es aleatoria si hay demasiadas o muy pocas rachas; si no es así, se considera que la secuencia es aleatoria. Para cuantificar esta idea, supóngase que se forman todas las secuencias posibles que tengan una cantidad  $N_1$  de letras  $a$  y una cantidad  $N_2$  de letras  $b$  haciendo un total  $N$  de símbolos (o letras) ( $N_1 + N_2 = N$ ). La colección de todas estas secuencias proporciona una distribución muestral: a cada secuencia le corresponde una cantidad de rachas, denotada  $V$ . De esta manera se llega a la distribución muestral del estadístico  $V$ . Puede demostrarse que esta distribución muestral tiene media y varianza dadas, respectivamente, por las fórmulas

$$\mu_V = \frac{2N_1N_2}{N_1 + N_2} + 1 \quad \sigma_V^2 = \frac{2N_1N_2(2N_1N_2 - N_1 - N_2)}{(N_1 + N_2)^2(N_1 + N_2 - 1)} \quad (13)$$

Empleando las fórmulas (13), se puede probar la hipótesis de aleatoriedad al nivel de significancia adecuado. Se encuentra que, si tanto  $N_1$  como  $N_2$  son por lo menos 8, entonces la distribución muestral de  $V$  se aproxima a una distribución normal. Por lo tanto,

$$z = \frac{V - \mu_V}{\sigma_V} \quad (14)$$

tiene distribución normal, con media 0 y varianza 1, y por lo tanto puede emplearse el apéndice II.

## OTRAS APLICACIONES DE LA PRUEBA DE LAS RACHAS

Las siguientes son otras aplicaciones de las rachas para problemas estadísticos:

- Prueba mayor y menor que la mediana para aleatoriedad de datos numéricos.** Para determinar si un conjunto de datos numéricos es aleatorio (por ejemplo, los datos de una muestra), primero se colocan los datos en el *mismo orden* en que se obtuvieron. Después, se encuentra la mediana de esos datos y cada dato se reemplaza por una *a*, si su valor es mayor que la mediana o por una *b* si su valor es menor que la mediana. Si un valor es igual a la mediana, se elimina de la muestra. La muestra es o no aleatoria según si la secuencia de letras *a* y *b* sea o no aleatoria. (Ver problema 17.20.)
- Diferencias entre poblaciones de las que se ha tomado una muestra.** Supóngase que dos muestras de tamaños *m* y *n* se denotan  $a_1, a_2, \dots, a_m$  y  $b_1, b_2, \dots, b_n$ , respectivamente. Para decidir si las muestras provienen o no de una misma población, primero se ordenan todos los  $m + n$  valores muestrales de menor a mayor. Si hay valores iguales, se deben ordenar mediante un proceso aleatorio (por ejemplo, empleando números aleatorios). Si la secuencia obtenida es aleatoria, se concluye que las muestras realmente no son diferentes y que, por lo tanto, provienen de la misma población; si la secuencia no es aleatoria, no puede sacarse tal conclusión. Esta prueba puede ser una alternativa a la prueba *U* de Mann-Whitney. (Ver problema 17.21.)

## CORRELACIÓN DE RANGOS DE SPEARMAN

Los métodos no paramétricos también pueden usarse para medir la correlación entre dos variables, *X* y *Y*. En lugar de emplear valores precisos de las variables, o cuando no se puede tener tal precisión, los datos se ordenan desde 1 hasta *N* de acuerdo con su tamaño, importancia, etc. Una vez que las variables *X* y *Y* se han ordenado de esta manera, el *coeficiente de correlación de rangos o fórmula de Spearman para correlación de rangos* (como suele llamársele) es

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)} \quad (15)$$

donde *D* denota las diferencias entre los rangos de los valores correspondientes de *X* y *Y* y donde *N* es la cantidad de pares de valores (*X*, *Y*) que hay en los datos.

## PROBLEMAS RESUELTOS

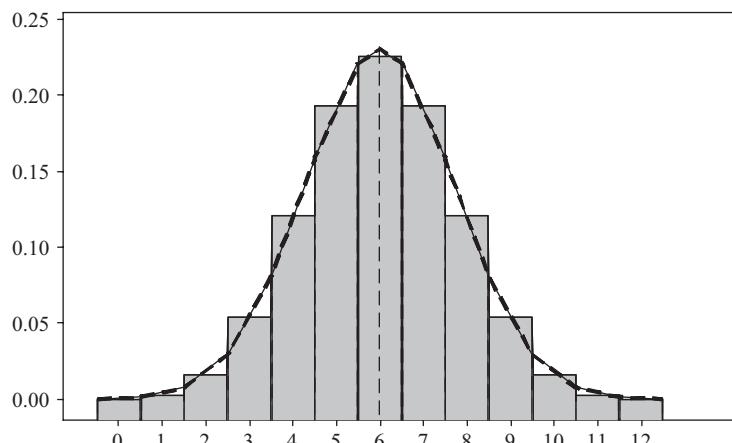
### LA PRUEBA DE LOS SIGNOS

- 17.1** Hágase referencia a la tabla 17.1 y al nivel de significancia 0.05, se prueba la hipótesis  $H_0$  de que no hay diferencia entre las máquinas, contra la hipótesis alternativa  $H_1$  de que sí hay diferencia.

### SOLUCIÓN

En la figura 17-1 se muestra la distribución binomial de *X* caras en 12 lanzamientos de una moneda, en forma de áreas bajo los rectángulos, para  $X = 0, 1, \dots, 12$ . Sobreponer a la distribución binomial se encuentra la distribución normal, trazada con una línea punteada. La media de la distribución binomial es  $\mu = Np = 12(0.5) = 6$ . La desviación estándar es  $\sigma = \sqrt{Npq} = \sqrt{12(0.5)(0.5)} = \sqrt{3} = 1.73$ . La distribución normal también tiene media = 6 y desviación estándar = 1.73. De acuerdo con el capítulo 7, la probabilidad binomial de *X* caras es

$$\Pr\{X\} = \binom{12}{X} \left(\frac{1}{2}\right)^X \left(\frac{1}{2}\right)^{12-X} = \binom{12}{X} \left(\frac{1}{2}\right)^{12}$$



**Figura 17-1 Distribución binomial (áreas bajo los rectángulos) y aproximación normal a la distribución binomial (curva punteada).**

Las probabilidades pueden encontrarse usando EXCEL. El valor  $p$  correspondiente al resultado  $X = 3$  es  $2P\{X \leq 3\}$ , que usando EXCEL es  $=2*\text{BINOMDIST}(3, 12, 0.5, 1)$  o bien 0.146. (El valor  $p$  es el doble del área en la cola izquierda de la distribución binomial.) Como esta área es mayor que 0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula al nivel de significancia 0.05. Por lo tanto, se concluye que a este nivel no hay diferencia entre las dos máquinas.

- 17.2** Resolver el problema 17.1, pero esta vez empleando la aproximación normal a la distribución binomial.

### SOLUCIÓN

En la aproximación normal a la distribución binomial se emplea el hecho de que la puntuación  $z$  correspondiente a la cantidad de caras es

$$z = \frac{X - \mu}{\sigma} = \frac{X - Np}{\sqrt{Npq}}$$

Como en la distribución normal la variable  $X$  es discreta, en tanto que en la distribución binomial es continua, se hace una *corrección por continuidad* (por ejemplo, 3 caras es en realidad un valor que está entre 2.5 y 3.5 caras). Esto es equivalente a restarle 0.05 al valor de  $X$  si  $X > Np$  y sumarle 0.05 al valor de  $X$  si  $X < Np$ . Como  $N = 12$ ,  $\mu = Np = (12)(0.5) = 6$  y  $\sigma = \sqrt{Npq} = \sqrt{(12)(0.5)(0.5)} = 1.73$ , se tiene

$$z = \frac{(3 + 0.5) - 6}{1.73} = -1.45$$

El valor  $p$  es el doble del área a la izquierda de  $-1.45$ . Empleando EXCEL con  $=2*\text{NORMSDIST}(-1.45)$  se obtiene 0.147. En la figura 17-1, el valor  $p$  es, aproximadamente, el área bajo la curva normal estándar a la izquierda de  $-1.45$ , la cual se duplica debido a que se trata de una hipótesis de dos colas. Obsérvese cuán cercanos, uno de otro, están los dos valores  $p$ ; el área binomial bajo los rectángulos es 0.146 y el área bajo la curva normal estándar es 0.147.

- 17.3** La empresa PQR asegura que un tipo de batería fabricada por ellos tiene una duración mayor a 250 horas (h). Para determinar si está justificado, se mide la duración de 24 baterías producidas por esta empresa; los resultados se presentan en la tabla 17.3. Suponiendo que la muestra sea aleatoria, determinar al nivel de significancia 0.05 si lo que asegura la empresa está justificado. Resolver el problema primero a mano, dando todos los detalles de la prueba de los signos. Despues, dar la solución empleando MINITAB.

**SOLUCIÓN**

Sea  $H_0$  la hipótesis de que la duración de las baterías de esta empresa es igual a 250 h y sea  $H_1$  la hipótesis de que su duración es mayor a 250 h. Para probar  $H_0$  contra  $H_1$  se emplea la prueba de los signos. Para esto, a cada entrada de la tabla 17.3 se le resta 250 y se registra el signo de la diferencia, como se muestra en la tabla 17.4. Se observa que hay 15 signos más y 9 signos menos.

**Tabla 17.3**

|     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 271 | 230 | 198 | 275 | 282 | 225 | 284 | 219 |
| 253 | 216 | 262 | 288 | 236 | 291 | 253 | 224 |
| 264 | 295 | 211 | 252 | 294 | 243 | 272 | 268 |

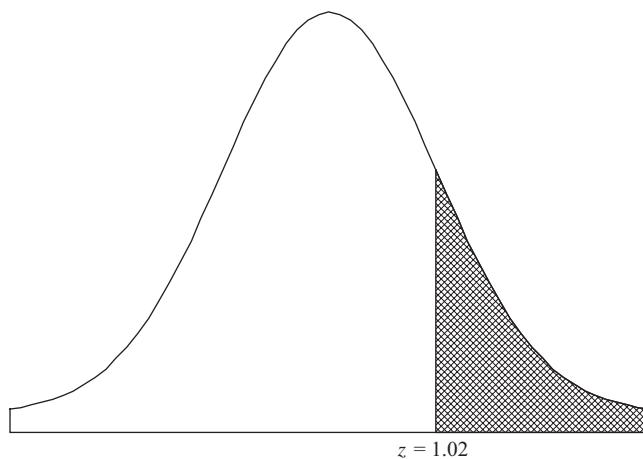
**Tabla 17.4**

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| + | - | - | + | + | - | + | - |
| + | - | + | + | - | + | + | - |
| + | + | - | + | + | - | + | + |

Empleando la aproximación normal a la distribución binomial, la puntuación  $z$  es

$$z = \frac{(15 - 0.5) - 24(0.5)}{\sqrt{24(0.5)(0.5)}} = 1.02.$$

Obsérvese que al restar 0.5 de 15 se hace la corrección por continuidad  $(15 - 0.5) = 14.5$ . El valor  $p$  es el área de la curva normal estándar, a la derecha de 1.02. (Ver la figura 17-2.)

**Figura 17-2** El valor  $p$  es el área a la derecha de  $z = 1.02$ .

El valor  $p$  es el área a la derecha de  $z = 1.02$ , o usando EXCEL, el área se obtiene mediante =1-NORMSDIST(1.02) o bien 0.1537. Dado que el valor  $p > 0.05$ , lo que asegura la empresa no se justifica.

A continuación se presenta la solución empleando MINITAB. Los datos de la tabla 17.3 se ingresan en la columna 1 de la hoja de cálculo de MINITAB y a esta columna se le pone como título Duración. Con la secuencia **Stat → Non-parametrics → 1-sample sign** se obtienen los resultados siguientes.

Prueba de los signos para la mediana: Duración

Sign test of median = 250.0 versus > 250.0

|          | N  | Below | Equal | Above | P      | Median |
|----------|----|-------|-------|-------|--------|--------|
| Lifetime | 24 | 9     | 0     | 15    | 0.1537 | 257.5  |

Obsérvese que la información dada aquí es la misma a la que se llegó antes en la solución de este problema.

- 17.4** En la tabla 17.5 se presentan 40 calificaciones obtenidas en un examen a nivel estatal. Al nivel de significancia 0.05, probar la hipótesis de que la calificación mediana de todos los participantes es: a) 66 y b) 75. Resolver el problema primero a mano, dando todos los detalles de la prueba de los signos, y a continuación, resolverlo empleando MINITAB.

Tabla 17.5

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 71 | 67 | 55 | 64 | 82 | 66 | 74 | 58 | 79 | 61 |
| 78 | 46 | 84 | 93 | 72 | 54 | 78 | 86 | 48 | 52 |
| 67 | 95 | 70 | 43 | 70 | 73 | 57 | 64 | 60 | 83 |
| 73 | 40 | 78 | 70 | 64 | 86 | 76 | 62 | 95 | 66 |

**SOLUCIÓN**

- a) Se resta 66 a cada entrada de la tabla 17.5 y se conservan sólo los signos de las diferencias, con lo que se obtiene la tabla 17.6, en la que se observa que hay 23 signos más, 15 signos menos y 2 ceros. Si se eliminan los 2 ceros, la muestra consta de 38 signos: 23 signos más y 15 signos menos. En una prueba de dos colas, usando la distribución normal con probabilidades  $\frac{1}{2}(0.05) = 0.025$  en cada cola (ver la figura. 17-3), la regla de decisión que se adopta es la siguiente:  
Aceptar la hipótesis si  $-1.96 \leq z \leq 1.96$ .  
Rechazar la hipótesis si no es así.

Dado que

$$z = \frac{X - Np}{\sqrt{Npq}} = \frac{(23 - 0.5) - (38)(0.5)}{\sqrt{(38)(0.5)(0.5)}} = 1.14$$

al nivel de significancia 0.05, se acepta la hipótesis de que la mediana es 66.

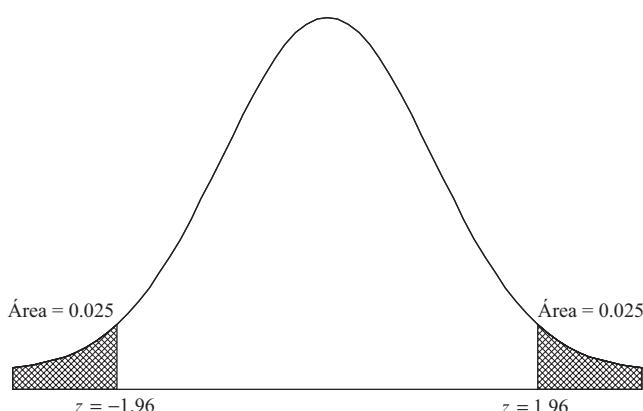
Tabla 17.6

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| + | + | - | - | + | 0 | + | - | + | - |
| + | - | + | + | + | - | + | + | - | - |
| + | + | + | - | + | + | - | - | - | + |
| + | - | + | + | - | + | + | - | + | 0 |

Obsérvese que también se puede usar 15, la cantidad de signo menos. En este caso

$$z = \frac{(15 + 0.5) - (38)(0.5)}{\sqrt{(38)(0.5)(0.5)}} = -1.14$$

llegándose a la misma conclusión.

Figura 17-3 Prueba de dos colas mostrando la región crítica para  $\alpha = 0.05$ .

- b) Restando 75 a cada una de las entradas de la tabla 17.5 se obtiene la tabla 17.7, en la que hay 13 signos más y 27 signos menos. Como

$$z = \frac{(13 + 0.5) - (40)(0.5)}{\sqrt{(40)(0.5)(0.5)}} = -2.06$$

al nivel de significancia 0.05, se rechaza la hipótesis de que la mediana sea 75.

**Tabla 17.7**

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - | - | - | - | + | - | - | - | + | - |
| + | - | + | + | - | - | + | + | - | - |
| - | + | - | - | - | - | - | - | - | + |
| - | - | + | - | - | + | + | - | + | - |

Empleando este método se puede encontrar un intervalo de confianza de 95% para la calificación mediana en este examen. (Ver el problema 17.30.)

Obsérvese que en la solución anterior se emplea el método clásico de prueba de hipótesis. En el método clásico se emplea  $\alpha = 0.05$  para determinar la región de rechazo para la prueba,  $[z < -1.96 \text{ o } z > 1.96]$ . A continuación se calcula el estadístico de prueba [en el inciso a)  $z = -1.14$ , y en el inciso b)  $z = -2.06$ ]. Si el estadístico de prueba cae en la región de rechazo, se rechaza la hipótesis nula. Si este estadístico no cae en la región de rechazo, no se rechaza la hipótesis nula.

En la solución de MINITAB se usa el método del valor  $p$ . Se calcula el valor  $p$  y si este valor es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula. Si el valor  $p$  es mayor que 0.05, no se rechaza la hipótesis nula. Usando tanto el método clásico como el método del valor  $p$  se llega a la misma decisión.

La solución empleando MINITAB es la que se muestra a continuación. Para probar que la mediana es 66, el resultado es el siguiente

#### Prueba de los signos para la mediana: Calificaciones

Sign test of median = 66.00 versus not = 66.00

|       | N  | Below | Equal | Above | P      | Median |
|-------|----|-------|-------|-------|--------|--------|
| Grade | 40 | 15    | 2     | 23    | 0.2559 | 70.00  |

Como el valor  $p$  es mayor que 0.05, no se rechaza la hipótesis nula.

El resultado para probar que la mediana es 75 es

#### Prueba de los signos para la mediana: Calificaciones

Sign test of median = 75.00 versus not = 75.00

|       | N  | Below | Equal | Above | P      | Median |
|-------|----|-------|-------|-------|--------|--------|
| Grade | 40 | 27    | 0     | 13    | 0.0385 | 70.00  |

Como el valor  $p$  es  $< 0.05$ , se rechaza la hipótesis nula.

## LA PRUEBA U DE MANN-WHITNEY

- 17.5** Volver a la tabla 17.2. Al nivel de significancia 0.05, determinar si hay alguna diferencia entre los cables hechos con la aleación I y los hechos con la aleación II. Resolver el problema, primero a mano, dando todos los detalles de la prueba  $U$  de Mann-Whitney, y después usando MINITAB.

### SOLUCIÓN

La solución se encuentra siguiendo los pasos 1, 2 y 3 (antes descritos en este capítulo):

*Paso 1.* Se juntan los 18 valores muestrales y se ordenan de menor a mayor, con lo cual se obtiene el primer renglón de la tabla 17.8. En el segundo renglón se numeran estos valores del 1 al 18, con lo que se obtienen los rangos.

Tabla 17.8

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 10.7 | 11.8 | 12.6 | 12.9 | 14.1 | 14.7 | 15.2 | 15.9 | 16.1 | 16.4 | 17.8 | 18.3 | 18.9 | 19.6 | 20.5 | 22.7 | 24.2 | 25.3 |
| 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   |

Paso 2. Para hallar la suma de los rangos de cada muestra, se describe la tabla 17.2 con los rangos correspondientes a cada valor de acuerdo con la tabla 17.8, y de esta manera se obtiene la tabla 17.9. La suma de los rangos correspondiente a la aleación I es 106 y la suma de los rangos correspondientes a la aleación II es 65.

Tabla 17.9

| Aleación I            |           | Aleación II           |          |
|-----------------------|-----------|-----------------------|----------|
| Resistencia del cable | Rango     | Resistencia del cable | Rango    |
| 18.3                  | 12        | 12.6                  | 3        |
| 16.4                  | 10        | 14.1                  | 5        |
| 22.7                  | 16        | 20.5                  | 15       |
| 17.8                  | 11        | 10.7                  | 1        |
| 18.9                  | 13        | 15.9                  | 8        |
| 25.3                  | 18        | 19.6                  | 14       |
| 16.1                  | 9         | 12.9                  | 4        |
| 24.2                  | <u>17</u> | 15.2                  | 7        |
| Suma 106              |           | 11.8                  | 2        |
|                       |           | 14.7                  | <u>6</u> |
|                       |           | Suma 65               |          |

Paso 3. Como la muestra de la aleación I es la menor,  $N_1 = 8$  y  $N_2 = 10$ . Las correspondientes sumas de los rangos son  $R_1 = 106$  y  $R_2 = 65$ . Entonces

$$U = N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1 + 1)}{2} - R_1 = (8)(10) + \frac{(8)(9)}{2} - 106 = 10$$

$$\mu_U = \frac{N_1 N_2}{2} = \frac{(8)(10)}{2} = 40 \quad \sigma_U^2 = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12} = \frac{(8)(10)(19)}{12} = 126.67$$

Por lo que  $\sigma_U = 11.25$  y

$$z = \frac{U - \mu_U}{\sigma_U} = \frac{10 - 40}{11.25} = -2.67$$

Dado que la hipótesis  $H_0$  que se está probando es que *no* hay diferencia entre las aleaciones, se requiere una prueba de dos colas. La regla de decisión al nivel de significancia 0.05 es:

Aceptar  $H_0$  si  $-1.96 \leq z \leq 1.96$ .

Rechazar  $H_0$  si no es así.

Como  $z = -2.67$ , se rechaza  $H_0$  y se concluye que al nivel de significancia 0.05, sí hay diferencia entre las aleaciones.

A continuación se presenta la solución a este problema obtenida con MINITAB. Primero, se ingresan los datos de la aleación I en la columna C1 y los datos de la aleación II en la columna C2, y a las columnas se les pone como encabezado AleaciónI y AleaciónII. Mediante la secuencia Stat → Nonparametrics → Mann-Whitney se obtienen los resultados siguientes.

#### Prueba de Mann-Whitney e intervalo de confianza: AleaciónI y AleaciónII

|         | N  | Median |
|---------|----|--------|
| AlloyI  | 8  | 18.600 |
| AlloyII | 10 | 14.400 |

```

Point estimate for ETA1-ETA2 is      4.800
95.4 Percent CI for ETA1-ETA2 is (2.000, 9.401)
W = 106.0
Test of ETA1 = ETA2   vs   ETA1 not = ETA2 is significant at 0.0088

```

Los resultados de MINITAB dan la resistencia mediana de los cables de cada muestra, una estimación puntual de la diferencia entre las medianas poblacionales ( $\text{ETA}_1 - \text{ETA}_2$ ), un intervalo de confianza para la diferencia entre las medianas poblacionales, la suma de los rangos de la primera variable ( $W = 106$ ) y el valor  $p$  para dos colas = 0.0088. Como el valor  $p < 0.05$ , se rechaza la hipótesis nula. Se concluye que con la aleación I se obtienen cables más resistentes.

- 17.6** Con los datos del problema 17.5, verificar las fórmulas (6) y (7) de este capítulo.

### SOLUCIÓN

- a) Como los valores de  $U$  que se obtienen con las muestras 1 y 2 son

$$\begin{aligned} U_1 &= N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1 + 1)}{2} - R_1 = (8)(10) + \frac{(8)(9)}{2} - 106 = 10 \\ U_2 &= N_1 N_2 + \frac{N_2(N_2 + 1)}{2} - R_2 = (8)(10) + \frac{(10)(11)}{2} - 65 = 70 \end{aligned}$$

se tiene  $U_1 + U_2 = 10 + 70 = 80$  y  $N_1 N_2 = (8)(10) = 80$ .

- b) Como  $R_1 = 106$  y  $R_2 = 65$ , se tiene  $R_1 + R_2 = 106 + 65 = 171$  y

$$\frac{N(N + 1)}{2} = \frac{(N_1 + N_2)(N_1 + N_2 + 1)}{2} = \frac{(18)(19)}{2} = 171$$

- 17.7** Resolver el problema 17.5 usando el estadístico  $U$  de la muestra de la aleación II.

### SOLUCIÓN

Para la muestra de la aleación II

$$U = N_1 N_2 + \frac{N_2(N_2 + 1)}{2} - R_2 = (8)(10) + \frac{(10)(11)}{2} - 65 = 70$$

de manera que

$$z = \frac{U - \mu_U}{\sigma_U} = \frac{70 - 40}{11.25} = 2.67$$

Este valor de  $z$  es el *negativo* de la  $z$  del problema 17.5, por lo que se emplea la cola derecha de la distribución normal, en lugar de la cola izquierda. Como este valor de  $z$  también se encuentra fuera de  $-1.96 \leq z \leq 1.96$ , la conclusión es la misma que en el problema 17.5.

- 17.8** Un profesor tiene dos grupos de psicología: uno en la mañana, con 9 alumnos, y otro en la tarde con 12 alumnos. En el examen final, que es el mismo para los dos grupos, las calificaciones obtenidas son las que se muestran en la tabla 17.10. ¿Puede concluirse al nivel de significancia 0.05 que en el grupo de la mañana el rendimiento sea menor que en el grupo de la tarde? Resolver el problema, primero a mano, dando todos los detalles de la prueba  $U$  de Mann-Whitney y después dar la solución empleando MINITAB.

**Tabla 17.10**

|                  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Grupo matutino   | 73 | 87 | 79 | 75 | 82 | 66 | 95 | 75 | 70 |    |    |
| Grupo vespertino | 86 | 81 | 84 | 88 | 90 | 85 | 84 | 92 | 83 | 91 | 53 |

**SOLUCIÓN**

*Paso 1.* En la tabla 17.11 se muestran las calificaciones con sus rangos respectivos. Obsérvese que el rango que corresponde a las dos calificaciones 75 es  $\frac{1}{2}(5 + 6) = 5.5$  y el que corresponde a los tres 84 es  $\frac{1}{3}(11 + 12 + 13) = 12$ .

**Tabla 17.11**

|    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 53 | 66 | 70 | 73 | 75  | 75 | 79 | 81 | 82 | 83 | 84 | 84 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 90 | 91 | 92 | 92 |
| 1  | 2  | 3  | 4  | 5.5 | 7  | 8  | 9  | 10 |    | 12 |    | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |    |

*Paso 2.* Rescribiendo la tabla 17.10 en términos de los rangos, se obtiene la tabla 17.12.

*Verificación:*  $R_1 = 73$ ,  $R_2 = 158$  y  $N = N_1 + N_2 = 9 + 12 = 21$ ; por lo tanto,  $R_1 + R_2 = 73 + 158 = 231$  y

$$\frac{N(N+1)}{2} = \frac{(21)(22)}{2} = 231 = R_1 + R_2$$

**Tabla 17.12**

| Grupo matutino   | 4  | 16 | 7  | 5.5 | 9  | 2  | 21 | 5.5 | 3  |    | Suma de rangos |    |     |
|------------------|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----------------|----|-----|
| Grupo matutino   | 4  | 16 | 7  | 5.5 | 9  | 2  | 21 | 5.5 | 3  |    | 73             |    |     |
| Grupo vespertino | 15 | 8  | 12 | 17  | 18 | 14 | 12 | 20  | 10 | 19 | 1              | 12 | 158 |

*Paso 3.*

$$U = N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1 + 1)}{2} - R_1 = (9)(12) + \frac{(9)(10)}{2} - 73 = 80$$

$$\mu_U = \frac{N_1 N_2}{2} = \frac{(9)(12)}{2} = 54 \quad \sigma_U^2 = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12} = \frac{(9)(12)(22)}{12} = 198$$

Por lo tanto,

$$z = \frac{U - \mu_U}{\sigma_U} = \frac{80 - 54}{14.07} = 1.85$$

El valor  $p$  para una cola se obtiene empleando la expresión de EXCEL =1-NORMSDIST(1.85) que da 0.0322. Como el valor  $p < 0.05$ , se concluye que el desempeño del grupo matutino no es tan bueno como el del turno vespertino.

La solución de MINITAB al problema es como sigue. Primero se introducen los datos de los valores del turno matutino y del vespertino en las columnas C1 y C2 y se nombra a esas columnas **matutino** y **vespertino**. Con la secuencia **Stat → Nonparametrics → Mann-Whitney** se obtienen los resultados siguientes.

Prueba de Mann-Whitney e intervalo de confianza: Matutino, Vespertino

|           |              |
|-----------|--------------|
| N         | Median       |
| Morning   | 9      75.00 |
| Afternoon | 12     84.50 |

```

Point estimate for ETA1-ETA2 is -9.00
95.7 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-15.00, 2.00)
W = 73.0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 < ETA2 is significant at 0.0350
The test is significant at 0.0348 (adjusted for ties)

```

En los resultados de MINITAB se da la calificación mediana de cada muestra, una estimación puntual de la diferencia entre las medianas poblacionales, un intervalo de confianza para la diferencia entre las medianas poblacionales, la suma de los rangos de la primera variable (en este caso, el grupo matutino) y el valor  $p$  para una cola que es = 0.0350. Como el valor  $p$  es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula. Se concluye que la clase matutina no tiene tan buen desempeño como la clase vespertina.

- 17.9 Dados los datos de la tabla 17.13, encontrar  $U$  usando: *a)* la fórmula (2) de este capítulo y *b)* el método de conteo (descrito en la **Nota 4** de este capítulo).

### SOLUCIÓN

- a)* Ordenando todos los datos juntos, de menor a mayor, y asignándoles un rango del 1 al 5, se obtiene la tabla 17.14. Sustituyendo los datos de la tabla 17.13 por sus rangos correspondientes se obtiene la tabla 17.15, en la que se dan las sumas de los rangos, que son  $R_1 = 5$  y  $R_2 = 10$ . Como  $N_1 = 2$  y  $N_2 = 3$ , el valor  $U$  para la muestra 1 es

$$U = N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1 + 1)}{2} - R_1 = (2)(3) + \frac{(2)(3)}{2} - 5 = 4$$

De igual manera se encuentra el valor  $U$  para la muestra 2, que es  $U = 2$ .

Tabla 17.13

|           |    |    |
|-----------|----|----|
| Muestra 1 | 22 | 10 |
| Muestra 2 | 17 | 25 |
|           | 14 |    |

Tabla 17.14

|       |    |    |    |    |    |
|-------|----|----|----|----|----|
| Datos | 10 | 14 | 17 | 22 | 25 |
| Rango | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |

Tabla 17.15

|           |   |   |   | Suma de los rangos |
|-----------|---|---|---|--------------------|
| Muestra 1 | 4 | 1 |   | 5                  |
| Muestra 2 | 3 | 5 | 2 | 10                 |

- b)* Sustituyendo los valores de la tabla 17.14 con I o II, dependiendo si el valor pertenece a la muestra 1 o a la muestra 2, el primer renglón de la tabla 17.14 se transforma en

|      |   |    |    |   |    |
|------|---|----|----|---|----|
| Dato | I | II | II | I | II |
|------|---|----|----|---|----|

En esta tabla se ve que

Número de valores de la muestra 1 que preceden al primer valor de la muestra 2 = 1

Número de valores de la muestra 1 que preceden al segundo valor de la muestra 2 = 1

Número de valores de la muestra 1 que preceden al tercer valor de la muestra 2 = 2

Total = 4

Por lo tanto, el valor de  $U$  que corresponde a la primera muestra es 4.

De igual manera,

Número de valores de la muestra 2 que preceden al primer valor de la muestra 1 = 0

Número de valores de la muestra 2 que preceden al segundo valor de la muestra 1 = 2

Total = 2

Por lo tanto, el valor de  $U$  que corresponde a la segunda muestra es 2.

Obsérvese que como  $N_1 = 2$  y  $N_2 = 3$ , estos valores satisfacen  $U_1 + U_2 = N_1 N_2$ ; es decir,  $4 + 2 = 6 = (2)(3) = 6$ .

- 17.10** Una población consta de los valores 7, 12 y 15. De esta población se toman dos muestras sin reposición: la muestra 1 consta de un valor y la muestra 2 consta de dos valores. (Estas dos muestras agotan la población.)

- Encontrar la distribución muestral de  $U$  y su gráfica.
- Encontrar la media y la varianza de la distribución del inciso a).
- Verificar los resultados hallados en el inciso b) empleando la fórmula (3) de este capítulo.

### SOLUCIÓN

- a) Se elige el muestreo sin reposición para evitar empates, los cuales se presentarían si, por ejemplo, el valor 12 apareciera en ambas muestras.

Como se observa en la tabla 17.16, hay  $3 \cdot 2 = 6$  posibilidades para elegir las muestras. Debe notarse que también se pueden emplear sólo los rangos 1, 2 y 3, en lugar de 7, 12 y 15. El valor  $U$  de la tabla 17.16 es el hallado para la muestra 1, pero si se usa la  $U$  para la muestra 2, se obtendrá la misma distribución.

Tabla 17.16

| Muestra 1 | Muestra 2 | $U$ |
|-----------|-----------|-----|
| 7         | 12 15     | 2   |
| 7         | 15 12     | 2   |
| 12        | 7 15      | 1   |
| 12        | 15 7      | 1   |
| 15        | 7 12      | 0   |
| 15        | 12 7      | 0   |

En la figura 17-4 se muestra una gráfica de esta distribución, en la que  $f$  es la frecuencia. También puede graficarse la distribución de probabilidad de  $U$ ; en ese caso,  $\Pr\{U = 0\} = \Pr\{U = 1\} = \Pr\{U = 2\} = \frac{1}{3}$ . La gráfica que se requiere es igual a la de la figura 17-4, pero con  $\frac{1}{3}$  y  $\frac{1}{6}$  en lugar de 1 y 2.

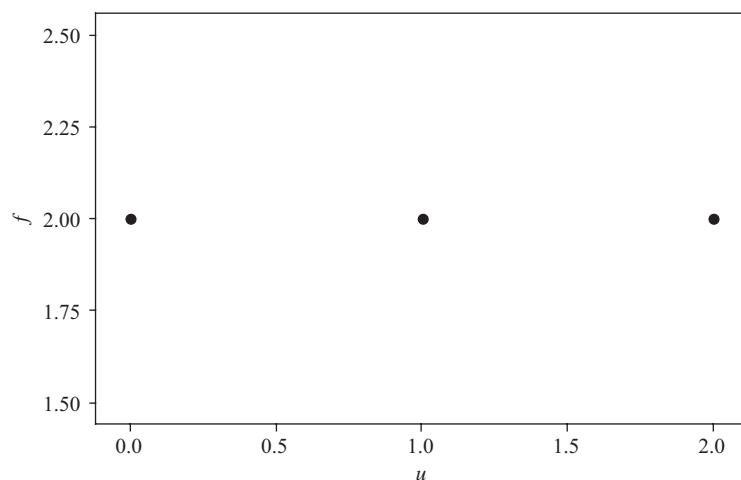


Figura 17-4 MINITAB, gráfica de la distribución muestral de  $U$  con  $N_1 = 1$  y  $N_2 = 2$ .

- b) La media y la varianza de los valores de la tabla 17.16 son

$$\mu_U = \frac{2 + 2 + 1 + 1 + 0 + 0}{6} = 1$$

$$\sigma_U^2 = \frac{(2 - 1)^2 + (2 - 1)^2 + (1 - 1)^2 + (1 - 1)^2 + (0 - 1)^2 + (0 - 1)^2}{6} = \frac{2}{3}$$

- c) De acuerdo con la fórmula (3)

$$\mu_U = \frac{N_1 N_2}{2} = \frac{(1)(2)}{2} = 1$$

$$\sigma_U^2 = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12} = \frac{(1)(2)(1 + 2 + 1)}{12} = \frac{2}{3}$$

lo que coincide con el inciso a).

- 17.11** a) Con los datos del problema 17.9, encontrar la distribución muestral de  $U$  y graficarla.  
 b) Graficar la correspondiente distribución de probabilidad de  $U$ .  
 c) Obtener la media y la varianza de  $U$  directamente a partir de los resultados del inciso a).  
 d) Verificar el inciso c) empleando la fórmula (3) de este capítulo.

### SOLUCIÓN

- a) En este caso hay  $5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 = 120$  posibilidades para elegir los valores de las dos muestras y el método del problema 17.9 resulta demasiado laborioso. Para simplificar este procedimiento hay que fijar la atención en la muestra más pequeña (de tamaño  $N_1 = 2$ ) y en las posibles sumas de sus rangos,  $R_1$ . La suma de los rangos de la muestra 1 es la *menor* cuando la muestra consta de los dos números de menor rango (1, 2); entonces  $R_1 = 1 + 2 = 3$ . De igual manera, la suma de los rangos de la muestra 1 es la *mayor* cuando la muestra consta de los dos números de mayor rango (4, 5); entonces  $R_1 = 4 + 5 = 9$ . Por lo tanto,  $R_1$  varía desde 3 hasta 9.

En la columna 1 de la tabla 17.17 se presentan estos valores de  $R_1$  (desde 3 hasta 9) y en la columna 2 se muestran los valores correspondientes de la muestra 1, cuya suma es  $R_1$ . En la columna 3 se da la frecuencia (o el número) de las muestras cuya suma es  $R_1$ ; por ejemplo, hay  $f = 2$  muestras para las que  $R_1 = 5$ . Como  $N_1 = 2$  y  $N_2 = 3$ , se tiene

$$U = N_1 N_2 + \frac{N_1 (N_1 + 1)}{2} - R_1 = (2)(3) + \frac{(2)(3)}{2} - R_1 = 9 - R_1$$

A partir de lo cual pueden encontrarse los valores correspondientes de  $U$  en la columna 4 de la tabla; obsérvese que como  $R_1$  varía de 3 a 9,  $U$  varía de 6 a 0. La distribución muestral se da en las columnas 3 y 4 y la gráfica en la figura 17-5.

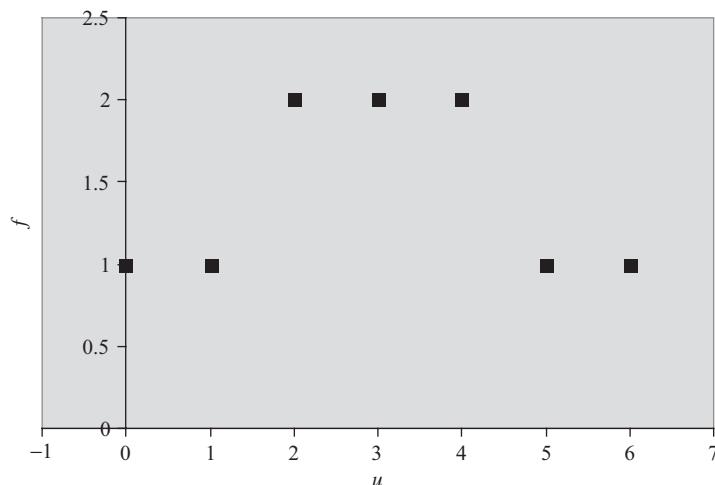
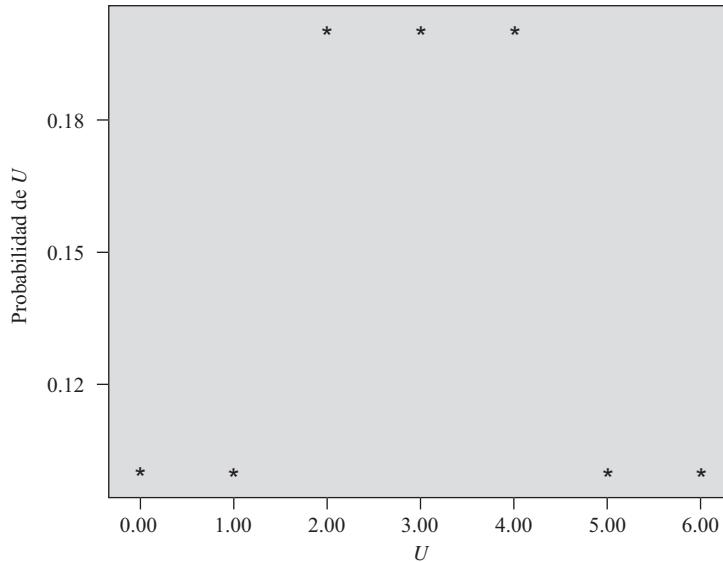


Figura 17-5 EXCEL, gráfica de la distribución muestral de  $U$  con  $N_1 = 2$  y  $N_2 = 3$ .

- b) La probabilidad de que  $U = R_1$  (es decir,  $\Pr\{U = R_1\}$ ) se presenta en la columna 5 de la tabla 17.17 y se obtiene hallando la frecuencia relativa. La frecuencia relativa se halla dividiendo cada frecuencia entre la suma de todas las frecuencias, o sea entre 10; por ejemplo,  $\Pr\{U = 5\} = \frac{2}{10} = 0.2$ . En la figura 17.6 se muestra la gráfica de la distribución de probabilidad.

Tabla 17.17

| $R_1$ | Valores de la muestra 1 | $f$ | $U$ | $\Pr\{U = R_1\}$ |
|-------|-------------------------|-----|-----|------------------|
| 3     | (1, 2)                  | 1   | 6   | 0.1              |
| 4     | (1, 3)                  | 1   | 5   | 0.1              |
| 5     | (1, 4), (2, 3)          | 2   | 4   | 0.2              |
| 6     | (1, 5), (2, 4)          | 2   | 3   | 0.2              |
| 7     | (2, 5), (3, 4)          | 2   | 2   | 0.2              |
| 8     | (3, 5)                  | 1   | 1   | 0.1              |
| 9     | (4, 5)                  | 1   | 0   | 0.1              |

Figura 17-6 SPSS, gráfica de la distribución de probabilidad de  $U$  con  $N_1 = 2$  y  $N_2 = 3$ .

- c) De acuerdo con las columnas 3 y 4 de la tabla 17.17, se tiene

$$\begin{aligned}\mu_U &= \bar{U} = \frac{\sum fU}{\sum f} = \frac{(1)(6) + (1)(5) + (2)(4) + (2)(3) + (2)(2) + (1)(1) + (1)(0)}{1 + 1 + 2 + 2 + 2 + 1 + 1} = 3 \\ \sigma_U^2 &= \frac{\sum f(U - \bar{U})^2}{\sum f} \\ &= \frac{(1)(6-3)^2 + (1)(5-3)^2 + (2)(4-3)^2 + (2)(3-3)^2 + (2)(2-3)^2 + (1)(1-3)^2 + (1)(0-3)^2}{10} = 3\end{aligned}$$

**Otro método**

$$\sigma_U^2 = \overline{U^2} - \bar{U}^2 = \frac{(1)(6)^2 + (1)(5)^2 + (2)(4)^2 + (2)(3)^2 + (2)(2)^2 + (1)(1)^2 + (1)(0)^2}{10} - (3)^2 = 3$$

d) De acuerdo con la fórmula (3), empleando  $N_1 = 2$  y  $N_2 = 3$ , se tiene

$$\mu_U = \frac{N_1 N_2}{2} = \frac{(2)(3)}{2} = 3 \quad \sigma_U^2 = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12} = \frac{(2)(3)(6)}{12} = 3$$

- 17.12** Si  $N$  números de un conjunto se ordenan del 1 al  $N$ , probar que la suma de los rangos es  $[N(N + 1)]/2$ .

### SOLUCIÓN

Sea  $R$  la suma de los rangos. Entonces se tiene

$$R = 1 + 2 + 3 + \cdots + (N - 1) + N \quad (16)$$

$$R = N + (N - 1) + (N - 2) + \cdots + 2 + 1 \quad (17)$$

en donde la suma de la ecuación (17) se obtiene invirtiendo el orden de los sumandos de la ecuación (16). Sumando las ecuaciones (16) y (17) se obtiene

$$2R = (N + 1) + (N + 1) + (N + 1) + \cdots + (N + 1) + (N + 1) = N(N + 1)$$

como en esta suma  $(N + 1)$  se presenta  $N$  veces, entonces  $R = [N(N + 1)]/2$ . Esto también puede obtenerse empleando una fórmula del álgebra elemental en series y progresiones aritméticas.

- 17.13** Si  $R_1$  y  $R_2$  son, respectivamente, las sumas de los rangos en las muestras 1 y 2 en una prueba  $U$ , demostrar que  $R_1 + R_2 = [N(N + 1)]/2$ .

### SOLUCIÓN

Se supone que en los datos muestrales no hay empates. Entonces,  $R_1$  debe ser la suma de algunos de los rangos (números) del conjunto 1, 2, 3, ...,  $N$ , y  $R_2$  debe ser la suma de los rangos restantes del conjunto. Por lo tanto,  $R_1 + R_2$  debe ser la suma de todos los rangos del conjunto; es decir,  $R_1 + R_2 = 1 + 2 + 3 + \cdots + N = [N(N + 1)]/2$ , de acuerdo con el problema 17.12.

## LA PRUEBA $H$ DE KRUSKAL-WALLIS

- 17.14** Una empresa va a comprar una de cinco máquinas:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  o  $E$ . En un experimento para determinar si hay diferencia en el desempeño de estas máquinas, cinco operadores experimentados trabajan con cada una de las cinco máquinas durante un mismo tiempo. En la tabla 17.18 se muestra la cantidad de unidades obtenida con cada máquina. A los niveles de significancia: a) 0.05 y b) 0.01, probar la hipótesis de que no hay diferencia entre las máquinas. Resolver el problema primero a mano, dando todos los detalles de la prueba  $H$  de Kruskal-Wallis; después, resolver el problema usando MINITAB.

Tabla 17.18

|     |    |    |    |    |    |
|-----|----|----|----|----|----|
| $A$ | 68 | 72 | 77 | 42 | 53 |
| $B$ | 72 | 53 | 63 | 53 | 48 |
| $C$ | 60 | 82 | 64 | 75 | 72 |
| $D$ | 48 | 61 | 57 | 64 | 50 |
| $E$ | 64 | 65 | 70 | 68 | 53 |

Tabla 17.19

|     | Suma de los rangos |     |    |      |     |      |
|-----|--------------------|-----|----|------|-----|------|
| $A$ | 17.5               | 21  | 24 | 1    | 6.5 | 70   |
| $B$ | 21                 | 6.5 | 12 | 6.5  | 2.5 | 48.5 |
| $C$ | 10                 | 25  | 14 | 23   | 21  | 93   |
| $D$ | 2.5                | 11  | 9  | 14   | 4   | 40.5 |
| $E$ | 14                 | 16  | 19 | 17.5 | 6.5 | 73   |

**SOLUCIÓN**

Dado que hay cinco muestras ( $A, B, C, D$  y  $E$ ),  $k = 5$ . Como cada muestra consta de cinco valores, se tiene  $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = N_5 = 5$  y  $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 = 25$ . Ordenando todos los valores en forma creciente de magnitud y asignando a los empates los rangos adecuados, la tabla 17.18 se transforma en la tabla 17.19, en la que en la columna del extremo derecho se muestran las sumas de los rangos. De acuerdo con la tabla 17.19 se tiene  $R_1 = 70$ ,  $R_2 = 48.5$ ,  $R_3 = 93$ ,  $R_4 = 40.5$  y  $R_5 = 73$ . Por lo tanto,

$$\begin{aligned} H &= \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{N_j} - 3(N+1) \\ &= \frac{12}{(25)(26)} \left[ \frac{(70)^2}{5} + \frac{(48.5)^2}{5} + \frac{(93)^2}{5} + \frac{(40)^2}{5} + \frac{(73)^2}{5} \right] - 3(26) = 6.44 \end{aligned}$$

Para  $k - 1 = 4$  grados de libertad al nivel de significancia 0.05, en el apéndice IV se encuentra  $\chi^2_{.95} = 9.49$ . Como  $6.44 < 9.49$ , al nivel de significancia 0.05, no se puede rechazar la hipótesis de que no haya diferencia entre las máquinas y, por lo tanto, tampoco se podrá rechazar al nivel de significancia 0.01. En otras palabras, se puede aceptar la hipótesis (o postergar la decisión) de que, a ambos niveles, no hay diferencia entre las máquinas.

Obsérvese que este problema ya fue resuelto antes empleando el análisis de varianza (ver problema 16.8) y se llegó a la misma conclusión.

A continuación se presenta la solución del problema usando MINITAB. Primero, es necesario ingresar los datos en la hoja de cálculo de MINITAB. La estructura que deben tener los datos es la siguiente:

| Row | Machine | Units |
|-----|---------|-------|
| 1   | 1       | 68    |
| 2   | 1       | 72    |
| 3   | 1       | 77    |
| 4   | 1       | 42    |
| 5   | 1       | 53    |
| 6   | 2       | 72    |
| 7   | 2       | 53    |
| 8   | 2       | 63    |
| 9   | 2       | 53    |
| 10  | 2       | 48    |
| 11  | 3       | 60    |
| 12  | 3       | 82    |
| 13  | 3       | 64    |
| 14  | 3       | 75    |
| 15  | 3       | 72    |
| 16  | 4       | 48    |
| 17  | 4       | 61    |
| 18  | 4       | 57    |
| 19  | 4       | 64    |
| 20  | 4       | 50    |
| 21  | 5       | 64    |
| 22  | 5       | 65    |
| 23  | 5       | 70    |
| 24  | 5       | 68    |
| 25  | 5       | 53    |

Con la secuencia **Stat** → **Nonparametrics** → **Kruskal-Wallis** se obtienen los resultados:

**Prueba de Kruskal-Wallis: unidades versus máquinas**

| Machine | N  | Median | Ave Rank | Z     |
|---------|----|--------|----------|-------|
| 1       | 5  | 68.00  | 14.0     | 0.34  |
| 2       | 5  | 53.00  | 9.7      | -1.12 |
| 3       | 5  | 72.00  | 18.6     | 1.90  |
| 4       | 5  | 57.00  | 8.1      | -1.66 |
| 5       | 5  | 65.00  | 14.6     | 0.54  |
| Overall | 25 |        | 13.0     |       |

H = 6.44 DF = 4 P = 0.168  
H = 6.49 DF = 4 P = 0.165 (adjusted for ties)

Obsérvese que se dan dos valores  $p$ . Uno es el valor  $p$  ajustado, para los empates que se presentan al dar los rangos, y el otro no es ajustado. Es claro que, a los niveles de significancia 0.05 y 0.01, las máquinas no son estadísticamente diferentes respecto a la cantidad de unidades que producen, ya que los dos valores  $p$  superan con mucho ambos niveles.

**17.15** Resolver el problema 17.14 usando los paquetes de software STATISTIX y SPSS.

### SOLUCIÓN

El archivo con los datos se estructura como en el problema 17.14. Usando STATISTIX, la secuencia **Statistics → One, Two, Multi-sample tests → Kruskal-Wallis One-way AOV Test** proporciona los resultados que se muestran a continuación. Comparar estos resultados con los obtenidos en el problema 17.14.

Statistix 8.0

Kruskal-Wallis One-way Nonparametrics AOV para unidades por máquina

| <b>Machine</b> | <b>Mean</b> | <b>Sample</b> |
|----------------|-------------|---------------|
|                | <b>Rank</b> | <b>Size</b>   |
| 1              | 14.0        | 5             |
| 2              | 9.7         | 5             |
| 3              | 18.6        | 5             |
| 4              | 8.1         | 5             |
| 5              | 14.6        | 5             |
| Total          | 13.0        | 25            |

|  |        |
|--|--------|
| Kruskal-Wallis Statistic                         | 6.4949 |
| <i>p</i> -Value, Using Chi-Squared Approximation | 0.1651 |

Los resultados de STATISTIX coinciden con los resultados de MINITAB ajustados para empates.

Los resultados de SPSS también coinciden con los resultados de MINITAB ajustados para empates.

### Prueba de Kruskal-Wallis

#### Rangos

| Máquina  | N  | Rango medio |
|----------|----|-------------|
| Unidades |    |             |
| 1.00     | 4  | 14.00       |
| 2.00     | 5  | 9.70        |
| 3.00     | 5  | 18.60       |
| 4.00     | 5  | 8.10        |
| 5.00     | 5  | 14.60       |
| Total    | 25 |             |

#### Estadísticos de prueba<sup>a,b</sup>

|                          | Unidades |
|--------------------------|----------|
| Ji cuadrada              | 6.495    |
| df                       | 4        |
| Significación asintótica | .165     |

<sup>a</sup>Prueba de Kruskal-Wallis

<sup>b</sup>Variable agrupada: máquina

- 17.16** En la tabla 17.20 se da la cantidad de DVD rentados durante el pasado año por los profesores, abogados y médicos de una muestra aleatoria. Usar la prueba  $H$  de Kruskal-Wallis del paquete SAS para probar la hipótesis nula de que las distribuciones de las rentas son las mismas en los tres grupos de profesionistas. Emplear el nivel 0.01.

Tabla 17.20

| Profesores | Abogados | Médicos |
|------------|----------|---------|
| 18         | 2        | 14      |
| 4          | 16       | 30      |
| 5          | 21       | 11      |
| 9          | 24       | 1       |
| 20         | 5        | 7       |
| 26         | 2        | 5       |
| 7          | 50       | 14      |
| 17         | 10       | 7       |
| 43         | 7        | 16      |
| 20         | 49       | 14      |
| 24         | 35       | 27      |
| 7          | 1        | 19      |
| 34         | 45       | 15      |
| 30         | 6        | 22      |
| 45         | 9        | 20      |
| 2          | 24       | 10      |
| 45         | 36       |         |
| 9          | 50       |         |
|            | 44       |         |
|            | 3        |         |

### SOLUCIÓN

Los datos se ingresan en dos columnas. Una columna contiene 1, 2 o 3 que corresponden a profesores, abogados y médicos; la otra columna contiene la cantidad de DVD rentados. Con la secuencia **Statistics** → **ANOVA** → **Nonparametric Oneway ANOVA** de SAS se obtienen los resultados siguientes.

The NPAR1WAY Procedure

Wilcoxon Scores (Rank Sums) for Variable number  
Classified by Variable Profession

| Profession | N  | Sum of Scores | Expected Under H0 | Std Dev Under H0 | Mean Score |
|------------|----|---------------|-------------------|------------------|------------|
| 1          | 18 | 520.50        | 495.0             | 54.442630        | 29.916667  |
| 2          | 20 | 574.50        | 550.0             | 55.770695        | 28.725000  |
| 3          | 16 | 390.00        | 440.0             | 52.735539        | 24.375000  |

Average scores were used for ties.

Kruskal-Wallis Test

|                 |        |
|-----------------|--------|
| Chi-Square      | 0.9004 |
| DF              | 2      |
| Pr > Chi-Square | 0.6375 |

El valor  $p$  se da como  $\text{Pr} > \text{Chi-Square } 0.6375$ . Como el valor  $p$  es mucho mayor que 0.05, no se rechaza la hipótesis nula.

## PRUEBA DE LAS RACHAS PARA ALEATORIEDAD

**17.17** En 30 lanzamientos de una moneda se obtiene la siguiente secuencia de caras (H) y cruces (T):

H T T H T H H H T H H T T H T  
H T H H T H T T H T H H T H T

- Determinar la cantidad  $V$  de rachas.
- Al nivel de significancia 0.05, probar si esta secuencia es aleatoria.

Resolver el problema primero a mano, dando todos los detalles de las pruebas de las rachas para aleatoriedad, y después dar la solución al problema usando MINITAB.

### SOLUCIÓN

- Empleando una línea vertical para separar las rachas

H | T T | H | T | H H H | T | H H | T T | H | T  
H | T | H H H | T | H | T | H T | H H | T | H | T | H | T |

se observa que la cantidad de rachas es  $V = 22$ .

- En esta muestra de lanzamientos hay  $N_1 = 16$  caras y  $N_2 = 14$  cruces, y de acuerdo con el inciso *a*), la cantidad de rachas es  $V = 22$ . Por lo tanto, de acuerdo con las fórmulas (13) de este capítulo, se tiene

$$\mu_V = \frac{2(16)(14)}{16 + 14} + 1 = 15.93 \quad \sigma_V^2 = \frac{2(16)(14)[2(16)(14) - 16 - 14]}{(16 + 14)^2(16 + 14 - 1)} = 7.175$$

o  $\sigma_V = 2.679$ . Por lo tanto, la puntuación  $z$  correspondiente a  $V = 22$  rachas es

$$z = \frac{V - \mu_V}{\sigma_V} = \frac{22 - 15.93}{2.679} = 2.27$$

En una prueba de dos colas, al nivel de significancia 0.05, se aceptará la hipótesis  $H_0$  de aleatoriedad si  $-1.96 \leq z \leq 1.96$  y se rechazará si no es así (ver figura 17-7). Como el valor obtenido para  $z$  es  $2.27 > 1.96$ , se concluye, al nivel de significancia 0.05, que los lanzamientos no son aleatorios. La prueba indica que hay *demasiadas* rachas, lo que indica un *patrón cíclico* en los lanzamientos.

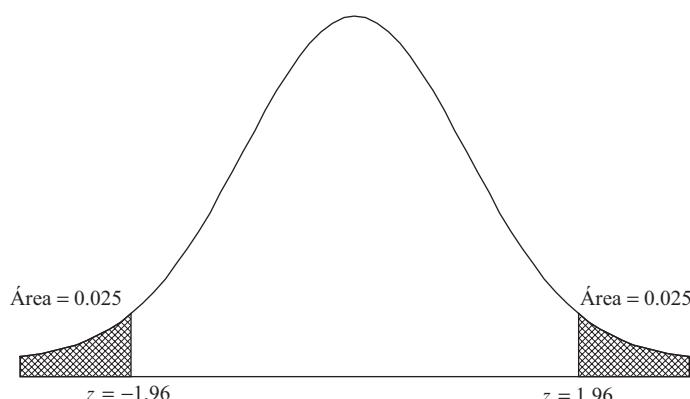


Figura 17-7 Región de rechazo en la curva normal estándar, al nivel de significancia 0.05.

Si se emplea la corrección por continuidad, la puntuación  $z$  dada arriba se convierte en

$$z = \frac{(22 - 0.5) - 15.93}{2.679} = 2.08$$

y se llega a la misma conclusión.

La solución del problema empleando MINITAB es como se indica a continuación. En la columna C1 se ingresan los datos. Cada cara se ingresa como un número 1 y cada cruz como un 0. A la columna 1 se le pone como título Coin (moneda). Con la secuencia de MINITAB Stat → Nonparametrics → Runs Test se obtienen los resultados siguientes.

#### Prueba de las rachas: Moneda

```
Runs test for Coin
Runs above and below K = 0.533333

The observed number of runs = 22
The expected number of runs = 15.9333
16 Observations above K    14 below
p-value = 0.024
```

El valor  $K$  corresponde a la media de ceros y unos en la columna 1. La cantidad de observaciones mayores y menores a  $K$  es la cantidad de caras y cruces en los 30 lanzamientos de la moneda. El valor  $p$  es igual a 0.0235. Como este valor  $p$  es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula. La cantidad de rachas no es aleatoria.

- 17.18** En una muestra de 48 herramientas producidas con una máquina se encuentra la siguiente secuencia de herramientas buenas (G) y defectuosas (D):

```
G G G G G G D D G G G G G G G G G G G
G G D D D D G G G G G G G D G G G
G G G G G G D D G G G G G G D G G G
```

Al nivel de significancia 0.05, probar la aleatoriedad de la secuencia. Usar también SPSS para probar la aleatoriedad de la secuencia.

#### SOLUCIÓN

El número de letras D es  $N_1 = 10$  y el número de letras G es  $N_2 = 38$ ; el número de rachas es  $V = 11$ . Por lo tanto, la media y la varianza son

$$\mu_V = \frac{2(10)(38)}{10 + 38} + 1 = 16.83 \quad \sigma_V^2 = \frac{2(10)(38)[2(10)(38) - 10 - 38]}{(10 + 38)^2(10 + 38 - 1)} = 4.997$$

de manera que  $\sigma_V = 2.235$ .

En una prueba de dos colas, al nivel de significancia 0.05, se acepta la hipótesis  $H_0$  de aleatoriedad si  $-1.96 \leq z \leq 1.96$  (ver figura 17-7), y se rechaza si no es así. Como la puntuación  $z$  que corresponde a  $V = 11$  es

$$z = \frac{V - \mu_V}{\sigma_V} = \frac{11 - 16.83}{2.235} = -2.61$$

y  $-2.61 < -1.96$ , se rechaza  $H_0$  al nivel 0.05.

La prueba muestra que hay *muy pocas* rachas, lo que indica que hay una acumulación (o agrupación) de herramientas defectuosas. En otras palabras, parece haber un *patrón de tendencia* en la producción de herramientas defectuosas. Se recomienda un examen del proceso de producción.

Con la secuencia **Analyze** → **Nonparametric Tests** → **Runs** de SPSS se obtienen los resultados que se dan a continuación. Si las G se reemplazan por unos y las D por ceros, el valor de prueba (Test Value), 0.7917, es la media de estos valores. Los demás valores que se dan en los resultados son  $N_1 = 10$ ,  $N_2 = 38$ , Suma = 48 y  $V = 11$ . El valor obtenido para  $z$  es el valor con corrección por continuidad. A esto se debe que el valor  $z$  difiera del valor  $z$  calculado arriba. El término **Asymp. Sig. (2-tailed)** es el valor  $p$  para dos colas correspondiente a  $z = -2.386$ . Como se ve, los resultados de SPSS contienen la misma información que se halló a mano. Sólo hay que saber interpretarla.

**Prueba de rachas**

|                              | Calidad |
|------------------------------|---------|
| Valor de prueba <sup>a</sup> | .7917   |
| Casos < Valor de prueba      | 10      |
| Casos $\geq$ Valor de prueba | 38      |
| Total de casos               | 48      |
| Número de rachas             | 11      |
| Z                            | -2.386  |
| Asymp. Sig. (2 colas)        | .017    |

<sup>a</sup>Media

- 17.19** a) Formar todas las secuencias posibles que contengan tres  $a$  y dos  $b$ , y dar la cantidad  $V$  de rachas correspondientes a cada secuencia.  
 b) Obtener la distribución muestral de  $V$  y su gráfica.  
 c) Obtener la distribución de probabilidad de  $V$  y su gráfica.

**SOLUCIÓN**

- a) La cantidad de secuencias con tres  $a$  y dos  $b$  es

$$\binom{5}{2} = \frac{5!}{2!3!} = 10$$

Estas secuencias se muestran en la tabla 17.21, dando también la cantidad de rachas correspondiente a cada secuencia.

- b) En la tabla 17.22 se da la distribución muestral de  $V$  (obtenida a partir de la tabla 17.21), en la que  $V$  denota la cantidad de rachas y  $f$  su frecuencia. Así, por ejemplo, la tabla 17.22 indica que hay un 5, cuatro 4, etc. En la figura 17-8 se muestra la gráfica correspondiente.

**Tabla 17.21**

| Secuencia       | Rachas ( $V$ ) |
|-----------------|----------------|
| $a\ a\ a\ b\ b$ | 2              |
| $a\ a\ b\ a\ b$ | 4              |
| $a\ a\ b\ b\ a$ | 3              |
| $a\ b\ a\ b\ a$ | 5              |
| $a\ b\ b\ a\ a$ | 3              |
| $a\ b\ a\ a\ b$ | 4              |
| $b\ b\ a\ a\ a$ | 2              |
| $b\ a\ b\ a\ a$ | 4              |
| $b\ a\ a\ a\ b$ | 3              |
| $b\ a\ a\ b\ a$ | 4              |

**Tabla 17.22**

| $V$ | $f$ |
|-----|-----|
| 2   | 2   |
| 3   | 3   |
| 4   | 4   |
| 5   | 1   |

- c) La distribución de probabilidad de  $V$ , graficada en la figura 17-9, se obtiene de la tabla 17.22 dividiendo cada frecuencia entre la frecuencia total  $2 + 3 + 4 + 1 = 10$ . Por ejemplo,  $\Pr\{V = 5\} = \frac{1}{10} = 0.1$ .

- 17.20** En el problema 17.19, obtener directamente de los resultados ahí obtenidos: a) la media y b) la varianza de la cantidad de rachas.

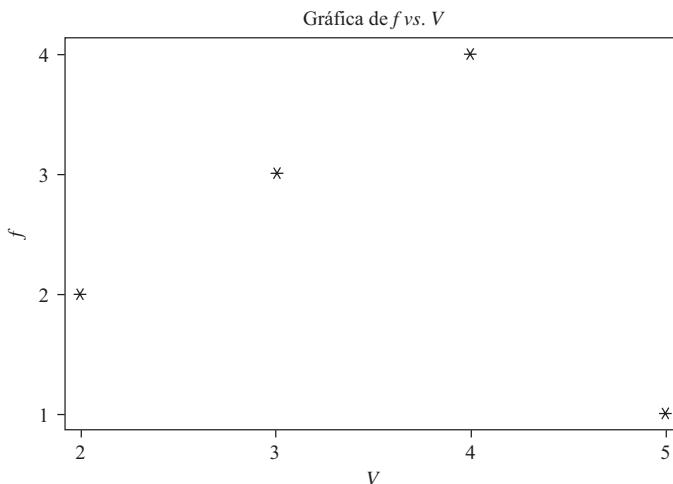


Figura 17-8 STATISTIX, gráfica de la distribución muestral de  $V$ .

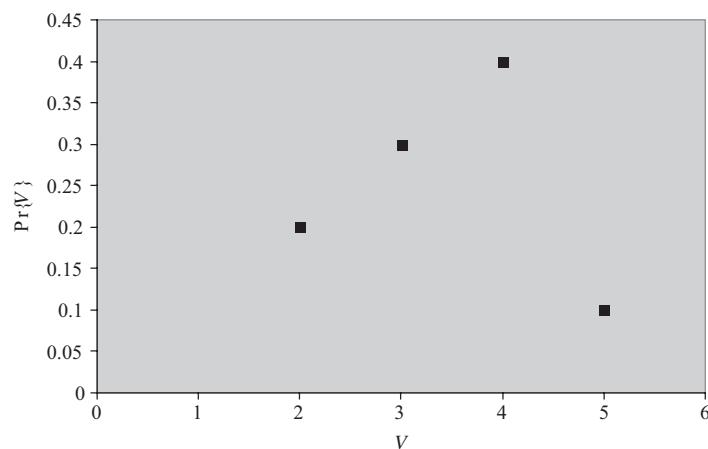


Figura 17-9 EXCEL, gráfica de la distribución de probabilidad de  $V$ .

### SOLUCIÓN

- a) De acuerdo con la tabla 17.21, se tiene

$$\mu_V = \frac{2 + 4 + 3 + 5 + 3 + 4 + 2 + 4 + 3 + 4}{10} = \frac{17}{5}$$

#### Otro método

De acuerdo con la tabla 17.21, con el método de los datos agrupados se tiene

$$\mu_V = \frac{\sum fV}{\sum f} = \frac{(2)(2) + (3)(3) + (4)(4) + (1)(5)}{2 + 3 + 4 + 1} = \frac{17}{5}$$

- b) Empleando el método de los datos agrupados para calcular la varianza, de acuerdo con la tabla 17.22, se tiene

$$\sigma_V^2 = \frac{\sum f(V - \bar{V})^2}{\sum f} = \frac{1}{10} \left[ (2) \left( 2 - \frac{17}{5} \right)^2 + (3) \left( 3 - \frac{17}{5} \right)^2 + (4) \left( 4 - \frac{17}{5} \right)^2 + (1) \left( 5 - \frac{17}{5} \right)^2 \right] = \frac{21}{25}$$

#### Otro método

Como en el capítulo 3, la varianza está dada por

$$\sigma_V^2 = \overline{V^2} - \bar{V}^2 = \frac{(2)(2)^2 + (3)(3)^2 + (4)(4)^2 + (1)(5)^2}{10} - \left( \frac{17}{5} \right)^2 = \frac{21}{25}$$

- 17.21** Repetir el problema 17.20 empleando las fórmulas (13) de este capítulo.

#### SOLUCIÓN

Como hay tres  $a$  y dos  $b$ , se tiene que  $N_1 = 3$  y  $N_2 = 2$ . Por lo tanto,

$$a) \quad \mu_V = \frac{2N_1N_2}{N_1 + N_2} + 1 = \frac{2(3)(2)}{3 + 2} + 1 = \frac{17}{5}$$

$$b) \quad \sigma_V^2 = \frac{2N_1N_2(2N_1N_2 - N_1 - N_2)}{(N_1 + N_2)^2(N_1 + N_2 - 1)} = \frac{2(3)(2)[2(3)(2) - 3 - 2]}{(3 + 2)^2(3 + 2 - 1)} = \frac{21}{25}$$

#### OTRAS APLICACIONES DE LA PRUEBA DE LAS RACHAS

- 17.22** Con los datos del problema 17.3 y empleando como nivel de significancia 0.05, determinar si las duraciones muestrales de las baterías producidas por la empresa PQR son aleatorias. Suponer que las duraciones de las baterías dadas en la tabla 17.3 se registraron en forma consecutiva. Esto es, la primera duración fue 271, la segunda duración fue 230, y así sucesivamente hasta la última duración, 268. Resolver el problema primero a mano, dando todos los detalles de la prueba de las rachas para aleatoriedad. Despues, resolver el problema empleando STATISTIX.

#### SOLUCIÓN

En la tabla 17.23 se muestran las duraciones de las baterías en orden creciente de magnitud. Como en esta tabla hay 24 entradas, la mediana se obtiene de los dos valores de en medio, 253 y 262, y es  $\frac{1}{2}(253 + 262) = 257.5$ . Ahora se reescriben los datos de la tabla 17.3 sustituyéndolos por una  $a$  si su valor es mayor a la mediana y por una  $b$  si su valor es menor a la mediana; se obtiene la tabla 17.24, en la que hay 12 letras  $a$ , 12 letras  $b$  y 15 rachas. Por lo tanto,  $N_1 = 12$ ,  $N_2 = 12$ ,  $N = 24$ ,  $V = 15$ , y se tiene

$$\mu_V = \frac{2N_1N_2}{N_1 + N_2} + 1 = \frac{2(12)(12)}{12 + 12} + 1 = 13 \quad \sigma_V^2 = \frac{2(12)(12)(264)}{(24)^2(23)} = 5.739$$

de manera que

$$z = \frac{V - \mu_V}{\sigma_V} = \frac{15 - 13}{2.396} = 0.835$$

Tabla 17.23

|     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 198 | 211 | 216 | 219 | 224 | 225 | 230 | 236 |
| 243 | 252 | 253 | 253 | 262 | 264 | 268 | 271 |
| 272 | 275 | 282 | 284 | 288 | 291 | 294 | 295 |

Tabla 17.24

|          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>b</i> | <i>a</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>a</i> | <i>b</i> |
| <i>b</i> | <i>b</i> | <i>a</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>b</i> |
| <i>a</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>b</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>a</i> | <i>a</i> |

Empleando una prueba de dos colas, al nivel de significancia 0.05, la hipótesis de aleatoriedad se acepta si  $-1.96 \leq z \leq 1.96$ . Como 0.835 cae dentro de este intervalo, se concluye que la muestra es aleatoria.

A continuación se presenta el análisis empleando STATISTIX. Las duraciones se ingresan en la columna 1 en el orden en que fueron obtenidas. A la columna se le da como título Duraciones. Empleando la secuencia **Statistics → Randomness/Normality Tests → Runs Test** se obtiene el resultado que se presenta a continuación.

Statistix 8.0

#### Prueba de rachas para duración

|   |        |
|---|--------|
| Median                                  | 257.50 |
| Values Above the Median                 | 12     |
| Values below the Median                 | 12     |
| Values Tied with the Median             | 0      |
| Runs Above the Median                   | 8      |
| Runs Below the Median                   | 7      |
| Total Number of Runs                    | 15     |
| Expected Number of Runs                 | 13.0   |
| <br>                                    |        |
| p-Value, Two-Tailed Test                | 0.5264 |
| Probability of getting 15 or fewer runs | 0.8496 |
| Probability of getting 14 or more runs  | 0.2632 |

El valor  $p$  grande indica que la cantidad de rachas puede ser considerada como aleatoria.

- 17.23** Resolver el problema 17.5 empleando la prueba de las rachas para aleatoriedad.

#### SOLUCIÓN

En el primer renglón de la tabla 17.8 aparecen ya todos los valores de las dos muestras ordenados de menor a mayor. Empleando una  $a$  para cada dato de la muestra I y una  $b$  para cada dato de la muestra II, el primer renglón de la tabla 17.8 será

$b \ b \ b \ b \ b \ b \ b \ b \ a \ a \ a \ a \ a \ b \ b \ a \ a \ a$

Como hay cuatro rachas, se tiene  $V = 4$ ,  $N_1 = 8$  y  $N_2 = 10$ . Entonces,

$$\mu_V = \frac{2N_1 N_2}{N_1 + N_2} + 1 = \frac{2(8)(10)}{18} + 1 = 9.889$$

$$\sigma_V^2 = \frac{2N_1 N_2 (2N_1 N_2 - N_1 - N_2)}{(N_1 + N_2)^2 (N_1 + N_2 - 1)} + \frac{2(8)(10)(142)}{(18)^2 (17)} = 4.125$$

de manera que

$$z = \frac{V - \mu_V}{\sigma_V} = \frac{4 - 9.889}{2.031} = -2.90$$

Si  $H_0$  es la hipótesis de que no hay diferencia entre las aleaciones, esto equivale a la hipótesis de que la secuencia anterior es aleatoria. Esta hipótesis se acepta si  $-1.96 \leq z \leq 1.96$  y se rechaza si no es así. Como  $z = -2.90$  se encuentra fuera de este intervalo, se rechaza  $H_0$  y se llega a la misma conclusión que en el problema 17.5.

Obsérvese que si se hace la corrección por continuidad,

$$z = \frac{V - \mu_V}{\sigma_V} = \frac{(4 + 0.5) - 9.889}{2.031} = -2.65$$

y se llega a la misma conclusión.

## CORRELACIÓN DE RANGOS

- 17.24** Las calificaciones, en teoría y laboratorio, de una clase de biología que se presentan en la tabla 17.25 corresponden a 10 estudiantes colocados en orden alfabético. Encontrar el coeficiente de correlación de rangos. Usar SPSS para calcular la correlación de rangos de Spearman.

**Tabla 17.25**

|             |   |   |    |   |   |    |   |   |   |   |
|-------------|---|---|----|---|---|----|---|---|---|---|
| Laboratorio | 8 | 3 | 9  | 2 | 7 | 10 | 4 | 6 | 1 | 5 |
| Teoría      | 9 | 5 | 10 | 1 | 8 | 7  | 3 | 4 | 2 | 6 |

## SOLUCIÓN

En la tabla 17.26 se presentan las diferencias,  $D$ , entre los rangos (calificaciones) de laboratorio y de teoría de cada estudiante; se da también  $D^2$  y  $\sum D^2$ . Entonces

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)} = 1 - \frac{6(24)}{10(10^2 - 1)} = 0.8545$$

lo que indica que hay una estrecha relación entre las calificaciones de teoría y de laboratorio.

**Tabla 17.26**

|                                     |    |    |    |   |    |   |   |   |    |    |
|-------------------------------------|----|----|----|---|----|---|---|---|----|----|
| Diferencia entre los rangos ( $D$ ) | -1 | -2 | -1 | 1 | -1 | 3 | 1 | 2 | -1 | -1 |
| $D^2$                               | 1  | 4  | 1  | 1 | 1  | 9 | 1 | 4 | 1  | 1  |

 $\sum D^2 = 24$ 

Los datos de la tabla 17.26 se ingresan en las columnas tituladas Lab y Lecture (Teoría). Con la secuencia **Analyze** → **Correlate** → **Bivariate** se obtienen los resultados siguientes.

Correlaciones

|                                   |        |  | Lab          | Teoría       |
|-----------------------------------|--------|--|--------------|--------------|
| Correlación de rangos de Spearman | Lab    | Coeficiente de correlación<br>Sig. (2 colas) | 1.000        | .855<br>.002 |
|                                   |        | N  | 10           | 10           |
|                                   | Teoría | Coeficiente de correlación<br>Sig. (2 colas) | .855<br>.002 | 1.000        |
|                                   |        | N  | 10           | 10           |

El resultado indica que hay una correlación significativa entre los desempeños en teoría y en laboratorio.

- 17.25** En la tabla 17.27 se muestran las estaturas de una muestra de 12 padres y de sus hijos mayores adultos. Encontrar el coeficiente de correlación de rangos. Resolver el problema primero a mano, dando todos los detalles para hallar el coeficiente de correlación de rangos. Después, usar SAS para hallar la solución del problema.

Tabla 17.27

|                               |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Estatura del padre (pulgadas) | 65 | 63 | 67 | 64 | 68 | 62 | 70 | 66 | 68 | 67 | 69 | 71 |
| Estatura del hijo (pulgadas)  | 68 | 66 | 68 | 65 | 69 | 66 | 68 | 65 | 71 | 67 | 68 | 70 |

**SOLUCIÓN**

En orden creciente de magnitud, las estaturas de los padres son

$$62 \quad 63 \quad 64 \quad 65 \quad 66 \quad 67 \quad 67 \quad 68 \quad 68 \quad 69 \quad 71 \quad (18)$$

Como la sexta y séptima estaturas son iguales [67 pulgadas (in)], a estas posiciones se les asigna un rango medio  $\frac{1}{2}(6 + 7) = 6.5$ . De igual manera, a las estaturas octava y novena se les asigna el rango  $\frac{1}{2}(8 + 9) = 8.5$ . De esta manera, los rangos asignados a las estaturas de los padres son

$$1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6.5 \quad 6.5 \quad 8.5 \quad 8.5 \quad 10 \quad 11 \quad 12 \quad (19)$$

En forma análoga, en orden creciente de magnitud, las estaturas de los hijos son

$$65 \quad 65 \quad 66 \quad 66 \quad 67 \quad 68 \quad 68 \quad 68 \quad 68 \quad 69 \quad 70 \quad 71 \quad (20)$$

y como las estaturas sexta, séptima, octava y novena son iguales (68 in), a estos lugares se les asigna el rango medio  $\frac{1}{4}(6 + 7 + 8 + 9) = 7.5$ . De esta manera, los rangos asignados a las estaturas de los hijos son

$$1.5 \quad 1.5 \quad 3.5 \quad 3.5 \quad 5 \quad 7.5 \quad 7.5 \quad 7.5 \quad 7.5 \quad 10 \quad 11 \quad 12 \quad (21)$$

Empleando las correspondencias (18) y (19), y (20) y (21), la tabla 17.27 puede reemplazarse por la tabla 17.28. En la tabla 17.29 se dan las diferencias entre los rangos  $D$ ,  $D^2$  y  $\sum D^2$ , con lo que

$$r_S = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)} = 1 - \frac{6(72.50)}{12(12^2 - 1)} = 0.7465$$

Tabla 17.28

|                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| Rango del padre | 4   | 2   | 6.5 | 3   | 8.5 | 1   | 11  | 5   | 8.5 | 6.5 | 10  | 12 |
| Rango del hijo  | 7.5 | 3.5 | 7.5 | 1.5 | 10  | 3.5 | 7.5 | 1.5 | 12  | 5   | 7.5 | 11 |

Tabla 17.29

|       |       |      |      |      |      |      |       |       |       |      |      |      |
|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| $D$   | -3.5  | -1.5 | -1.0 | 1.5  | -1.5 | -2.5 | 3.5   | 3.5   | -3.5  | 1.5  | 2.5  | 1.0  |
| $D^2$ | 12.25 | 2.25 | 1.00 | 2.25 | 2.25 | 6.25 | 12.25 | 12.25 | 12.25 | 2.25 | 6.25 | 1.00 |

$$\sum D^2 = 72.50$$

Este resultado coincide con el coeficiente de correlación obtenido mediante otros métodos.

Las estaturas de los padres se ingresan en la primera columna y las de los hijos en la segunda columna y se pulsa el comando de SAS. Con la secuencia **Statistics** → **Descriptive** → **Correlations** se obtienen los resultados siguientes.

| The CORR Procedure          |    |          |         |          |          |          |
|-----------------------------|----|----------|---------|----------|----------|----------|
| 2 Variables: Fatherht Sonht |    |          |         |          |          |          |
| Simple Statistics           |    |          |         |          |          |          |
| Variable                    | N  | Mean     | Std Dev | Median   | Minimum  | Maximum  |
| Fatherht                    | 12 | 66.66667 | 2.77434 | 67.00000 | 62.00000 | 71.00000 |
| Sonht                       | 12 | 67.58333 | 1.88092 | 68.00000 | 65.00000 | 71.00000 |

Spearman Correlation Coefficient, N = 12  
 prob > |r| under H0: Rho = 0

|          | Fatherht | Sonht   |
|----------|----------|---------|
| Fatherht | 1.00000  | 0.74026 |
| Sonht    | 0.74026  | 1.00000 |

0.0059  
 0.0059

Además de los estadísticos sencillos, SAS da el coeficiente de correlación de Spearman, que es 0.74. El valor  $p$ , 0.0059, puede emplearse para probar la hipótesis nula de que el coeficiente poblacional de correlación de rangos es igual a 0 versus la hipótesis alternativa de que el coeficiente poblacional de correlación de rangos es diferente de 0. Se concluye que en la población sí existe una relación entre estaturas de los padres y estaturas de los hijos.

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### LA PRUEBA DE LOS SIGNOS

- 17.26** Una empresa asegura que si sus productos se adicionan al tanque de gasolina de los automóviles, su rendimiento, en millas por galón, aumenta. Para probar esto, se eligen 15 automóviles diferentes y se mide el rendimiento de la gasolina, en millas por galón, con el aditivo y sin éste; los resultados se muestran en la tabla 17.30. Suponiendo que las condiciones de manejo sean las mismas, determinar los niveles de significancia: a) 0.05 y b) 0.01, si hay alguna diferencia atribuible al uso del aditivo.

Tabla 17.30

|             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Con aditivo | 34.7 | 28.3 | 19.6 | 25.1 | 15.7 | 24.5 | 28.7 | 23.5 | 27.7 | 32.1 | 29.6 | 22.4 | 25.7 | 28.1 | 24.3 |
| Sin aditivo | 31.4 | 27.2 | 20.4 | 24.6 | 14.9 | 22.3 | 26.8 | 24.1 | 26.2 | 31.4 | 28.8 | 23.1 | 24.0 | 27.3 | 22.9 |

- 17.27** ¿Se puede concluir, al nivel de significancia 0.05, que el rendimiento, en millas por galón, obtenido en el problema 17.26 es *mejor* con aditivo que sin aditivo?
- 17.28** Un club para bajar de peso anuncia un programa especial con el que se pierde por lo menos el 6% en 1 mes, si se sigue el programa al pie de la letra. Para probar si esto es así, 36 adultos se someten al programa. De éstos, 25 logran bajar la cantidad deseada, 6 aumentan de peso y el resto permanece esencialmente igual. Al nivel de significancia 0.05, determinar si el programa es efectivo.
- 17.29** Un capacitador asegura que si el personal de ventas de la empresa toma un curso especial, las ventas anuales de la empresa aumentarán. Para probar esto, 24 personas toman el curso. Las ventas de 16 de ellas aumentan, las ventas de 6 de ellas disminuyen y las de 2 de ellas permanecen igual. Al nivel de significancia 0.05, probar la hipótesis de que el curso incrementa las ventas de la empresa.
- 17.30** La empresa refresquera MW realiza “pruebas de sabor” en 27 lugares en todo Estados Unidos, con objeto de determinar las preferencias del público respecto a dos marcas de cola, A y B. En ocho lugares se prefirió la marca A a la marca B, en 17 lugares se prefirió la marca B a la marca A, y en el resto de los lugares fueron indiferentes. Al nivel de significancia 0.05, ¿se puede concluir que la marca B se prefiere a la marca A?
- 17.31** En la tabla 17.31 se muestra la resistencia a la ruptura de una muestra de 25 cuerdas fabricadas por una empresa. Basándose en esta muestra, probar al nivel de significancia 0.05 la afirmación del fabricante de que la resistencia a la ruptura de las cuerdas es: a) 25, b) 30, c) 35 y d) 40.

**Tabla 17.31**

|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| 41 | 28 | 35 | 38 | 23 |
| 37 | 32 | 24 | 46 | 30 |
| 25 | 36 | 22 | 41 | 37 |
| 43 | 27 | 34 | 27 | 36 |
| 42 | 33 | 28 | 31 | 24 |

**17.32** Mostrar cómo obtener límites de confianza de 95% para los datos del problema 17.4.

**17.33** Diseñe y resuelva un problema en el que se emplee la prueba de los signos.

#### LA PRUEBA *U* DE MANN-WHITNEY

**17.34** Dos profesores, *A* y *B*, imparten un mismo curso en la universidad XYZ. En la tabla 17.32 se presentan las calificaciones que obtienen sus alumnos en el examen final, que es común para los dos grupos. Al nivel de significancia 0.05, probar la hipótesis de que no hay diferencia entre las calificaciones de los dos profesores.

**Tabla 17.32**

|          |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| <i>A</i> | 88 | 75 | 92 | 71 | 63 | 84 | 55 | 64 | 82 | 96 |
| <i>B</i> | 72 | 65 | 84 | 53 | 76 | 80 | 51 | 60 | 57 | 85 |

**17.35** Volviendo al problema 17.34, al nivel de significancia 0.01, ¿puede concluirse que los alumnos del maestro *B* sean mejores que los alumnos del maestro *A*?

**17.36** Un agricultor quiere determinar si hay diferencia en el rendimiento de dos variedades de trigo, I y II. En la tabla 17.33 se muestra la producción de trigo por unidad de área con cada una de las dos variedades de trigo. A los niveles de significancia: *a*) 0.05 y *b*) 0.01, ¿puede concluirse que existe alguna diferencia?

**Tabla 17.33**

|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Trigo I  | 15.9 | 15.3 | 16.4 | 14.9 | 15.3 | 16.0 | 14.6 | 15.3 | 14.5 | 16.6 | 16.0 |
| Trigo II | 16.4 | 16.8 | 17.1 | 16.9 | 18.0 | 15.6 | 18.1 | 17.2 | 15.4 |      |      |

**17.37** ¿Puede el agricultor del problema 17.36 concluir que con el trigo II se obtiene mayor rendimiento?

**17.38** Una empresa desea determinar si hay diferencia entre dos marcas de gasolina, *A* y *B*. En la tabla 17.34 se muestran las distancias obtenidas por galón con cada una de las dos marcas. Al nivel de significancia 0.05, ¿puede concluirse: *a*) que sí hay diferencia entre las marcas y *b*) que la marca *B* es mejor que la marca *A*?

**Tabla 17.34**

|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>A</i> | 30.4 | 28.7 | 29.2 | 32.5 | 31.7 | 29.5 | 30.8 | 31.1 | 30.7 | 31.8 |
| <i>B</i> | 33.5 | 29.8 | 30.1 | 31.4 | 33.8 | 30.9 | 31.3 | 29.6 | 32.8 | 33.0 |

**17.39** ¿Puede emplearse una prueba *U* para determinar si hay diferencia entre las máquinas I y II de la tabla 17.1? Explicar.

**17.40** Diseñar y resolver un problema usando la prueba  $U$ .

**17.41** Dados los datos de la tabla 17.35, encontrar  $U$  usando: *a)* el método de la fórmula y *b)* el método del conteo.

**17.42** Repetir el problema 17.41 con los datos de la tabla 17.36.

**Tabla 17.35**

|           |    |    |
|-----------|----|----|
| Muestra 1 | 15 | 25 |
| Muestra 2 | 20 | 32 |

**Tabla 17.36**

|           |    |    |    |    |
|-----------|----|----|----|----|
| Muestra 1 | 40 | 27 | 30 | 56 |
| Muestra 2 | 10 | 35 |    |    |

**17.43** Una población consta de los números 2, 5, 9 y 12. De esta población se toman dos muestras, la primera consta de uno de estos números y la segunda consta de los otros tres números.

- a)* Obtener la distribución muestral de  $U$  y su gráfica.
- b)* Obtener la media y la varianza de esta distribución, tanto directamente como empleando la fórmula.

**17.44** Probar que  $U_1 + U_2 = N_1 N_2$ .

**17.45** Probar que  $R_1 + R_2 = [N(N+1)]/2$  en el caso en que la cantidad de empates sea: *a)* 1, *b)* 2 y *c)* cualquier número.

**17.46** Si  $N_1 = 14$ ,  $N_2 = 12$  y  $R_1 = 105$ , encontrar: *a)*  $R_2$ , *b)*  $U_1$  y *c)*  $U_2$ .

**17.47** Si  $N_1 = 10$ ,  $N_2 = 16$  y  $U_2 = 60$ , encontrar: *a)*  $R_1$ , *b)*  $R_2$  y *c)*  $U_1$ .

**17.48** ¿Cuál es la mayor cantidad de los valores  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $U_1$  y  $U_2$  que se puede determinar a partir de los restantes? Probar la respuesta.

#### LA PRUEBA $H$ DE KRUSKAL-WALLIS

**17.49** Se hace un experimento para determinar el rendimiento de cinco variedades de trigo: *A*, *B*, *C*, *D* y *E*. A cada variedad se le asignan cuatro parcelas. En la tabla 17.37 se presentan los rendimientos (en bushels por acre). Suponiendo que en todas las parcelas la fertilidad sea semejante y que las variedades se hayan asignado de manera aleatoria a las parcelas, determinar, a los niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01, si hay diferencia significativa entre los rendimientos.

**Tabla 17.37**

|          |    |    |    |    |
|----------|----|----|----|----|
| <i>A</i> | 20 | 12 | 15 | 19 |
| <i>B</i> | 17 | 14 | 12 | 15 |
| <i>C</i> | 23 | 16 | 18 | 14 |
| <i>D</i> | 15 | 17 | 20 | 12 |
| <i>E</i> | 21 | 14 | 17 | 18 |

**Tabla 17.38**

|          |    |    |    |    |    |    |
|----------|----|----|----|----|----|----|
| <i>A</i> | 33 | 38 | 36 | 40 | 31 | 35 |
| <i>B</i> | 32 | 40 | 42 | 38 | 30 | 34 |
| <i>C</i> | 31 | 37 | 35 | 33 | 34 | 30 |
| <i>D</i> | 27 | 33 | 32 | 29 | 31 | 28 |

**17.50** Una empresa desea probar cuatro tipos diferentes de neumáticos: *A*, *B*, *C* y *D*. En la tabla 17.38 se dan las duraciones de los neumáticos (en miles de millas) determinadas de acuerdo con su dibujo; cada tipo de neumático se probó en seis automóviles similares asignados aleatoriamente a los neumáticos. A los niveles: *a)* 0.05 y *b)* 0.01, determinar si hay diferencia significativa entre los neumáticos.

- 17.51** Un maestro desea probar tres métodos de enseñanza: I, II y III. Para esto, elige en forma aleatoria tres grupos de cinco estudiantes cada uno y en cada grupo prueba uno de los métodos de enseñanza. A todos los estudiantes les pone el mismo examen. En la tabla 17.39 se presentan las calificaciones obtenidas. A los niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01, determinar si hay diferencia entre estos métodos de enseñanza.

**Tabla 17.39**

|            |    |    |    |    |    |
|------------|----|----|----|----|----|
| Método I   | 78 | 62 | 71 | 58 | 73 |
| Método II  | 76 | 85 | 77 | 90 | 87 |
| Método III | 74 | 79 | 60 | 75 | 80 |

- 17.52** En la tabla 17.40 se presentan las calificaciones obtenidas por un estudiante durante un semestre en varias materias. A los niveles de significancia: *a)* 0.05 y *b)* 0.01, probar si hay diferencia entre las calificaciones en estas materias.

**Tabla 17.40**

|             |    |    |    |    |
|-------------|----|----|----|----|
| Matemáticas | 72 | 80 | 83 | 75 |
| Ciencias    | 81 | 74 | 77 |    |
| Inglés      | 88 | 82 | 90 | 87 |
| Economía    | 74 | 71 | 77 | 70 |

- 17.53** Usando la prueba *H*, resolver: *a)* el problema 16.9, *b)* el problema 16.21 y *c)* el problema 16.22.

- 17.54** Usando la prueba *H*, resolver: *a)* el problema 16.23, *b)* el problema 16.24 y *c)* el problema 16.25.

### PRUEBA DE LAS RACHAS PARA ALEATORIEDAD

- 17.55** En cada una de estas secuencias, determinar la cantidad, *V*, de rachas.

- a)* A B A B B A A A B B A B  
*b)* H H T H H H T T T T H H T H H T H T

- 17.56** A 25 personas se les preguntó si les gustaba un producto (lo que se indica por Y y N, respectivamente). El resultado muestral obtenido es el que se presenta en la secuencia siguiente:

Y Y N N N N N Y Y Y N Y N N Y N N N N N Y Y Y Y N N

- a)* Determinar la cantidad, *V*, de rachas.  
*b)* Al nivel de significancia 0.05, probar si estas respuestas son aleatorias.

- 17.57** Aplicar la prueba de las rachas a las secuencias (*I*) y (*II*) de este capítulo y dar las conclusiones acerca de la aleatoriedad.

- 17.58** *a)* Formar todas las secuencias posibles que contengan dos letras *a* y una letra *b* y dar el número *V* de rachas correspondiente a cada secuencia.  
*b)* Obtener la distribución muestral de *V*, así como su gráfica.  
*c)* Obtener la distribución de probabilidad de *V*, así como su gráfica.

- 17.59** En el problema 17.58, encontrar la media y la varianza de  $V$ : *a)* directamente a partir de la distribución muestral y *b)* mediante las fórmulas.
- 17.60** Resolver los problemas 17.58 y 17.59, pero esta vez con: *a)* dos letras  $a$  y dos letras  $b$ ; *b)* una letra  $a$  y tres letras  $b$ , y *c)* una letra  $a$  y cuatro letras  $b$ .
- 17.61** Resolver los problemas 17.58 y 17.59, pero esta vez con dos letras  $a$  y cuatro letras  $b$ .

### OTRAS APLICACIONES DE LA PRUEBA DE LAS RACHAS

- 17.62** Empleando como nivel de significancia 0.05, determinar si la muestra de las 40 calificaciones de la tabla 17.5 es aleatoria.
- 17.63** En la tabla 17.41 se da el precio de cierre de una acción en 25 días consecutivos. Al nivel de significancia 0.05, determinar si estos precios son aleatorios.

**Tabla 17.41**

|        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10.375 | 11.125 | 10.875 | 10.625 | 11.500 |
| 11.625 | 11.250 | 11.375 | 10.750 | 11.000 |
| 10.875 | 10.750 | 11.500 | 11.250 | 12.125 |
| 11.875 | 11.375 | 11.875 | 11.125 | 11.750 |
| 11.375 | 12.125 | 11.750 | 11.500 | 12.250 |

- 17.64** Los primeros dígitos de  $\sqrt{2}$  son  $1.41421\ 35623\ 73095\ 0488\dots$ . ¿Qué conclusión se puede sacar respecto a la aleatoriedad de estos dígitos?
- 17.65** ¿Qué conclusión se puede sacar respecto a la aleatoriedad de los dígitos siguientes?
- $\sqrt{3} = 1.73205\ 08075\ 68877\ 2935\dots$
  - $\pi = 3.14159\ 26535\ 89793\ 2643\dots$
- 17.66** En el problema 17.62, mostrar que empleando la aproximación normal, el valor  $p$  es 0.105.
- 17.67** En el problema 17.63, mostrar que empleando la aproximación normal, el valor  $p$  es 0.168.
- 17.68** En el problema 17.64, mostrar que empleando la aproximación normal, el valor  $p$  es 0.485.

### CORRELACIÓN DE RANGOS

- 17.69** En un concurso se pide a los jueces que ordenen a los candidatos (numerados del 1 al 8) de acuerdo con su preferencia. Los resultados se muestran en la tabla 17.42.
- Encontrar el coeficiente de correlación de rangos.
  - Decidir si hay buena coincidencia entre los jueces.

**Tabla 17.42**

|              |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Primer juez  | 5 | 2 | 8 | 1 | 4 | 6 | 3 | 7 |
| Segundo juez | 4 | 5 | 7 | 3 | 2 | 8 | 1 | 6 |

- 17.70** La tabla 14.17, que se reproduce a continuación, da los índices de precios al consumidor, en Estados Unidos, para alimentos y atención médica desde 2000 hasta 2006, comparados con los precios de los años base, 1982 a 1984 (tomando la media como 100).

| Año       | 2000  | 2001  | 2002  | 2003  | 2004  | 2005  | 2006  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alimentos | 167.8 | 173.1 | 176.2 | 180.0 | 186.2 | 190.7 | 195.2 |
| Medicina  | 260.8 | 272.8 | 285.6 | 297.1 | 310.1 | 323.2 | 336.2 |

*Fuente:* Bureau of Labor Statistics.

Según estos datos, encontrar la correlación de rangos de Spearman y el coeficiente de correlación de Pearson.

- 17.71** El coeficiente de correlación de rangos se obtiene empleando los datos ordenados por rangos en la fórmula del producto-momento del capítulo 14. Ilustrar esto empleando ambos métodos para resolver un problema.
- 17.72** Para datos agrupados, ¿puede obtenerse el coeficiente de correlación de rangos? Explicar e ilustrar la respuesta con un ejemplo.

# CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS Y CAPACIDAD DE PROCESOS

# 18

## ANÁLISIS GENERAL DE LAS GRÁFICAS DE CONTROL

Las variaciones que se presentan en cualquier proceso pueden deberse a *causas comunes* o a *causas especiales*. La variación natural de materiales, maquinaria y personas da lugar a las causas comunes de variación. Las causas especiales, también conocidas como *causas asignables*, se deben en la industria a desgaste excesivo de las herramientas, a un nuevo operador, a cambios en los materiales, a nuevos proveedores, etc. Uno de los propósitos de las *gráficas de control* es localizar, y si es posible, eliminar las causas especiales de variación. La estructura general de una gráfica de control consta de *límites de control* y de una *línea central*, como se muestra en la figura 18-1. Hay dos límites de control, el *límite superior de control* o UCL (por sus siglas en inglés) y el *límite inferior de control* o LCL (por sus siglas en inglés).

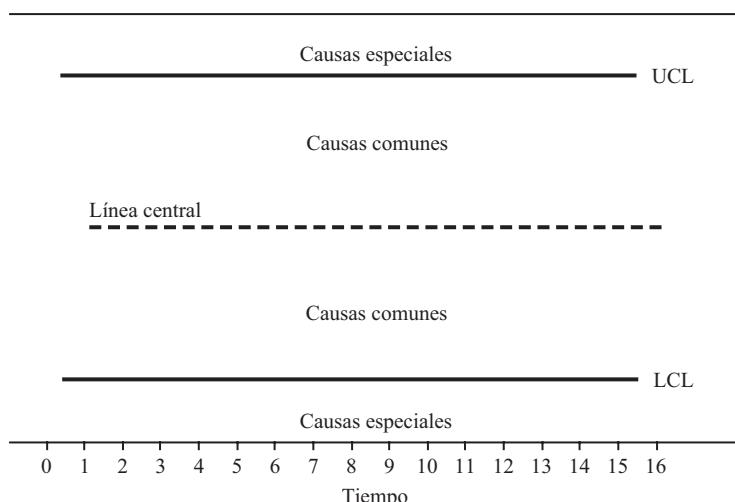


Figura 18-1 Las gráficas de control pueden ser de dos tipos (gráficas de control para variables y gráficas de control para atributos).

Cuando en una gráfica de control un punto cae fuera de los límites de control, se dice que el proceso está fuera de control estadístico. Además de los puntos fuera de control, hay otras anomalías que indican que un proceso está fuera de control. Éstas se verán más adelante. Lo deseable es que los procesos estén bajo control, de manera que su comportamiento sea previsible.

## GRÁFICAS DE CONTROL DE VARIABLES Y GRÁFICAS DE CONTROL DE ATRIBUTOS

Las gráficas de control se pueden dividir en *gráficas de control de variables* y *gráficas de control de atributos*. Los términos “variable” y “atributo” se deben al tipo de datos que se recolectan del proceso. Si se miden características como tiempo, peso, volumen, longitud, caída de presión, concentración, etc., los datos obtenidos se consideran continuos y se conocen como *datos de variables*. Si se cuenta la cantidad de defectuosos en una muestra o la cantidad de defectos en determinado tipo de artículo, a los datos obtenidos se les llama *datos de atributos*. Se considera que los datos de variables son de nivel superior a los datos de atributos. En la tabla 18.1 se dan los nombres de algunas gráficas de control de variables y de control de atributos, así como los estadísticos que en ellas se grafican.

Tabla 18.1

| Tipo de gráfica                   | Estadístico que se grafica   |
|-----------------------------------|--|
| Gráfica X-barra y gráfica R       | Promedios y rangos de subgrupos de datos de las variables                |
| Gráfica X-barra y gráfica sigma   | Promedios y desviaciones estándar de subgrupos de datos de las variables |
| Gráfica mediana                   | Mediana de subgrupos de datos de las variables                           |
| Gráficas de lecturas individuales | Mediciones individuales  |
| Gráfica cusum                     | Suma acumulada de cada $\bar{X}$ menos el valor nominal                  |
| Gráfica de zonas                  | Pesos por zonas  |
| Gráfica EWMA                      | Medias móviles con pesos exponenciales                                   |
| <hr/>                             |  |
| Gráfica P                         | Proporción de artículos defectuosos en el total inspeccionado            |
| Gráfica NP                        | Cantidad real de artículos defectuosos                                   |
| Gráfica C                         | Cantidad de defectos por artículo en muestras de tamaño constante        |
| Gráfica U                         | Cantidad de defectos por artículo en muestras de tamaño variable         |

En la tabla 18.1, las gráficas arriba de la línea punteada son gráficas de control de variables y las gráficas debajo de la línea punteada son gráficas de control de atributos. Actualmente, para la elaboración de gráficas suele emplearse algún software para estadística, como MINITAB.

## GRÁFICAS X-BARRA Y GRÁFICAS R

Para entender la idea general de una gráfica X-barra considérese un proceso que tenga media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$ . Supóngase que el proceso se vigila tomando periódicamente muestras, a las que se les llama *subgrupos* de tamaño  $n$ , y calculando la media muestral  $\bar{X}$  de cada una de ellas. El teorema del límite central asegura que la media de las medias muestrales es  $\mu$  y la desviación estándar de las medias muestrales es  $\sigma/\sqrt{n}$ . La línea central de las medias muestrales se designa como  $\mu$  y se considera que los límites inferior y superior de control están  $3(\sigma/\sqrt{n})$  abajo y arriba de la línea central. El límite inferior de control está dado por la ecuación (I):

$$\text{LCL} = \mu - 3(\sigma/\sqrt{n}) \quad (I)$$

El límite superior de control está dado por la ecuación (2):

$$UCL = \mu + 3(\sigma / \sqrt{n}) \quad (2)$$

En un proceso distribuido normalmente, la media de un subgrupo caerá 99.7% de las veces entre los límites dados por (1) y (2). En la práctica no se conoce ni la media ni la desviación estándar del proceso y es necesario estimarlas. La media del proceso se estima mediante la media de las medias de las muestras periódicas. Esta media está dada por la ecuación (3), donde  $m$  es la cantidad de muestras de tamaño  $n$  tomadas periódicamente.

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum \bar{X}}{m} \quad (3)$$

La media  $\bar{\bar{X}}$ , también puede encontrarse sumando todos los datos y dividiendo esta suma entre  $mn$ . La desviación estándar del proceso se estima promediando las desviaciones estándar o los rangos de los subgrupos, o bien usando un valor histórico de  $\sigma$ .

**EJEMPLO 1** Se obtienen datos sobre la anchura de un producto. En 20 períodos se toman 5 observaciones de cada período. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 18.2. El número de muestras periódicas es  $m = 20$ , el tamaño de la muestra o subgrupo es  $n = 5$ , la suma de todos los datos es 199.84 y la línea central es  $\bar{\bar{X}} = 1.998$ . La secuencia del menú de MINITAB “Stat ⇒ Control charts ⇒ Xbar” se utilizó para procesar la gráfica de control que se muestra en la figura 18-2. Los datos de la tabla 18.2 se ingresan en una sola columna antes de aplicar la secuencia del menú anterior.

Tabla 18.2

| 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.000 | 2.007 | 1.987 | 1.989 | 1.997 | 1.983 | 1.966 | 2.004 | 2.009 | 1.991 |
| 1.988 | 1.988 | 1.983 | 1.989 | 2.018 | 1.972 | 1.982 | 1.998 | 1.994 | 1.989 |
| 1.975 | 2.002 | 2.006 | 1.997 | 1.999 | 2.002 | 1.995 | 2.011 | 2.020 | 2.000 |
| 1.994 | 1.978 | 2.019 | 1.976 | 1.990 | 1.991 | 2.020 | 1.991 | 2.000 | 2.016 |
| 1.991 | 2.012 | 2.021 | 2.007 | 2.003 | 1.997 | 2.008 | 1.972 | 2.006 | 2.037 |

| 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.004 | 1.988 | 1.996 | 1.999 | 2.018 | 1.986 | 2.002 | 1.988 | 2.011 | 1.998 |
| 1.980 | 1.991 | 2.005 | 1.984 | 2.009 | 2.010 | 1.969 | 2.031 | 1.976 | 2.003 |
| 1.998 | 2.003 | 1.996 | 1.988 | 2.023 | 2.012 | 2.018 | 1.978 | 1.998 | 2.016 |
| 1.994 | 1.997 | 2.008 | 2.011 | 2.010 | 2.013 | 1.984 | 1.987 | 2.023 | 1.996 |
| 2.006 | 1.985 | 2.007 | 2.005 | 1.993 | 1.988 | 1.990 | 1.990 | 1.998 | 2.009 |

La desviación estándar del producto puede estimarse de cuatro maneras distintas: sacando el promedio de los rangos de los 20 subgrupos, sacando el promedio de las desviaciones estándar de los 20 subgrupos, conjuntando las varianzas de los 20 subgrupos o mediante un valor histórico de  $\sigma$ , en caso de que se conozca alguno. MINITAB permite utilizar cualquiera de las cuatro opciones. En la figura 18-2 se grafican las 20 medias de las muestras que se presentan en la tabla 18.2. Esta gráfica indica que el proceso está bajo control. Las medias varían aleatoriamente respecto a la línea central y ninguna cae fuera de los límites de control.

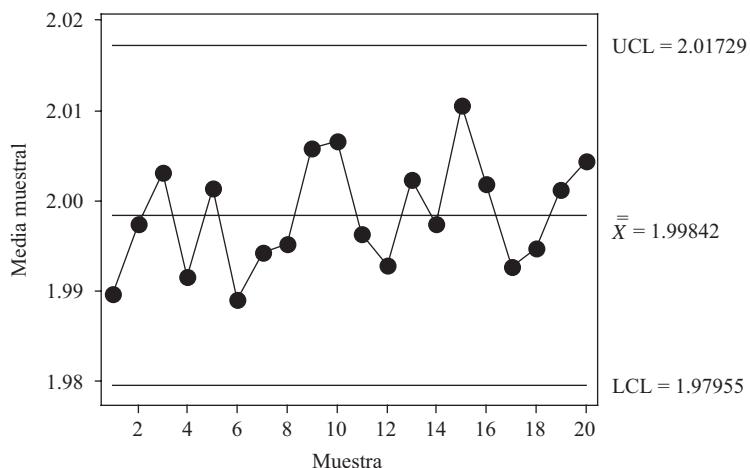


Figura 18-2 Gráfica X-barra para las anchuras.

Las gráficas  $R$  se usan para vigilar la variación del proceso. Para cada uno de los  $m$  subgrupos se calcula el rango  $R$ . La línea central de la gráfica  $R$  está dada por la ecuación (4)

$$\bar{R} = \frac{\sum R}{m} \quad (4)$$

Como en el caso de la gráfica  $X$ -barra, hay diversos métodos para estimar la desviación estándar del proceso.

**EJEMPLO 2** Dados los datos de la tabla 18.2, el rango del primer subgrupo es  $R_1 = 2.000 - 1.975 = 0.025$ , el rango del segundo subgrupo es  $R_2 = 2.012 - 1.978 = 0.034$ . Los 20 rangos son: 0.025, 0.034, 0.038, 0.031, 0.028, 0.030, 0.054, 0.039, 0.026, 0.048, 0.026, 0.018, 0.012, 0.027, 0.030, 0.027, 0.049, 0.053, 0.047 y 0.020. La media de estos 20 rangos es 0.0327. En la figura 18-3 se presenta una gráfica de estos rangos elaborada con MINITAB. Esta gráfica  $R$  no muestra patrón inusual respecto de la variabilidad. Para obtener la gráfica de control de la figura 18-3 se emplea la secuencia “Stat → Control charts → R chart” de MINITAB. Antes de aplicar esta secuencia, los datos de la tabla 18.2 deben ingresarse en una sola columna.

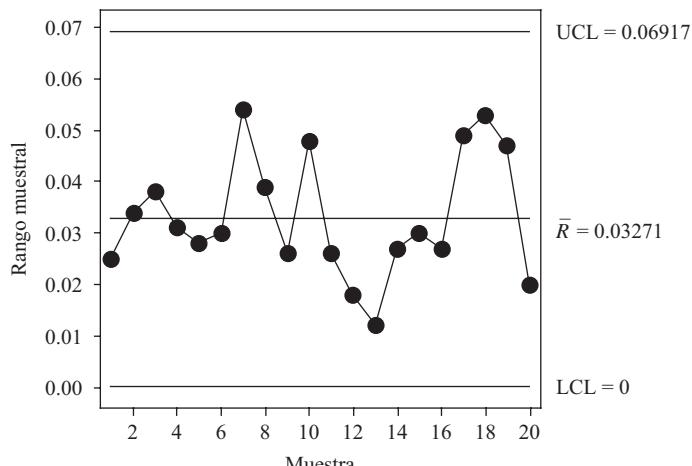


Figura 18-3 Gráfica R para las anchuras.

## PRUEBAS PARA CAUSAS ESPECIALES

Además de un punto que caiga fuera de los límites de control, hay otros indicadores que sugieren falta de aleatoriedad en un proceso debida a causas especiales. En la tabla 18.3 se presentan ocho pruebas para causas especiales.

**Tabla 18.3 Pruebas para causas especiales**

1. Un punto a más de 3 sigmas de la línea central
2. Nueve puntos consecutivos de un mismo lado de la línea central
3. Seis puntos consecutivos, crecientes o decrecientes
4. Catorce puntos consecutivos, alternados arriba y abajo
5. Dos de tres puntos a más de 2 sigmas de la línea central (de un mismo lado)
6. Cuatro de cinco puntos a más de 1 sigma de la línea central (de un mismo lado)
7. Quince puntos consecutivos a más de 1 sigma de la línea central (de cualquier lado)
8. Ocho puntos consecutivos a más de 1 sigma de la línea central (de cualquier lado)

## CAPACIDAD DE PROCESOS

Para llevar a cabo un análisis de la capacidad de un proceso, el proceso debe estar bajo control estadístico. Normalmente se supone que las características del proceso que van a ser medidas tienen distribución normal. Esto se puede comprobar empleando pruebas de normalidad, como la prueba de Kolmogorov-Smirnov, la prueba de Ryan-Joiner o la prueba de Anderson-Darling. La capacidad del proceso es una comparación entre el desempeño del proceso y los requerimientos del mismo. Los requerimientos del proceso determinan los *límites de especificación*. El LSL y el USL (por sus siglas en inglés) son, respectivamente, el *límite inferior de especificación* y el *límite superior de especificación*.

Los datos utilizados para determinar si un proceso está bajo control estadístico pueden emplearse para hacer el análisis de capacidad. A la distancia de 3 sigmas a ambos lados de la media se le conoce como *dispersión del proceso*. La media y la desviación estándar de las características del proceso suelen estimarse a partir de los datos obtenidos para el estudio del control estadístico del proceso.

**EJEMPLO 3** Como se vio en el ejemplo 2, los datos de la tabla 18.2 provienen de un proceso que está bajo control estadístico. Se encuentra que la estimación de la media del proceso es 1.9984. Y la desviación estándar de las 100 observaciones es 0.013931. Supóngase que los límites de especificación son LSL = 1.970 y USL = 2.030. La prueba de Kolmogorov-Smirnov para normalidad se aplica usando MINITAB y se encuentra que no se puede rechazar la normalidad de la característica del proceso. Las *tasas de no conformes* se calculan como sigue. La proporción arriba del USL =  $P(X > 2.030) = P[(X - 1.9984)/0.013931 > (2.030 - 1.9984)/0.013931] = P(Z > 2.27) = 0.0116$ . Es decir, hay  $0.0116(1\ 000\ 000) = 11\ 600$  partes por millón (ppm) superiores al USL que son no conformes. Obsérvese que  $P(Z > 2.27)$  puede encontrarse usando MINITAB, en lugar de buscar en las tablas de distribución normal estándar. Esto se hace como sigue. Se emplea la secuencia **Calc → Probability Distribution → Normal**.

Con  $X = 2.27$  se obtiene

| x      | $P(X \leq x)$ |
|--------|---------------|
| 2.2700 | 0.9884        |

Se tiene  $P(Z < 2.27) = 0.9884$ , por lo tanto,  $P(Z > 2.27) = 1 - 0.9884 = 0.0116$ .

De igual manera, la proporción abajo del LSL =  $P(X < 1.970) = P(Z < -2.04) = 0.0207$ . Hay 20 700 ppm abajo del LSL que son no conformes. También aquí se emplea MINITAB para hallar el área bajo la curva normal estándar a la izquierda de -2.04.

La cantidad total de unidades no conformes es  $11\ 600 + 20\ 700 = 32\ 300$  ppm. Esto es, claramente, un número inaceptablemente elevado de unidades no conformes.

Supóngase que  $\hat{\mu}$  es la estimación de la media de la característica del proceso y  $\hat{\sigma}$  es la estimación de la desviación estándar de la característica del proceso, entonces la tasa de no conformes se estima como sigue. La proporción arriba del USL es igual a

$$P(X > \text{USL}) = P\left(Z > \frac{\text{USL} - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right)$$

y la proporción abajo del LSL es igual a

$$P(X < \text{LSL}) = P\left(Z < \frac{\text{LSL} - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right)$$

El *índice de capacidad del proceso* mide el potencial del proceso para satisfacer las especificaciones y se define como sigue:

$$C_p = \frac{\text{dispersión permitida}}{\text{dispersión medida}} = \frac{\text{USL} - \text{LSL}}{6\hat{\sigma}} \quad (5)$$

**EJEMPLO 4** Dados los datos del proceso de la tabla 18.2,  $\text{USL} - \text{LSL} = 2.030 - 1.970 = 0.060$ ,  $6\hat{\sigma} = 6(0.013931) = 0.083586$  y  $C_p = 0.060/0.083586 = 0.72$ .

El *índice C<sub>PK</sub>* mide el desempeño del proceso y se define como sigue:

$$C_{PK} = \min \left\{ \frac{\text{USL} - \hat{\mu}}{3\hat{\sigma}}, \frac{\hat{\mu} - \text{LSL}}{3\hat{\sigma}} \right\} \quad (6)$$

**EJEMPLO 5** Dados los datos del proceso del ejemplo 1,

$$C_{PK} = \min \left\{ \frac{2.030 - 1.9984}{3(0.013931)}, \frac{1.9984 - 1.970}{3(0.013931)} \right\} = \min \{0.76, 0.68\} = 0.68$$

En procesos que únicamente tienen límite inferior de especificación, el *índice inferior de capacidad C<sub>PL</sub>* se define como sigue:

$$C_{PL} = \frac{\hat{\mu} - \text{LSL}}{3\hat{\sigma}} \quad (7)$$

En procesos que únicamente tienen límite superior de especificación, el *índice superior de capacidad C<sub>PU</sub>* se define como sigue:

$$C_{PU} = \frac{\text{USL} - \hat{\mu}}{3\hat{\sigma}} \quad (8)$$

El *C<sub>PK</sub>* se puede definir en términos del *C<sub>PL</sub>* y del *C<sub>PU</sub>* como sigue:

$$C_{PK} = \min \{C_{PL}, C_{PU}\} \quad (9)$$

La relación entre tasas de no conformes y *C<sub>PL</sub>* y *C<sub>PU</sub>* se obtiene como sigue:

$$\begin{aligned} P(X < \text{LSL}) &= P\left(Z < \frac{\text{LSL} - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right) = P(Z < -3C_{PL}) \text{ dado que } -3C_{PL} = \frac{\text{LSL} - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \\ P(X > \text{USL}) &= P\left(Z > \frac{\text{USL} - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right) = P(Z > 3C_{PU}) \text{ dado que } 3C_{PU} = \frac{\text{USL} - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \end{aligned}$$

**EJEMPLO 6** Supóngase que  $C_{PL} = 1.1$ , entonces la proporción de no conformes es  $P(Z < -3(1.1)) = P(Z < -3.3)$ . Esto se puede encontrar usando MINITAB, de la manera siguiente. Se da la secuencia “**Calc ⇒ Probability Distribution ⇒ Normal**”.

El área acumulada a la izquierda de  $-3.3$  está dada como:

#### Función de distribución acumulada

Normal with mean = 0 and standard deviation = 1

| x    | $P(X \leq x)$ |
|------|---------------|
| -3.3 | 0.00048348    |

Habrá  $1\ 000\ 000 \times 0.00048348 = 483$  ppm de no conformes. Empleando esta técnica se puede elaborar una tabla en la que se relacione la tasa de no conformes con el índice de capacidad. Esto se da en la tabla 18.4.

Tabla 18.4

| $C_{PL}$ o $C_{PU}$ | Proporción de no conformes | ppm    |
|---------------------|----------------------------|--------|
| 0.1                 | 0.38208867                 | 382089 |
| 0.2                 | 0.27425308                 | 274253 |
| 0.3                 | 0.18406010                 | 184060 |
| 0.4                 | 0.11506974                 | 115070 |
| 0.5                 | 0.06680723                 | 66807  |
| 0.6                 | 0.03593027                 | 35930  |
| 0.7                 | 0.01786436                 | 17864  |
| 0.8                 | 0.00819753                 | 8198   |
| 0.9                 | 0.00346702                 | 3467   |
| 1.0                 | 0.00134997                 | 1350   |
| 1.1                 | 0.00048348                 | 483    |
| 1.2                 | 0.00015915                 | 159    |
| 1.3                 | 0.00004812                 | 48     |
| 1.4                 | 0.00001335                 | 13     |
| 1.5                 | 0.00000340                 | 3      |
| 1.6                 | 0.00000079                 | 1      |
| 1.7                 | 0.00000017                 | 0      |
| 1.8                 | 0.00000003                 | 0      |
| 1.9                 | 0.00000001                 | 0      |
| 2.0                 | 0.00000000                 | 0      |

**EJEMPLO 7** Usando la siguiente secuencia de MINITAB **Stat ⇒ Quality tools ⇒ Capability Analysis (Normal)** se obtiene un análisis de capacidad de los datos de la tabla 18.2. Estos resultados de MINITAB se muestran en la figura 18-4. En estos resultados se dan las tasas de no conformes, los índices de capacidad y algunas otras medidas. Las cantidades halladas en los ejemplos 3, 4 y 5 se acercan mucho a las medidas correspondientes mostradas en la figura. Las diferencias se deben a errores de redondeo, así como a diferentes métodos para estimar ciertos parámetros. La gráfica es muy ilustrativa, y señala la distribución de las mediciones muestrales en un histograma. La distribución poblacional de las mediciones del proceso aparece como una curva normal. Las áreas, a la derecha del USL y a la izquierda del LSL, en las colas bajo la curva normal, representan el porcentaje de productos no conformes. Multiplicando la suma de estos porcentajes por un millón, se obtiene la tasa, en ppm, de no conformes en el proceso.

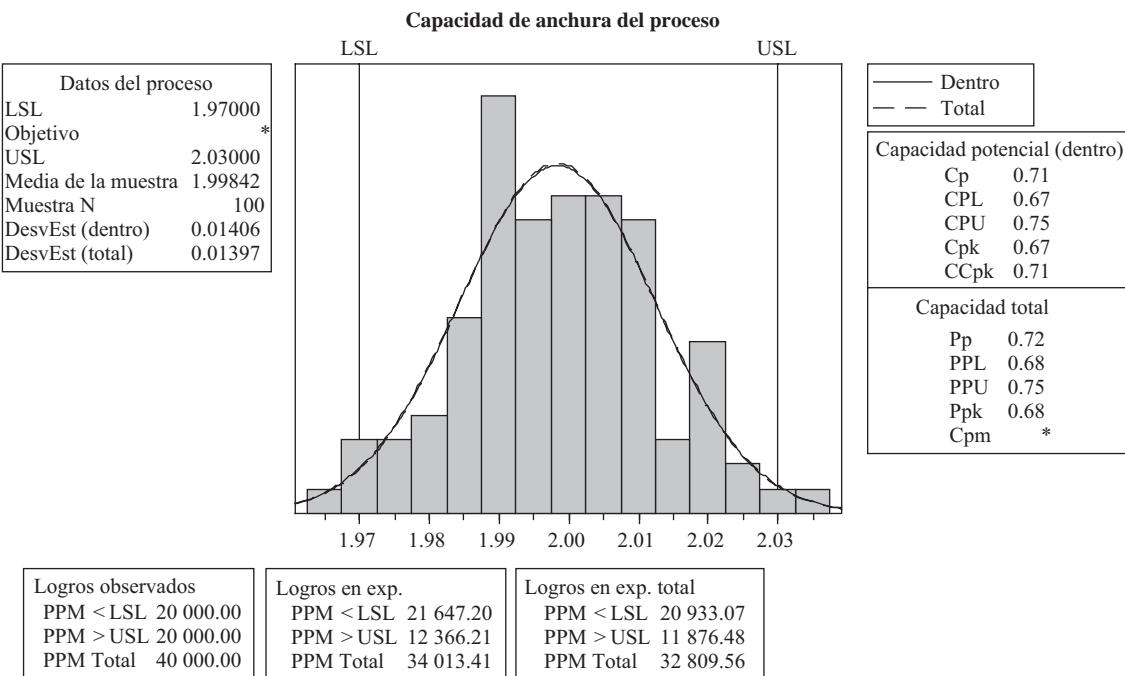


Figura 18-4 Varias medidas de la capacidad del proceso.

## GRÁFICAS P Y NP

Cuando se categorizan o clasifican artículos producidos en masa, a los datos resultantes se les llama *datos de atributos*. Una vez establecidos los estándares que debe satisfacer un producto, se determinan las especificaciones. A un artículo que no satisface las especificaciones se le llama *artículo no conforme*. A un artículo que es no conforme y que no sirve para ser usado se le llama *artículo defectuoso*. Resulta más grave que un artículo sea defectuoso a que sea no conforme. Un artículo puede ser no conforme debido a un rayón o una decoloración, sin que sea un artículo defectuoso. Que un artículo no satisfaga una prueba de desempeño posiblemente hará que el producto sea clasificado como defectuoso y como no conforme. A los defectos encontrados en un artículo se les llama *no conformidades*. A las fallas irreparables se les llama *defectos*.

Para los datos de atributo se pueden emplear cuatro gráficas de control distintas. Estas cuatro gráficas son las gráficas *P*, las *NP*, las *C* y las *U*. Las gráficas *P* y las *NP* se basan en la distribución binomial y las gráficas *C* y *U* se basan en la distribución de Poisson. Las gráficas *P* se usan para vigilar la proporción de artículos no conformes producidos en un proceso. En el ejemplo 8 se ilustran las gráficas *P*, así como la notación que se emplea para describirlas.

**EJEMPLO 8** Supóngase que cada 30 minutos se examinan 20 mascarillas para respiración y que por cada turno de 8 h se registra la cantidad de unidades defectuosas. La cantidad total examinada durante un turno es igual a  $n = 20(16) = 320$ . En la tabla 18.5 se dan los resultados obtenidos en 30 turnos. La línea central de la gráfica *P* corresponde a la proporción de defectuosos en los 30 turnos, y está dada por la cantidad total de defectuosos entre el total de examinados en los 30 turnos, es decir

$$\bar{p} = 72/9\ 600 = 0.0075$$

La desviación estándar de la distribución binomial, correspondiente a esta gráfica, es

$$\sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n}} = \sqrt{\frac{0.0075 \times 0.9925}{320}} = 0.004823$$

Los límites de control de 3 sigma para este proceso son

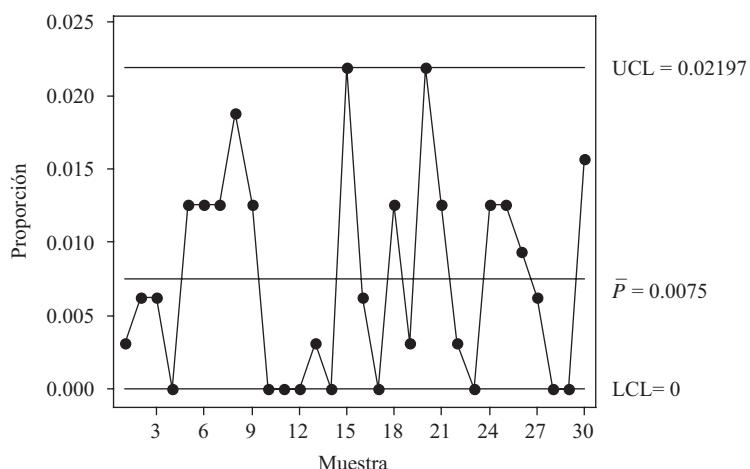
Tabla 18.5

| Turno # | Cantidad de defectuosos<br>$X_i$ | Proporción de defectuosos<br>$P_i = X/n$ | Turno # | Cantidad de defectuosos<br>$X_i$ | Proporción de defectuosos<br>$P_i = X/n$ |
|---------|----------------------------------|--|---------|----------------------------------|--|
| 1       | 1                                | 0.003125                                 | 16      | 2                                | 0.006250                                 |
| 2       | 2                                | 0.006250                                 | 17      | 0                                | 0.000000                                 |
| 3       | 2                                | 0.006250                                 | 18      | 4                                | 0.012500                                 |
| 4       | 0                                | 0.000000                                 | 19      | 1                                | 0.003125                                 |
| 5       | 4                                | 0.012500                                 | 20      | 7                                | 0.021875                                 |
| 6       | 4                                | 0.012500                                 | 21      | 4                                | 0.012500                                 |
| 7       | 4                                | 0.012500                                 | 22      | 1                                | 0.003125                                 |
| 8       | 6                                | 0.018750                                 | 23      | 0                                | 0.000000                                 |
| 9       | 4                                | 0.012500                                 | 24      | 4                                | 0.012500                                 |
| 10      | 0                                | 0.000000                                 | 25      | 4                                | 0.012500                                 |
| 11      | 0                                | 0.000000                                 | 26      | 3                                | 0.009375                                 |
| 12      | 0                                | 0.000000                                 | 27      | 2                                | 0.006250                                 |
| 13      | 1                                | 0.003125                                 | 28      | 0                                | 0.000000                                 |
| 14      | 0                                | 0.000000                                 | 29      | 0                                | 0.000000                                 |
| 15      | 7                                | 0.021875                                 | 30      | 5                                | 0.015625                                 |

$$\bar{p} \pm 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \quad (10)$$

El límite inferior de control es  $LCL = 0.0075 - 3(0.004823) = -0.006969$ . Cuando el LCL es negativo, se considera igual a cero, ya que la proporción de defectuosos en una muestra no es posible que sea negativa. El límite superior de control es  $UCL = 0.0075 + 3(0.004823) = 0.021969$ .

La gráfica  $P$  de este proceso, empleando MINITAB, se obtiene con la secuencia **Stat → Control charts → P**. En la figura 18-5 se muestra la gráfica  $P$ . Aunque al parecer las muestras 15 y 20 indican la presencia de una causa especial, cuando se compara la proporción de defectuosos en estas muestras 15 y 20 (ambas igual a 0.021875) con el  $UCL = 0.021969$ , se ve que estos puntos no están más allá del  $UCL$ .

Figura 18-5 Con la gráfica  $p$  se vigila la proporción de defectuosos.

Con las *gráficas NP* se vigila el número de defectuosos, en lugar de la proporción de defectuosos. La gráfica *NP* es preferida por muchos debido a que es más fácil de entender que la proporción de defectuosos, tanto para los técnicos de calidad como para los operadores. La línea central en la gráfica *NP* está dada por  $n\bar{p}$  y los límites de control de 3 sigma son

$$n\bar{p} \pm 3\sqrt{n\bar{p}(1 - \bar{p})} \quad (11)$$

**EJEMPLO 9** Dados los datos de la tabla 18.5, la línea central está dada por  $n\bar{p} = 320(.0075) = 2.4$  y los límites de control son  $LCL = 2.4 - 4.63 = -2.23$ , que se toma igual a 0 y  $UCL = 2.4 + 4.63 = 7.03$ . Si en un turno se encuentran 8 o más defectuosos, el proceso estará fuera de control. Con MINITAB, la solución se encuentra usando la secuencia

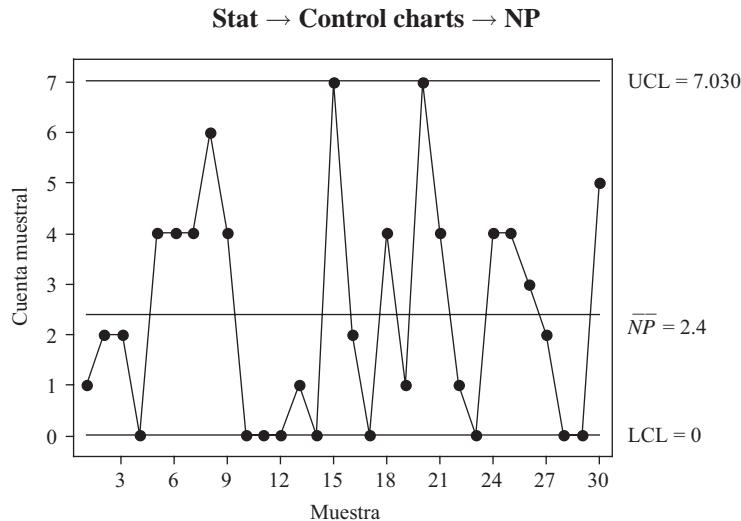


Figura 18-6 Con la gráfica NP se vigila el número de defectuosos.

Antes de ejecutar esta secuencia, el número de defectuosos por muestra debe ser ingresado en alguna columna de la hoja de cálculo. En la figura 18-6 se muestra una gráfica NP.

## OTRAS GRÁFICAS DE CONTROL

Este capítulo es sólo una introducción al uso de las gráficas de control como ayuda en el proceso de control estadístico. En la tabla 18.1 se enumeran varias de las muchas gráficas de control que se emplean actualmente en la industria. Para facilitar los cálculos, en las plantas de producción suele usarse la *gráfica mediana*. En lugar de las medias de las muestras se grafican las medianas de las muestras. Si el tamaño de la muestra es non, entonces la mediana es simplemente el valor de en medio en el conjunto de valores ordenados de menor a mayor.

Cuando el volumen de producción es pequeño suelen emplearse las *gráficas de lecturas individuales*. En este caso, el subgrupo o muestra consta de una sola observación. A las gráficas de lecturas individuales también se les llama gráficas *X*.

Una *gráfica de zonas* está dividida en cuatro zonas. La zona 1 son los valores a no más de 1 desviación estándar de la media, la zona 2 son los valores entre 1 y 2 desviaciones estándar de la media, la zona 3 son los valores entre 2 y 3 desviaciones estándar de la media, y la zona 4 son los valores a 3 o más desviaciones estándar de la media. A las cuatro zonas se les asignan pesos. Los pesos de los puntos a un mismo lado de la línea central se suman y si la suma acumulada es mayor o igual al peso asignado a la zona 4, esto se considera como una señal de que el proceso está fuera de control. La suma acumulada se hace igual a cero después de que el proceso se ha considerado fuera de control, o cuando el siguiente punto graficado cruza la línea central.

Las gráficas de medias móviles con pesos exponenciales (*gráfica EWMA*, por sus siglas en inglés) son una alternativa a las gráficas de lecturas individuales o a las gráficas X-barra y proporcionan una rápida respuesta a cualquier desplazamiento del promedio del proceso. En las gráficas EWMA se incorpora información de todos los subgrupos anteriores, no sólo del subgrupo presente.

Las sumas acumuladas de las desviaciones del valor objetivo del proceso se utilizan en las *gráficas cusum*. Tanto las gráficas EWMA como las gráficas cusum permiten detectar fácilmente cualquier desplazamiento del proceso.

Cuando lo que interesa es la cantidad de no conformidades o de defectos en un producto y no simplemente determinar si el producto está defectuoso o no, se usan las *gráficas C* o las *gráficas U*. Cuando se usan estas gráficas es importante definir una *unidad de inspección*. La unidad de inspección se define como la unidad de producción a ser muestreada y examinada respecto de no conformidades. Si sólo hay una unidad de inspección por muestra, se usa una gráfica *C*, y si el número de unidades de inspección por muestra varía, se usa una gráfica *U*.

## PROBLEMAS RESUELTOS

### GRÁFICAS X-BARRA Y GRÁFICAS R

- 18.1** En un proceso industrial se llenan paquetes de avena para desayuno. La media de llenado de este proceso es 510 gramos (g) y la desviación estándar del llenado es 5 g. Cada hora se toman cuatro paquetes y el peso medio del subgrupo de cuatro pesos se emplea para vigilar el proceso respecto a causas especiales y para ayudar a mantener el proceso bajo control estadístico. Hallar los límites inferior y superior de control de la gráfica de control X-barra.

### SOLUCIÓN

En este problema se supone que se conocen  $\mu$  y  $\sigma$  y que son iguales a 510 y 5, respectivamente. Cuando no se conocen ni  $\mu$  ni  $\sigma$ , será necesario estimarlas. El límite inferior de control es  $LCL = \mu - 3(\sigma/\sqrt{n}) = 510 - 3(2.5) = 502.5$  y el límite superior de control es  $UCL = \mu + 3(\sigma/\sqrt{n}) = 510 + 3(2.5) = 517.5$ .

Tabla 18.6

| Periodo 1 | Periodo 2 | Periodo 3 | Periodo 4 | Periodo 5 | Periodo 6 | Periodo 7 | Periodo 8 | Periodo 9 | Periodo 10 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 2.000     | 2.007     | 1.987     | 1.989     | 1.997     | 1.983     | 1.966     | 2.004     | 2.009     | 1.991      |
| 1.988     | 1.988     | 1.983     | 1.989     | 2.018     | 1.972     | 1.982     | 1.998     | 1.994     | 1.989      |
| 1.975     | 2.002     | 2.006     | 1.997     | 1.999     | 2.002     | 1.995     | 2.011     | 2.020     | 2.000      |
| 1.994     | 1.978     | 2.019     | 1.976     | 1.990     | 1.991     | 2.020     | 1.991     | 2.000     | 2.016      |
| 1.991     | 2.012     | 2.021     | 2.007     | 2.003     | 1.997     | 2.008     | 1.972     | 2.006     | 2.037      |

| Periodo 11 | Periodo 12 | Periodo 13 | Periodo 14 | Periodo 15 | Periodo 16 | Periodo 17 | Periodo 18 | Periodo 19 | Periodo 20 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 2.004      | 1.988      | 1.996      | 1.999      | 2.018      | 2.025      | 2.002      | 1.988      | 2.011      | 1.998      |
| 1.980      | 1.991      | 2.005      | 1.984      | 2.009      | 2.022      | 1.969      | 2.031      | 1.976      | 2.003      |
| 1.998      | 2.003      | 1.996      | 1.988      | 2.023      | 2.035      | 2.018      | 1.978      | 1.998      | 2.016      |
| 1.994      | 1.997      | 2.008      | 2.011      | 2.010      | 2.013      | 1.984      | 1.987      | 2.023      | 1.996      |
| 2.006      | 1.985      | 2.007      | 2.005      | 1.993      | 2.020      | 1.990      | 1.990      | 1.998      | 2.009      |

- 18.2** La tabla 18.6 contiene las anchuras de un producto obtenidas en 20 periodos. Los límites de control para la gráfica X-barra son  $LCL = 1.981$  y  $UCL = 2.018$ . ¿Está alguna de las medias de los grupos fuera de estos límites de control?

### SOLUCIÓN

Las medias de los 20 subgrupos son 1.9896, 1.9974, 2.0032, 1.9916, 2.0014, 1.9890, 1.9942, 1.9952, 2.0058, 2.0066, 1.9964, 1.9928, 2.0024, 1.9974, 2.0106, **2.0230**, 1.9926, 1.9948, 2.0012 y 2.0044, respectivamente. La media número dieciséis, 2.0230, está fuera del límite superior de control. Todas las demás medias están dentro de los límites de control.

- 18.3** Volviendo al problema 18.2, se encuentra que precisamente antes de muestrear el grupo número dieciséis hubo una falla. Este subgrupo se elimina, se vuelven a calcular los límites de control y se encuentra que los nuevos límites de control son  $LCL = 1.979$  y  $UCL = 2.017$ . ¿Hay alguna otra media, además de la media del subgrupo dieciséis, que esté fuera de los nuevos límites de control?

### SOLUCIÓN

Ninguna de las medias dadas en el problema 18.2, además de la número dieciséis, cae fuera de los nuevos límites. Suponiendo que la nueva gráfica satisface todas las otras pruebas para causas especiales, dadas en la tabla 18.3, los límites de control dados en este problema pueden emplearse para vigilar el proceso.

- 18.4** Verificar los límites de control dados en el problema 18.2. Estimar la desviación estándar del proceso conjuntando las 20 varianzas muestrales.

### SOLUCIÓN

La media de las 100 observaciones muestrales es 1.999. Una manera de hallar la varianza conjunta de estas 20 muestras es tratar estas 20 muestras, cada una con cinco observaciones, como una clasificación en un sentido. El error cuadrado medio dentro de los tratamientos es igual a la varianza conjunta de las 20 muestras. Empleando el análisis de MINITAB para un diseño en un sentido, se obtiene la siguiente tabla de análisis de varianza

| Analysis of Variance |    |          |          |      |       |
|----------------------|----|----------|----------|------|-------|
| Source               | DF | SS       | MS       | F    | P     |
| Factor               | 19 | 0.006342 | 0.000334 | 1.75 | 0.044 |
| Error                | 80 | 0.015245 | 0.000191 |      |       |
| Total                | 99 | 0.021587 |          |      |       |

La estimación de la desviación estándar es  $\sqrt{0.000191} = 0.01382$ . El límite inferior de control es  $LCL = 1.999 - 3(0.01382/\sqrt{5}) = 1.981$  y el límite superior de control es  $UCL = 1.999 + 3(0.01382/\sqrt{5}) = 2.018$ .

## PRUEBAS PARA CAUSAS ESPECIALES

- 18.5** En la tabla 18.7 se presentan los datos de 20 subgrupos, cada uno de tamaño 5. La gráfica X-barra se da en la figura 18-7. ¿Qué efectos tuvo en el proceso un cambio a un nuevo proveedor en el periodo 10? ¿Cuál es la prueba para causas especiales, de la tabla 18.3, que no satisface el proceso?

### SOLUCIÓN

En la gráfica de control de la figura 18-7 se observa que el cambio al nuevo proveedor ocasionó un aumento en la anchura. Este cambio después del periodo 10 es evidente. El 6 que aparece en la gráfica de la figura 18-7 indica que no se satisface la prueba 6 de la tabla 18.3. Cuatro de cinco puntos están a más de 1 sigma de la línea central (del mismo lado). Los cinco puntos corresponden a los subgrupos 4 a 8.

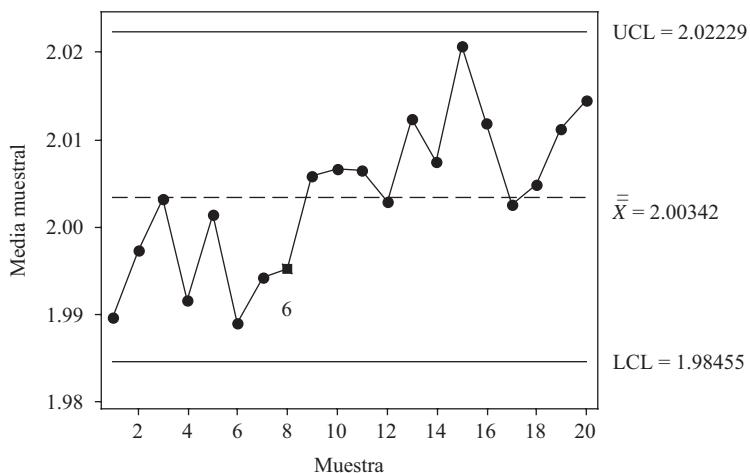


Figura 18-7 MINITAB, puntos que no satisfacen la prueba 6 de la tabla 18.3.

Tabla 18.7

| Periodo 1 | Periodo 2 | Periodo 3 | Periodo 4 | Periodo 5 | Periodo 6 | Periodo 7 | Periodo 8 | Periodo 9 | Periodo 10 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 2.000     | 2.007     | 1.987     | 1.989     | 1.997     | 1.983     | 1.966     | 2.004     | 2.009     | 1.991      |
| 1.988     | 1.988     | 1.983     | 1.989     | 2.018     | 1.972     | 1.982     | 1.998     | 1.994     | 1.989      |
| 1.975     | 2.002     | 2.006     | 1.997     | 1.999     | 2.002     | 1.995     | 2.011     | 2.020     | 2.000      |
| 1.994     | 1.978     | 2.019     | 1.976     | 1.990     | 1.991     | 2.020     | 1.991     | 2.000     | 2.016      |
| 1.991     | 2.012     | 2.021     | 2.007     | 2.003     | 1.997     | 2.008     | 1.972     | 2.006     | 2.037      |

| Periodo 11 | Periodo 12 | Periodo 13 | Periodo 14 | Periodo 15 | Periodo 16 | Periodo 17 | Periodo 18 | Periodo 19 | Periodo 20 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 2.014      | 1.998      | 2.006      | 2.009      | 2.028      | 1.996      | 2.012      | 1.998      | 2.021      | 2.008      |
| 1.990      | 2.001      | 2.015      | 1.994      | 2.019      | 2.020      | 1.979      | 2.041      | 1.986      | 2.013      |
| 2.008      | 2.013      | 2.006      | 1.998      | 2.033      | 2.022      | 2.028      | 1.988      | 2.008      | 2.026      |
| 2.004      | 2.007      | 2.018      | 2.021      | 2.020      | 2.023      | 1.994      | 1.997      | 2.033      | 2.006      |
| 2.016      | 1.995      | 2.017      | 2.015      | 2.003      | 1.998      | 2.000      | 2.000      | 2.008      | 2.019      |

## CAPACIDAD DEL PROCESO

- 18.6 Volver al problema 18.2. Después de determinar una causa especial relacionada con el subgrupo 16, se elimina ese subgrupo. La anchura media se estima hallando la media de los 19 subgrupos restantes. Y la desviación estándar se estima hallando la desviación estándar de estos mismos datos. Si los límites de especificación son LSL = 1.960 y USL = 2.040, hallar el índice inferior de capacidad, el índice superior de capacidad y el índice  $C_{PK}$ .

**SOLUCIÓN**

Empleando las 95 mediciones restantes, después de excluir al subgrupo 16, se encuentra que  $\hat{\mu} = 1.9982$  y  $\hat{\sigma} = 0.01400$ . El índice inferior de capacidad es

$$C_{PL} = \frac{\hat{\mu} - LSL}{3\hat{\sigma}} = \frac{1.9982 - 1.960}{0.0420} = 0.910$$

el índice superior de capacidad es

$$C_{PU} = \frac{USL - \hat{\mu}}{3\hat{\sigma}} = \frac{2.040 - 1.9982}{0.042} = 0.995$$

y  $C_{PK} = \min\{C_{PL}, C_{PU}\} = 0.91$ .

- 18.7** Volver al problema 18.1. *a)* Encontrar el porcentaje de no conformes si  $LSL = 495$  y  $USL = 525$ . *b)* Encontrar las ppm de no conformes si  $LSL = 490$  y  $USL = 530$ .

**SOLUCIÓN**

- a)* Suponiendo que el llenado tenga una distribución normal, el área bajo la curva normal abajo del LSL se encuentra empleando el comando de EXCEL =NORMDIST(495, 510, 5, 1), con el que se obtiene 0.001350. Por simetría, el área bajo la curva normal arriba del USL también es 0.001350. El total del área fuera de los límites de especificación es 0.002700. Las ppm de no conformes son  $0.002700(1\ 000\ 000) = 2\ 700$ .
- b)* El área bajo la curva normal correspondiente a  $LSL = 490$  y a  $USL = 530$  se halla de manera similar y es  $0.000032 + 0.000032 = 0.000064$ . Se encuentra que las partes por millón son  $0.000064(1\ 000\ 000) = 64$ .

**GRÁFICAS P Y NP**

- 18.8** Se inspeccionan circuitos impresos para detectar soldaduras imperfectas. A lo largo de 30 días, diariamente se inspeccionan 500 circuitos impresos. En la tabla 18.8 se presentan las cantidades de defectuosos. Elaborar una gráfica *P* y localizar las causas especiales.

**Tabla 18.8**

| Día           | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| # Defectuosos | 2  | 0  | 2  | 5  | 2  | 4  | 5  | 1  | 2  | 3  |
| Día           | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| # Defectuosos | 3  | 2  | 0  | 4  | 3  | 8  | 10 | 4  | 4  | 5  |
| Día           | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| # Defectuosos | 2  | 4  | 3  | 2  | 3  | 3  | 2  | 1  | 1  | 2  |

**SOLUCIÓN**

Los límites de confianza son

$$\bar{p} = 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$$

La línea central es  $\bar{p} = 92/15\ 000 = 0.00613$  y la desviación estándar es

$$\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} = \sqrt{\frac{(0.00613)(0.99387)}{500}} = 0.00349$$

El límite inferior de control es  $0.00613 - 0.01047 = -0.00434$ , que se toma igual a 0, ya que las proporciones no pueden ser negativas. El límite superior de control es  $0.00613 + 0.01047 = 0.0166$ . El día 17 la proporción de defectuosos es  $P_{17} = 10/500 = 0.02$ ; es el único día en que la proporción es mayor al límite superior.

- 18.9** Dados los datos del problema 18.8, proporcionar los límites de control de la gráfica-NP.

### SOLUCIÓN

Los límites de control para el número de defectuosos son  $n\bar{p} = 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$ . La línea central es  $n\bar{p} = 3.067$ . El límite inferior es 0 y el límite superior es 8.304.

- 18.10** Supóngase que se empacan mascarillas para respiración en cajas con 25 o con 50 unidades. Durante cada turno, a intervalos de 30 minutos, se toma de manera aleatoria una caja y se determina la cantidad de defectuosas en ella. La caja puede contener 25 o 50 mascarillas. La cantidad de mascarillas examinadas por turno varía entre 400 y 800. En la tabla 18.9 se presentan los datos. Usar MINITAB para elaborar la gráfica de control para la proporción de defectuosas.

Tabla 18.9

| Turno # | Tamaño de la muestra<br>$n_i$ | Cantidad de defectuosas<br>$X_i$ | Proporción de defectuosas<br>$P_i = X_i/n_i$ |
|---------|-------------------------------|----------------------------------|--|
| 1       | 400                           | 3                                | 0.0075                                       |
| 2       | 575                           | 7                                | 0.0122                                       |
| 3       | 400                           | 1                                | 0.0025                                       |
| 4       | 800                           | 7                                | 0.0088                                       |
| 5       | 475                           | 2                                | 0.0042                                       |
| 6       | 575                           | 0                                | 0.0000                                       |
| 7       | 400                           | 8                                | 0.0200                                       |
| 8       | 625                           | 1                                | 0.0016                                       |
| 9       | 775                           | 10                               | 0.0129                                       |
| 10      | 425                           | 8                                | 0.0188                                       |
| 11      | 400                           | 7                                | 0.0175                                       |
| 12      | 400                           | 3                                | 0.0075                                       |
| 13      | 625                           | 6                                | 0.0096                                       |
| 14      | 800                           | 5                                | 0.0063                                       |
| 15      | 800                           | 4                                | 0.0050                                       |
| 16      | 800                           | 7                                | 0.0088                                       |
| 17      | 475                           | 9                                | 0.0189                                       |
| 18      | 800                           | 9                                | 0.0113                                       |
| 18      | 750                           | 9                                | 0.0120                                       |
| 20      | 475                           | 2                                | 0.0042                                       |

### SOLUCIÓN

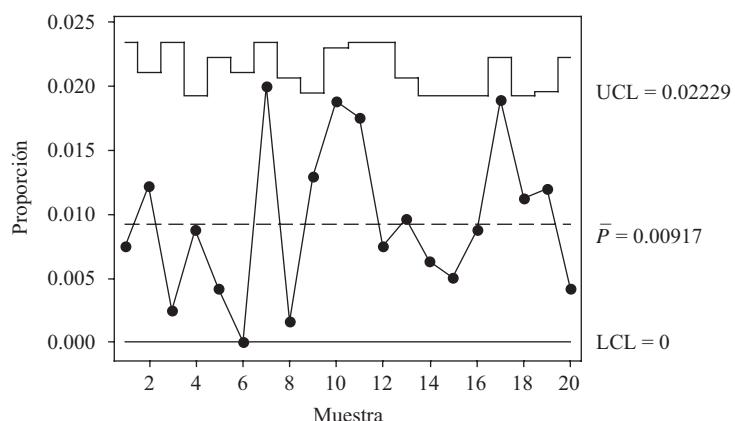
Cuando varía el tamaño de la muestra, la línea central siempre es la misma, es decir, es la proporción de defectuosos en todas las muestras. Pero la desviación estándar varía de una muestra a otra y los límites de control que se obtienen son límites de control escalonados. Los límites de control son

$$\bar{p} = 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}}$$

La línea central es  $\bar{p} = 108/11\ 775 = 0.009172$ . Para el primer subgrupo, se tiene  $n_i = 400$

$$\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}} = \sqrt{\frac{(0.009172)(0.990828)}{400}} = 0.004767$$

y  $3(0.004767) = 0.014301$ . El límite inferior del subgrupo 1 es 0 y el límite superior es  $0.009172 + 0.014301 = 0.023473$ . Los límites de los turnos restantes se determinan de igual manera. Estos límites cambiantes dan lugar a límites superiores de control escalonados, como se muestran en la figura 18-8.



Pruebas realizadas con tamaños de muestras variables

**Figura 18-8 Gráfica  $P$  para tamaños de muestra variables.**

## OTRAS GRÁFICAS DE CONTROL

- 18.11** En los casos en que las mediciones resultan muy costosas, los datos se obtienen lentamente, o cuando la producción es bastante homogénea lo indicado es una *gráfica de lecturas o mediciones individuales de rangos móviles*. Los datos consisten en una sola medición tomada en diferentes momentos. La línea central es la media de todas las mediciones individuales y la variación se estima mediante el uso de *rangos móviles*. Normalmente, los rangos móviles se calculan restando los valores de datos adyacentes y tomando el valor absoluto del valor resultante. En la tabla 18.10 se presentan las mediciones codificadas de la resistencia a la ruptura de un costoso cable empleado en los aviones. Del proceso de producción, se toma un cable por día y se prueba. Proporcionar la gráfica de lecturas individuales generada con MINITAB e interpretar los resultados.

**Tabla 18.10**

| Día         | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Resistencia | 491.5 | 502.0 | 505.5 | 499.6 | 504.1 | 501.3 | 503.5 | 504.3 | 498.5 | 508.8 |
| Día         | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
| Resistencia | 515.4 | 508.0 | 506.0 | 510.9 | 507.6 | 519.1 | 506.9 | 510.9 | 503.9 | 507.4 |

### SOLUCIÓN

Se emplea la secuencia siguiente **Stats → Control charts → individuals**.

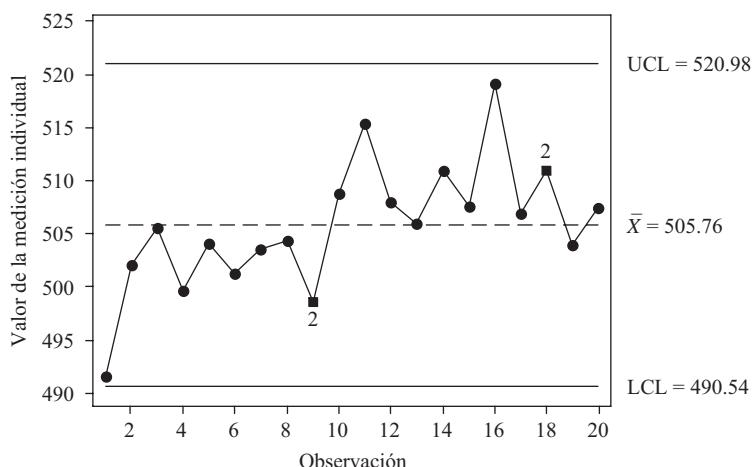


Figura 18-9 Gráfica de mediciones individuales para la resistencia.

En la figura 18-9 se presenta la gráfica de lecturas individuales correspondiente a los datos de la tabla 18.10. En esta gráfica de control se grafican los valores de las lecturas individuales de la tabla 18.10. El 2 que aparece en las semanas 9 y 18 de la gráfica de control hace referencia a la segunda prueba para causas especiales de la tabla 18.3. Esta indicación de una causa especial corresponde a nueve puntos consecutivos de un mismo lado de la línea central. En el periodo 10, un aumento de la temperatura del proceso ocasionó incremento en la resistencia a la ruptura. Este cambio en la resistencia a la ruptura resultó en puntos debajo de la línea central antes del periodo 10 y puntos sobre la línea central después del periodo 10.

- 18.12** La gráfica EWMA de promedios móviles exponencialmente ponderados se usa para detectar pequeños cambios respecto a un valor objetivo  $t$ . Los puntos de la gráfica EWMA están dados por la ecuación siguiente:

$$\hat{x}_i = w\bar{x}_i + (1 - w)\hat{x}_{i-1}$$

Para ilustrar el uso de esta ecuación, supóngase que los datos de la tabla 18.7 hayan sido seleccionados de un proceso cuyo valor objetivo sea 2 000. El valor inicial  $\hat{x}_0$  se elige igual al valor objetivo, 2 000. Como peso  $w$  suele elegirse un valor entre 0.10 y 0.30. Si no se especifica ningún valor, MINITAB utiliza 0.20. El primer punto de la gráfica EWMA será  $\hat{x}_1 = w\bar{x}_1 + (1 - w)\hat{x}_0 + 0.20(1.9896) + 0.80(2.000) = 1.9979$ . El segundo punto de la gráfica será  $\hat{x}_2 = w\bar{x}_2 + (1 - w)\hat{x}_1 = 0.20(1.9974) + 0.80(1.9979) = 1.9978$ , etc. El análisis de MINITAB se obtiene empleando la secuencia siguiente **Stat → Control charts → EWMA**. Es necesario proporcionar a MINITAB el valor objetivo. En la figura 18-10 se muestran los resultados. De acuerdo con la figura, determinar en qué subgrupo se desvía el proceso del valor objetivo.

### SOLUCIÓN

La gráfica de los valores  $\hat{x}_i$  cruza el límite superior de control con el punto correspondiente al periodo 15. Éste es el punto en el que se concluirá que el proceso se aleja del valor objetivo. Obsérvese que la gráfica EWMA tiene límites de control escalonados.

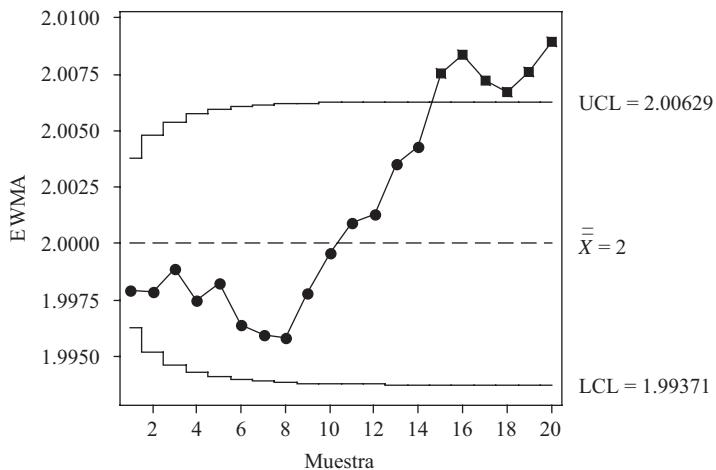


Figura 18-10 Gráfica de promedios móviles exponencialmente ponderados.

- 18.13** Una gráfica de zonas se divide en cuatro zonas. La zona 1 se define como los valores a no más de 1 desviación estándar de la media, la zona 2 se define como los valores entre 1 y 2 desviaciones estándar de la media, la zona 3 se define como los valores entre 2 y 3 desviaciones estándar de la media, y la zona 4 como los valores a 3 o más desviaciones estándar de la media. Si no se especifica otra cosa, MINITAB asigna a las zonas 1 a 4 los valores 0, 2, 4 y 8, respectivamente. Los puntos que se encuentran de un mismo lado de la línea central se suman. Si una suma acumulada es mayor o igual al peso asignado a la zona 4, eso se considera como una señal de que el proceso está fuera de control. Después de que un proceso se señala como fuera de control o cuando el siguiente punto graficado cruza la línea central, la suma acumulada se iguala a 0. En la figura 18-11 se presenta el análisis de MINITAB empleando una gráfica de zonas para los datos de la tabla 18.6. La secuencia para obtener esta gráfica es **Stat → Control charts → Zone**. ¿Qué puntos se encuentran fuera de control en esta gráfica de zona?

### SOLUCIÓN

El subgrupo 16 corresponde a un punto fuera de control. La puntuación de zona correspondiente al subgrupo 16 es 10, que es mayor a la puntuación asignada a la zona 4, con lo que en el proceso se localiza un periodo fuera de control.

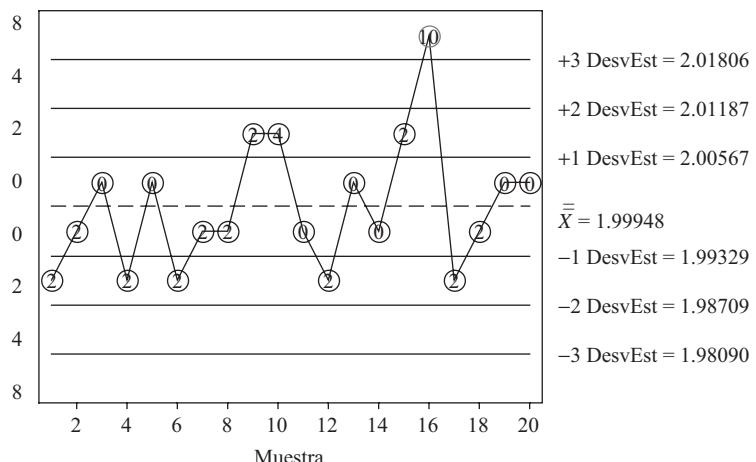


Figura 18-11 Gráfica de zonas para las anchuras.

- 18.14** Cuando lo que interesa es el número de no conformidades o de defectos en un producto, y no sólo determinar si el producto está o no defectuoso, se usa la *gráfica C* o la *gráfica U*. Para usar estas gráficas es importante definir la *unidad de inspección*. La unidad de inspección se define como la unidad de producción (de salida) a ser muestreada y examinada respecto a no conformidades. Si sólo hay una unidad de inspección por muestra, se usa una gráfica *C*; si la cantidad de unidades de inspección por muestra varía, se usa una gráfica *U*.

La fabricación de productos en rollo, como papel, películas, textiles, plásticos, etc., es un área en la que se usan la gráfica *C* y la gráfica *U*. No conformidades o defectos, como la aparición de puntos negros en una película fotográfica, atadíos de fibras, manchas, agujeritos, marcas por electricidad estática, suelen presentarse en algún grado en la fabricación de productos en rollo. El propósito de las gráficas *C* y *U* es garantizar que en el resultado del proceso la ocurrencia de tales inconformidades permanezca dentro de un nivel aceptable. Estas no conformidades suelen presentarse en forma aleatoria e independiente unas de otras en toda el área del producto. En estos casos, para elaborar la gráfica de control se emplea la distribución de Poisson. La línea central de una gráfica *C* se localiza en  $\bar{c}$ , la cantidad media de no conformidades en todos los subgrupos. La desviación estándar en la distribución de Poisson es  $\sqrt{\bar{c}}$ , y por lo tanto los límites de control 3 sigma son  $\bar{c} \pm 3\sqrt{\bar{c}}$ . Es decir, el límite inferior de control es  $LCL = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$  y el límite superior de control es  $UCL = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$ .

Cuando se aplica un recubrimiento a un material, suelen formarse pequeñas no conformidades llamadas aglomerados. En los rollos jumbo de un producto se registra la cantidad de aglomerados por 5 pies (ft) de rollo. En la tabla 18.11 se presentan los resultados en 24 de estos rollos. ¿Hay algún punto fuera de los límites de control 3 sigma?

Tabla 18.11

| Rollo jumbo # | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Aglomerados   | 3  | 3  | 6  | 0  | 7  | 5  | 3  | 6  | 3  | 5  | 2  | 2  |
| Rollo jumbo # | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Aglomerados   | 2  | 7  | 6  | 4  | 7  | 8  | 5  | 13 | 7  | 3  | 3  | 7  |

### SOLUCIÓN

La cantidad media de aglomerados por rollo jumbo es igual a la cantidad total de aglomerados dividida entre 24, esto es,  $\bar{c} = 117/24 = 4.875$ . La desviación estándar es  $\sqrt{\bar{c}} = 2.208$ . El límite inferior de control es  $LCL = 4.875 - 3(2.208) = -1.749$ . Como este valor es negativo, se toma 0 como límite inferior. El límite superior es  $UCL = 4.875 + 3(2.208) = 11.499$ . En el rollo jumbo # 20 hay una condición fuera de control, ya que la cantidad de aglomerados, 13, es mayor al límite superior de control, 11.499.

- 18.15** Este problema es continuación del problema 18.14. Antes de hacer este problema se deberá revisar el problema 18.14. En la tabla 18.12 se dan los datos de 20 rollos jumbo. En la tabla se da el número del rollo, la longitud del rollo inspeccionada para detectar aglomerados, la cantidad de unidades inspeccionadas (recuérdese que según el problema 18.14, una unidad de inspección es 5 ft), la cantidad de aglomerados encontrados en la longitud inspeccionada y la cantidad de aglomerados por unidad inspeccionada. La línea central de la gráfica *U* es  $\bar{u}$ , la suma de la columna 4 dividida entre la suma de la columna 3. Sin embargo, la desviación estándar cambia de una muestra a otra y hace que los límites de control sean límites de control escalonados. El límite inferior de control de la muestra  $i$  es  $UCL = \bar{u} - 3\sqrt{\bar{u}/n_i}$  y el límite superior de control de la muestra  $i$  es  $UCL = \bar{u} + 3\sqrt{\bar{u}/n_i}$ .

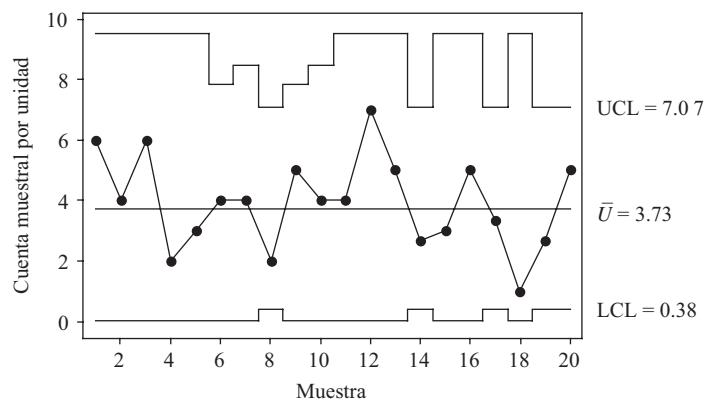
Tabla 18.12

| Rollo jumbo # | Longitud inspeccionada | # de unidades inspeccionadas, $n_i$ | # de aglomerados | $u_i = \text{Col. 4}/\text{Col. 3}$ |
|---------------|------------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| 1             | 5.0                    | 1.0                                 | 6                | 6.00                                |
| 2             | 5.0                    | 1.0                                 | 4                | 4.00                                |
| 3             | 5.0                    | 1.0                                 | 6                | 6.00                                |
| 4             | 5.0                    | 1.0                                 | 2                | 2.00                                |
| 5             | 5.0                    | 1.0                                 | 3                | 3.00                                |
| 6             | 10.0                   | 2.0                                 | 8                | 4.00                                |
| 7             | 7.5                    | 1.5                                 | 6                | 4.00                                |
| 8             | 15.0                   | 3.0                                 | 6                | 2.00                                |
| 9             | 10.0                   | 2.0                                 | 10               | 5.00                                |
| 10            | 7.5                    | 1.5                                 | 6                | 4.00                                |
| 11            | 5.0                    | 1.0                                 | 4                | 4.00                                |
| 12            | 5.0                    | 1.0                                 | 7                | 7.00                                |
| 13            | 5.0                    | 1.0                                 | 5                | 5.00                                |
| 14            | 15.0                   | 3.0                                 | 8                | 2.67                                |
| 15            | 5.0                    | 1.0                                 | 3                | 3.00                                |
| 16            | 5.0                    | 1.0                                 | 5                | 5.00                                |
| 17            | 15.0                   | 3.0                                 | 10               | 3.33                                |
| 18            | 5.0                    | 1.0                                 | 1                | 1.00                                |
| 19            | 15.0                   | 3.0                                 | 8                | 2.67                                |
| 20            | 15.0                   | 3.0                                 | 15               | 5.00                                |

Usar MINITAB para elaborar la gráfica de control para este problema y determinar si el proceso está bajo control.

### SOLUCIÓN

La línea central de la gráfica  $U$  es  $\bar{u}$ , la suma de la columna 4 entre la suma de la columna 3. Pero la desviación estándar cambia de una muestra a otra y hace que los límites de control sean escalonados. El límite inferior de control de la muestra  $i$  es  $LCL = \bar{u} - 3\sqrt{\bar{u}/n_i}$  y el límite superior de control de la muestra  $i$  es  $UCL = \bar{u} + 3\sqrt{\bar{u}/n_i}$ . La línea central correspon-



Prueba realizada con tamaños de muestra diferentes

Figura 18-12 Gráfica  $U$  para aglomerados.

diente a los datos anteriores es  $\bar{u} = 123/33 = 3.73$ . La solución de MINITAB se obtiene mediante la secuencia **Stat → Control Charts → U**.

La información que requiere MINITAB para elaborar la gráfica *U* es la dada en las columnas 3 y 4 de la tabla 18.12. En la figura 18-12 se muestra la gráfica *U* de los datos de la tabla 18.12. La gráfica de control no indica que ningún periodo esté fuera de control.

## PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

### GRÁFICA X-BARRA Y GRÁFICA R

- 18.16** En la tabla 18.13 se presentan los datos de 10 subgrupos, cada uno de tamaño 4. Para cada subgrupo calcular  $\bar{X}$  y  $R$ , así como  $\bar{\bar{X}}$  y  $\bar{R}$ . En una gráfica señalar los valores de  $\bar{X}$  y la línea central correspondiente a  $\bar{\bar{X}}$ . En otra gráfica mostrar los valores de  $R$  junto con la línea central correspondiente a  $\bar{R}$ .

**Tabla 18.13**

| Subgrupo | Observaciones del subgrupo |    |    |    |
|----------|----------------------------|----|----|----|
| 1        | 13                         | 11 | 13 | 16 |
| 2        | 11                         | 12 | 20 | 15 |
| 3        | 16                         | 18 | 20 | 15 |
| 4        | 13                         | 15 | 18 | 12 |
| 5        | 12                         | 19 | 11 | 12 |
| 6        | 14                         | 10 | 19 | 16 |
| 7        | 12                         | 13 | 20 | 10 |
| 8        | 17                         | 17 | 12 | 14 |
| 9        | 15                         | 12 | 16 | 17 |
| 10       | 20                         | 13 | 18 | 17 |

- 18.17** Una empresa de alimentos congelados elabora paquetes de ejotes de una libra (lb) (454 g). Cada hora se toman cuatro paquetes y se pesan con una exactitud de décimas de gramo. En la tabla 18.14 se presentan los datos obtenidos durante una semana.

**Tabla 18.14**

| Lunes<br>10:00 | Lunes<br>12:00 | Lunes<br>2:00 | Lunes<br>4:00 | Martes<br>10:00 | Martes<br>12:00 | Martes<br>2:00 | Martes<br>4:00 | Miércoles<br>10:00 | Miércoles<br>12:00 |
|----------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|
| 453.0          | 451.6          | 452.0         | 455.4         | 454.8           | 452.6           | 453.6          | 453.2          | 453.0              | 451.6              |
| 454.5          | 455.5          | 451.5         | 453.0         | 450.9           | 452.8           | 456.1          | 455.8          | 451.4              | 456.0              |
| 452.6          | 452.8          | 450.8         | 454.3         | 455.0           | 455.5           | 453.9          | 452.0          | 452.5              | 455.0              |
| 451.8          | 453.5          | 454.8         | 450.6         | 453.6           | 454.8           | 454.8          | 453.5          | 452.1              | 453.0              |

| Miércoles<br>2:00 | Miércoles<br>4:00 | Jueves<br>10:00 | Jueves<br>12:00 | Jueves<br>2:00 | Jueves<br>4:00 | Viernes<br>10:00 | Viernes<br>12:00 | Viernes<br>2:00 | Viernes<br>4:00 |
|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 454.7             | 451.1             | 452.2           | 454.0           | 455.7          | 455.3          | 454.2            | 451.1            | 455.7           | 450.7           |
| 451.4             | 452.6             | 448.9           | 452.8           | 451.8          | 452.4          | 452.9            | 453.8            | 455.3           | 452.5           |
| 450.9             | 448.5             | 455.3           | 455.5           | 451.2          | 452.3          | 451.5            | 452.4            | 455.4           | 454.1           |
| 455.8             | 454.4             | 453.9           | 453.8           | 452.8          | 452.3          | 455.8            | 454.3            | 453.7           | 454.2           |

Usar el método visto en el problema 18.4 para estimar la desviación estándar conjuntando las varianzas de las 20 muestras. Usar esta estimación para hallar los límites de control de la gráfica X-barra. ¿Se encuentra alguna de las 20 medias de los subgrupos fuera de los límites de control?

- 18.18** Los límites de control en la gráfica  $R$  de los datos de la tabla 18.14 son  $LCL = 0$  y  $UCL = 8.205$ . ¿Se encuentra alguno de los rangos de los subgrupos fuera de los límites 3 sigma?
- 18.19** El proceso del problema 18.17 mediante el cual se llenan paquetes de ejotes de 1 lb se modifica con objeto de reducir la variabilidad de los pesos de los paquetes. Después de haber empleado esta modificación durante algún tiempo, se vuelven a recolectar los datos de toda una semana y se grafican los rangos de los nuevos subgrupos usando los límites de control dados en el problema 18.18. En la tabla 18.15 se presentan los nuevos datos. ¿Parece haberse reducido a la variabilidad? Si se ha reducido la variabilidad, encontrar nuevos límites de control para la gráfica  $X$  empleando los datos de la tabla 18.15.

Tabla 18.15

| Lunes<br>10:00 | Lunes<br>12:00 | Lunes<br>2:00 | Lunes<br>4:00 | Martes<br>10:00 | Martes<br>12:00 | Martes<br>2:00 | Martes<br>4:00 | Miércoles<br>10:00 | Miércoles<br>12:00 |
|----------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|
| 454.9          | 454.2          | 454.4         | 454.7         | 454.3           | 454.2           | 454.6          | 453.6          | 454.4              | 454.6              |
| 452.7          | 453.6          | 453.6         | 453.9         | 454.2           | 452.8           | 454.5          | 453.2          | 455.0              | 454.1              |
| 457.0          | 454.4          | 453.6         | 454.6         | 454.2           | 453.3           | 454.3          | 453.6          | 454.6              | 453.3              |
| 454.2          | 453.9          | 454.3         | 453.9         | 453.4           | 453.3           | 454.9          | 453.1          | 454.1              | 454.3              |

| Miércoles<br>2:00 | Miércoles<br>4:00 | Jueves<br>10:00 | Jueves<br>12:00 | Jueves<br>2:00 | Jueves<br>4:00 | Viernes<br>10:00 | Viernes<br>12:00 | Viernes<br>2:00 | Viernes<br>4:00 |
|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 453.0             | 453.9             | 453.8           | 455.1           | 454.2          | 454.4          | 455.1            | 455.7            | 452.2           | 455.4           |
| 454.0             | 454.2             | 453.3           | 453.3           | 453.0          | 452.6          | 454.6            | 452.8            | 453.7           | 452.8           |
| 452.9             | 454.3             | 454.1           | 454.7           | 453.8          | 454.9          | 454.1            | 453.8            | 454.4           | 454.7           |
| 454.2             | 454.7             | 454.7           | 453.9           | 453.9          | 454.2          | 454.6            | 454.9            | 454.5           | 455.1           |

### PRUEBAS PARA CAUSAS ESPECIALES

- 18.20** Los operadores que hacen ajustes a las máquinas continuamente son un problema en los procesos industriales. La tabla 18.16 contiene un conjunto de datos (20 muestras cada una de tamaño 5) en las que éste es el caso. Encontrar los límites de control de la gráfica X-barra, elaborar la gráfica X-barra y hacer las ocho pruebas para causas especiales dadas en la tabla 18.3.

Tabla 18.16

| 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.006 | 2.001 | 1.993 | 1.983 | 2.003 | 1.977 | 1.972 | 1.998 | 2.015 | 1.985 |
| 1.994 | 1.982 | 1.989 | 1.983 | 2.024 | 1.966 | 1.988 | 1.992 | 2.000 | 1.983 |
| 1.981 | 1.996 | 2.012 | 1.991 | 2.005 | 1.996 | 2.001 | 2.005 | 2.026 | 1.994 |
| 2.000 | 1.972 | 2.025 | 1.970 | 1.996 | 1.985 | 2.026 | 1.985 | 2.006 | 2.010 |
| 1.997 | 2.006 | 2.027 | 2.001 | 2.009 | 1.991 | 2.014 | 1.966 | 2.012 | 2.031 |

| 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.010 | 1.982 | 2.002 | 1.993 | 2.024 | 1.980 | 2.008 | 1.982 | 2.017 | 1.992 |
| 1.986 | 1.985 | 2.011 | 1.978 | 2.015 | 2.004 | 1.975 | 2.025 | 1.982 | 1.997 |
| 2.004 | 1.997 | 2.002 | 1.982 | 2.029 | 2.006 | 2.024 | 1.972 | 2.004 | 2.010 |
| 2.000 | 1.991 | 2.014 | 2.005 | 2.016 | 2.007 | 1.990 | 1.981 | 2.029 | 1.990 |
| 2.012 | 1.979 | 2.013 | 1.999 | 1.999 | 1.982 | 1.996 | 1.984 | 2.004 | 2.003 |

**CAPACIDAD DE PROCESOS**

- 18.21** Supóngase que los límites de especificación para los paquetes de comida congelada del problema 18.17 son  $LSL = 450$  g y  $USL = 458$  g. Usar las estimaciones de  $\mu$  y  $\sigma$  obtenidas en el problema 18.17 para hallar  $C_{pk}$ . Estimar también las ppm que no satisfacen las especificaciones.
- 18.22** En el problema 18.21, calcular el  $C_{pk}$  y estimar las ppm de no conformes después de las modificaciones hechas en el problema 18.19.

**GRÁFICAS P Y NP**

- 18.23** Una empresa produce fusibles para el sistema eléctrico de los automóviles. A lo largo de 30 días se prueban 500 fusibles por día. En la tabla 18.17 se presenta la cantidad de fusibles defectuosos hallados por día. Determinar la línea central y los límites superior e inferior de control de la gráfica  $P$ . ¿Parece estar el proceso bajo control estadístico? Si el proceso está bajo control estadístico, dar una estimación puntual de las tasas de ppm de defectuosos.

**Tabla 18.17**

| Día              | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| # de defectuosos | 3  | 3  | 3  | 3  | 1  | 1  | 1  | 1  | 6  | 1  |
| Día              | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| # de defectuosos | 1  | 1  | 5  | 4  | 6  | 3  | 6  | 2  | 7  | 3  |
| Día              | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| # de defectuosos | 2  | 3  | 6  | 1  | 2  | 3  | 1  | 4  | 4  | 5  |

- 18.24** Supóngase que en el problema 18.23, el fabricante de fusibles decide usar una gráfica  $NP$  en lugar de una gráfica  $P$ . Encontrar la línea central y los límites superior e inferior de control de esta gráfica.
- 18.25** Scottie Long, el gerente del departamento de carnes de una cadena grande de supermercados, desea saber cuál es el porcentaje de paquetes de carne para hamburguesa que muestran ligera decoloración. Cada día se inspeccionan varios paquetes y se anota el número de ellos que muestra una pequeña decoloración. Estos datos se presentan en la tabla 18.18. Proporcionar los límites escalonados superiores de control de estos 20 subgrupos.

Tabla 18.18

| Día | Tamaño del subgrupo | Cantidad de decolorados | Porcentaje de decolorados |
|-----|---------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1   | 100                 | 1                       | 1.00                      |
| 2   | 150                 | 1                       | 0.67                      |
| 3   | 100                 | 0                       | 0.00                      |
| 4   | 200                 | 1                       | 0.50                      |
| 5   | 200                 | 1                       | 0.50                      |
| 6   | 150                 | 0                       | 0.00                      |
| 7   | 100                 | 0                       | 0.00                      |
| 8   | 100                 | 0                       | 0.00                      |
| 9   | 150                 | 0                       | 0.00                      |
| 10  | 200                 | 2                       | 1.00                      |
| 11  | 100                 | 1                       | 1.00                      |
| 12  | 200                 | 1                       | 0.50                      |
| 13  | 150                 | 3                       | 2.00                      |
| 14  | 200                 | 2                       | 1.00                      |
| 15  | 150                 | 1                       | 0.67                      |
| 16  | 200                 | 1                       | 0.50                      |
| 17  | 150                 | 4                       | 2.67                      |
| 18  | 150                 | 0                       | 0.00                      |
| 19  | 150                 | 0                       | 0.00                      |
| 20  | 150                 | 2                       | 1.33                      |

**OTRAS GRÁFICAS DE CONTROL**

- 18.26** Antes de revisar este problema, leer el problema 18.11. Durante 24 horas se lee cada hora la temperatura de un horno que se usa para elaborar pan. La temperatura de horneado es crítica en el proceso y el horno trabaja sin interrupción a lo largo de todos los turnos. Estos datos se presentan en la tabla 18.19. Para vigilar la temperatura del proceso se emplea una gráfica de mediciones individuales. Encontrar la línea central y los rangos móviles correspondientes al uso de pares adyacentes de mediciones. ¿Cómo se encuentran los límites de control?

Tabla 18.19

|             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Hora        | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| Temperatura | 350.0 | 350.0 | 349.8 | 350.4 | 349.6 | 350.0 | 349.7 | 349.8 | 349.4 | 349.8 | 350.7 | 350.9 |
| Hora        | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    |
| Temperatura | 349.8 | 350.3 | 348.8 | 351.6 | 350.0 | 349.7 | 349.8 | 348.6 | 350.5 | 350.3 | 349.1 | 350.0 |

- 18.27** Antes de revisar este problema, leer el problema 18.12. Usar MINITAB para elaborar una gráfica EWMA con los datos de la tabla 18.14. Usando como valor objetivo 454 g, ¿qué indica esta gráfica respecto al proceso?
- 18.28** Antes de revisar este problema, leer el problema 18.13 que se refiere a las gráficas de zonas. Con los datos de la tabla 18.16, elaborar una gráfica de zonas. ¿Indica la gráfica de zonas que haya algunas situaciones fuera de control? ¿Qué deficiencia de las gráficas de zonas muestra este problema?

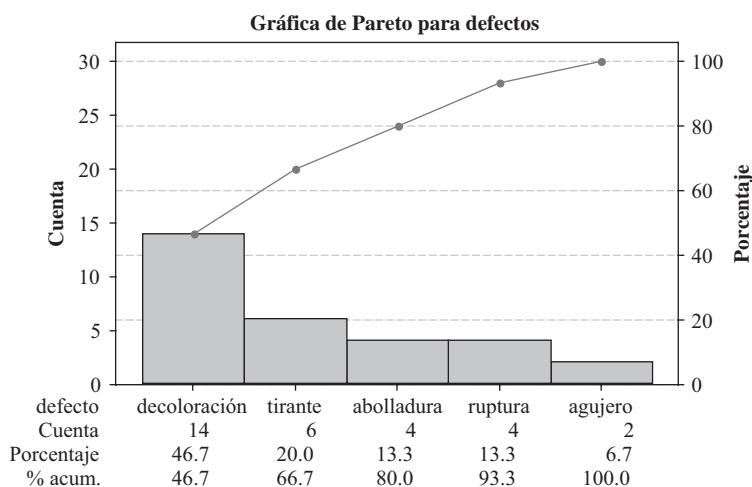
**18.29** Antes de revisar este problema, leer el problema 18.15. Dar los límites de control escalonados de la gráfica *U* del problema 18.15.

**18.30** En el control de calidad se emplean también las *gráficas de Pareto*. Una gráfica de Pareto es una gráfica de barras en la que se enumeran los defectos observados en orden descendente. Los defectos que se encuentran con mayor frecuencia aparecen primero en la lista, seguidos por aquellos que se encuentran con menos frecuencia. Usando estas gráficas se pueden identificar áreas de problema para corregir aquellas causas a las que se debe el mayor porcentaje de defectos. En mascarillas para respiración inspeccionadas durante cierto tiempo, se encontraron los siguientes defectos: decoloración, tirante faltante, abolladuras, roturas y agujeros. En la tabla 18.20 se muestran los resultados.

**Tabla 18.20**

|              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|
| decoloración | decoloración | decoloración |
| tirante      | tirante      | tirante      |
| decoloración | abolladura   | tirante      |
| decoloración | tirante      | decoloración |
| tirante      | decoloración | decoloración |
| decoloración | decoloración | abolladura   |
| decoloración | abolladura   | ruptura      |
| ruptura      | agujero      | decoloración |
| abolladura   | decoloración | agujero      |
| decoloración | ruptura      | ruptura      |

En la figura 18-13 se presenta una gráfica de Pareto generada con MINITAB. Los datos que aparecen en la tabla 18.20 se ingresan en la columna 1 de la hoja de cálculo. La secuencia para elaborar esta gráfica es la siguiente: “**Stat → Quality tools → Pareto charts**”. De acuerdo con la gráfica de Pareto, ¿a qué tipo de defecto debe dársele mayor atención? ¿Cuáles son los dos tipos de defectos a los que debe dárseles mayor atención?



**Figura 18-13 Defectos en mascarillas para respiración.**

# RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

## CAPÍTULO 1

**1.46** *a)* continua; *b)* continua; *c)* discreta; *d)* discreta; *e)* discreta.

**1.47** *a)* Desde cero en adelante; continua. *b)*  $2, 3, \dots$ ; discreta.

*c)* Soltero, casado, divorciado, separado, viudo; discreta. *d)* Desde cero en adelante; continua.

*e)*  $0, 1, 2, \dots$ ; discreta.

**1.48** *a)* 3 300; *b)* 5.8; *c)* 0.004; *d)* 46.74; *e)* 126.00; *f)* 4 000 000; *g)* 148; *h)* 0.000099; *i)* 2 180; *j)* 43.88.

**1.49** *a)* 1 325 000; *b)* 0.0041872; *c)* 0.0000280; *d)* 7 300 000 000; *e)* 0.0003487; *f)* 18.50.

**1.50** *a)* 3; *b)* 4; *c)* 7; *d)* 3; *e)* 8; *f)* una cantidad ilimitada; *g)* 3; *h)* 3; *i)* 4; *j)* 5.

**1.51** *a)* 0.005 millones de bu o 5 000 bu; tres. *b)*  $0.000000005$  cm o  $5 \times 10^{-9}$  cm; cuatro. *c)* 0.5 ft; cuatro.  
*d)*  $0.05 \times 10^8$  m o bien  $5 \times 10^6$  m; dos. *e)* 0.5 mi/s; seis. *f)* 0.5 millares de mi/s o bien 500 mi/s; tres.

**1.52** *a)*  $3.17 \times 10^{-4}$ ; *b)*  $4.280 \times 10^8$ ; *c)*  $2.160000 \times 10^4$ ; *d)*  $9.810 \times 10^{-6}$ ; *e)*  $7.32 \times 10^5$ ; *f)*  $1.80 \times 10^{-3}$ .

**1.53** *a)* 374; *b)* 14.0.

**1.54** *a)* 280 (dos cifras significativas), 2.8 centenas o  $2.8 \times 10^2$ ; *b)* 178.9;  
*c)* 250 000 (tres cifras significativas), 250 millares o  $2.50 \times 10^5$ ; *d)* 53.0; *e)* 5.461; *f)* 9.05;  
*g)* 11.54; *h)* 5 745 000 (cuatro cifras significativas), 5 745 millares, 5.745 millones o  $5.745 \times 10^6$ ; *i)* 1.2;  
*j)* 4 157.

**1.55** a)  $-11$ ; b)  $2$ ; c)  $\frac{35}{8}$  o bien  $4.375$ ; d)  $21$ ; e)  $3$ ; f)  $-16$ ; g)  $\sqrt{98}$  o  $9.89961$  aproximadamente; h)  $-7/\sqrt{34}$  o bien  $-1.20049$  aproximadamente; i)  $32$ ; j)  $10/\sqrt{17}$  o bien  $2.42536$  aproximadamente.

**1.56** a)  $22, 18, 14, 10, 6, 2, -2, -6$  y  $-10$ ; b)  $19.6, 16.4, 13.2, 2.8, -0.8, -4$  y  $-8.4$ ; c)  $-1.2, 30, 10 - 4\sqrt{2} = 4.34$  aproximadamente y  $10 + 4\pi = 22.57$  aproximadamente; d)  $3, 1, 5, 2.1, -1.5, 2.5$  y  $0$ ; e)  $X = \frac{1}{4}(10 - Y)$ .

**1.57** a)  $-5$ ; b)  $-24$ ; c)  $8$ .

**1.58** a)  $-8$ ; b)  $4$ ; c)  $-16$ .

**1.76** a)  $-4$ ; b)  $2$ ; c)  $5$ ; d)  $\frac{3}{4}$ ; e)  $1$ ; f)  $-7$ .

**1.77** a)  $a = 3, b = 4$ ; b)  $a = -2, b = 6$ ; c)  $X = -0.2, Y = -1.2$ ; d)  $A = \frac{184}{7} = 26.28571$  aproximadamente,  $B = \frac{110}{7} = 15.71429$  aproximadamente; e)  $a = 2, b = 3, c = 5$ ; f)  $X = -1, Y = 3, Z = -2$ ; g)  $U = 0.4, V = -0.8, W = 0.3$ .

**1.78** b)  $(2, -3)$ ; es decir,  $X = 2, Y = -3$ .

**1.79** a)  $2, -2.5$ ; b)  $2.1$  y  $-0.8$  aproximadamente.

**1.80** a)  $\frac{4 \pm \sqrt{76}}{6}$  o bien  $2.12$  y  $-0.79$  aproximadamente.

b)  $2$  y  $-2.5$ .

c)  $0.549$  y  $-2.549$  aproximadamente.

d)  $\frac{-8 \pm \sqrt{-36}}{2} = \frac{-8 \pm \sqrt{36}\sqrt{-1}}{2} = \frac{-8 \pm 6i}{2} = -4 \pm 3i$ , donde  $i = \sqrt{-1}$ .

Estas raíces son *números complejos* y no se mostrarán cuando se emplee un procedimiento gráfico.

**1.81** a)  $-6.15 < -4.3 < -1.5 < 1.52 < 2.37$ ; b)  $2.37 > 1.52 > -1.5 > -4.3 > -6.15$ .

**1.82** a)  $30 \leq N \leq 50$ ; b)  $S \geq 7$ ; c)  $-4 \leq X < 3$ ; d)  $P \leq 5$ ; e)  $X - Y > 2$ .

**1.83** a)  $X \geq 4$ ; b)  $X > 3$ ; c)  $N < 5$ ; d)  $Y \leq 1$ ; e)  $-8 \leq X \leq 7$ ; f)  $-1.8 \leq N < 3$ ; g)  $2 \leq a < 22$ .

**1.84** a)  $1$ ; b)  $2$ ; c)  $3$ ; d)  $-1$ ; e)  $-2$ .

**1.85** a)  $1.0000$ ; b)  $2.3026$ ; c)  $4.6052$ ; d)  $6.9076$ ; e)  $-2.3026$ .

**1.86** a)  $1$ ; b)  $2$ ; c)  $3$ ; d)  $4$ ; e)  $5$ .

**1.87** Debajo de cada respuesta se muestra el comando de EXCEL.

|           |            |             |           |           |
|-----------|------------|-------------|-----------|-----------|
| 1.160964  | 1.974636   | 2.9974102   | 1.068622  | 1.056642  |
| =LOG(5,4) | =LOG(24,5) | =LOG(215,6) | =LOG(8,7) | =LOG(9,8) |

**1.88** > evalf(log[4](5)); 1.160964047  
 > evalf(log[5](24)); 1.974635869  
 > evalf(log[6](215)); 2.997410155  
 > evalf(log[7](8)); 1.068621561  
 > evalf(log[8](9)); 1.056641667

**1.89**  $\ln\left(\frac{a^3b^4}{c^5}\right) = 3\ln(a) + 4\ln(b) - 5\ln(c)$

**1.90**  $\log\left(\frac{xyz}{w^3}\right) = \log(x) + \log(y) + \log(z) - 3\log(w)$

**1.91**  $5\ln(a) - 4\ln(b) + \ln(c) + \ln(d) = \ln\left(\frac{a^5cd}{b^4}\right).$

**1.92**  $\log(u) + \log(v) + \log(w) - 2\log(x) - 3\log(y) - 4\log(z) = \log\left(\frac{uvw}{x^2y^3z^4}\right).$

**1.93**  $104/3.$

**1.94**  $2, -5/3.$

**1.95**  $-\frac{5}{2} - \frac{\sqrt{7}}{2}i$  y  $-\frac{5}{2} + \frac{\sqrt{7}}{2}i.$

**1.96**  $165.13.$

**1.97**  $471.71.$

**1.98**  $402.14.$

**1.99**  $2.363.$

**1.100**  $0.617.$

## CAPÍTULO 2

**2.19** b) 62.

**2.20** a) 799; b) 1 000; c) 949.5; d) 1 099.5 y 1 199.5; e) 100 (horas); f) 76;  
g)  $\frac{62}{400} = 0.155$  o 15.5%; h) 29.5%; i) 19.0%; j) 78.0%.

**2.25** a) 24%; b) 11%; c) 46%.

**2.26** a) 0.003 in; b) 0.3195, 0.3225, 0.3255, ..., 0.3375 in.  
c) 0.320-0.322, 0.323-0.325, 0.326-0.328, ..., 0.335-0.337 in.

**2.31** a) Cada una es de 5 años; b) cuatro (aunque estrictamente hablando el tamaño de la última clase no está especificado);  
c) uno; d) (85-94); e) 7 años y 17 años; f) 14.5 años y 19.5 años; g) 49.3% y 87.3%; h) 45.1%;  
i) no se puede determinar.

**2.33** 19.3, 19.3, 19.1, 18.6, 17.5, 19.1, 21.5, 22.5, 20.7, 18.3, 14.0, 11.4, 10.1, 18.6, 11.4 y 3.7. (Esto no suma 265 millones debido a los errores de redondeo en los porcentajes.)

**2.34** b) 0.295, c) 0.19; d) 0.

## CAPÍTULO 3

- 3.47** a)  $X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + 8$   
b)  $f_1X_1^2 + f_2X_2^2 + f_3X_3^2 + f_4X_4^2 + f_5X_5^2$   
c)  $U_1(U_1 + 6) + U_2(U_2 + 6) + U_3(U_3 + 6)$   
d)  $Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_N^2 - 4N$   
e)  $4X_1Y_1 + 4Y_2Y_2 + 4X_3Y_3 + 4X_4Y_4.$

**3.48** a)  $\sum_{j=1}^3 (X_j + 3)^3;$       b)  $\sum_{j=1}^{15} f_j(Y_j - a)^2;$       c)  $\sum_{j=1}^N (2X_j - 3Y_j);$

$$d) \sum_{j=1}^8 \left( \frac{X_j}{Y_j} - 1 \right)^2; \quad e) \frac{\sum_{j=1}^{12} f_j a_j^2}{\sum_{j=1}^{12} f_j}.$$

**3.51** a) 20; b) -37; c) 53; d) 6; e) 226; f) -62; g)  $\frac{25}{12}$ .

**3.52** a) -1; b) 23.

**3.53** 86.

**3.54** 0.50 s.

**3.55** 8.25.

**3.56** a) 82; b) 79.

**3.57** 78.

**3.58** 66.7% varones y 33.3% mujeres.

**3.59** 11.09 tons.

**3.60** 501.0

**3.61** 0.72642 cm.

**3.62** 26.2.

**3.63** 715 min.

**3.64** b) 1.7349 cm.

**3.65** a) media = 5.4, mediana = 5; b) media = 19.91, mediana = 19.85.

**3.66** 85.

**3.67** 0.51 s.

**3.68** 8.

**3.69** 11.07 tons.

**3.70** 490.6.

**3.71** 0.72638 cm.

**3.72** 25.4.

**3.73** Aproximadamente 78.3 años.

**3.74** 35.7 años.

**3.75** 708.3 min.

- 3.76** a) Media = 8.9, mediana = 9, moda = 7.  
 b) Media = 6.4, mediana = 6. Como cada uno de los números 4, 5, 6, 8 y 10 se presentan dos veces, se puede considerar que éstos son cinco modas; sin embargo, en este caso es más razonable concluir que no hay moda.
- 3.77** No existe una puntuación modal.
- 3.78** 0.53 s.
- 3.79** 10.
- 3.80** 11.06 tons.
- 3.81** 462.
- 3.82** 0.72632 cm.
- 3.83** 23.5.
- 3.84** 668.7 min.
- 3.85** a) 35-39; b) 75 a 84.
- 3.86** a) Empleando la fórmula (9), moda = 11.1  
 b) Empleando la fórmula (9), moda = 0.7264  
 c) Empleando la fórmula (9), moda = 23.5  
 d) Empleando la fórmula (9), moda = 668.7
- Empleando la fórmula (10), moda = 11.3  
 Empleando la fórmula (10), moda = 0.7263  
 Empleando la fórmula (10), moda = 23.8  
 Empleando la fórmula (10), moda = 694.9.
- 3.88** a) 8.4; b) 4.23.
- 3.89** a)  $G = 8$ ; b)  $\bar{X} = 12.4$ .
- 3.90** a) 4.14; b) 45.8.
- 3.91** a) 11.07 tons; b) 499.5.
- 3.92** 18.9%.
- 3.93** a) 1.01%; b) 238.2 millones; c) 276.9 millones.
- 3.94** \$1 586.87.
- 3.95** \$1 608.44.
- 3.96** 3.6 y 14.4.
- 3.97** a) 3.0; b) 4.48.
- 3.98** a) 3; b) 0; c) 0.
- 3.100** a) 11.04; b) 498.2.
- 3.101** 38.3 mi/h.
- 3.102** b) 420 mi/h.

## 510 RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

- 3.104** a) 25; b) 3.55.
- 3.107** a) Cuartil inferior =  $Q_1 = 67$ , cuartil intermedio =  $Q_2 =$  mediana = 75 y cuartil superior =  $Q_3 = 83$ .  
b) 25% obtuvo 67 o menos (o 75% obtuvo 67 o más), 50% obtuvo 75 o menos (o 50% obtuvo 75 o más) y 75% obtuvo 83 o menos (o 25% obtuvo 83 o más).
- 3.108** a)  $Q_1 = 10.55$  tons,  $Q_2 = 11.07$  tons y  $Q_3 = 11.57$  tons; b)  $Q_1 = 469.3$ ,  $Q_2 = 490.6$  y  $Q_3 = 523.3$ .
- 3.109** Media aritmética, mediana, moda,  $Q_2$ ,  $P_{50}$  y  $D_5$ .
- 3.110** a) 10.15 tons; b) 11.78 tons; c) 10.55 tons; d) 11.57 tons.
- 3.112** a) 83; b) 64.

## CAPÍTULO 4

- 4.33** a) 9; b) 4.273.
- 4.34** 4.0 tons.
- 4.35** 0.0036 cm.
- 4.36** 7.88 kg.
- 4.37** 20 semanas.
- 4.38** a) 18.2; b) 3.58; c) 6.21; d) 0; e)  $\sqrt{2} = 1.414$  aproximadamente; f) 1.88.
- 4.39** a) 2; b) 0.85.
- 4.40** a) 2.2; b) 1.317.
- 4.41** 0.576 ton.
- 4.42** a) 0.00437 cm; b) 60.0%, 85.2% y 96.4%.
- 4.43** a) 3.0; b) 2.8.
- 4.44** a) 31.2; b) 30.6.
- 4.45** a) 6.0; b) 6.0.
- 4.46** 4.21 semanas.
- 4.48** a) 0.51 ton; b) 27.0; c) 12.
- 4.49** 3.5 semanas.
- 4.52** a) 1.63 tons; b) 33.6 o 34.
- 4.53** El rango percentil 10-90 es igual a \$189 500 y el 80% de los precios de venta se encuentran en el intervalo \$130 250 ± \$94 750.
- 4.56** a) 2.16; b) 0.90; c) 0.484.

- 4.58** 45.
- 4.59** a) 0.733 ton; b) 38.60; c) 12.1.
- 4.61** a)  $\bar{X} = 2.47$ ; b)  $s = 1.11$ .
- 4.62**  $s = 5.2$  y rango/4 = 5.
- 4.63** a) 0.00576 cm; b) 72.1%, 93.3% y 99.76%.
- 4.64** a) 0.719 ton; b) 38.24; c) 11.8.
- 4.65** a) 0.000569 cm; b) 71.6%, 93.0% y 99.68%.
- 4.66** a) 146.8 lb y 12.9 lb.
- 4.67** a) 1.7349 cm y 0.00495 cm.
- 4.74** a) 15; b) 12.
- 4.75** a) Estadística; b) álgebra.
- 4.76** a) 6.6%; b) 19.0%.
- 4.77** 0.15.
- 4.78** 0.20.
- 4.79** Álgebra.
- 4.80** 0.19, -1.75, 1.17, 0.68, -0.29.

## CAPÍTULO 5

- 5.15** a) 6; b) 40; c) 288; d) 2 188.
- 5.16** a) 0; b) 4; c) 0; d) 25.86.
- 5.17** a) -1; b) 5; c) -91; d) 53.
- 5.19** 0, 26.25, 0, 1 193.1.
- 5.21** 7.
- 5.22** a) 0, 6, 19, 42; b) -4, 22, -117, 560; c) 1, 7, 38, 155.
- 5.23** 0, 0.2344, -0.0586, 0.0696.
- 5.25** a)  $m_1 = 0$ , b)  $m_2 = pq$ ; c)  $m_3 = pq(q - p)$ ; d)  $m_4 = pq(p^2 - pq + q^2)$ .
- 5.27**  $m_1 = 0$ ,  $m_2 = 5.97$ ,  $m_3 = -0.397$ ,  $m_4 = 89.22$ .
- 5.29**  $m_1$  (corregido) = 0,  $m_2$  (corregido) = 5.440,  $m_3$  (corregido) = -0.5920,  $m_4$  (corregido) = 76.2332.

## 512 RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS

- 5.30** a)  $m_1 = 0, m_2 = 0.53743, m_3 = 0.36206, m_4 = 0.84914$ ;  
 b)  $m_2$  (corregido) = 0.51660,  $m_4$  (corregido) = 0.78378.
- 5.31** a) 0; b) 52.95; c) 92.35; d) 7 158.20; e) 26.2; f) 7.28; g) 739.58; h) 22 247; i) 706 428; j) 24 545.

**5.32** a) -0.2464; b) -0.2464.

**5.33** 0.9190.

**5.34** La primera distribución.

**5.35** a) 0.040; b) 0.074.

**5.36** a) -0.02; b) -0.13.

|   | Distribución |   |        |
|---|--------------|---|--------|
| Coeficiente de asimetría (o sesgo) de Pearson | 1            | 2 | 3      |
| Primer coeficiente                            | 0.770        | 1 | -0.770 |
| Segundo coeficiente                           | 1.094        | 0 | -1.094 |

**5.38** a) 2.62; b) 2.58.

**5.39** a) 2.94; b) 2.94.

**5.40** a) La segunda; b) la primera.

**5.41** a) La segunda; b) ninguna; c) la primera.

**5.42** a) Mayor que 1 875; b) igual a 1 875; c) menor que 1 875.

**5.43** a) 0.313.

## CAPÍTULO 6

- 6.40** a)  $\frac{5}{26}$ ; b)  $\frac{5}{36}$ ; c) 0.98; d)  $\frac{2}{9}$ ; e)  $\frac{7}{8}$ .
- 6.41** a) Probabilidad de obtener un rey en la primera extracción, pero no en la segunda extracción.  
 b) Probabilidad de obtener un rey, ya sea en la primera extracción, en la segunda extracción o en ambas.  
 c) No obtener rey en la primera extracción o no obtener rey en la segunda o en ninguna (es decir, no obtener rey ni en la primera extracción ni en la segunda extracción).  
 d) Probabilidad de obtener un rey en la tercera extracción dado que se obtuvo rey en la primera extracción pero no en la segunda extracción.  
 e) No obtener rey en la primera ni en la segunda ni en la tercera extracción.  
 f) Probabilidad de obtener rey en la primera y en la segunda extracción o no obtener rey en la segunda extracción pero sí en la tercera extracción.
- 6.42** a)  $\frac{1}{3}$ ; b)  $\frac{3}{5}$ ; c)  $\frac{11}{15}$ ; d)  $\frac{2}{5}$ ; e)  $\frac{4}{5}$ .
- 6.43** a)  $\frac{4}{25}$ ; b)  $\frac{4}{75}$ ; c)  $\frac{16}{25}$ ; d)  $\frac{64}{225}$ ; e)  $\frac{11}{15}$ ; f)  $\frac{1}{5}$ ; g)  $\frac{104}{225}$ ; h)  $\frac{221}{225}$ ; i)  $\frac{6}{25}$ ; j)  $\frac{52}{225}$ .
- 6.44** a)  $\frac{29}{185}$ ; b)  $\frac{2}{37}$ ; c)  $\frac{118}{185}$ ; d)  $\frac{52}{185}$ ; e)  $\frac{11}{15}$ ; f)  $\frac{1}{5}$ ; g)  $\frac{86}{185}$ ; h)  $\frac{182}{185}$ ; i)  $\frac{9}{37}$ ; j)  $\frac{26}{111}$ .

**6.45** a)  $\frac{5}{18}$ ; b)  $\frac{11}{36}$ ; c)  $\frac{1}{36}$ .

**6.46** a)  $\frac{47}{52}$ ; b)  $\frac{16}{221}$ ; c)  $\frac{15}{34}$ ; d)  $\frac{13}{17}$ ; e)  $\frac{210}{221}$ ; f)  $\frac{10}{13}$ ; g)  $\frac{40}{51}$ ; h)  $\frac{77}{442}$ .

**6.47**  $\frac{5}{18}$ .

**6.48** a) 81:44; b) 21:4.

**6.49**  $\frac{19}{42}$ .

**6.50** a)  $\frac{2}{5}$ ; b)  $\frac{1}{5}$ ; c)  $\frac{4}{15}$ ; d)  $\frac{13}{15}$ .

**6.51** a) 37.5%; b) 93.75%; c) 6.25%; d) 68.75%.

**6.52** a)

| $X$    | 0              | 1              | 2              | 3              | 4              |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $p(X)$ | $\frac{1}{16}$ | $\frac{4}{16}$ | $\frac{6}{16}$ | $\frac{4}{16}$ | $\frac{1}{16}$ |

**6.53** a)  $\frac{1}{48}$ ; b)  $\frac{7}{24}$ ; c)  $\frac{3}{4}$ ; d)  $\frac{1}{6}$ .

**6.54** a)

| $X$    | 0             | 1             | 2              | 3              |
|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| $p(X)$ | $\frac{1}{6}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{3}{10}$ | $\frac{1}{30}$ |

**6.55** a)

| $X$      | 3 | 4 | 5 | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|----------|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $p(X)^*$ | 1 | 3 | 6 | 10 | 15 | 21 | 25 | 27 | 27 | 25 | 21 | 15 | 10 | 6  | 3  | 1  |

\*Todos los valores de  $p(x)$  tienen un divisor de 216.

b) 0.532407.

**6.56** \$9.

**6.57** \$4.80 por día.

**6.58** A contribuye con \$12.50; B contribuye con \$7.50.

**6.59** a) 7; b) 590; c) 541; d) 10 900.

**6.60** a) 1.2; b) 0.56; c)  $\sqrt{0.56} = 0.75$  aproximadamente.

**6.63** 10.5.

**6.64** a) 12; b) 2 520; c) 720;  
d)  $=\text{PERMUT}(4, 2)$ ,  $=\text{PERMUT}(7, 5)$ ,  $=\text{PERMUT}(10, 3)$ .

**6.65**  $n = 5$ .

**6.66** 60.

**6.67** a) 5 040; b) 720; c) 240.

**6.68** a) 8 400; b) 2 520.

**6.69** a) 32 805; b) 11 664.

**514** RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS**6.70** 26.**6.71** a) 120; b) 72; c) 12.**6.72** a) 35; b) 70; c) 45.  
d)  $=\text{COMBIN}(7, 3)$ ,  $=\text{COMBIN}(8, 4)$ ,  $=\text{COMBIN}(10, 8)$ .**6.73**  $n = 6$ .**6.74** 210.**6.75** 840.**6.76** a) 42 000; b) 7 000.**6.77** a) 120; b) 12 600.**6.78** a) 150; b) 45; c) 100.**6.79** a) 17; b) 163.**6.81**  $2.95 \times 10^{25}$ .**6.83** a)  $\frac{6}{5525}$ ; b)  $\frac{22}{425}$ ; c)  $\frac{169}{425}$ ; d)  $\frac{73}{5525}$ .**6.84**  $\frac{171}{1296}$ .**6.85** a) 0.59049; b) 0.32805; c) 0.08866.**6.86** b)  $\frac{3}{4}$ ; c)  $\frac{7}{8}$ .**6.87** a) 8; b) 78; c) 86; d) 102; e) 20; f) 142.**6.90**  $\frac{1}{3}$ .**6.91** 1/3 838 380 (es decir, las posibilidades en contra de ganar son 3 838 379 contra 1).**6.92** a) 658 007 a 1; b) 91 389 a 1; c) 9 879 a 1.**6.93** a) 649 739 a 1; b) 71 192 a 1; c) 4 164 a 1; d) 693 a 1.**6.94**  $\frac{11}{36}$ .**6.95**  $\frac{1}{4}$ .

|          |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|----------|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| X        | 3 | 4 | 5 | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| $p(X)^*$ | 1 | 3 | 6 | 10 | 12 | 12 | 10 | 5  | 3  | 1  |

\*Todos los valores de  $p(x)$  tienen un divisor de 64.

**6.97** 7.5**6.98** 70%.

**6.99**  $(0.5)(0.01) + (0.3)(0.02) + (0.2)(0.03) = 0.017.$

**6.100**  $\frac{0.2(0.03)}{0.017} = 0.35.$

## CAPÍTULO 7

**7.35** a) 5 040; b) 210; c) 126; d) 165; e) 6.

**7.36** a)  $q^7 + 7q^6p + 21q^5p^2 + 35q^4p^3 + 35q^3p^4 + 21q^2p^5 + 7qp^6 + p^7$   
 b)  $q^{10} + 10q^9p + 45q^8p^2 + 120q^7p^3 + 210q^6p^4 + 252q^5p^5 + 210q^4p^6 + 120q^3p^7 + 45p^2p^8 + 10qp^9 + p^{10}$

**7.37** a)  $\frac{1}{64}$ ; b)  $\frac{3}{32}$ ; c)  $\frac{15}{64}$ ; d)  $\frac{5}{16}$ ; e)  $\frac{15}{64}$ ; f)  $\frac{3}{32}$ ; g)  $\frac{1}{64}$ ;

**h) Función de densidad de probabilidad**

Binomial with n=6 and p=0.5

| X | P(X=x)   |
|---|----------|
| 0 | 0.015625 |
| 1 | 0.093750 |
| 2 | 0.234375 |
| 3 | 0.312500 |
| 4 | 0.234375 |
| 5 | 0.093750 |
| 6 | 0.015625 |

**7.38** a)  $\frac{57}{64}$ ; b)  $\frac{21}{32}$ ;

c)  $1 - \text{BINOMDIST}(1, 6, 0.5, 1)$  o bien  $0.890625$ ,  $=\text{BINOMDIST}(3, 6, 0.5, 1) = 0.65625$ .

**7.39** a)  $\frac{1}{4}$ ; b)  $\frac{5}{16}$ ; c)  $\frac{11}{16}$ ; d)  $\frac{5}{8}$ .

**7.40** a) 250; b) 25; c) 500.

**7.41** a)  $\frac{17}{162}$ ; b)  $\frac{1}{324}$ .

**7.42**  $\frac{64}{243}$ .

**7.43**  $\frac{193}{512}$ .

**7.44** a)  $\frac{32}{243}$ ; b)  $\frac{192}{243}$ ; c)  $\frac{40}{243}$ ; d)  $\frac{242}{243}$ ;  
 e)

|   |          |                                   |
|---|----------|-----------------------------------|
| a | 0.131691 | =BINOMDIST(5, 5, 0.66667, 0)      |
| b | 0.790128 | =1 - BINOMDIST(2, 5, 0.66667, 1)  |
| c | 0.164606 | =BINOMDIST(2, 5, 0.66667, 0)      |
| d | 0.995885 | =1 - BINOMDIST(0, 5, 0.66667, 0). |

**7.45** a) 42; b) 3.550; c)  $-0.1127$ ; d) 2.927.

**7.47** a)  $Npq(q-p)$ ; b)  $Npq(1-6pq) + 3N^2p^2q^2$ .

**7.49** a) 1.5 y  $-1.6$ ; b) 72 y 90.

**7.50** a) 75.4; b) 9.

**516 RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS****7.51** a) 0.8767; b) 0.0786; c) 0.2991;

d)

|   |           |                                    |
|---|-----------|------------------------------------|
| a | 0.8767328 | =NORMSDIST(2.4)-NORMSDIST(-1.2)    |
| b | 0.0786066 | =NORMSDIST(1.87)-NORMSDIST(1.23)   |
| c | 0.2991508 | =NORMSDIST(-0.5)-NORMSDIST(-2.35). |

**7.52** a) 0.0375; b) 0.7123; c) 0.9265; d) 0.0154; e) 0.7251; f) 0.0395;

g)

|   |           |  |
|---|-----------|--|
| a | 0.037538  | =NORMSDIST(-1.78)                      |
| b | 0.7122603 | =NORMSDIST(0.56)                       |
| c | 0.9264707 | =1-NORMSDIST(-1.45)                    |
| d | 0.0153863 | =1-NORMSDIST(2.16)                     |
| e | 0.7251362 | =NORMSDIST(1.53)-NORMSDIST(-0.8)       |
| f | 0.0394927 | =NORMSDIST(-2.52)+(1-NORMSDIST(1.83)). |

**7.53** a) 0.9495; b) 0.9500; c) 0.6826.**7.54** a) 0.75; b) -1.86; c) 2.08; d) 1.625 o bien 0.849; e)  $\pm 1.645$ .**7.55** -0.995.**7.56** a) 0.0317; b) 0.3790; c) 0.1989;

d)

|   |         |                         |
|---|---------|-------------------------|
| a | 0.03174 | =NORMDIST(2.25,0,1,0)   |
| b | 0.37903 | =NORMDIST(-0.32,0,1,0)  |
| c | 0.19886 | =NORMDIST(-1.18,0,1,0). |

**7.57** a) 4.78%; b) 25.25%; c) 58.89%.**7.58** a) 2.28%; b) 68.27%; c) 0.14%.**7.59** 84.**7.60** a) 61.7%; b) 54.7%.**7.61** a) 95.4%; b) 23.0%; c) 93.3%.**7.62** a) 1.15; b) 0.77.**7.63** a) 0.9962; b) 0.0687; c) 0.0286; d) 0.0558.**7.64** a) 0.2511; b) 0.1342.**7.65** a) 0.0567; b) 0.9198; c) 0.6404; d) 0.0079.**7.66** 0.0089.**7.67** a) 0.04979; b) 0.1494; c) 0.2241; d) 0.2241; e) 0.1680; f) 0.1008.**7.68** a) 0.0838; b) 0.5976; c) 0.4232.**7.69** a) 0.05610; b) 0.06131.**7.70** a) 0.00248; b) 0.04462; c) 0.1607; d) 0.1033; e) 0.6964; f) 0.0620.

**7.71** a) 0.08208; b) 0.2052; c) 0.2565; d) 0.2138; e) 0.8911; f) 0.0142.

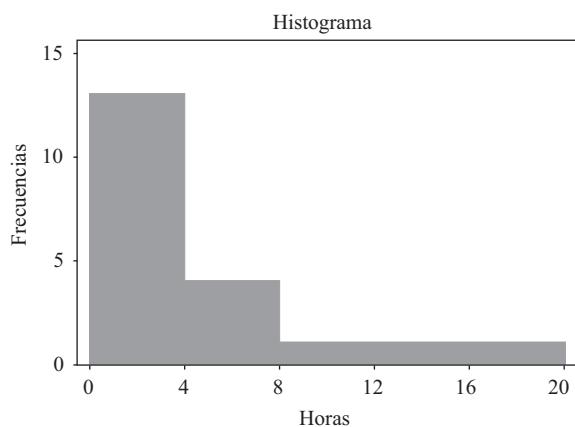
**7.72** a)  $\frac{5}{3888}$ ; b)  $\frac{5}{324}$ .

**7.73** a) 0.0348; b) 0.000295.

**7.74**  $\frac{1}{16}$ .

**7.75**  $p(X) = \binom{4}{X}(0.32)^X(0.68)^{4-X}$ . Las frecuencias esperadas son 32, 60, 43, 13 y 2, respectivamente.

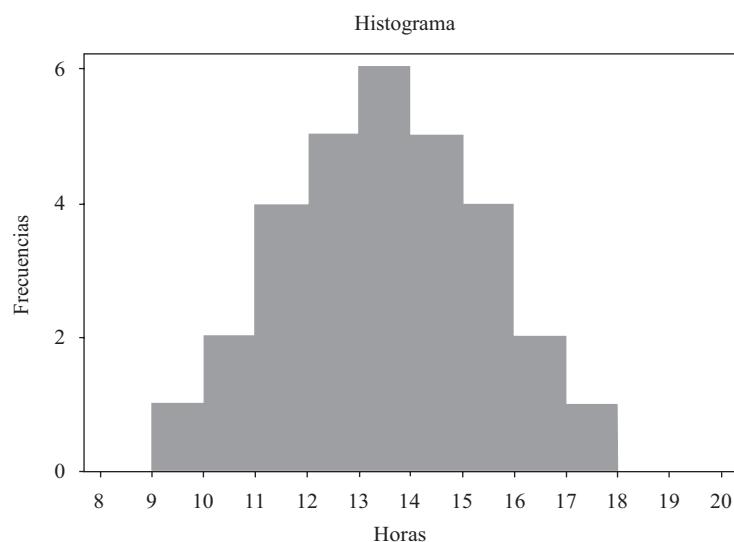
**7.76**



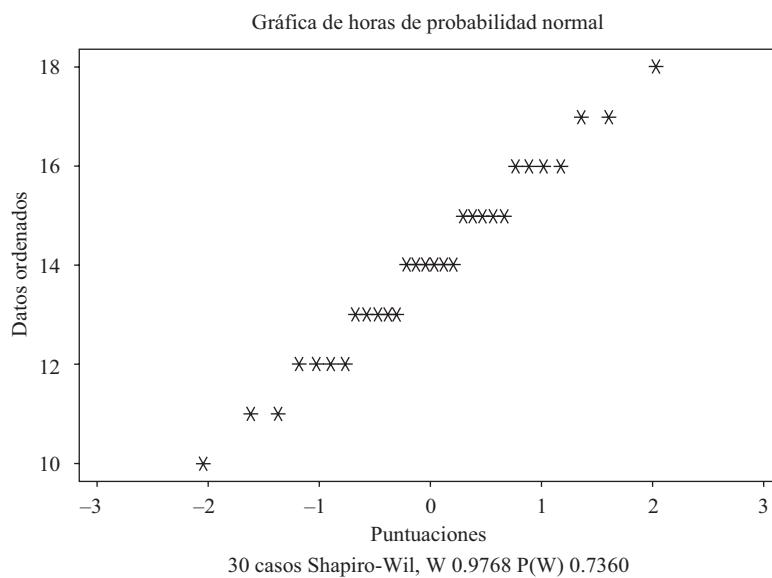
El histograma muestra un sesgo en los datos, lo que indica que no hay normalidad.

La prueba de Shapiro-Wilt de STATISTIX indica que no hay normalidad.

**7.77** El histograma de STATISTIX indica claramente normalidad.

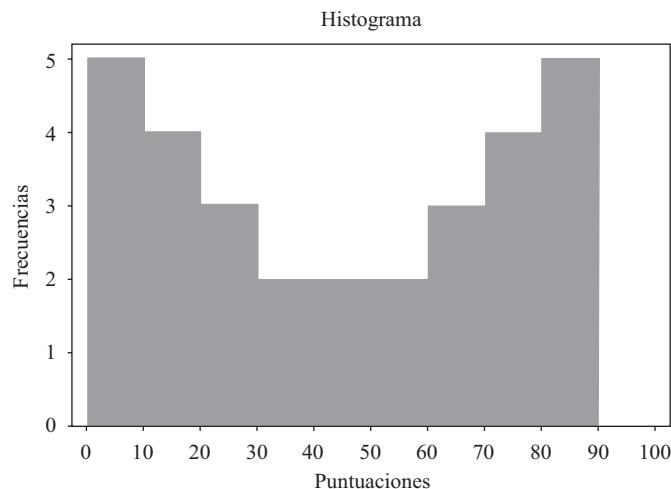


Con la secuencia “**Statistics** ⇒ **Randomness/Normality Tests** ⇒ **Normality Probability Plot**” se obtiene la gráfica siguiente. Si los datos provienen de una población distribuida normalmente, los puntos de la gráfica tienden a caer en una línea recta y  $P(W)$  tiende a ser mayor que 0.05. Si  $P(W) < 0.05$ , por lo general se rechaza que haya normalidad.

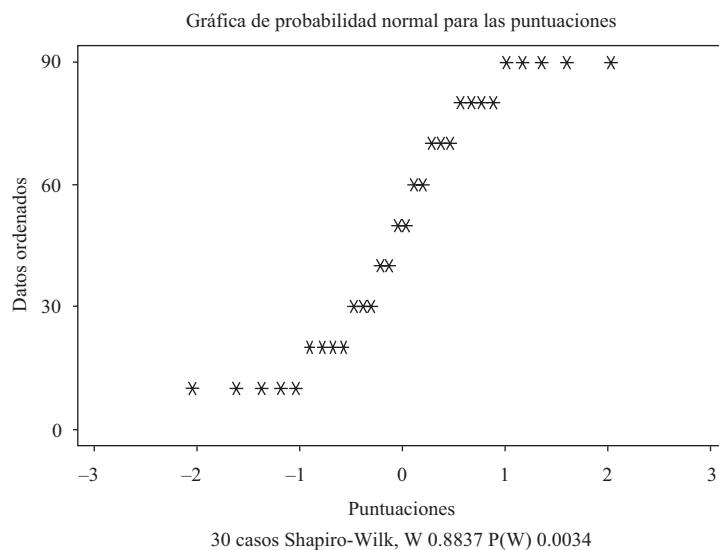


Arriba se muestra la gráfica para probabilidad normal. Se muestra el estadístico de Shapiro-Wilk junto con el valor  $p$ .  $P(W) = 0.7360$ . Como el valor  $p$  es considerablemente mayor que 0.05, no se rechaza la normalidad de los datos.

- 7.78** El siguiente histograma de las puntuaciones de examen de la tabla 7.11, obtenido con STATISTIX, tiene forma de U. Por lo tanto, se le conoce como distribución en forma de U.

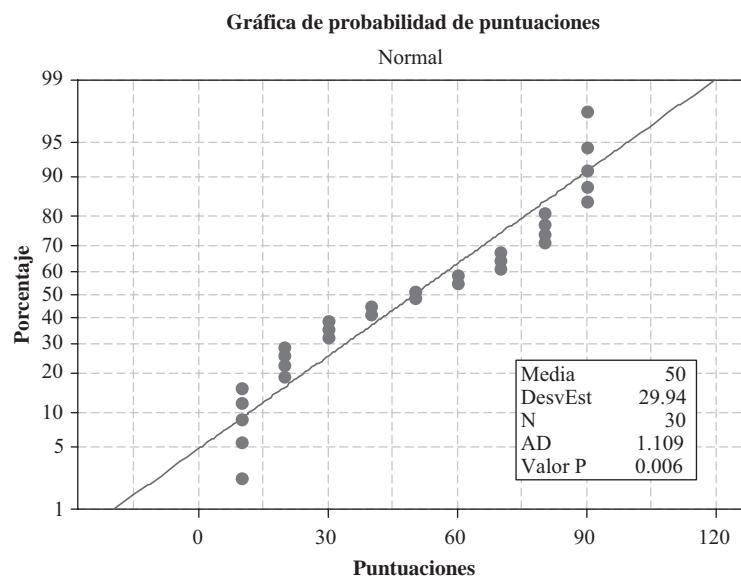


Esta gráfica se obtiene con la secuencia “Statistics  $\Rightarrow$  Randomness/Normality Tests  $\Rightarrow$  Normality Probability Plot”. Si los datos provienen de una población distribuida normalmente, los puntos de la gráfica tienden a caer en una línea recta y  $P(W)$  tiende a ser mayor que 0.05. Si  $P(W) < 0.05$ , por lo general se rechaza que haya normalidad.

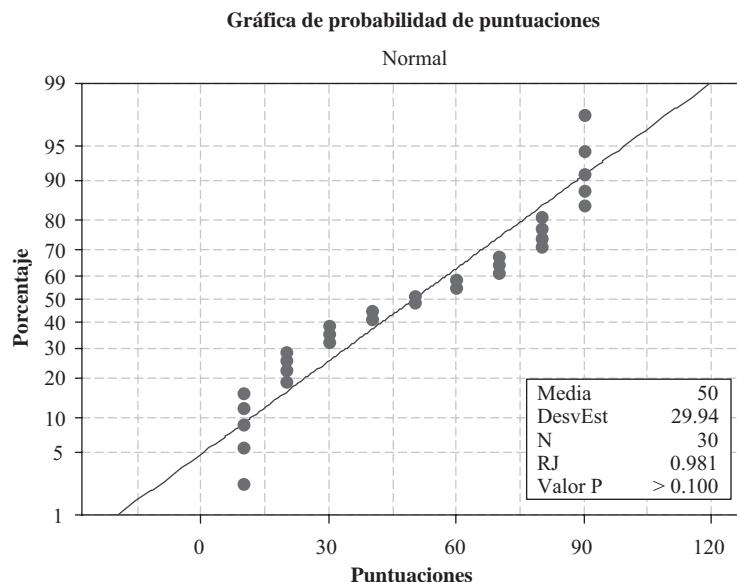


Arriba se muestra la gráfica para probabilidad normal. Se muestra el estadístico de Shapiro-Wilk junto con el valor  $p$   $P(W) = 0.0034$ . Como el valor  $p$  es menor que 0.05, se rechaza la normalidad de los datos.

- 7.79** Además de la prueba de Kolgomorov-Smirnov de MINITAB y de la prueba de Shapiro-Wilk de STATISTIX, hay otras dos pruebas para la normalidad, que se verán aquí. Éstas son la prueba de Ryan-Joiner y la prueba de Anderson-Darling. Básicamente las cuatro pruebas calculan un estadístico de prueba y cada estadístico tiene un correspondiente valor  $p$ . Por lo general se sigue la regla siguiente. Si el valor  $p$  es  $< 0.05$ , se rechaza la normalidad. La gráfica siguiente se obtiene al hacer la prueba de Anderson-Darling. En este caso, el valor  $p$  es 0.006 y se rechazaría la hipótesis de que los datos provienen de una distribución normal.



Obsérvese que si se emplea la prueba de Ryan-Joiner no se rechaza la normalidad.



- 7.80  $p(X) = \frac{(0.61)^X e^{-0.61}}{X!}$ . Las frecuencias esperadas son 108.7, 66.3, 20.2, 4.1 y 0.7, respectivamente.

## CAPÍTULO 8

- 8.21 a) 9.0; b) 4.47; c) 9.0; d) 3.16.
- 8.22 a) 9.0; b) 4.47; c) 9.0; d) 2.58.
- 8.23 a)  $\mu_{\bar{X}} = 22.40$  g,  $\sigma_{\bar{X}} = 0.008$  g; b)  $\mu_{\bar{X}} = 22.40$  g,  $\sigma_{\bar{X}}$  = un poco menos de 0.008 g.
- 8.24 a)  $\mu_{\bar{X}} = 22.40$  g,  $\sigma_{\bar{X}} = 0.008$  g; b)  $\mu_{\bar{X}} = 22.40$  g,  $\sigma_{\bar{X}} = 0.0057$  g.
- 8.25 a) 237; b) 2; c) ninguna; d) 34.
- 8.26 a) 0.4972; b) 0.1587; c) 0.0918; d) 0.9544.
- 8.27 a) 0.8164; b) 0.0228; c) 0.0038; d) 1.0000.
- 8.28 0.0026.
- 8.34 a) 0.0029; b) 0.9596; c) 0.1446.
- 8.35 a) 2; b) 996; c) 218.
- 8.36 a) 0.0179; b) 0.8664; c) 0.1841.
- 8.37 a) 6; b) 9; c) 2; d) 12.
- 8.39 a) 19; b) 125.
- 8.40 a) 0.0077; b) 0.8869.

**8.41** a) 0.0028; b) 0.9172.

**8.42** a) 0.2150; b) 0.0064; c) 0.4504.

**8.43** 0.0482.

**8.44** 0.0188.

**8.45** 0.0410.

**8.47** a) 118.79 g; b) 0.74 g.

**8.48** 0.0228.

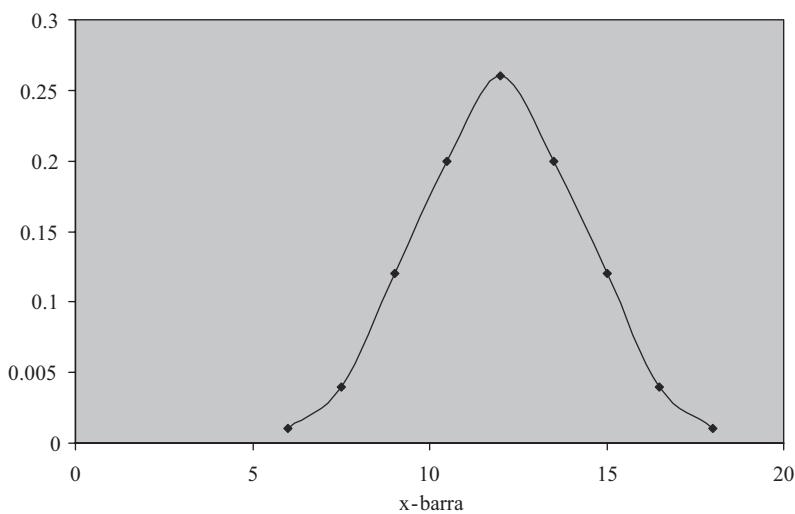
**8.49**  $\mu = 12$  y  $\sigma^2 = 10.8$ .

| A       | B       | C     | D            |
|---------|---------|-------|--------------|
| primera | segunda | media | probabilidad |
| 6       | 6       | 6     | 0.01         |
| 6       | 9       | 7.5   | 0.02         |
| 6       | 12      | 9     | 0.04         |
| 6       | 15      | 10.5  | 0.02         |
| 6       | 18      | 12    | 0.01         |
| 9       | 6       | 7.5   | 0.02         |
| 9       | 9       | 9     | 0.04         |
| 9       | 12      | 10.5  | 0.08         |
| 9       | 15      | 12    | 0.04         |
| 9       | 18      | 13.5  | 0.02         |
| 12      | 6       | 9     | 0.04         |
| 12      | 9       | 10.5  | 0.08         |
| 12      | 12      | 12    | 0.16         |
| 12      | 15      | 13.5  | 0.08         |
| 12      | 18      | 15    | 0.04         |
| 15      | 6       | 10.5  | 0.02         |
| 15      | 9       | 12    | 0.04         |
| 15      | 12      | 13.5  | 0.08         |
| 15      | 15      | 15    | 0.04         |
| 15      | 18      | 16.5  | 0.02         |
| 18      | 6       | 12    | 0.01         |
| 18      | 9       | 13.5  | 0.02         |
| 18      | 12      | 15    | 0.04         |
| 18      | 15      | 16.5  | 0.02         |
| 18      | 18      | 18    | 0.01         |
|         |         |       | 1            |

**8.50 Distribución de probabilidad de  $X\bar{x}$  para  $n = 2$ .**

| D            | E      | F         | G    | H     |
|--------------|--------|-----------|------|-------|
| probabilidad | xbarra | p(xbarra) |      |       |
| 0.01         |        | 6         | 0.01 | D2    |
| 0.02         |        | 7.5       | 0.04 | D3+D7 |

|      |      |      |                    |
|------|------|------|--------------------|
| 0.04 | 9    | 0.12 | D4+D8+D12          |
| 0.02 | 10.5 | 0.2  | D5+D9+D13+D17      |
| 0.01 | 12   | 0.26 | D6+D10+D14+D18+D22 |
| 0.02 | 13.5 | 0.2  | D11+D15+D19+D23    |
| 0.04 | 15   | 0.12 | D16+D20+D24        |
| 0.08 | 16.5 | 0.04 | D21+D25            |
| 0.04 | 18   | 0.01 | D26                |
| 0.02 |      | 1    | SUM(G2:G10)        |
| 0.04 |      |      |                    |
| 0.08 |      |      |                    |
| 0.16 |      |      |                    |
| 0.08 |      |      |                    |
| 0.04 |      |      |                    |
| 0.02 |      |      |                    |
| 0.04 |      |      |                    |
| 0.08 |      |      |                    |
| 0.04 |      |      |                    |
| 0.02 |      |      |                    |
| 0.01 |      |      |                    |
| 0.02 |      |      |                    |
| 0.04 |      |      |                    |
| 0.02 |      |      |                    |
| 0.01 |      |      |                    |

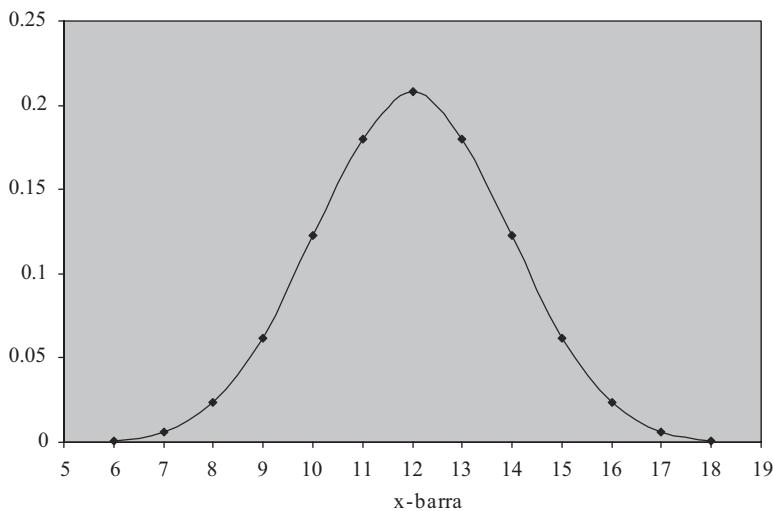


8.51  $\text{Media}(x\text{-barra}) = 12$   $\text{Var}(x\text{-barra}) = 5.4$ .

8.52

| xbarra | P(xbarra) |
|--------|-----------|
| 6      | 0.001     |
| 7      | 0.006     |
| 8      | 0.024     |
| 9      | 0.062     |

|    |       |
|----|-------|
| 10 | 0.123 |
| 11 | 0.18  |
| 12 | 0.208 |
| 13 | 0.18  |
| 14 | 0.123 |
| 15 | 0.062 |
| 16 | 0.024 |
| 17 | 0.006 |
| 18 | 0.001 |



## CAPÍTULO 9

- 9.21** a) 9.5 kg; b)  $0.74 \text{ kg}^2$ ; c) 0.78 kg y 0.86 kg, respectivamente.
- 9.22** a) 1 200 h; b) 105.4 h.
- 9.23** a) Las estimaciones de las desviaciones estándar con muestras de tamaño 30, 50 y 100 cinescopios son 101.7 h, 101.0 h y 100.5 h, respectivamente; las estimaciones de las medias poblacionales son 1 200 h en todos los casos.
- 9.24** a)  $11.09 \pm 0.18$  tons; b)  $11.09 \pm 0.24$  tons.
- 9.25** a)  $0.72642 \pm 0.000095$  in; b)  $0.72642 \pm 0.000085$  in; c)  $0.72642 \pm 0.000072$  in; d)  $0.72642 \pm 0.000060$  in.
- 9.26** a)  $0.72642 \pm 0.000025$  in; b) 0.000025 in.
- 9.27** a) Por lo menos 97; b) por lo menos 68; c) por lo menos 167; d) por lo menos 225.
- 9.28** Intervalo de confianza de 80% para la media: (286.064, 332.856).
- 9.29** a)  $2\ 400 \pm 45$  lb,  $2\ 400 \pm 59$  lb; b) 87.6%.
- 9.30** a)  $0.70 \pm 0.12$ ,  $0.69 \pm 0.11$ ; b)  $0.70 \pm 0.15$ ,  $0.68 \pm 0.15$ ; c)  $0.70 \pm 0.18$ ,  $0.67 \pm 0.17$ .

**524 RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS**

- 9.31** Intervalo de confianza de 97.5% para la diferencia: (0.352477, 0.421523).
- 9.32** a) 16 400; b) 27 100; c) 38 420; d) 66 000.
- 9.33** a)  $1.07 \pm 0.09$  h; b)  $1.07 \pm 0.12$  h.
- 9.34** Intervalo de confianza de 85% para la diferencia: (-7.99550, -0.20948).
- 9.35** Intervalo de confianza de 95% para la diferencia: (-0.0918959, -0.00610414).
- 9.36** a)  $180 \pm 24.9$  lb; b)  $180 \pm 32.8$  lb; c)  $180 \pm 38.2$  lb.
- 9.37**

One Sample Chi-square Test for a Variance

Sample Statistics for volume

| N     | Mean   | Std. Dev. | Variance |
|-------|--------|-----------|----------|
| ----- |        |           |          |
| 20    | 180.65 | 1.4677    | 2.1542   |

99% Confidence Interval for the variance

| Lower Limit | Upper Limit |
|-------------|-------------|
| 1.06085     | 5.98045     |

**9.38**

Two Sample Test for variances of units within line

Sample Statistics

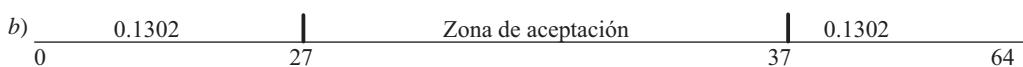
| line  | Group | N  | Mean     | Std. Dev. | Variance |
|-------|-------|----|----------|-----------|----------|
| ----- |       |    |          |           |          |
| 1     | 1     | 13 | 104.9231 | 12.189    | 148.5769 |
| 2     | 2     | 15 | 101.2667 | 5.5737    | 31.06667 |

95% Confidence Interval of the Ratio of Two Variances

| Lower Limit | Upper Limit |
|-------------|-------------|
| 1.568       | 15.334      |

**CAPÍTULO 10**

- 10.29** a) 0.2604.



$$\alpha = 0.1302 + 0.1302.$$

- 10.30** *a)* Rechazar la hipótesis nula si  $X \leq 21$  o  $X \geq 43$ , donde  $X$  = número de canicas rojas extraídas; *b)* 0.99186; *c)* rechazar si  $X \leq 23$  o  $X \geq 41$ .
- 10.31** *a)*  $H_0: p = 0.5$     $H_a: p > 0.5$ ; *b)* prueba de una cola; *c)* rechazar la hipótesis nula si  $X \geq 40$ ; *d)* rechazar la hipótesis nula si  $X \geq 41$ .
- 10.32** *a)* Para dos colas, valor  $p = 2 * (1 - \text{BINOMDIST}(22, 100, 0.16666, 1)) = 0.126 > 0.05$ . Al nivel de significancia 0.05, no se rechaza la hipótesis nula.  
*b)* Para una cola, valor  $p = 1 - \text{BINOMDIST}(22, 100, 0.16666, 1) = 0.063 > 0.05$ . Al nivel de significancia 0.05, no se rechaza la hipótesis nula.
- 10.33** Empleando ya sea una prueba de una cola o una prueba de dos colas, al nivel de significancia 0.01 no se puede rechazar la hipótesis.
- 10.34**  $H_0: p \geq 0.95$     $H_a: p < 0.95$   
 Valor  $p = P\{X \leq 182 \text{ de } 200 \text{ piezas cuando } p = 0.95\} = \text{BINOMDIST}(182, 200, 0.95, 1) = 0.012$ . No se rechaza a 0.01, pero se rechaza a 0.05
- 10.35** Estadístico de prueba = 2.63, valores críticos  $\pm 1.7805$ , se rechaza la hipótesis nula.
- 10.36** Estadístico de prueba = -3.39, valor crítico para  $\alpha = 0.10$  es -1.28155, valor crítico para  $\alpha = 0.025$  es -1.96. El resultado es significativo a  $\alpha = 0.10$  y  $\alpha = 0.025$ .
- 10.37** Estadístico de prueba = 6.46, valor crítico = 1.8808, se concluye que  $\mu > 25.5$ .
- 10.38**  $=\text{NORMSINV}(0.9) = 1.2815$  para  $\alpha = 0.1$ ,  $=\text{NORMSINV}(0.99) = 2.3263$  para  $\alpha = 0.01$  y  $=\text{NORMSINV}(0.999) = 3.0902$  para  $\alpha = 0.001$ .
- 10.39** valor  $p = P\{X \leq 3\} + P\{X \geq 12\} = 0.0352$ .
- 10.40** valor  $p = P\{Z < -2.63\} + P\{Z > 2.63\} = 0.0085$ .
- 10.41** valor  $p = P\{Z < -3.39\} = 0.00035$ .
- 10.42** valor  $p = P\{Z > 6.46\} = 5.23515E-11$ .
- 10.43** *a)*  $8.64 \pm 0.96$  oz; *b)*  $8.64 \pm 0.83$  oz; *c)*  $8.64 \pm 0.63$  oz.
- 10.44** Los límites superiores de control son: *a)* 12 y *b)* 10.
- 10.45** Estadístico de prueba = -5.59, valor  $p = 0.000$ . Se rechaza la hipótesis nula ya que el valor  $p < \alpha$ .
- 10.46** Estadístico de prueba = -1.58, valor  $p = 0.059$ . Para  $\alpha = 0.05$  no se rechaza, para  $\alpha = 0.10$  sí se rechaza.
- 10.47** Estadístico de prueba = -1.73, valor  $p = 0.042$ . Para  $\alpha = 0.05$  se rechaza, para  $\alpha = 0.01$  no se rechaza.
- 10.48** Con una prueba de una cola se observa que, a ambos niveles de significancia, el nuevo fertilizante es mejor.
- 10.49** *a)* Estadístico de prueba = 1.35, valor  $p = 0.176$ , no se puede rechazar la hipótesis nula a  $\alpha = 0.05$ .  
*b)* Estadístico de prueba = 1.35, valor  $p = 0.088$ , no se puede rechazar la hipótesis nula a  $\alpha = 0.05$ .
- 10.50** *a)* Estadístico de prueba = 1.81, valor  $p = 0.07$ , no se puede rechazar la hipótesis nula a  $\alpha = 0.05$ .  
*b)* Estadístico de prueba = 1.81, valor  $p = 0.0035$ , se rechaza la hipótesis nula a  $\alpha = 0.05$ .
- 10.51**  $=1 - \text{BINOMDIST}(10, 15, 0.5, 1)$  o bien 0.059235.

**526 RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS SUPLEMENTARIOS**

**10.52**  $=\text{BINOMDIST}(2, 20, 0.5, 1) + 1 - \text{BINOMDIST}(17, 20, 0.5, 1)$  o 0.000402.

**10.53**  $=\text{BINOMDIST}(10, 15, 0.6, 1)$  o 0.7827.

**10.54**  $=\text{BINOMDIST}(17, 20, 0.9, 1) - \text{BINOMDIST}(2, 20, 0.9, 1)$  o 0.3231.

**10.55** El valor  $p$  se obtiene con  $=1 - \text{BINOMDIST}(9, 15, 0.5, 1)$  que da 0.1509. No se rechaza la hipótesis nula porque el valor de  $\alpha = 0.0592$  y el valor  $p$  no es menor que  $\alpha$ .

**10.56**  $\alpha = \text{BINOMDIST}(4, 20, 0.5, 1) + 1 - \text{BINOMDIST}(15, 20, 0.5, 1)$  o bien 0.0118  
valor  $p = \text{BINOMDIST}(3, 20, 0.5, 1) + 1 - \text{BINOMDIST}(16, 20, 0.5, 1)$  o bien 0.0026.  
Se rechaza la hipótesis nula dado que el valor  $p < \alpha$ .

**10.57**  $=1 - \text{BINOMDIST}(3, 30, 0.03, 1)$  o bien 0.0119.

**10.58**  $=\text{BINOMDIST}(3, 30, 0.04, 1)$  o bien 0.9694.

**10.59**  $\alpha = 1 - \text{BINOMDIST}(5, 20, 0.16667, 1)$  o bien 0.1018  
valor  $p = 1 - \text{BINOMDIST}(6, 20, 0.16667, 1)$  o bien 0.0371.

**CAPÍTULO 11**

**11.20** a) 2.60; b) 1.75; c) 1.34; d) 2.95; e) 2.13.

**11.21** a) 3.75; b) 2.68; c) 2.48; d) 2.39; e) 2.33.  
 $a) =\text{TINV}(0.02, 4)$  o bien 3.7469; b) 2.6810; c) 2.4851; d) 2.3901; e) 3.3515.

**11.22** a) 1.71; b) 2.09; c) 4.03; d) -0.128.

**11.23** a) 1.81; b) 2.76; c) -0.879; d) -1.37.

**11.24** a)  $\pm 4.60$ ; b)  $\pm 3.06$ ; c)  $\pm 2.79$ ; d)  $\pm 2.75$ ; e)  $\pm 2.70$ .

**11.25** a)  $7.38 \pm 0.79$ ; b)  $7.38 \pm 1.11$ .  
c)  $(6.59214, 8.16786)$ ,  $(6.26825, 8.49175)$ .

**11.26** a)  $7.38 \pm 0.70$ ; b)  $7.38 \pm 0.92$ .

**11.27** a)  $0.289 \pm 0.030$  segundos; b)  $0.298 \pm 0.049$  segundos.

**11.28** Con una prueba de dos colas se observa que no hay evidencia, ni al nivel 0.05 ni al nivel 0.01, que indiquen que el tiempo medio de vida ha variado.

**11.29** Con una prueba de una cola se observa que no hay disminución en la media al nivel 0.05 ni al nivel 0.01.

**11.30** Con una prueba de dos colas se observa que el producto no satisface las especificaciones requeridas.

**11.31** Con una prueba de una cola se observa, a ambos niveles, que el contenido de cobre es superior al requerido por las especificaciones.

**11.32** Con una prueba de una cola se observa que la nueva máquina debe introducirse si el nivel de significancia que se adopte es 0.01, pero no debe introducirse si el nivel de significancia que se adopte es 0.05.

**11.33** Con una prueba de una cola se observa que la marca  $A$  es mejor que la marca  $B$  al nivel de significancia 0.05.

- 11.34** Empleando una prueba de dos colas, al nivel de significancia 0.05, de acuerdo con las muestras no se puede concluir que haya diferencia entre la acidez de las dos soluciones.
- 11.35** Empleando una prueba de una cola, al nivel de significancia 0.05 se concluye que el primer grupo no es mejor que el segundo.
- 11.36** a) 21.0; b) 26.2; c) 23.3; d)  $=\text{CHIINV}(0.05, 12)$  o bien 21.0261  $=\text{CHIINV}(0.01, 12)$  o bien 26.2170  
 $=\text{CHIINV}(0.025, 12)$  o bien 23.3367.
- 11.37** a) 15.5; b) 30.1; c) 41.3; d) 55.8.
- 11.38** a) 20.1; b) 36.2; c) 48.3; d) 63.7.
- 11.39** a)  $\chi_1^2 = 9.59$  y  $\chi_2^2 = 34.2$ .
- 11.40** a) 16.0; b) 6.35; c) suponiendo áreas iguales en ambas colas,  $\chi_1^2 = 2.17$  y  $\chi_2^2 = 14.1$ .
- 11.41** a) 87.0 a 230.9 h; b) 78.1 a 288.5 h.
- 11.42** a) 95.6 a 170.4 h; b) 88.9 a 190.8 h.
- 11.43** a) 122.5; b) 179.2; c)  $=\text{CHIINV}(0.95, 150)$  o bien 122.6918; d)  $=\text{CHIINV}(0.05, 150)$  o bien 179.5806.
- 11.44** a) 207.7; b) 295.2; c)  $=\text{CHIINV}(0.975, 250)$  o bien 208.0978; d)  $=\text{CHIINV}(0.025, 250)$  o bien 295.6886.
- 11.46** a) 106.1 a 140.5 h; b) 102.1 a 148.1 h.
- 11.47** 105.5 a 139.6 h.
- 11.48** Con base en las muestras dadas, el aparente aumento de la variabilidad no es significativo a ninguno de los dos niveles.
- 11.49** La disminución aparente de la variabilidad es significativa al nivel 0.05, pero no al nivel 0.01.
- 11.50** a) 3.07; b) 4.02; c) 2.11; d) 2.83.
- 11.51** a)  $=\text{FINV}(0.05, 8, 10)$  o bien 3.0717; b)  $=\text{FINV}(0.01, 24, 11)$  o bien 4.0209;  
c)  $=\text{FINV}(0.05, 15, 24)$  o bien 2.1077; d)  $=\text{FINV}(0.01, 20, 22)$  o bien 2.8274.
- 11.52** Al nivel 0.05, la varianza de la muestra 1 es significativamente mayor, pero al nivel 0.01, no.
- 11.53** a) Sí; b) no.

## CAPÍTULO 12

- 12.26** La hipótesis no puede rechazarse a ninguno de los dos niveles.
- 12.27** La conclusión es la misma que antes.
- 12.28** El nuevo profesor no sigue el patrón de notas de los otros profesores. (El que las notas sean mejores que el promedio *puede* deberse a una mejor capacidad para enseñar o a un estándar inferior, o ambas cosas.)

- 12.29** No hay razón para rechazar la hipótesis de que la moneda no esté cargada.
- 12.30** No hay razón para rechazar la hipótesis a ninguno de los dos niveles.
- 12.31** *a)* 10, 50 y 60, respectivamente;  
*b)* al nivel de significancia 0.05 no se puede rechazar la hipótesis de que los resultados sean los esperados.
- 12.32** Al nivel de significancia 0.05, la diferencia es significativa.
- 12.33** *a)* El ajuste es bueno; *b)* no.
- 12.34** *a)* El ajuste es “muy bueno”; *b)* al nivel 0.05, el ajuste no es bueno.
- 12.35** *a)* Al nivel 0.05 el ajuste es muy malo; dado que la distribución binomial da un buen ajuste a los datos, esto coincide con el problema 12.33.  
*b)* El ajuste es bueno, pero no “muy bueno”.
- 12.36** Al nivel 0.05 se puede rechazar la hipótesis, pero no al nivel 0.01.
- 12.37** La conclusión es la misma que antes.
- 12.38** La hipótesis no se puede rechazar a ninguno de los dos niveles.
- 12.39** La hipótesis no se puede rechazar al nivel 0.05.
- 12.40** La hipótesis se puede rechazar a los dos niveles.
- 12.41** La hipótesis se puede rechazar a los dos niveles.
- 12.42** La hipótesis no se puede rechazar a ninguno de los dos niveles.
- 12.49** *a)* 0.3863 (no corregido) y 0.3779 (con la corrección de Yate).
- 12.50** *a)* 0.2205, 0.1985 (corregido); *b)* 0.0872, 0.0738 (corregido).
- 12.51** 0.4651.
- 12.54** *a)* 0.4188, 0.4082 (corregido).
- 12.55** *a)* 0.2261, 0.2026 (corregido); *b)* 0.0875, 0.0740 (corregido).
- 12.56** 0.3715.

## CAPÍTULO 13

- 13.24** *a)* 4; *b)* 6; *c)*  $\frac{28}{3}$ ; *d)* 10.5; *e)* 6; *f)* 9.
- 13.25** (2, 1).
- 13.26** *a)*  $2X + Y = 4$ ; *b)* intersección con el eje  $X = 2$ , intersección con el eje  $Y = 4$ ; *c)*  $-2, -6$ .
- 13.27**  $Y = \frac{2}{3}X - 3$  o bien  $2X - 3Y = 9$ .

**13.28** a) Pendiente =  $\frac{3}{5}$ , intersección con el eje  $Y = -4$ ; b)  $3X - 5Y = 11$ .

**13.29** a)  $-\frac{4}{3}$ ; b)  $\frac{32}{3}$ ; c)  $4X + 3Y = 32$ .

**13.30**  $X/3 + Y/(-5) = 1$  o bien  $5X - 3Y = 15$ .

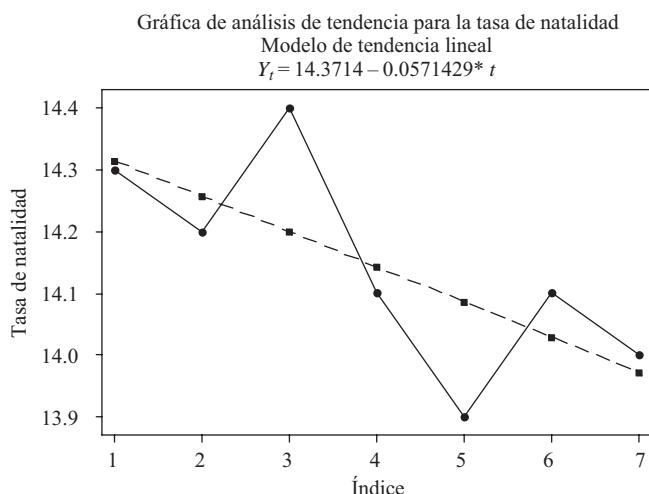
**13.31** a)  ${}^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} {}^{\circ}\text{C} + 32$ ; b)  $176 {}^{\circ}\text{F}$ ; c)  $20 {}^{\circ}\text{C}$ .

**13.32** a)  $Y = -\frac{1}{3} + \frac{5}{7}X$ , o bien  $Y = -0.333 + 0.714X$ ; b)  $X = 1 + \frac{9}{7}Y$ , o bien  $X = 1.00 + 1.29Y$ .

**13.33** a) 3.24; 8.24; b) 10.00.

**13.35** b)  $Y = 29.13 + 0.661X$ ; c)  $X = -14.39 + 1.15Y$ ; d) 79; e) 95.

**13.36** a) y b).

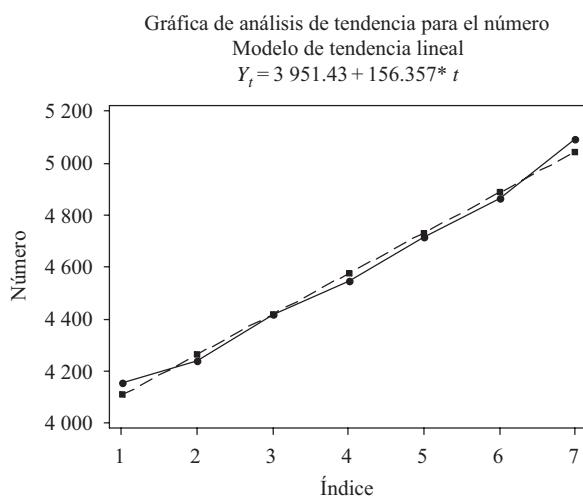


c)

| Año  | Tasa de natalidad | Valor ajustado | Residual  |
|------|-------------------|----------------|-----------|
| 1998 | 14.3              | 14.3143        | -0.014286 |
| 1999 | 14.2              | 14.2571        | -0.057143 |
| 2000 | 14.4              | 14.2000        | 0.200000  |
| 2001 | 14.1              | 14.1429        | -0.042857 |
| 2002 | 13.9              | 14.0857        | -0.185714 |
| 2003 | 14.1              | 14.0286        | 0.071429  |
| 2004 | 14.0              | 13.9714        | 0.028571  |

d)  $14.3714 - 0.0571429(13) = 13.6$ .

13.37 a) y b)



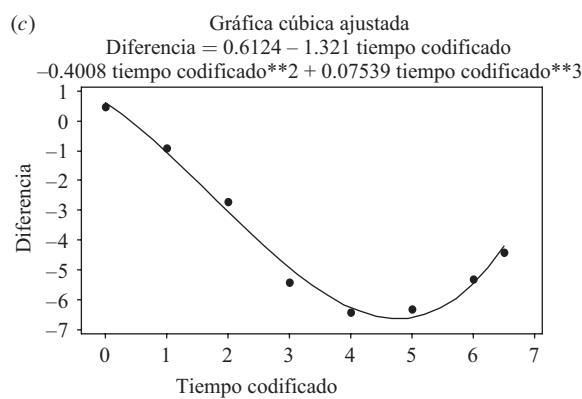
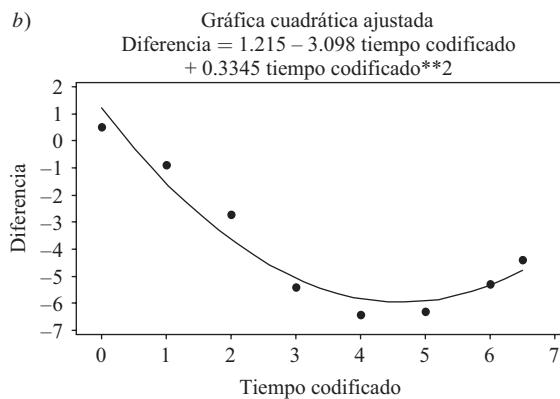
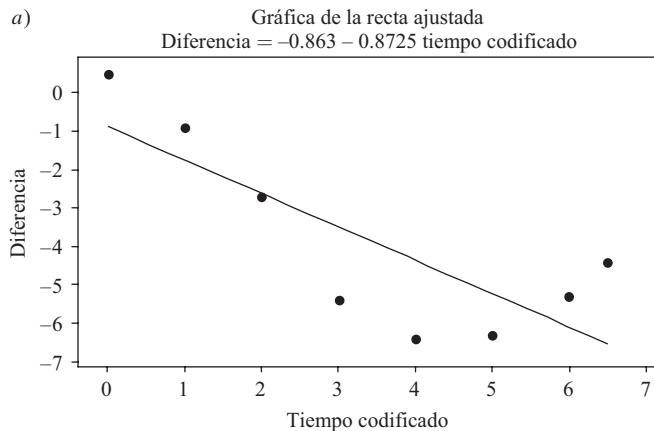
c)

| Año  | Número | Valor ajustado | Residual |
|------|--------|----------------|----------|
| 1999 | 4 154  | 4 107.79       | 46.2143  |
| 2000 | 4 240  | 4 264.14       | -24.1429 |
| 2001 | 4 418  | 4 420.50       | -2.5000  |
| 2002 | 4 547  | 4 576.86       | -29.8571 |
| 2003 | 4 716  | 4 733.21       | -17.2143 |
| 2004 | 4 867  | 4 889.57       | -22.5714 |
| 2005 | 5 096  | 5 045.93       | 50.0714  |

d)  $3\,951.43 + 156.357(12) = 5\,827.7.$

13.38  $Y = 5.51 + 3.20(X - 3) + 0.733(X - 3)^2$  o bien  $Y = 2.51 - 1.20X + 0.733X^2.$ 13.39 b)  $D = 41.77 - 1.096V + 0.08786V^2$ ; c) 170 ft, 516 ft.

13.40



d)

| Año  | Modelo lineal |              | Modelo cuadrático |             | Modelo cúbico |             |  |
|------|---------------|--------------|-------------------|-------------|---------------|-------------|--|
|      | Residual      | Ajustado     | Residual          | Ajustado    | Residual      | Ajustado    |  |
| 1940 | 1.363         | 0.863        | -0.715            | 1.215       | -0.112        | 0.612       |  |
| 1950 | 0.836         | 1.736        | 0.649             | -1.549      | 0.134         | -1.034      |  |
| 1960 | -0.092        | 0.092        | 0.943             | -3.643      | 0.330         | -3.030      |  |
| 1970 | -1.919        | 1.919        | -0.332            | -5.068      | -0.476        | -4.924      |  |
| 1980 | -2.047        | 2.047        | -0.575            | -5.825      | -0.139        | -6.261      |  |
| 1990 | -1.074        | 1.074        | -0.388            | -5.912      | 0.292         | -6.592      |  |
| 2000 | 0.798         | 6.098        | 0.030             | -5.330      | 0.162         | -5.462      |  |
| 2005 | 2.134         | 6.534        | 0.388             | -4.788      | -0.191        | -4.209      |  |
|      |               | SSQ = 16.782 |                   | SSQ = 2.565 |               | SSQ = 0.533 |  |

e)

$$\text{Lineal: } -0.863 - 0.8725(7) = -6.97$$

$$\text{Cuadrático: } 1.215 - 3.098(7) + 0.3345(7^2) = -4.08$$

$$\text{Cúbico: } 0.6124 - 1.321(7) - 0.4008(49) + 0.07539(343) = -2.41.$$

**13.41** b) Proporción =  $0.965 + 0.0148$  año codificado.

c)

| Año  | Año codificado | Hombre | Mujer  | Proporción | Valor ajustado | Residual |
|------|----------------|--------|--------|------------|----------------|----------|
| 1920 | 0              | 53.90  | 51.81  | 0.96       | 0.97           | -0.00    |
| 1930 | 1              | 62.14  | 60.64  | 0.98       | 0.98           | -0.00    |
| 1940 | 2              | 66.06  | 65.61  | 0.99       | 0.99           | -0.00    |
| 1950 | 3              | 75.19  | 76.14  | 1.01       | 1.01           | 0.00     |
| 1960 | 4              | 88.33  | 90.99  | 1.03       | 1.02           | 0.01     |
| 1970 | 5              | 98.93  | 104.31 | 1.05       | 1.04           | 0.01     |
| 1980 | 6              | 110.05 | 116.49 | 1.06       | 1.05           | 0.00     |
| 1990 | 7              | 121.24 | 127.47 | 1.05       | 1.07           | -0.02    |

d) Proporción pronosticada = 1.08. Proporción real = 1.04.

**13.42** b) Diferencia =  $-2.63 + 1.35 x + 0.0064 x^2$ .

d) La diferencia pronosticada para 1995 es  $-2.63 + 1.35(7.5) + 0.0064(56.25) = 7.86$ .

**13.43** b)  $Y = 32.14(1.427)^X$  o bien  $Y = 32.14(10)^{0.1544X}$  o bien  $Y = 32.14e^{0.3556X}$ , donde  $e = 2.718\cdots$  es la base logarítmica natural.  
d) 387.

## CAPÍTULO 14

**14.40** b)  $Y = 4.000 + 0.500X$ ; c)  $X = 2.408 + 0.612Y$ .

**14.41** a) 1.304; b) 1.443.

**14.42** a) 24.50; b) 17.00; c) 7.50.

**14.43** 0.5533.

**14.44** Usando EXCEL la solución es =CORREL(A2:A11, B2:B11) que es 0.553.

**14.45** 1.5.

**14.46** a) 0.8961; b)  $Y = 80.78 + 1.138X$ ; c) 132.

**14.47** a) 0.958; b) 0.872.

**14.48** a)  $Y = 0.8X + 12$ ; b)  $X = 0.45Y + 1$ .

**14.49** a) 1.60; b) 1.20.

**14.50**  $\pm 0.80$ .

**14.51** 75%.

**14.53** En los dos incisos se obtiene la misma respuesta, a saber  $-0.9203$ .

**14.54** a)  $Y = 18.04 - 1.34X$ ,  $Y = 51.18 - 2.01X$ .

**14.58** 0.5440.

**14.59** a)  $Y = 4.44X - 142.22$ ; b) 141.9 lb y 177.5 lb, respectivamente.

**14.60** a) 16.92 lb; b) 2.07 in.

**14.62** Correlación de Pearson entre C1 y C2 = 0.957.

**14.63** Correlación de Pearson entre C1 y C2 = 0.582.

**14.64** a) Sí; b) no.

**14.65** a) No; b) sí.

**14.66** a) 0.2923 y 0.7951; b) 0.1763 y 0.8361.

**14.67** a) 0.3912 y 0.7500; b) 0.3146 y 0.7861.

**14.68** a) 0.7096 y 0.9653; b) 0.4961 y 0.7235.

**14.69** a) Sí; b) no.

**14.70** a)  $2.00 \pm 0.21$ ; b)  $2.00 \pm 0.28$ .

**14.71** a) Usando una prueba de una cola, se puede rechazar la hipótesis.  
b) Usando una prueba de una cola, no se puede rechazar la hipótesis.

**14.72** a)  $37.0 \pm 3.28$ ; b)  $37.0 \pm 4.45$ .

**14.73** a)  $37.0 \pm 0.69$ ; b)  $37.0 \pm 0.94$ .

**14.74** a)  $1.138 \pm 0.398$ ; b)  $132.0 \pm 16.6$ ; c)  $132.0 \pm 5.4$ .

## CAPÍTULO 15

**15.26** a)  $X_3 = b_{3,12} + b_{31,2}X_1 + b_{32,1}X_2$ ; b)  $X_4 = b_{4,1235} + b_{41,235}X_1 + b_{42,135}X_2 + b_{43,125}X_3$ .

**15.28** a)  $X_3 = 61.40 - 3.65X_1 + 2.54X_2$ ; b) 40.

**15.29** a)  $X_3 - 74 = 4.36(X_1 - 6.8) + 4.04(X_2 - 7.0)$  o bien  $X_3 = 16.07 + 4.36X_1 + 4.04X_2$ ; b) 84 y 66.

**15.30** En todos los casos se han resumido los resultados.

**EXCEL**

| Price | Bedrooms | Baths | SUMMARY OUTPUT               |             |
|-------|----------|-------|------------------------------|-------------|
| 165   | 3        | 2     |                              |             |
| 200   | 3        | 3     | <i>Regression Statistics</i> |             |
| 225   | 4        | 3     | Multiple R                   | 0.877519262 |
| 180   | 2        | 3     | R Square                     | 0.770040055 |
| 202   | 4        | 2     | Adjusted R Square            | 0.704337213 |
| 250   | 4        | 4     | Standard Error               | 25.62718211 |
| 275   | 3        | 4     | Observations                 | 10          |
| 300   | 5        | 3     | <i>Coefficients</i>          |             |
| 155   | 2        | 2     | Intercept                    | 32.94827586 |
| 230   | 4        | 4     | Bedrooms                     | 28.64655172 |
|       |          |       | Baths                        | 29.28448276 |

**MINITAB****Análisis de regresión: precio contra recámaras, baños**

The regression equation is

$$\text{Price} = 32.9 + 28.6 \text{ Bedrooms} + 29.3 \text{ Baths}$$

$$R-Sq = 77.0\% \quad R-Sq(\text{adj}) = 70.4\%$$

**SAS**

|                |           |          |        |
|----------------|-----------|----------|--------|
| Root MSE       | 25.62718  | R-Square | 0.7700 |
| Dependent Mean | 218.20000 | Adj R-Sq | 0.7043 |
| Coeff Var      | 11.74481  |          |        |

## Parameter Estimates

| Variable  | Label     | DF | Parameter Estimate | Standard Error | t Value | Pr >  t |
|-----------|-----------|----|--------------------|----------------|---------|---------|
| Intercept | Intercept | 1  | 32.94828           | 39.24247       | 0.84    | 0.4289  |
| Bedrooms  | Bedrooms  | 1  | 28.64655           | 9.21547        | 3.11    | 0.0171  |
| Baths     | Baths     | 1  | 29.28448           | 10.90389       | 2.69    | 0.0313  |

**SPSS****Coeficientes<sup>a</sup>**

| Modelo        | Coeficientes sin estandarizar |                | Beta | t     | Sig. |
|---------------|-------------------------------|----------------|------|-------|------|
|               | B                             | Error estándar |      |       |      |
| 1 (Constante) | 32.948                        | 39.242         |      | .840  | .429 |
| Recámaras     | 28.647                        | 9.215          | .587 | 3.109 | .017 |
| Baños         | 29.284                        | 10.904         | .507 | 2.686 | .031 |

<sup>a</sup>Variable dependiente: Precio

**STATISTIX**

Statistix 8.0

**Unweighted Least Squares Linear Regression of Price****Predictor**

| Variables | Coefficients   | Std Error | T    | P      | VIF |
|-----------|----------------|-----------|------|--------|-----|
| Constant  | <b>32.9483</b> | 39.2425   | 0.84 | 0.4289 |     |
| Bedrooms  | <b>28.6466</b> | 9.21547   | 3.11 | 0.0171 | 1.1 |
| Baths     | <b>29.2845</b> | 10.9039   | 2.69 | 0.0313 | 1.1 |
| R-Squared | 0.7700         |           |      |        |     |

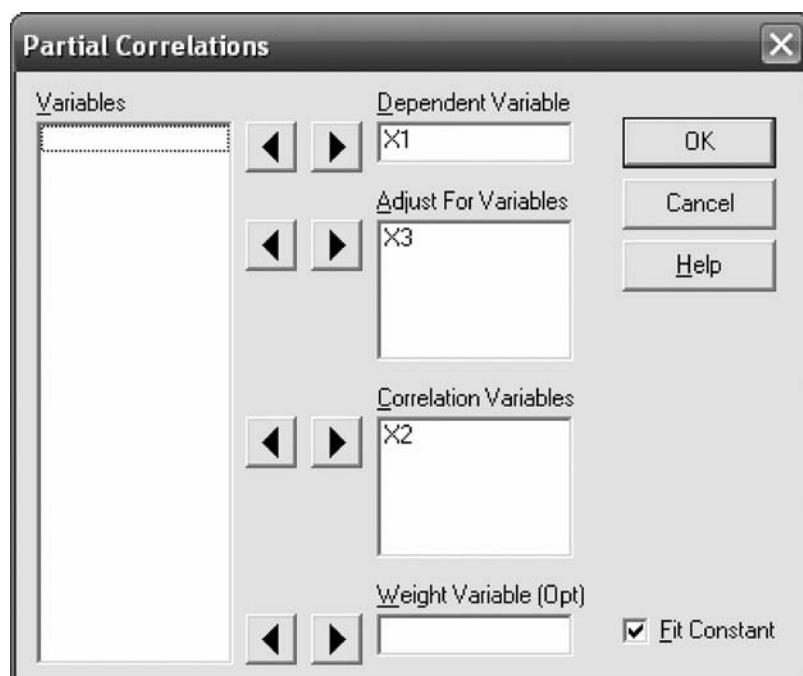
$$\text{Estimated Price} = 32.9 + 28.6(5) + 29.3(4) = 293.1 \text{ thousand.}$$

15.31 3.12.

15.32 a) 5.883; b) 0.6882.

15.33 0.9927.

15.34 a) 0.7567; b) 0.7255; c) 0.6710.

15.37 Se usa la secuencia “Statistics  $\Rightarrow$  Linear models  $\Rightarrow$  Partial Correlations”. Se llena la siguiente ventana de diálogo como se muestra.

Se obtienen los resultados siguientes.

Statistix 8.0

**Partial Correlations with X1****Controlled for X3**

X2 0.5950

De igual manera, se encuentra que:

Statistix 8.0  
**Partial Correlations with X1**  
**Controlled for X2**

X3 -0.8995

y

Statistix 8.0  
**Partial Correlations with x2**  
**Controlled for X1**

X3 0.8727

**15.38** a) 0.2672; b) 0.5099; c) 0.4026.

**15.42** a)  $X_4 = 6X_1 + 3X_2 - 4X_3 - 100$ ; b) 54.

**15.43** a) 0.8710; b) 0.8587; c) -0.8426.

**15.44** a) 0.8947; b) 2.680.

**15.45** Con cualquiera de las soluciones siguientes se obtendrán los mismos coeficientes que resolviendo las ecuaciones normales. En EXCEL se usa la secuencia “**Tools** ⇒ **Data analysis** ⇒ **Regression**” para hallar la ecuación de regresión, así como otras medidas de regresión. La parte de los resultados a partir de la cual se obtiene la ecuación de regresión es la siguiente:

| <b>Coefficientes</b> |          |
|----------------------|----------|
| Intersección         | -25.3355 |
| Fumador              | -302.904 |
| Alcohol              | -4.57069 |
| Ejercicio            | -60.8839 |
| Alimentación         | -36.8586 |
| Peso                 | 16.76998 |
| Edad                 | -9.52833 |

En MINITAB se emplea la secuencia “**Stat** ⇒ **Regression** ⇒ **Regression**” para hallar la ecuación de regresión. La parte de los resultados a partir de la cual se encuentra la ecuación de regresión es la siguiente.

#### Análisis de regresión: Medcost versus fumador, alcohol,...

The regression equation is

Medcost = -25 - 303 smoker - 4.6 alcohol - 60.9 Exercise - 37 Dietary + 16.8 weight  
- 9.53 Age

| Predictor | Coef   | SE Coef | T     | P     |
|-----------|--------|---------|-------|-------|
| Constant  | -25.3  | 644.8   | -0.04 | 0.970 |
| smoker    | -302.9 | 256.1   | -1.18 | 0.271 |
| alcohol   | -4.57  | 11.89   | -0.38 | 0.711 |
| Exercise  | -60.88 | 19.75   | -3.08 | 0.015 |

|         |        |       |       |       |
|---------|--------|-------|-------|-------|
| Dietary | -36.9  | 104.0 | -0.35 | 0.732 |
| weight  | 16.770 | 3.561 | 4.71  | 0.002 |
| Age     | -9.528 | 9.571 | -1.00 | 0.349 |

En SAS se emplea la secuencia “**Statistics** ⇒ **Regression** ⇒ **Linear**” para hallar la ecuación de regresión. La parte de los resultados a partir de la cual se encuentra la ecuación de regresión es la siguiente.

```
The REG Procedure
Model: MODEL1
Dependent Variable: Medcost Medcost

Number of Observations Read           16
Number of Observations Used          15
Number of Observations with Missing Values  1

Root MSE      224.41971   R-Square 0.9029
Dependent Mean 2461.80000   Adj R-Sq 0.8301
Coeff Var    9.11608
```

| Parameter Estimates |           |    |                    |                |         |         |
|---------------------|-----------|----|--------------------|----------------|---------|---------|
| Variable            | Label     | DF | Parameter Estimate | Standard Error | t value | Pr >  t |
| Intercept           | Intercept | 1  | -25.33552          | 644.84408      | -0.04   | 0.9696  |
| smoker              | smoker    | 1  | -302.90395         | 256.11003      | -1.18   | 0.2709  |
| alcohol             | alcohol   | 1  | -4.57069           | 11.88579       | -0.38   | 0.7106  |
| Exercise            | Exercise  | 1  | -60.88386          | 19.75371       | -3.08   | 0.0151  |
| Dietary             | Dietary   | 1  | -36.85858          | 104.04736      | -0.35   | 0.7323  |
| weight              | weight    | 1  | 16.76998           | 3.56074        | 4.71    | 0.0015  |
| Age                 | Age       | 1  | -9.52833           | 9.57104        | -1.00   | 0.3486  |

En SPSS se emplea la secuencia “**Analysis** ⇒ **Regression** ⇒ **Linear**” para hallar la ecuación de regresión. La parte de los resultados a partir de la cual se encuentra la ecuación de regresión es la siguiente. Ver bajo la columna de coeficientes no estandarizados.

| Modelo        | Coeficientes <sup>a</sup> |                |       | t      | Sig. |
|---------------|---------------------------|----------------|-------|--------|------|
|               | B                         | Error estándar | Beta  |        |      |
| 1 (Constante) | -25.336                   | 644.844        |       | -.039  | .970 |
| fumador       | -302.904                  | 256.110        | -.287 | -1.183 | .271 |
| alcohol       | -4.571                    | 11.886         | -.080 | -.385  | .711 |
| ejercicio     | -60.884                   | 19.754         | -.553 | -3.082 | .015 |
| dieta         | -36.859                   | 104.047        | -.044 | -.354  | .732 |
| peso          | -16.770                   | 3.561          | .927  | 4.710  | .002 |
| edad          | -9.528                    | 9.571          | -.124 | -.996  | .049 |

<sup>a</sup>Variable dependiente: medcost

En STATISTIX se emplea la secuencia “**Statistics** ⇒ **Linear models** ⇒ **Linear regression**” para hallar la ecuación de regresión. La parte de los resultados a partir de la cual se encuentra la ecuación de regresión es la siguiente. Ver bajo la columna de coeficientes.

Statistix 8.0

**Unweighted Least Squares Linear Regression of Medcost**

| Predictor<br>Variables | Coefficient | Std Error | T     | P      | VIF |
|------------------------|-------------|-----------|-------|--------|-----|
| Constant               | -25.3355    | 644.844   | -0.04 | 0.9696 |     |
| Age                    | -9.52833    | 9.57104   | -1.00 | 0.3486 | 1.3 |
| Dietary                | -36.8586    | 104.047   | -0.35 | 0.7323 | 1.3 |
| Exercise               | -60.8839    | 19.7537   | -3.08 | 0.0151 | 2.6 |
| alcohol                | -4.57069    | 11.8858   | -0.38 | 0.7106 | 3.6 |
| smoker                 | -302.904    | 256.110   | -1.18 | 0.2709 | 4.9 |
| weight                 | 16.7700     | 3.56074   | 4.71  | 0.0015 | 3.2 |

**CAPÍTULO 16**

- 16.21** A los niveles de significancia 0.05 y 0.01 no hay diferencia significativa entre las cinco variedades. El análisis proporcionado por MINITAB es el siguiente:

**One-way ANOVA: A, B, C, D, E**

| Source | DF | SS    | MS   | F    | P     |
|--------|----|-------|------|------|-------|
| Factor | 4  | 27.2  | 6.8  | 0.65 | 0.638 |
| Error  | 15 | 157.8 | 10.5 |      |       |
| Total  | 19 | 185.0 |      |      |       |

$$S = 3.243 \quad R-Sq = 14.71\% \quad R-Sq(\text{adj}) = 0.00\%$$

Individual 95% CIs For Mean Based on  
Pooled StDev

| Level | N | Mean   | StDev | (-----*-----)  |
|-------|---|--------|-------|--|
| A     | 4 | 16.500 | 3.697 | (-----*-----)  |
| B     | 4 | 14.500 | 2.082 | (-----*-----)  |
| C     | 4 | 17.750 | 3.862 | (-----*-----)  |
| D     | 4 | 16.000 | 3.367 | (-----*-----)  |
| E     | 4 | 17.500 | 2.887 | (-----*-----)  |
|       |   |        |       | -----+-----+-----+-----                              |
|       |   |        |       | 12.0            15.0            18.0            21.0 |

- 16.22** A los niveles de significancia 0.05 y 0.01 no hay diferencia entre los cuatro tipos de neumáticos. El análisis proporcionado por STATISTIX es el siguiente:

Statistix 8.0

**Completely Randomized AOV for Mileage**

| Source | DF | SS      | MS      | F    | P      |
|--------|----|---------|---------|------|--------|
| Type   | 3  | 77.500  | 25.8333 | 2.39 | 0.0992 |
| Error  | 20 | 216.333 | 10.8167 |      |        |
| Total  | 23 | 293.833 |         |      |        |

Grand Mean 34.083 CV 9.65

|                                    | Chi-Sq | DF | P      |
|------------------------------------|--------|----|--------|
| Bartlett's Test of Equal Variances | 4.13   | 3  | 0.2476 |
| Cochran's Q                        | 0.5177 |    |        |
| Largest Var / Smallest Var         | 6.4000 |    |        |

Component of variance for between groups 2.50278  
 Effective cell size 6.0

**Type Mean**

|   |        |
|---|--------|
| A | 35.500 |
| B | 36.000 |
| C | 33.333 |
| D | 31.500 |

- 16.23** Al nivel de significancia 0.05 sí hay diferencia entre los tres métodos de enseñanza, pero no al nivel 0.01. El análisis proporcionado por EXCEL es el siguiente:

| Métodol | Métodoll | Métodolll |
|---------|----------|-----------|
| 75      | 81       | 73        |
| 62      | 85       | 79        |
| 71      | 68       | 60        |
| 58      | 92       | 75        |
| 73      | 90       | 81        |

## Análisis de varianza de un factor

## RESUMEN

| Grupos    | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza |
|-----------|--------|------|----------|----------|
| Métodol   | 5      | 339  | 67.8     | 54.7     |
| Métodoll  | 5      | 416  | 83.2     | 90.7     |
| Métodolll | 5      | 368  | 73.6     | 67.8     |

## Análisis de varianza

| Origen de las variaciones | SS        | df | MS       | F        | Valor p  |
|---------------------------|-----------|----|----------|----------|----------|
| Entre grupos              | 604.9333  | 2  | 302.4667 | 4.265098 | 0.040088 |
| Dentro de los grupos      | 852.8     | 12 | 71.06667 |          |          |
| Total                     | 1 457.733 | 14 |          |          |          |

- 16.24** Al nivel de significancia 0.05 sí hay diferencia entre las cinco marcas, pero no al nivel 0.01. El análisis proporcionado por SPSS es el siguiente:

## ANÁLISIS DE VARIANZA

## mpg

|               | Suma de cuadrados | df | Cuadrado medio | F     | Sig. |
|---------------|-------------------|----|----------------|-------|------|
| Entre grupos  | 52.621            | 4  | 13.155         | 4.718 | .010 |
| En los grupos | 44.617            | 16 | 2.789          |       |      |
| Total         | 97.238            | 20 |                |       |      |

- 16.25** A los dos niveles hay diferencia entre las cuatro materias. El análisis proporcionado por SAS es el siguiente:

```
The ANOVA Procedure
Class Level Information
      Class      Levels      Values
          Subject        4        1 2 3 4
      Number of Observations Read           16
      Number of Observations Used          16
```

| The ANOVA Procedure       |    |             |             |         |        |
|---------------------------|----|-------------|-------------|---------|--------|
| Dependent Variable: Grade |    |             |             |         |        |
| Source                    | DF | Sum of      |             | F Value | Pr > F |
|                           |    | Squares     | Mean Square |         |        |
| Model                     | 3  | 365.5708333 | 121.8569444 | 7.35    | 0.0047 |
| Error                     | 12 | 198.8666667 | 16.5722222  |         |        |
| Corrected Total           | 15 | 564.4375000 |             |         |        |

- 16.26 Al nivel de significancia 0.05 no hay diferencia ni entre los operadores ni entre las máquinas. A continuación se presenta el análisis proporcionado por MINITAB.

#### Two-way ANOVA: Number versus Machine, Operator

| Source   | DF | SS | MS   | F    | P     |
|----------|----|----|------|------|-------|
| Machine  | 2  | 56 | 28.0 | 4.31 | 0.101 |
| Operator | 2  | 6  | 3.0  | 0.46 | 0.660 |
| Error    | 4  | 26 | 6.5  |      |       |
| Total    | 8  | 88 |      |      |       |

$$S = 2.550 \quad R-Sq = 70.45\% \quad R-Sq(\text{adj}) = 40.91\%$$

- 16.27 Al nivel de significancia 0.01 no hay diferencia ni entre los operadores ni entre las máquinas. A continuación se presenta el análisis proporcionado por EXCEL. Comparar el análisis de EXCEL con el proporcionado por MINITAB en el problema anterior.

|          | Operador1 | Operador2 | Operador3 |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| Máquina1 | 23        | 27        | 24        |
| Máquina2 | 34        | 30        | 28        |
| Máquina3 | 28        | 25        | 27        |

#### Análisis de varianza de dos factores con una sola muestra por grupo

| RESUMEN   | Cuenta | Suma | Promedio  | Varianza  |
|-----------|--------|------|-----------|-----------|
| Fila 1    | 3      | 74   | 24.666667 | 4.333333  |
| Fila 2    | 3      | 92   | 30.666667 | 9.333333  |
| Fila 3    | 3      | 80   | 26.666667 | 2.333333  |
| Columna 1 | 3      | 85   | 28.333333 | 30.333333 |
| Columna 2 | 3      | 82   | 27.333333 | 6.333333  |
| Columna 3 | 3      | 79   | 26.333333 | 4.333333  |

#### Análisis de varianza

| Origen de las variaciones | SS | df | MS  | F        | Valor p  |
|---------------------------|----|----|-----|----------|----------|
| Filas                     | 56 | 2  | 28  | 4.307692 | 0.100535 |
| Columnas                  | 6  | 2  | 3   | 0.461538 | 0.660156 |
| Error                     | 26 | 4  | 6.5 |          |          |
| Total                     | 88 | 8  |     |          |          |

- 16.28 Al valor *p* en SPSS se le llama *sig*. El valor *p* para los bloques es 0.640 y el valor *p* para los tipos de maíz es 0.011, que es menor a 0.05 y por lo tanto es significativo. Al nivel de significancia 0.05 no hay diferencia entre los bloques. Al nivel de significancia 0.05 sí hay diferencias en los rendimientos debido al tipo de maíz. A continuación se presenta el análisis proporcionado por SPSS.

**Pruebas de efectos entre temas**

Variable dependiente: resultado

| Origen           | Tipo III Suma de cuadrados | df | Cuadrado medio | F         | Sig. |
|------------------|----------------------------|----|----------------|-----------|------|
| Modelo corregido | 77.600 <sup>a</sup>        | 7  | 11.086         | 2.867     | .053 |
| Intersección     | 3 920.000                  | 1  | 3 920.000      | 1 013.793 | .000 |
| bloque           | 10.000                     | 4  | 2.500          | .647      | .640 |
| tipo             | 67.600                     | 3  | 22.533         | 5.828     | .011 |
| Error            | 46.400                     | 12 | 3.867          |           |      |
| Total            | 4 044.000                  | 20 |                |           |      |
| Total corregido  | 124.000                    | 19 |                |           |      |

<sup>a</sup>R cuadrada = .626 (R cuadrada ajustada = .408)

- 16.29** Al nivel de significancia 0.01, en los rendimientos no hay diferencias que se deban a los bloques o al tipo de maíz. Comparar estos resultados de STATISTIX con los resultados de SPSS del problema 16.28.

Statistix 8.0

**Randomized Complete Block AOV Table for yield**

| Source            | DF | SS       | MS      | F    | P      |
|-------------------|----|----------|---------|------|--------|
| block             | 4  | 10.000   | 2.5000  | 5.83 | 0.0108 |
| type              | 3  | 67.600   | 22.5333 |      |        |
| Error             | 12 | 46.400   | 3.8667  |      |        |
| Total             | 19 | 124.000  |         |      |        |
| Grand Mean 14.000 |    | CV 14.05 |         |      |        |

**Means of yield for type**

| type | Mean   |
|------|--------|
| 1    | 13.600 |
| 2    | 17.000 |
| 3    | 12.000 |
| 4    | 13.400 |

- 16.30** SAS representa el valor *p* como Pr > F. En los dos últimos renglones de los resultados, se ve que tanto los automóviles como las marcas de los neumáticos son significativos al nivel 0.05.

The GLM Procedure  
Class Level Information

| Class | Levels | Values      |
|-------|--------|-------------|
| Auto  | 6      | 1 2 3 4 5 6 |
| Brand | 4      | 1 2 3 4     |

The GLM Procedure  
Dependent Variable: lifetime

| Source          | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Pr > F |
|-----------------|----|----------------|-------------|---------|--------|
| Model           | 8  | 201.3333333    | 25.1666667  | 4.08    | 0.0092 |
| Error           | 15 | 92.5000000     | 6.1666667   |         |        |
| Corrected Total | 23 | 293.8333333    |             |         |        |

| Source | DF | Type III SS | Mean Square | F Value | Pr > F |
|--------|----|-------------|-------------|---------|--------|
| Auto   | 5  | 123.8333333 | 24.7666667  | 4.02    | 0.0164 |
| Brand  | 3  | 77.5000000  | 25.8333333  | 4.19    | 0.0243 |

- 16.31 Compare el análisis de MINITAB en este problema con el de SAS en el problema 16.30. Al nivel de significancia 0.01, no hay diferencia entre los automóviles ni entre las marcas, ya que los valores  $p$  son 0.016 y 0.024, ambos mayores a 0.01.

**Two-way ANOVA: lifetime versus Auto, Brand**

| Source | DF | SS      | MS      | F    | P     |
|--------|----|---------|---------|------|-------|
| Auto   | 5  | 123.833 | 24.7667 | 4.02 | 0.016 |
| Brand  | 3  | 77.500  | 25.8333 | 4.19 | 0.024 |
| Error  | 15 | 92.500  | 6.1667  |      |       |
| Total  | 23 | 293.833 |         |      |       |

S = 2.483 R-Sq = 68.52% R-Sq(adj) = 51.73%

- 16.32 A continuación se presentan los resultados de STATISTIX. El valor  $p$  que es 0.3171 indica que, al nivel de significancia 0.05 no hay diferencia entre las escuelas.

Statistix 8.0

**Randomized Complete Block AOV Table for Grade**

| Source | DF | SS      | MS      | F    | P      |
|--------|----|---------|---------|------|--------|
| Method | 2  | 604.93  | 302.467 |      |        |
| School | 4  | 351.07  | 87.767  | 1.40 | 0.3171 |
| Error  | 8  | 501.73  | 62.717  |      |        |
| Total  | 14 | 1457.73 |         |      |        |

Para los métodos de enseñanza, el valor de  $F$  es 4.82 y el valor  $p$  es 0.0423. Por lo tanto, al nivel de significancia 0.05, sí hay diferencia entre los métodos de enseñanza.

- 16.33 Los resultados de EXCEL indican que al nivel de significancia 0.05, ni el color del pelo ni las estaturas de las mujeres adultas tienen influencia en los logros escolares. El valor  $p$  para el color del pelo es 0.4534 y el valor  $p$  para la estatura es 0.2602.

|         | Pelirroja | Rubia | Castaña |
|---------|-----------|-------|---------|
| Alta    | 75        | 78    | 80      |
| Mediana | 81        | 76    | 79      |
| Baja    | 73        | 75    | 77      |

Análisis de varianza de dos factores con una sola muestra por grupo

| RESUMEN   | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza |
|-----------|--------|------|----------|----------|
| Fila 1    | 3      | 233  | 77.66667 | 6.333333 |
| Fila 2    | 3      | 236  | 78.66667 | 6.333333 |
| Fila 3    | 3      | 225  | 75       | 4        |
| Columna 1 | 3      | 229  | 76.33333 | 17.33333 |
| Columna 2 | 3      | 229  | 76.33333 | 2.333333 |
| Columna 3 | 3      | 236  | 78.33333 | 2.333333 |

## Análisis de varianza

| Origen de las variaciones | SS       | df | MS       | F        | Valor p  |
|---------------------------|----------|----|----------|----------|----------|
| Filas                     | 21.55556 | 2  | 10.77778 | 1.920792 | 0.260203 |
| Columnas                  | 10.88889 | 2  | 5.444444 | 0.970297 | 0.453378 |
| Error                     | 22.44444 | 4  | 5.611111 |          |          |
| Total                     | 54.88889 | 8  |          |          |          |

- 16.34** En los siguientes resultados de SPSS, al valor *p* se le llama *Sig.* El valor *p* para color de pelo es 0.453 y el valor *p* para estatura es 0.260. Éstos son los mismos valores *p* que se obtuvieron con EXCEL en el problema 16.33. Dado que ninguno de ellos es menor que 0.01, al nivel de significancia 0.01 no son significativos. Es decir, las puntuaciones no son diferentes de acuerdo con los distintos colores de pelo ni tampoco de acuerdo con las diferentes estaturas.

## Tests of Between-Subjects Effects

Variable dependiente: puntuación

| Origen           | Tipo III Suma de cuadrados | df | Cuadrado medio | F         | Sig. |
|------------------|----------------------------|----|----------------|-----------|------|
| Modelo corregido | 32.444 <sup>a</sup>        | 4  | 8.111          | 1.446     | .365 |
| Intersección     | 53 515.111                 | 1  | 53 515.111     | 9 537.347 | .000 |
| Pelo             | 10.889                     | 2  | 5.444          | .970      | .453 |
| Estatura         | 21.556                     | 2  | 10.778         | 1.921     | .260 |
| Error            | 22.444                     | 4  | 5.611          |           |      |
| Total            | 53 570.000                 | 9  |                |           |      |
| Total corregido  | 54.889                     | 8  |                |           |      |

<sup>a</sup>R cuadrada = .591 (R cuadrada ajustada = .182)

- 16.35** En los resultados de MINITAB se observa que al nivel de significancia 0.05 hay diferencias debidas a la ubicación, pero no hay diferencias debidas a los fertilizantes. La interacción es significativa al nivel 0.05.

## ANOVA: yield versus location, fertilizer

| Factor     | Type  | Levels | Values     |
|------------|-------|--------|------------|
| location   | fixed | 2      | 1, 2       |
| fertilizer | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |

## Analysis of Variance for yield

| Source              | DF | SS      | MS     | F     | P     |
|---------------------|----|---------|--------|-------|-------|
| location            | 1  | 81.225  | 81.225 | 12.26 | 0.001 |
| fertilizer          | 3  | 18.875  | 6.292  | 0.95  | 0.428 |
| location*fertilizer | 3  | 78.275  | 26.092 | 3.94  | 0.017 |
| Error               | 32 | 212.000 | 6.625  |       |       |
| Total               | 39 | 390.375 |        |       |       |

- 16.36** En los resultados de STATISTIX se observa que al nivel de significancia 0.01 hay diferencias debidas a la ubicación, pero no hay diferencias debidas a los fertilizantes. Al nivel 0.01 no hay una interacción significativa.

Statistix 8.0

**Analysis of Variance Table for yield**

| Source             | DF | SS      | MS      | F     | P      |
|--------------------|----|---------|---------|-------|--------|
| fertilize          | 3  | 18.875  | 6.2917  | 0.95  | 0.4283 |
| location           | 1  | 81.225  | 81.2250 | 12.26 | 0.0014 |
| fertilize*location | 3  | 78.275  | 26.0917 | 3.94  | 0.0169 |
| Error              | 32 | 212.000 | 6.6250  |       |        |
| Total              | 39 | 390.375 |         |       |        |

- 16.37 En los siguientes resultados de SAS, el valor  $p$  para las máquinas es 0.0664, el valor  $p$  para los operadores es 0.0004 y el valor  $p$  para la interacción es 0.8024. Al nivel de significancia 0.05, sólo los operadores son significativos.

| The GLM Procedure            |        |             |             |         |        |
|------------------------------|--------|-------------|-------------|---------|--------|
| Class Level Information      |        |             |             |         |        |
| Class                        | Levels | Values      |             |         |        |
| Operator                     | 4      | 1 2 3 4     |             |         |        |
| Machine                      | 2      | 1 2         |             |         |        |
| Number of Observations Read  |        |             | 40          |         |        |
| Number of Observations Used  |        |             | 40          |         |        |
| The GLM Procedure            |        |             |             |         |        |
| Dependent Variable: Articles |        |             |             |         |        |
| Sum of                       |        |             |             |         |        |
| Source                       | DF     | Squares     | Mean Square | F Value | Pr > F |
| Model                        | 7      | 154.8000000 | 22.1142857  | 4.08    | 0.0027 |
| Error                        | 32     | 173.6000000 | 5.4250000   |         |        |
| Corrected Tot                | 39     | 328.4000000 |             |         |        |
| Source                       | DF     | Type III SS | Mean Square | F Value | Pr > F |
| Machine                      | 1      | 19.6000000  | 19.6000000  | 3.61    | 0.0664 |
| Operator                     | 3      | 129.8000000 | 43.2666667  | 7.98    | 0.0004 |
| Operator*Machine             | 3      | 5.4000000   | 1.8000000   | 0.33    | 0.8024 |

Los siguientes resultados de MINITAB son iguales a los de SAS.

**ANOVA: Articles versus Machine, Operator**

| Factor   | Type  | Levels | Values     |
|----------|-------|--------|------------|
| Machine  | fixed | 2      | 1, 2       |
| Operator | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |

**Analysis of Variance for Articles**

| Source           | DF | SS      | MS     | F    | P     |
|------------------|----|---------|--------|------|-------|
| Machine          | 1  | 19.600  | 19.600 | 3.61 | 0.066 |
| Operator         | 3  | 129.800 | 43.267 | 7.98 | 0.000 |
| Machine*Operator | 3  | 5.400   | 1.800  | 0.33 | 0.802 |
| Error            | 32 | 173.600 | 5.425  |      |       |
| Total            | 39 | 328.400 |        |      |       |

- 16.38 En los siguientes resultados de STATISTIX, los valores  $p$  para variaciones del suelo en dos direcciones perpendiculares son 0.5658 y 0.3633 y el valor  $p$  para los tratamientos es 0.6802. Al nivel de significancia 0.01, ninguno de los tres es significativo.

Statistix 8.0

**Latin Square AOV Table for Yield**

| Source    | DF | SS      | MS      | F    | P      |
|-----------|----|---------|---------|------|--------|
| Row       | 3  | 17.500  | 5.8333  | 0.74 | 0.5658 |
| Column    | 3  | 30.500  | 10.1667 | 1.28 | 0.3633 |
| Treatment | 3  | 12.500  | 4.1667  | 0.53 | 0.6802 |
| Error     | 6  | 47.500  | 7.9167  |      |        |
| Total     | 15 | 108.000 |         |      |        |

- 16.39** Los siguientes resultados de MINITAB son iguales a los resultados de STATISTIX del problema 16.38. Ninguno de los factores es significativo al nivel 0.05.

**General Linear Model: Yield versus Row, Column, Treatment**

| Factor    | Type  | Levels | Values     |
|-----------|-------|--------|------------|
| Row       | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |
| Column    | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |
| Treatment | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |

**Analysis of Variance for yield, using Adjusted SS for Tests**

| Source    | DF | Seq SS  | Adj SS | Adj MS | F    | P     |
|-----------|----|---------|--------|--------|------|-------|
| Row       | 3  | 17.500  | 17.500 | 5.833  | 0.74 | 0.567 |
| Column    | 3  | 30.500  | 30.500 | 10.167 | 1.28 | 0.362 |
| Treatment | 3  | 12.500  | 12.500 | 4.167  | 0.53 | 0.680 |
| Error     | 6  | 47.500  | 47.500 | 7.917  |      |       |
| Total     | 15 | 108.000 |        |        |      |       |

- 16.40** En los resultados obtenidos con SPSS no se observa que al nivel de significancia 0.05 haya diferencia en los logros escolares debido al color de pelo, a la estatura o al lugar de nacimiento.

**Pruebas de efectos entre temas**

Variable dependiente: puntuación

| Origen           | Tipo III Suma de cuadrados | df | Cuadrado medio | F         | Sig. |
|------------------|----------------------------|----|----------------|-----------|------|
| Modelo corregido | 44.000 <sup>a</sup>        | 6  | 7.333          | 1.347     | .485 |
| Intersección     | 53 515.111                 | 1  | 53 515.11      | 9 829.306 | .000 |
| Pelo             | 10.889                     | 2  | 5.444          | 1.000     | .500 |
| Estatura         | 21.556                     | 2  | 10.778         | 1.980     | .336 |
| Por nacimiento   | 11.556                     | 2  | 5.778          | 1.061     | .485 |
| Error            | 10.889                     | 2  | 5.444          |           |      |
| Total            | 53 570.000                 | 9  |                |           |      |
| Total corregido  | 54.889                     | 8  |                |           |      |

<sup>a</sup>R cuadrada = .802 (R cuadrada ajustada = .206)

- 16.41** En el análisis de MINITAB se observa que hay diferencias significativas debidas a las especies de los pollitos y a las cantidades de la primera sustancia química, pero no debidas a las cantidades de la segunda sustancia química o al peso inicial de los pollitos. Obsérvese que para las especies el valor *p* es 0.009 y para la primera sustancia química el valor *p* es 0.032.

**General Linear Model: Wtgain versus Weight, Species, ...**

| Factor    | Type  | Levels | Values     |
|-----------|-------|--------|------------|
| Weight    | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |
| Species   | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |
| Chemical1 | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |
| Chemical2 | fixed | 4      | 1, 2, 3, 4 |

**Analysis of Variance for Wtgain, using Adjusted SS for Tests**

| Source    | DF | Seq SS  | Adj SS  | Adj MS  | F     | P     |
|-----------|----|---------|---------|---------|-------|-------|
| Weight    | 3  | 2.7500  | 2.7500  | 0.9167  | 2.20  | 0.267 |
| Species   | 3  | 38.2500 | 38.2500 | 12.7500 | 30.60 | 0.009 |
| Chemical1 | 3  | 16.2500 | 16.2500 | 5.4167  | 13.00 | 0.032 |
| Chemical2 | 3  | 7.2500  | 7.2500  | 2.4167  | 5.80  | 0.091 |
| Error     | 3  | 1.2500  | 1.2500  | 0.4167  |       |       |
| Total     | 15 | 65.7500 |         |         |       |       |

- 16.42** En SPSS al valor *p* se le llama *Sig.* Hay diferencias significativas en la resistencia del cable debidas al tipo de cable, pero no hay diferencias significativas debidas a los operadores, las máquinas o las empresas.

**Pruebas de efectos entre temas**

Variable dependiente: resistencia

| Origen           | Tipo III Suma de cuadrados | df | Cuadrado medio | F         | Sig. |
|------------------|----------------------------|----|----------------|-----------|------|
| Modelo corregido | 6 579.750 <sup>a</sup>     | 12 | 548.313        | 5.489     | .094 |
| Intersección     | 488 251.563                | 1  | 488 251.563    | 4 887.607 | .000 |
| Tipo             | 4 326.188                  | 3  | 1 442.063      | 14.436    | .027 |
| Empresa          | 2 066.188                  | 3  | 688.729        | 6.894     | .074 |
| Operador         | 120.688                    | 3  | 40.229         | .403      | .763 |
| Máquina          | 66.888                     | 3  | 22.229         | .223      | .876 |
| Error            | 299.688                    | 3  | 99.896         |           |      |
| Total            | 495 131.000                | 16 |                |           |      |
| Total corregido  | 6 879.438                  | 15 |                |           |      |

<sup>a</sup>R cuadrada = .956 (R cuadrada ajustada = .782)

- 16.43** Al nivel de significancia 0.05 hay diferencias significativas entre los tres tratamientos, pero al nivel de significancia 0.01, no. A continuación se presenta el análisis que se obtiene con EXCEL.

| A | B | C |
|---|---|---|
| 3 | 4 | 6 |
| 5 | 2 | 4 |
| 4 | 3 | 5 |
| 4 | 3 | 5 |

**Análisis de varianza de un factor****RESUMEN**

| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza |
|--------|--------|------|----------|----------|
| A      | 4      | 16   | 4        | 0.666667 |
| B      | 4      | 12   | 3        | 0.666667 |
| C      | 4      | 20   | 5        | 0.666667 |

## Análisis de varianza

| Origen de las variaciones | SS | df | MS       | F | Valor p  |
|---------------------------|----|----|----------|---|----------|
| Entre grupos              | 8  | 2  | 4        | 6 | 0.022085 |
| Dentro de los grupos      | 6  | 9  | 0.666667 |   |          |
| Total                     | 14 | 11 |          |   |          |

- 16.44 El valor *p* que da MINITAB es 0.700. Entre los CI no hay diferencia debido a las estaturas.

**One-way ANOVA: Tall, Short, Medium**

| Source | DF | SS    | MS   | F    | P     |
|--------|----|-------|------|------|-------|
| Factor | 2  | 55.8  | 27.9 | 0.37 | 0.700 |
| Error  | 12 | 911.5 | 76.0 |      |       |
| Total  | 14 | 967.3 |      |      |       |

S = 8.715 R-Sq = 5.77% R-Sq(adj) = 0.00%

| Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev |   |        |       |                                     |               |               |       |
|---|---|--------|-------|-------------------------------------|---------------|---------------|-------|
| Level   | N | Mean   | StDev | -----+-----+-----+-----+-----+----- | (-----*-----) | (-----*-----) |       |
| Tall  | 5 | 107.00 | 10.58 | (-----*-----)                       |               |               |       |
| Short   | 4 | 105.00 | 8.33  | (-----*-----)                       |               |               |       |
| Medium  | 6 | 102.50 | 7.15  | (-----*-----)                       |               |               |       |
|   |   |        |       | 96.0                                | 102.0         | 108.0         | 114.0 |

- 16.46 En los resultados de SPSS, al valor *p* se le llama *Sig.* Al nivel de significancia 0.05, existe una diferencia significativa en las puntuaciones de examen, debida tanto a ser o no veterano como al CI.

**Pruebas de efectos entre temas**

Variable dependiente: puntuación

| Origen           | Tipo III Suma de cuadrados | df | Cuadrado medio | F          | Sig. |
|------------------|----------------------------|----|----------------|------------|------|
| Modelo corregido | 264.333 <sup>a</sup>       | 3  | 88.111         | 176.222    | .006 |
| Intersección     | 38 080.667                 | 1  | 38 080.667     | 76 161.333 | .000 |
| Veterano         | 24.000                     | 1  | 24.000         | 48.000     | .020 |
| CI               | 240.333                    | 2  | 120.167        | 240.333    | .004 |
| Error            | 1.000                      | 2  | .500           |            |      |
| Total            | 38 346.000                 | 6  |                |            |      |
| Total corregido  | 265.333                    | 5  |                |            |      |

<sup>a</sup>R cuadrada = .996 (R cuadrada ajustada = .991)

- 16.47 En el análisis de STATISTIX se encuentra que al nivel de significancia 0.01 las diferencias en las puntuaciones de examen debidas a ser o no veterano no son significativas, pero las diferencias debidas al CI sí son significativas.

Statistix 8.0

**Randomized Complete Block AOV Table for Score**

| Source  | DF | SS      | MS      | F      | P      |
|---------|----|---------|---------|--------|--------|
| Veteran | 1  | 24.000  | 24.000  | 48.00  | 0.020  |
| IQ      | 2  | 240.333 | 120.167 | 240.33 | 0.0041 |

|       |   |         |       |
|-------|---|---------|-------|
| Error | 2 | 1.000   | 0.500 |
| Total | 5 | 265.333 |       |

- 16.48** En el análisis de MINITAB se observa que al nivel de significancia 0.05 las diferencias en las puntuaciones de examen debidas a la ubicación no son significativas, pero las diferencias debidas al CI, sí.

#### Two-way ANOVA: Testscore versus Location, IQ

| Source   | DF | SS      | MS      | F    | P     |
|----------|----|---------|---------|------|-------|
| Location | 3  | 6.250   | 2.083   | 0.12 | 0.943 |
| IQ       | 2  | 221.167 | 110.583 | 6.54 | 0.031 |
| Error    | 6  | 101.500 | 16.917  |      |       |
| Total    | 11 | 328.917 |         |      |       |

- 16.49** En el análisis de SAS se observa que al nivel de significancia 0.01 las diferencias en las puntuaciones de examen debidas a la ubicación no son significativas, pero las diferencias debidas al CI, sí. Recuerde que el valor *p* se escribe Pr > F.

```
The GLM Procedure
Class Level Information
Class      Levels      Values
Location        4          1 2 3 4
IQ              3          1 2 3
Number of Observations Read           12
Number of Observations Used          12

The GLM Procedure
Source      DF      Type III SS      Mean Square      F Value      Pr>F
Location      3       6.2500000      2.0833333      0.12      0.9430
IQ            2      221.1666667      110.5833333      6.54      0.0311
```

- 16.53** En el análisis de MINITAB se observa que debido a la ubicación, las cantidades de óxido no son significativas al nivel de significancia 0.05. No hay interacción significativa entre ubicación y sustancias químicas.

#### ANOVA: rust versus location, chemical

| Factor   | Type  | Levels | Values  |
|----------|-------|--------|---------|
| location | fixed | 2      | 1, 2    |
| chemical | fixed | 3      | 1, 2, 3 |

#### Analysis of Variance for rust

| Source            | DF | SS     | MS     | F     | P     |
|-------------------|----|--------|--------|-------|-------|
| location          | 1  | 0.667  | 0.667  | 0.67  | 0.425 |
| chemical          | 2  | 20.333 | 10.167 | 10.17 | 0.001 |
| location*chemical | 2  | 0.333  | 0.167  | 0.17  | 0.848 |
| Error             | 18 | 18.000 | 1.000  |       |       |
| Total             | 23 | 39.333 |        |       |       |

- 16.54** En el análisis de STATISTIX se observa que al nivel de significancia 0.05, las diferencias en el rendimiento debidas a la ubicación son significativas, pero las diferencias debidas a las variedades no son significativas. No hay interacción significativa entre la ubicación y las variedades.

Statistix 8.0

**Analysis of Variance Table for Yield**

| <b>Source</b>    | <b>DF</b> | <b>SS</b> | <b>MS</b> | <b>F</b> | <b>P</b> |
|------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| Variety          | 4         | 35.333    | 8.8333    | 1.07     | 0.3822   |
| location         | 2         | 191.433   | 95.7167   | 11.60    | 0.0001   |
| Variety*location | 8         | 82.567    | 10.3208   | 1.25     | 0.2928   |
| Error            | 45        | 371.250   | 8.2500    |          |          |
| Total            | 59        | 680.583   |           |          |          |

- 16.55** En el análisis de MINITAB se observa que al nivel de significancia 0.01, las diferencias en el rendimiento debidas a la ubicación son significativas, pero las diferencias debidas a las variedades no son significativas. No hay interacción significativa entre la ubicación y las variedades.

**General Linear Model: Yield versus location, Variety**

| Factor   | Type  | Levels | Values        |
|----------|-------|--------|---------------|
| location | fixed | 3      | 1, 2, 3       |
| variety  | fixed | 5      | 1, 2, 3, 4, 5 |

**Analysis of Variance for Yield, using Adjusted SS for Tests**

| Source           | DF | Seq SS  | Adj SS  | Adj MS | F     | P     |
|------------------|----|---------|---------|--------|-------|-------|
| location         | 2  | 191.433 | 191.433 | 95.717 | 11.60 | 0.000 |
| Variety          | 4  | 35.333  | 35.333  | 8.833  | 1.07  | 0.382 |
| location*Variety | 8  | 82.567  | 82.567  | 10.321 | 1.25  | 0.293 |
| Error            | 45 | 371.250 | 371.250 | 8.250  |       |       |
| Total            | 59 | 680.583 |         |        |       |       |

- 16.56** Observando la ANOVA de SPSS y teniendo en cuenta que *Sig.* en SPSS es lo mismo que valor *p*, se ve que, al nivel 0.05, el factor 1, el factor 2 y el tratamiento (treatment) no tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta, ya que el valor *p* de los tres es mayor que 0.05.

**Pruebas de efectos entre temas**

Variable dependiente: respuesta

| Origen           | Tipo III Suma de cuadrados | df | Cuadrado medio | F         | Sig. |
|------------------|----------------------------|----|----------------|-----------|------|
| Modelo corregido | 92.667 <sup>a</sup>        | 6  | 15.444         | 7.316     | .125 |
| Intersección     | 2 567.111                  | 1  | 2 567.111      | 1 216.000 | .001 |
| Factor1          | 74.889                     | 2  | 37.444         | 17.737    | .053 |
| Factor2          | 17.556                     | 2  | 8.778          | 4.158     | .194 |
| Tratamiento      | .222                       | 2  | .111           | .053      | .950 |
| Error            | 4.222                      | 2  | 2.111          |           |      |
| Total            | 2 664.000                  | 9  |                |           |      |
| Total corregido  | 96.889                     | 8  |                |           |      |

<sup>a</sup>R cuadrada = .956 (R cuadrada ajustada = .826)

- 16.58** Observando la ANOVA de SPSS y teniendo en cuenta que *Sig.* en SPSS es lo mismo que valor *p*, se ve que al nivel 0.05 el Factor 1, el Factor 2, el tratamiento latino (latin treatment) y el tratamiento griego (greek treatment) no tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta, ya que el valor *p* de los cuatro es mayor que 0.05.

#### Pruebas de efectos entre temas

Variable dependiente: respuesta

| Origen           | Tipo III Suma de cuadrados | df | Cuadrado medio | F      | Sig. |
|------------------|----------------------------|----|----------------|--------|------|
| Modelo corregido | 362.750 <sup>a</sup>       | 12 | 30.229         | .924   | .607 |
| Intersección     | 1 914.063                  | 1  | 1 914.063      | 58.482 | .005 |
| Factor1          | 5.188                      | 3  | 1.729          | .053   | .981 |
| Factor2          | 15.188                     | 3  | 5.063          | .155   | .920 |
| Latino           | 108.188                    | 3  | 36.063         | 1.102  | .469 |
| Griego           | 234.188                    | 3  | 78.063         | 2.385  | .247 |
| Error            | 98.188                     | 3  | 32.729         |        |      |
| Total            | 2 375.000                  | 16 |                |        |      |
| Total corregido  | 460.938                    | 15 |                |        |      |

<sup>a</sup>R cuadrada = .787 (R cuadrada ajustada = .065)

## CAPÍTULO 17

- 17.26** Con la alternativa de dos colas, el valor *p* es 0.0352. Al nivel de significancia 0.05 hay diferencia debida al aditivo, pero al nivel 0.01, no. El valor *p* se obtiene usando la distribución binomial y no la aproximación normal a la binomial.
- 17.27** Con la alternativa de una cola, el valor *p* es 0.0176. Como el valor *p* es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula de que no hay diferencia debida al aditivo.
- 17.28** Empleando EXCEL, el valor *p* se obtiene con =1-BINOMDIST(24, 31, 0.5, 1) que da 0.00044. El programa es efectivo al nivel de significancia 0.05.
- 17.29** Empleando EXCEL, el valor *p* se obtiene con =1-BINOMDIST(15, 22, 0.5, 1), que da 0.0262. El programa es efectivo al nivel de significancia 0.05.
- 17.30** Empleando EXCEL, el valor *p* se obtiene con =1-BINOMDIST(16, 25, 0.5, 1), que da 0.0539. Al nivel de significancia 0.05 no se puede concluir que la marca *B* se prefiera a la marca *A*.

|    | BS = 25 | BS = 30 | BS = 35 | BS = 40 |
|----|---------|---------|---------|---------|
| 41 | 16      | 11      | 6       | 1       |
| 37 | 12      | 7       | 2       | -3      |
| 25 | 0       | -5      | -10     | -15     |
| 43 | 18      | 13      | 8       | 3       |
| 42 | 17      | 12      | 7       | 2       |
| 28 | 3       | -2      | -7      | -12     |
| 32 | 7       | 2       | -3      | -8      |
| 36 | 11      | 6       | 1       | -4      |
| 27 | 2       | -3      | -8      | -13     |
| 33 | 8       | 3       | -2      | -7      |

|             |                               |    |                    |     |
|-------------|-------------------------------|----|--------------------|-----|
| 35          | 10                            | 5  | 0                  | -5  |
| 24          | -1                            | -6 | -11                | -16 |
| 22          | -3                            | -8 | -13                | -18 |
| 34          | 9                             | 4  | -1                 | -6  |
| 28          | 3                             | -2 | -7                 | -12 |
| 38          | 13                            | 8  | 3                  | -2  |
| 46          | 21                            | 16 | 11                 | 6   |
| 41          | 16                            | 11 | 6                  | 1   |
| 27          | 2                             | -3 | -8                 | -13 |
| 31          | 6                             | 1  | -4                 | -9  |
| 23          | -2                            | -7 | -12                | -17 |
| 30          | 5                             | 0  | -5                 | -10 |
| 37          | 12                            | 7  | 2                  | -3  |
| 36          | 11                            | 6  | 1                  | -4  |
| 24          | -1                            | -6 | -11                | -16 |
|             |                               |    |                    |     |
| 0.00154388  | 2 * BINOMDIST(4, 24, 0.5, 1)  |    | Reject null        |     |
| 0.307456255 | 2 * BINOMDIST(9, 24, 0.5, 1)  |    | Do not reject null |     |
| 0.541256189 | 2 * BINOMDIST(10, 24, 0.5, 1) |    | Do not reject null |     |
| 0.004077315 | 2 * BINOMDIST(5, 25, 0.5, 1)  |    | Reject null        |     |

- 17.34** La suma de los rangos de la muestra menor = 141.5 y la suma de los rangos de la muestra mayor = 158.5. El valor  $p$  para dos colas = 0.3488. Al nivel de significancia 0.05 no se rechaza la hipótesis nula de no diferencia, pues el valor  $p > 0.05$ .
- 17.35** En el problema 17.34, al nivel 0.01 no se puede rechazar la hipótesis nula en la prueba de una cola.
- 17.36** La suma de los rangos de la muestra menor = 132.5 y la suma de los rangos de la muestra mayor = 77.5. Para dos colas el valor  $p = 0.0044$ . La hipótesis nula de no diferencia se rechaza tanto a nivel 0.01 como a nivel 0.05, ya que el valor  $p < 0.05$ .
- 17.37** Al nivel de significancia 0.05, el agricultor del problema 17.36 puede concluir que el trigo II da mayor rendimiento que el trigo I.
- 17.38** Para la marca A, la suma de los rangos = 86.0 y para la marca B, la suma de los rangos = 124.0. Para dos colas el valor  $p = 0.1620$ . *a)* Al nivel de significancia 0.05, no se rechaza la hipótesis nula de no diferencia entre las dos marcas *versus* hay diferencia, ya que el valor  $p > 0.05$ . *b)* Al nivel de significancia 0.05 no se puede concluir que la marca B sea mejor que la marca A, ya que para una cola valor  $p$  (0.081)  $> 0.05$ .
- 17.39** Sí, se puede emplear tanto la prueba  $U$  como la prueba de los signos para determinar si hay diferencia entre las dos máquinas.
- 17.41** 3.
- 17.42** 6.
- 17.46** *a)* 246; *b)* 168; *c)* 0.
- 17.47** *a)* 236; *b)* 115; *c)* 100.
- 17.49**  $H = 2.59$ ,  $DF = 4$ ,  $P = 0.629$ . A los niveles de significancia 0.05 y 0.01, no hay diferencia entre los rendimientos de las cinco variedades, ya que el valor  $p$  es mayor que 0.01 y que 0.05.
- 17.50**  $H = 8.42$ ,  $DF = 3$ ,  $P = 0.038$ . Al nivel de significancia 0.05 sí hay diferencia entre las cuatro marcas de neumáticos, pero no al nivel de significancia 0.01, ya que  $0.01 < \text{valor } p < 0.05$ .

**17.51**  $H = 6.54$ ,  $DF = 2$ ,  $P = 0.038$ . Al nivel de significancia 0.05 sí hay diferencia entre los tres métodos de enseñanza, pero no al nivel de significancia 0.01, ya que  $0.01 < \text{valor } p < 0.05$ .

**17.52**  $H = 9.22$ ,  $DF = 3$ ,  $P = 0.026$ . Al nivel de significancia 0.05 hay diferencia significativa entre las cuatro materias, pero no al nivel de significancia 0.01, ya que  $0.01 < \text{valor } p < 0.05$ .

- 17.53** a)  $H = 7.88$ ,  $DF = 8$ ,  $P = 0.446$ . A los niveles de significancia 0.01 y 0.05 no hay diferencia significativa entre las duraciones de los tres cinescopios, ya que el valor  $p > 0.01$  y 0.05.  
 b)  $H = 2.59$ ,  $DF = 4$ ,  $P = 0.629$ . A los niveles de significancia 0.01 y 0.05 no hay diferencia significativa entre las cinco variedades de trigo, ya que el valor  $p > 0.01$  y 0.05.  
 c)  $H = 5.70$ ,  $DF = 3$ ,  $P = 0.127$ . A los niveles de significancia 0.01 y 0.05 no hay diferencia significativa entre las cuatro marcas de neumáticos, ya que el valor  $p > 0.01$  y  $> 0.05$ .

- 17.54** a)  $H = 5.65$ ,  $DF = 2$ ,  $P = 0.059$ . A los niveles de significancia 0.01 y 0.05 no hay diferencia entre los tres métodos de enseñanza, ya que el valor  $p > 0.01$  y  $> 0.05$ .  
 b)  $H = 10.25$ ,  $DF = 4$ ,  $P = 0.036$ . Al nivel de significancia 0.05 hay diferencia entre las cinco marcas de gasolina, pero no al nivel 0.01, ya que  $0.01 < \text{valor } p < 0.05$ .  
 c)  $H = 9.22$ ,  $DF = 3$ ,  $P = 0.026$ . Al nivel de significancia 0.05 hay diferencia entre las cuatro materias, pero no al nivel 0.01, ya que  $0.01 < \text{valor } p < 0.05$ .

**17.55** a) 8; b) 10.

**17.56** a) El número de rachas es  $V = 10$ .

b) La prueba de aleatoriedad está basada en la distribución normal estándar. La media es

$$\mu_V = \frac{2N_1 N_2}{N_1 + N_2} + 1 = \frac{2(11)(14)}{25} + 1 = 13.32$$

y la desviación estándar es

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{2(11)(14)\{2(11)(14) - 11 - 14\}}{25^2(24)}} = 2.41$$

La  $Z$  encontrada es

$$Z = \frac{10 - 13.32}{2.41} = -1.38$$

Empleando EXCEL, el valor  $p$  es  $=2*\text{NORMSDIST}(-1.38)$  que es 0.1676. Dado que el valor  $p$  es grande, no se duda de la aleatoriedad.

- 17.57** a) Aun cuando el número de corridas es menor que lo esperado, el valor  $p$  no es menor que 0.05. No se rechaza la aleatoriedad de la secuencia (10).

#### Prueba de corridas: moneda

```
Runs test for coin
Runs above and below K = 0.4
The observed number of runs = 7
The expected number of runs = 10.6
8 observations above K, 12 below
* N is small, so the following approximation may be invalid.
P-value = 0.084
```

b) El número de rachas es mayor que lo esperado. Se rechaza la aleatoriedad de la secuencia (11).

#### Prueba de corridas: moneda

```
Runs test for coin
Runs above and below K = 0.5
```

The observed number of runs = 12

The expected number of runs = 7

6 observations above K, 6 below

\* N is small, so the following approximation may be invalid.

P-value = 0.002

**17.58 a)**

| Sequence |   |   | Runs |
|----------|---|---|------|
| a        | a | b | 2    |
| a        | b | a | 3    |
| b        | a | a | 2    |

**b)**

Sampling distribution

| V | f |
|---|---|
| 2 | 2 |
| 3 | 1 |

**c)**

Probability distribution

| V | Pr{V} |
|---|-------|
| 2 | 0.667 |
| 3 | 0.333 |

**17.59** Media = 2.333      Varianza = 0.222

**17.60 a)**

| Sequence |   |   | Runs |
|----------|---|---|------|
| a        | a | b | 2    |
| a        | b | a | 4    |
| a        | b | b | a    |
| b        | b | a | a    |
| b        | a | b | a    |
| b        | a | a | b    |

Sampling distribution

| V | f |
|---|---|
| 2 | 2 |
| 3 | 2 |
| 4 | 2 |

Probability distribution

| V | Pr{V} |
|---|-------|
| 2 | 0.333 |
| 3 | 0.333 |
| 4 | 0.333 |

Mean V                    3  
 Variance V    0.667

**b)**

| Sequence |   |   | Runs |
|----------|---|---|------|
| a        | b | b | 2    |
| b        | a | b | 3    |

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| b | b | a | b | 3 |
| b | b | b | a | 3 |

Sampling distribution

|   |   |
|---|---|
| V | f |
| 2 | 1 |
| 3 | 3 |

Probability distribution

|   |            |
|---|------------|
| V | $\Pr\{V\}$ |
| 2 | 0.25       |
| 3 | 0.75       |

Mean  $V$  2.75Variance  $V$  0.188

c)

| Sequence |   |   |   |   | Runs |
|----------|---|---|---|---|------|
| a        | b | b | b | b | 2    |
| b        | a | b | b | b | 3    |
| b        | b | a | b | b | 3    |
| b        | b | b | a | b | 3    |
| b        | b | b | b | a | 2    |

Sampling distribution

|   |   |
|---|---|
| V | f |
| 2 | 2 |
| 3 | 3 |

Probability distribution

|   |            |
|---|------------|
| V | $\Pr\{V\}$ |
| 2 | 0.4        |
| 3 | 0.6        |

Mean  $V$  2.6Variance  $V$  0.24

17.61 a)

| Sequence |   |   |   |   | Runs |   |
|----------|---|---|---|---|------|---|
| a        | a | b | b | b | 2    |   |
| a        | b | a | b | b | 4    |   |
| a        | b | b | a | b | 4    |   |
| a        | b | b | b | a | 4    |   |
| a        | b | b | b | b | a    | 3 |
| b        | a | a | b | b | b    | 3 |
| b        | a | b | a | b | b    | 5 |
| b        | a | b | b | a | b    | 5 |
| b        | a | b | b | b | a    | 4 |
| b        | b | a | a | b | b    | 3 |
| b        | b | a | b | a | b    | 5 |
| b        | b | a | b | b | a    | 4 |
| b        | b | b | b | a | a    | 2 |
| b        | b | b | a | b | a    | 4 |
| b        | b | b | a | a | b    | 3 |

b)  
Sampling distribution

| V | f |
|---|---|
| 2 | 2 |
| 3 | 4 |
| 4 | 6 |
| 5 | 3 |

c)  
Probability distribution

| V | Pr{V} |
|---|-------|
| 2 | 0.133 |
| 3 | 0.267 |
| 4 | 0.4   |
| 5 | 0.2   |

Mean V      3.667  
 Variance V    0.888

- 17.62** Supóngase que los renglones se leen uno por uno. Es decir, primero el renglón 1, luego el renglón 2, luego el renglón 3 y finalmente el renglón 4.

#### Prueba de corridas: Calificaciones

Runs test for Grade  
 Runs above and below K = 69  
 The observed number of runs = 26  
 The expected number of runs = 20.95  
 21 observations above K, 19 below  
 P-value = 0.105

Al nivel de significancia 0.05 puede suponerse que las calificaciones se registraron en forma aleatoria.

- 17.63** Supóngase que los datos se registraron renglón por renglón.

Runs test for price  
 Runs above and below K = 11.36  
 The observed number of runs = 10  
 The expected number of runs = 13.32  
 14 observations above K, 11 below  
 P-value = 0.168

Al nivel de significancia 0.05 puede suponerse que los precios son aleatorios.

- 17.64** En los dígitos después del punto decimal, considérese que 0 representa a un dígito par y 1 representa un dígito non.

Runs test for digit  
 Runs above and below K = 0.473684  
 The observed number of runs = 9  
 The expected number of runs = 10.4737  
 9 observations above K, 10 below  
 \* N is small, so the following approximation may be invalid.  
 P-value = 0.485

Al nivel de significancia 0.05 puede suponerse que los dígitos son aleatorios.

- 17.65** Al nivel de significancia 0.05 puede suponerse que los dígitos son aleatorios.

- 17.66** Usando la aproximación normal, el valor calculado para  $Z$  es  $-1.62$ . Empleando EXCEL, el valor  $p$  calculado es  $=2*\text{NORMSDIST}(-1.62)$  que es  $0.105$ .
- 17.67** Usando la aproximación normal, el valor calculado para  $Z$  es  $-1.38$ . Empleando EXCEL, el valor  $p$  calculado es  $=2*\text{NORMSDIST}(-1.38)$  que es  $0.168$ .
- 17.68** Usando la aproximación normal, el valor calculado para  $Z$  es  $-0.70$ . Empleando EXCEL, el valor  $p$  calculado es  $=2*\text{NORMSDIST}(-0.70)$  que es  $0.484$ .
- 17.70** Correlación de rangos de Spearman =  $1.0$  y coeficiente de correlación de Pearson =  $0.998$ .

## CAPÍTULO 18

- 18.16** Medias de los subgrupos: 13.25 14.50 17.25 14.50 13.50 14.75 13.75 15.00 15.00 17.00  
 Rangos de los subgrupos: 5 9 5 6 8 9 10 5 5 7  
 $\bar{X} = 14.85$ ,  $\bar{R} = 6.9$ .
- 18.17** La estimación conjunta de  $\sigma$  es  $1.741$ . LCL =  $450.7$ , UCL =  $455.9$ . Ninguna de las medias de los subgrupos está fuera de los límites de control.
- 18.18** No.
- 18.19** La gráfica indica que ha disminuido la variabilidad. Los nuevos límites de control son LCL =  $452.9$  y UCL =  $455.2$ . Después de la modificación, también parece que el proceso se ha centrado más próximo al valor objetivo.
- 18.20** Los límites de control son LCL =  $1.980$  y UCL =  $2.017$ . Los períodos 4, 5 y 6 no satisfacen la prueba 5. Los períodos 15 a 20 no satisfacen la prueba 4. Cada uno de estos puntos es el último de 14 puntos consecutivos alternantes hacia arriba y hacia abajo.
- 18.21**  $C_{PK} = 0.63$ . ppm de no conformes =  $32\ 487$ .
- 18.22**  $C_{PK} = 1.72$ . ppm de no conformes = menos de 1.
- 18.23** Línea central =  $0.006133$ , LCL = 0, UCL =  $0.01661$ . El proceso está bajo control. ppm =  $6\ 133$ .
- 18.24** Línea central =  $3.067$ , LCL = 0, UCL =  $8.304$ .
- 18.25** 0.032 0.027 0.032 0.024 0.024 0.027 0.032 0.032 0.027 0.024 0.032 0.024  
 0.027 0.024 0.027 0.024 0.027 0.027 0.027 0.027
- 18.26** Línea central =  $\bar{X} = 349.9$ .  
 Rangos móviles: 0.0 0.2 0.6 0.8 0.4 0.3 0.1 0.4 0.4 0.9 0.2 1.1 0.5 1.5 2.8 1.6 0.3 0.1 1.2 1.9 0.2  
 1.2 0.9  
 Media de los anteriores rangos móviles =  $\bar{R}_M = 0.765$ .  
 Límites de control de la gráfica de mediciones individuales  $\bar{X} \pm 3(\bar{R}_M/d_2)$ .  $d_2$  es una constante de la gráfica de mediciones individuales que se obtiene de tablas de diversas fuentes y que en este caso es igual a  $1.128$ . LCL =  $347.9$  y UCL =  $352.0$ .
- 18.27** La gráfica EWMA indica que las medias del proceso se encuentran constantemente abajo del valor objetivo. Las medias de los subgrupos 12 y 13 caen abajo de los límites de control inferior. Las medias de los grupos después del 13 están arriba de los límites inferiores de control; pero la media del proceso sigue estando abajo del valor objetivo.
- 18.28** La gráfica de zonas no indica que haya alguna situación fuera de control. Sin embargo, como se ve en el problema 18.20, hay 14 puntos consecutivos alternando hacia arriba y hacia abajo. Dada la manera en que funciona una gráfica de zonas, ésta no indica esta situación.

**18.29** Los 20 límites de control inferiores son: 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.38 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.38 0.00 0.00 0.38 0.00 0.38.

Los 20 límites de control superiores son: 9.52 9.52 9.52 9.52 9.52 7.82 8.46 7.07 7.82 8.46 9.52 9.52 9.52 7.07 9.52 9.52 7.07 9.52 7.07 7.07.

**18.30** Decoloración; decoloración y pérdida del tirante.

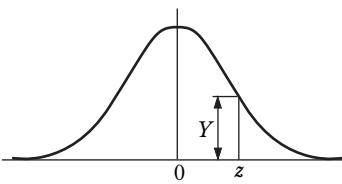


# APÉNDICES



## Apéndice I

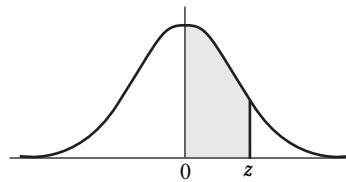
**Ordenadas ( $Y$ )  
en  $z$ ,  
en la curva  
normal  
estándar**



| $z$ | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.0 | .3989 | .3989 | .3989 | .3988 | .3986 | .3984 | .3982 | .3980 | .3977 | .3973 |
| 0.1 | .3970 | .3965 | .3961 | .3956 | .3951 | .3945 | .3939 | .3932 | .3925 | .3918 |
| 0.2 | .3910 | .3902 | .3894 | .3885 | .3876 | .3867 | .3857 | .3847 | .3836 | .3825 |
| 0.3 | .3814 | .3802 | .3790 | .3778 | .3765 | .3752 | .3739 | .3725 | .3712 | .3697 |
| 0.4 | .3683 | .3668 | .3653 | .3637 | .3621 | .3605 | .3589 | .3572 | .3555 | .3538 |
| 0.5 | .3521 | .3503 | .3485 | .3467 | .3448 | .3429 | .3410 | .3391 | .3372 | .3352 |
| 0.6 | .3332 | .3312 | .3292 | .3271 | .3251 | .3230 | .3209 | .3187 | .3166 | .3144 |
| 0.7 | .3123 | .3101 | .3079 | .3056 | .3034 | .3011 | .2989 | .2966 | .2943 | .2920 |
| 0.8 | .2897 | .2874 | .2850 | .2827 | .2803 | .2780 | .2756 | .2732 | .2709 | .2685 |
| 0.9 | .2661 | .2637 | .2613 | .2589 | .2565 | .2541 | .2516 | .2492 | .2468 | .2444 |
| 1.0 | .2420 | .2396 | .2371 | .2347 | .2323 | .2299 | .2275 | .2251 | .2227 | .2203 |
| 1.1 | .2179 | .2155 | .2131 | .2107 | .2083 | .2059 | .2036 | .2012 | .1989 | .1965 |
| 1.2 | .1942 | .1919 | .1895 | .1872 | .1849 | .1826 | .1804 | .1781 | .1758 | .1736 |
| 1.3 | .1714 | .1691 | .1669 | .1647 | .1626 | .1604 | .1582 | .1561 | .1539 | .1518 |
| 1.4 | .1497 | .1476 | .1456 | .1435 | .1415 | .1394 | .1374 | .1354 | .1334 | .1315 |
| 1.5 | .1295 | .1276 | .1257 | .1238 | .1219 | .1200 | .1182 | .1163 | .1145 | .1127 |
| 1.6 | .1109 | .1092 | .1074 | .1057 | .1040 | .1023 | .1006 | .0989 | .0973 | .0957 |
| 1.7 | .0940 | .0925 | .0909 | .0893 | .0878 | .0863 | .0848 | .0833 | .0818 | .0804 |
| 1.8 | .0790 | .0775 | .0761 | .0748 | .0734 | .0721 | .0707 | .0694 | .0681 | .0669 |
| 1.9 | .0656 | .0644 | .0632 | .0620 | .0608 | .0596 | .0584 | .0573 | .0562 | .0551 |
| 2.0 | .0540 | .0529 | .0519 | .0508 | .0498 | .0488 | .0478 | .0468 | .0459 | .0449 |
| 2.1 | .0440 | .0431 | .0422 | .0413 | .0404 | .0396 | .0387 | .0379 | .0371 | .0363 |
| 2.2 | .0355 | .0347 | .0339 | .0332 | .0325 | .0317 | .0310 | .0303 | .0297 | .0290 |
| 2.3 | .0283 | .0277 | .0270 | .0264 | .0258 | .0252 | .0246 | .0241 | .0235 | .0229 |
| 2.4 | .0224 | .0219 | .0213 | .0208 | .0203 | .0198 | .0194 | .0189 | .0184 | .0180 |
| 2.5 | .0175 | .0171 | .0167 | .0163 | .0158 | .0154 | .0151 | .0147 | .0143 | .0139 |
| 2.6 | .0136 | .0132 | .0129 | .0126 | .0122 | .0119 | .0116 | .0113 | .0110 | .0107 |
| 2.7 | .0104 | .0101 | .0099 | .0096 | .0093 | .0091 | .0088 | .0086 | .0084 | .0081 |
| 2.8 | .0079 | .0077 | .0075 | .0073 | .0071 | .0069 | .0067 | .0065 | .0063 | .0061 |
| 2.9 | .0060 | .0058 | .0056 | .0055 | .0053 | .0051 | .0050 | .0048 | .0047 | .0046 |
| 3.0 | .0044 | .0043 | .0042 | .0040 | .0039 | .0038 | .0037 | .0036 | .0035 | .0034 |
| 3.1 | .0033 | .0032 | .0031 | .0030 | .0029 | .0028 | .0027 | .0026 | .0025 | .0025 |
| 3.2 | .0024 | .0023 | .0022 | .0022 | .0021 | .0020 | .0020 | .0019 | .0018 | .0018 |
| 3.3 | .0017 | .0017 | .0016 | .0016 | .0015 | .0015 | .0014 | .0014 | .0013 | .0013 |
| 3.4 | .0012 | .0012 | .0012 | .0011 | .0011 | .0010 | .0010 | .0010 | .0009 | .0009 |
| 3.5 | .0009 | .0008 | .0008 | .0008 | .0008 | .0007 | .0007 | .0007 | .0007 | .0006 |
| 3.6 | .0006 | .0006 | .0006 | .0005 | .0005 | .0005 | .0005 | .0005 | .0005 | .0004 |
| 3.7 | .0004 | .0004 | .0004 | .0004 | .0004 | .0004 | .0003 | .0003 | .0003 | .0003 |
| 3.8 | .0003 | .0003 | .0003 | .0003 | .0003 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 |
| 3.9 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 | .0001 | .0001 |

## Apéndice II

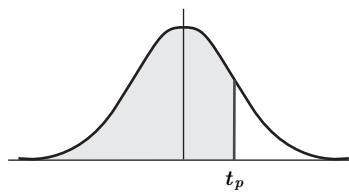
**Áreas bajo  
la curva  
normal estándar,  
desde 0  
hasta  $z$**



| $z$ | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.0 | .0000 | .0040 | .0080 | .0120 | .0160 | .0199 | .0239 | .0279 | .0319 | .0359 |
| 0.1 | .0398 | .0438 | .0478 | .0517 | .0557 | .0596 | .0636 | .0675 | .0714 | .0754 |
| 0.2 | .0793 | .0832 | .0871 | .0910 | .0948 | .0987 | .1026 | .1064 | .1103 | .1141 |
| 0.3 | .1179 | .1217 | .1255 | .1293 | .1331 | .1368 | .1406 | .1443 | .1480 | .1517 |
| 0.4 | .1554 | .1591 | .1628 | .1664 | .1700 | .1736 | .1772 | .1808 | .1844 | .1879 |
| 0.5 | .1915 | .1950 | .1985 | .2019 | .2054 | .2088 | .2123 | .2157 | .2190 | .2224 |
| 0.6 | .2258 | .2291 | .2324 | .2357 | .2389 | .2422 | .2454 | .2486 | .2518 | .2549 |
| 0.7 | .2580 | .2612 | .2642 | .2673 | .2704 | .2734 | .2764 | .2794 | .2823 | .2852 |
| 0.8 | .2881 | .2910 | .2939 | .2967 | .2996 | .3023 | .3051 | .3078 | .3106 | .3133 |
| 0.9 | .3159 | .3186 | .3212 | .3238 | .3264 | .3289 | .3315 | .3340 | .3365 | .3389 |
| 1.0 | .3413 | .3438 | .3461 | .3485 | .3508 | .3531 | .3554 | .3577 | .3599 | .3621 |
| 1.1 | .3643 | .3665 | .3686 | .3708 | .3729 | .3749 | .3770 | .3790 | .3810 | .3830 |
| 1.2 | .3849 | .3869 | .3888 | .3907 | .3925 | .3944 | .3962 | .3980 | .3997 | .4015 |
| 1.3 | .4032 | .4049 | .4066 | .4082 | .4099 | .4115 | .4131 | .4147 | .4162 | .4177 |
| 1.4 | .4192 | .4207 | .4222 | .4236 | .4251 | .4265 | .4279 | .4292 | .4306 | .4319 |
| 1.5 | .4332 | .4345 | .4357 | .4370 | .4382 | .4394 | .4406 | .4418 | .4429 | .4441 |
| 1.6 | .4452 | .4463 | .4474 | .4484 | .4495 | .4505 | .4515 | .4525 | .4535 | .4545 |
| 1.7 | .4554 | .4564 | .4573 | .4582 | .4591 | .4599 | .4608 | .4616 | .4625 | .4633 |
| 1.8 | .4641 | .4649 | .4656 | .4664 | .4671 | .4678 | .4686 | .4693 | .4699 | .4706 |
| 1.9 | .4713 | .4719 | .4726 | .4732 | .4738 | .4744 | .4750 | .4756 | .4761 | .4767 |
| 2.0 | .4772 | .4778 | .4783 | .4788 | .4793 | .4798 | .4803 | .4808 | .4812 | .4817 |
| 2.1 | .4821 | .4826 | .4830 | .4834 | .4838 | .4842 | .4846 | .4850 | .4854 | .4857 |
| 2.2 | .4861 | .4864 | .4868 | .4871 | .4875 | .4878 | .4881 | .4884 | .4887 | .4890 |
| 2.3 | .4893 | .4896 | .4898 | .4901 | .4904 | .4906 | .4909 | .4911 | .4913 | .4916 |
| 2.4 | .4918 | .4920 | .4922 | .4925 | .4927 | .4929 | .4931 | .4932 | .4934 | .4936 |
| 2.5 | .4938 | .4940 | .4941 | .4943 | .4945 | .4946 | .4948 | .4949 | .4951 | .4952 |
| 2.6 | .4953 | .4955 | .4956 | .4957 | .4959 | .4960 | .4961 | .4962 | .4963 | .4964 |
| 2.7 | .4965 | .4966 | .4967 | .4968 | .4969 | .4970 | .4971 | .4972 | .4973 | .4974 |
| 2.8 | .4974 | .4975 | .4976 | .4977 | .4977 | .4978 | .4979 | .4979 | .4980 | .4981 |
| 2.9 | .4981 | .4982 | .4982 | .4983 | .4984 | .4984 | .4985 | .4985 | .4986 | .4986 |
| 3.0 | .4987 | .4987 | .4987 | .4988 | .4988 | .4989 | .4989 | .4989 | .4990 | .4990 |
| 3.1 | .4990 | .4991 | .4991 | .4991 | .4992 | .4992 | .4992 | .4992 | .4993 | .4993 |
| 3.2 | .4993 | .4993 | .4994 | .4994 | .4994 | .4994 | .4994 | .4995 | .4995 | .4995 |
| 3.3 | .4995 | .4995 | .4995 | .4996 | .4996 | .4996 | .4996 | .4996 | .4996 | .4997 |
| 3.4 | .4997 | .4997 | .4997 | .4997 | .4997 | .4997 | .4997 | .4997 | .4997 | .4998 |
| 3.5 | .4998 | .4998 | .4998 | .4998 | .4998 | .4998 | .4998 | .4998 | .4998 | .4998 |
| 3.6 | .4998 | .4998 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 |
| 3.7 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 |
| 3.8 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 | .4999 |
| 3.9 | .5000 | .5000 | .5000 | .5000 | .5000 | .5000 | .5000 | .5000 | .5000 | .5000 |

### Apéndice III

**Valores percentiles ( $t_p$ )  
correspondientes a  
la distribución  $t$  de Student  
con  $\nu$  grados de libertad  
(área sombreada =  $p$ )**

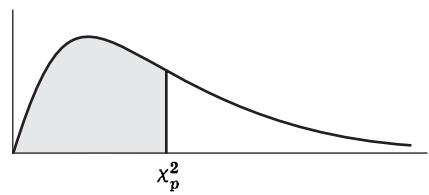


| $\nu$    | $t_{.995}$ | $t_{.99}$ | $t_{.975}$ | $t_{.95}$ | $t_{.90}$ | $t_{.80}$ | $t_{.75}$ | $t_{.70}$ | $t_{.60}$ | $t_{.55}$ |
|----------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1        | 63.66      | 31.82     | 12.71      | 6.31      | 3.08      | 1.376     | 1.000     | .727      | .325      | .158      |
| 2        | 9.92       | 6.96      | 4.30       | 2.92      | 1.89      | 1.061     | .816      | .617      | .289      | .142      |
| 3        | 5.84       | 4.54      | 3.18       | 2.35      | 1.64      | .978      | .765      | .584      | .277      | .137      |
| 4        | 4.60       | 3.75      | 2.78       | 2.13      | 1.53      | .941      | .741      | .569      | .271      | .134      |
| 5        | 4.03       | 3.36      | 2.57       | 2.02      | 1.48      | .920      | .727      | .559      | .267      | .132      |
| 6        | 3.71       | 3.14      | 2.45       | 1.94      | 1.44      | .906      | .718      | .553      | .265      | .131      |
| 7        | 3.50       | 3.00      | 2.36       | 1.90      | 1.42      | .896      | .711      | .549      | .263      | .130      |
| 8        | 3.36       | 2.90      | 2.31       | 1.86      | 1.40      | .889      | .706      | .546      | .262      | .130      |
| 9        | 3.25       | 2.82      | 2.26       | 1.83      | 1.38      | .883      | .703      | .543      | .261      | .129      |
| 10       | 3.17       | 2.76      | 2.23       | 1.81      | 1.37      | .879      | .700      | .542      | .260      | .129      |
| 11       | 3.11       | 2.72      | 2.20       | 1.80      | 1.36      | .876      | .697      | .540      | .260      | .129      |
| 12       | 3.06       | 2.68      | 2.18       | 1.78      | 1.36      | .873      | .695      | .539      | .259      | .128      |
| 13       | 3.01       | 2.65      | 2.16       | 1.77      | 1.35      | .870      | .694      | .538      | .259      | .128      |
| 14       | 2.98       | 2.62      | 2.14       | 1.76      | 1.34      | .868      | .692      | .537      | .258      | .128      |
| 15       | 2.95       | 2.60      | 2.13       | 1.75      | 1.34      | .866      | .691      | .536      | .258      | .128      |
| 16       | 2.92       | 2.58      | 2.12       | 1.75      | 1.34      | .865      | .690      | .535      | .258      | .128      |
| 17       | 2.90       | 2.57      | 2.11       | 1.74      | 1.33      | .863      | .689      | .534      | .257      | .128      |
| 18       | 2.88       | 2.55      | 2.10       | 1.73      | 1.33      | .862      | .688      | .534      | .257      | .127      |
| 19       | 2.86       | 2.54      | 2.09       | 1.73      | 1.33      | .861      | .688      | .533      | .257      | .127      |
| 20       | 2.84       | 2.53      | 2.09       | 1.72      | 1.32      | .860      | .687      | .533      | .257      | .127      |
| 21       | 2.83       | 2.52      | 2.08       | 1.72      | 1.32      | .859      | .686      | .532      | .257      | .127      |
| 22       | 2.82       | 2.51      | 2.07       | 1.72      | 1.32      | .858      | .686      | .532      | .256      | .127      |
| 23       | 2.81       | 2.50      | 2.07       | 1.71      | 1.32      | .858      | .685      | .532      | .256      | .127      |
| 24       | 2.80       | 2.49      | 2.06       | 1.71      | 1.32      | .857      | .685      | .531      | .256      | .127      |
| 25       | 2.79       | 2.48      | 2.06       | 1.71      | 1.32      | .856      | .684      | .531      | .256      | .127      |
| 26       | 2.78       | 2.48      | 2.06       | 1.71      | 1.32      | .856      | .684      | .531      | .256      | .127      |
| 27       | 2.77       | 2.47      | 2.05       | 1.70      | 1.31      | .855      | .684      | .531      | .256      | .127      |
| 28       | 2.76       | 2.47      | 2.05       | 1.70      | 1.31      | .855      | .683      | .530      | .256      | .127      |
| 29       | 2.76       | 2.46      | 2.04       | 1.70      | 1.31      | .854      | .683      | .530      | .256      | .127      |
| 30       | 2.75       | 2.46      | 2.04       | 1.70      | 1.31      | .854      | .683      | .530      | .256      | .127      |
| 40       | 2.70       | 2.42      | 2.02       | 1.68      | 1.30      | .851      | .681      | .529      | .255      | .126      |
| 60       | 2.66       | 2.39      | 2.00       | 1.67      | 1.30      | .848      | .679      | .527      | .254      | .126      |
| 120      | 2.62       | 2.36      | 1.98       | 1.66      | 1.29      | .845      | .677      | .526      | .254      | .126      |
| $\infty$ | 2.58       | 2.33      | 1.96       | 1.645     | 1.28      | .842      | .674      | .524      | .253      | .126      |

Fuente: R. A. Fisher y F. Yates, *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research* (Tablas de estadísticas para la investigación biológica, agrícola y médica) (5a. edición), Tabla III, Oliver and Boyd Ltd., Edinburgh, con autorización de los autores y editores.

## Apéndice IV

**Valores percentiles ( $\chi_p^2$ )  
correspondientes  
a la distribución ji cuadrada  
con  $\nu$  grados de libertad  
(área sombreada =  $p$ )**

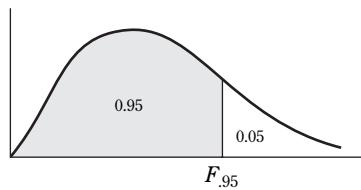


| $\nu$ | $\chi_{.995}^2$ | $\chi_{.99}^2$ | $\chi_{.975}^2$ | $\chi_{.95}^2$ | $\chi_{.90}^2$ | $\chi_{.75}^2$ | $\chi_{.50}^2$ | $\chi_{.25}^2$ | $\chi_{.10}^2$ | $\chi_{.05}^2$ | $\chi_{.025}^2$ | $\chi_{.01}^2$ | $\chi_{.005}^2$ |
|-------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 1     | 7.88            | 6.63           | 5.02            | 3.84           | 2.71           | 1.32           | .455           | .102           | .0158          | .0039          | .0010           | .0002          | .0000           |
| 2     | 10.6            | 9.21           | 7.38            | 5.99           | 4.61           | 2.77           | 1.39           | .575           | .211           | .103           | .0506           | .0201          | .0100           |
| 3     | 12.8            | 11.3           | 9.35            | 7.81           | 6.25           | 4.11           | 2.37           | 1.21           | .584           | .352           | .216            | .115           | .072            |
| 4     | 14.9            | 13.3           | 11.1            | 9.49           | 7.78           | 5.39           | 3.36           | 1.92           | 1.06           | .711           | .484            | .297           | .207            |
| 5     | 16.7            | 15.1           | 12.8            | 11.1           | 9.24           | 6.63           | 4.35           | 2.67           | 1.61           | 1.15           | .831            | .554           | .412            |
| 6     | 18.5            | 16.8           | 14.4            | 12.6           | 10.6           | 7.84           | 5.35           | 3.45           | 2.20           | 1.64           | 1.24            | .872           | .676            |
| 7     | 20.3            | 18.5           | 16.0            | 14.1           | 12.0           | 9.04           | 6.35           | 4.25           | 2.83           | 2.17           | 1.69            | 1.24           | .989            |
| 8     | 22.0            | 20.1           | 17.5            | 15.5           | 13.4           | 10.2           | 7.34           | 5.07           | 3.49           | 2.73           | 2.18            | 1.65           | 1.34            |
| 9     | 23.6            | 21.7           | 19.0            | 16.9           | 14.7           | 11.4           | 8.34           | 5.90           | 4.17           | 3.33           | 2.70            | 2.09           | 1.73            |
| 10    | 25.2            | 23.2           | 20.5            | 18.3           | 16.0           | 12.5           | 9.34           | 6.74           | 4.87           | 3.94           | 3.25            | 2.56           | 2.16            |
| 11    | 26.8            | 24.7           | 21.9            | 19.7           | 17.3           | 13.7           | 10.3           | 7.58           | 5.58           | 4.57           | 3.82            | 3.05           | 2.60            |
| 12    | 28.3            | 26.2           | 23.3            | 21.0           | 18.5           | 14.8           | 11.3           | 8.44           | 6.30           | 5.23           | 4.40            | 3.57           | 3.07            |
| 13    | 29.8            | 27.7           | 24.7            | 22.4           | 19.8           | 16.0           | 12.3           | 9.30           | 7.04           | 5.89           | 5.01            | 4.11           | 3.57            |
| 14    | 31.3            | 29.1           | 26.1            | 23.7           | 21.1           | 17.1           | 13.3           | 10.2           | 7.79           | 6.57           | 5.63            | 4.66           | 4.07            |
| 15    | 32.8            | 30.6           | 27.5            | 25.0           | 22.3           | 18.2           | 14.3           | 11.0           | 8.55           | 7.26           | 6.26            | 5.23           | 4.60            |
| 16    | 34.3            | 32.0           | 28.8            | 26.3           | 23.5           | 19.4           | 15.3           | 11.9           | 9.31           | 7.96           | 6.91            | 5.81           | 5.14            |
| 17    | 35.7            | 33.4           | 30.2            | 27.6           | 24.8           | 20.5           | 16.3           | 12.8           | 10.1           | 8.67           | 7.56            | 6.41           | 5.70            |
| 18    | 37.2            | 34.8           | 31.5            | 28.9           | 26.0           | 21.6           | 17.3           | 13.7           | 10.9           | 9.39           | 8.23            | 7.01           | 6.26            |
| 19    | 38.6            | 36.2           | 32.9            | 30.1           | 27.2           | 22.7           | 18.3           | 14.6           | 11.7           | 10.1           | 8.91            | 7.63           | 6.84            |
| 20    | 40.0            | 37.6           | 34.2            | 31.4           | 28.4           | 23.8           | 19.3           | 15.5           | 12.4           | 10.9           | 9.59            | 8.26           | 7.43            |
| 21    | 41.4            | 38.9           | 35.5            | 32.7           | 29.6           | 24.9           | 20.3           | 16.3           | 13.2           | 11.6           | 10.3            | 8.90           | 8.03            |
| 22    | 42.8            | 40.3           | 36.8            | 33.9           | 30.8           | 26.0           | 21.3           | 17.2           | 14.0           | 12.3           | 11.0            | 9.54           | 8.64            |
| 23    | 44.2            | 41.6           | 38.1            | 35.2           | 32.0           | 27.1           | 22.3           | 18.1           | 14.8           | 13.1           | 11.7            | 10.2           | 9.26            |
| 24    | 45.6            | 43.0           | 39.4            | 36.4           | 33.2           | 28.2           | 23.3           | 19.0           | 15.7           | 13.8           | 12.4            | 10.9           | 9.89            |
| 25    | 46.9            | 44.3           | 40.6            | 37.7           | 34.4           | 29.3           | 24.3           | 19.9           | 16.5           | 14.6           | 13.1            | 11.5           | 10.5            |
| 26    | 48.3            | 45.6           | 41.9            | 38.9           | 35.6           | 30.4           | 25.3           | 20.8           | 17.3           | 15.4           | 13.8            | 12.2           | 11.2            |
| 27    | 49.6            | 47.0           | 43.2            | 40.1           | 36.7           | 31.5           | 26.3           | 21.7           | 18.1           | 16.2           | 14.6            | 12.9           | 11.8            |
| 28    | 51.0            | 48.3           | 44.5            | 41.3           | 37.9           | 32.6           | 27.3           | 22.7           | 18.9           | 16.9           | 15.3            | 13.6           | 12.5            |
| 29    | 52.3            | 49.6           | 45.7            | 42.6           | 39.1           | 33.7           | 28.3           | 23.6           | 19.8           | 17.7           | 16.0            | 14.3           | 13.1            |
| 30    | 53.7            | 50.9           | 47.0            | 43.8           | 40.3           | 34.8           | 29.3           | 24.5           | 20.6           | 18.5           | 16.8            | 15.0           | 13.8            |
| 40    | 66.8            | 63.7           | 59.3            | 55.8           | 51.8           | 46.6           | 39.3           | 33.7           | 29.1           | 26.5           | 24.4            | 22.2           | 20.7            |
| 50    | 79.5            | 76.2           | 71.4            | 67.5           | 63.2           | 56.3           | 49.3           | 42.9           | 37.7           | 34.8           | 32.4            | 29.7           | 28.0            |
| 60    | 92.0            | 88.4           | 83.3            | 79.1           | 74.4           | 67.0           | 59.3           | 52.3           | 46.5           | 43.2           | 40.5            | 37.5           | 35.5            |
| 70    | 104.2           | 100.4          | 95.0            | 90.5           | 85.5           | 77.6           | 69.3           | 61.7           | 55.3           | 51.7           | 48.8            | 45.4           | 43.3            |
| 80    | 116.3           | 112.3          | 106.6           | 101.9          | 96.6           | 88.1           | 79.3           | 71.1           | 64.3           | 60.4           | 57.2            | 53.5           | 51.2            |
| 90    | 128.3           | 124.1          | 118.1           | 113.1          | 107.6          | 98.6           | 89.3           | 80.6           | 73.3           | 69.1           | 65.6            | 61.8           | 59.2            |
| 100   | 140.2           | 135.8          | 129.6           | 124.3          | 118.5          | 109.1          | 99.3           | 90.1           | 82.4           | 77.9           | 74.2            | 70.1           | 67.3            |

Fuente: Catherine M. Thompson, *Table of percentage points of the  $\chi^2$  distribution*. Biometrika, vol. 32 (1941) con autorización de autor y editor.

## Apéndice V

**Valores del percentil 95  
correspondientes  
a la distribución  $F$**   
 $(\nu_1$  grados de libertad en el numerador)  
 $\nu_2$  grados de libertad en el denominador)



| $\nu_2 \backslash \nu_1$ | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 12   | 15   | 20   | 24   | 30   | 40   | 60   | 120  | $\infty$ |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| 1                        | 161  | 200  | 216  | 225  | 230  | 234  | 237  | 239  | 241  | 242  | 244  | 246  | 248  | 249  | 250  | 251  | 252  | 253  | 254      |
| 2                        | 18.5 | 19.0 | 19.2 | 19.2 | 19.3 | 19.3 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.5 | 19.5 | 19.5 | 19.5 | 19.5 | 19.5     |
| 3                        | 10.1 | 9.55 | 9.28 | 9.12 | 9.01 | 8.94 | 8.89 | 8.85 | 8.81 | 8.79 | 8.74 | 8.70 | 8.66 | 8.64 | 8.62 | 8.59 | 8.57 | 8.55 | 8.53     |
| 4                        | 7.71 | 6.94 | 6.59 | 6.39 | 6.26 | 6.16 | 6.09 | 6.04 | 6.00 | 5.96 | 5.91 | 5.86 | 5.80 | 5.77 | 5.75 | 5.72 | 5.69 | 5.66 | 5.63     |
| 5                        | 6.61 | 5.79 | 5.41 | 5.19 | 5.05 | 4.95 | 4.88 | 4.82 | 4.77 | 4.74 | 4.68 | 4.62 | 4.56 | 4.53 | 4.50 | 4.46 | 4.43 | 4.40 | 4.37     |
| 6                        | 5.99 | 5.14 | 4.76 | 4.53 | 4.39 | 4.28 | 4.21 | 4.15 | 4.10 | 4.06 | 4.00 | 3.94 | 3.87 | 3.84 | 3.81 | 3.77 | 3.74 | 3.70 | 3.67     |
| 7                        | 5.59 | 4.74 | 4.35 | 4.12 | 3.97 | 3.87 | 3.79 | 3.73 | 3.68 | 3.64 | 3.57 | 3.51 | 3.44 | 3.41 | 3.38 | 3.34 | 3.30 | 3.27 | 3.23     |
| 8                        | 5.32 | 4.46 | 4.07 | 3.84 | 3.69 | 3.58 | 3.50 | 3.44 | 3.39 | 3.35 | 3.28 | 3.22 | 3.15 | 3.12 | 3.08 | 3.04 | 3.01 | 2.97 | 2.93     |
| 9                        | 5.12 | 4.26 | 3.86 | 3.63 | 3.48 | 3.37 | 3.29 | 3.23 | 3.18 | 3.14 | 3.07 | 3.01 | 2.94 | 2.90 | 2.86 | 2.83 | 2.79 | 2.75 | 2.71     |
| 10                       | 4.96 | 4.10 | 3.71 | 3.48 | 3.33 | 3.22 | 3.14 | 3.07 | 3.02 | 2.98 | 2.91 | 2.85 | 2.77 | 2.74 | 2.70 | 2.66 | 2.62 | 2.58 | 2.54     |
| 11                       | 4.84 | 3.98 | 3.59 | 3.36 | 3.20 | 3.09 | 3.01 | 2.95 | 2.90 | 2.85 | 2.79 | 2.72 | 2.65 | 2.61 | 2.57 | 2.53 | 2.49 | 2.45 | 2.40     |
| 12                       | 4.75 | 3.89 | 3.49 | 3.26 | 3.11 | 3.00 | 2.91 | 2.85 | 2.80 | 2.75 | 2.69 | 2.62 | 2.54 | 2.51 | 2.47 | 2.43 | 2.38 | 2.34 | 2.30     |
| 13                       | 4.67 | 3.81 | 3.41 | 3.18 | 3.03 | 2.92 | 2.83 | 2.77 | 2.71 | 2.67 | 2.60 | 2.53 | 2.46 | 2.42 | 2.38 | 2.34 | 2.30 | 2.25 | 2.21     |
| 14                       | 4.60 | 3.74 | 3.34 | 3.11 | 2.96 | 2.85 | 2.76 | 2.70 | 2.65 | 2.60 | 2.53 | 2.46 | 2.39 | 2.35 | 2.31 | 2.27 | 2.22 | 2.18 | 2.13     |
| 15                       | 4.54 | 3.68 | 3.29 | 3.06 | 2.90 | 2.79 | 2.71 | 2.64 | 2.59 | 2.54 | 2.48 | 2.40 | 2.33 | 2.29 | 2.25 | 2.20 | 2.16 | 2.11 | 2.07     |
| 16                       | 4.49 | 3.63 | 3.24 | 3.01 | 2.85 | 2.74 | 2.66 | 2.59 | 2.54 | 2.49 | 2.42 | 2.35 | 2.28 | 2.24 | 2.19 | 2.15 | 2.11 | 2.06 | 2.01     |
| 17                       | 4.45 | 3.59 | 3.20 | 2.96 | 2.81 | 2.70 | 2.61 | 2.55 | 2.49 | 2.45 | 2.38 | 2.31 | 2.23 | 2.19 | 2.15 | 2.10 | 2.06 | 2.01 | 1.96     |
| 18                       | 4.41 | 3.55 | 3.16 | 2.93 | 2.77 | 2.66 | 2.58 | 2.51 | 2.46 | 2.41 | 2.34 | 2.27 | 2.19 | 2.15 | 2.11 | 2.06 | 2.02 | 1.97 | 1.92     |
| 19                       | 4.38 | 3.52 | 3.13 | 2.90 | 2.74 | 2.63 | 2.54 | 2.48 | 2.42 | 2.38 | 2.31 | 2.23 | 2.16 | 2.11 | 2.07 | 2.03 | 1.98 | 1.93 | 1.88     |
| 20                       | 4.35 | 3.49 | 3.10 | 2.87 | 2.71 | 2.60 | 2.51 | 2.45 | 2.39 | 2.35 | 2.28 | 2.20 | 2.12 | 2.08 | 2.04 | 1.99 | 1.95 | 1.90 | 1.84     |
| 21                       | 4.32 | 3.47 | 3.07 | 2.84 | 2.68 | 2.57 | 2.49 | 2.42 | 2.37 | 2.32 | 2.25 | 2.18 | 2.10 | 2.05 | 2.01 | 1.96 | 1.92 | 1.87 | 1.81     |
| 22                       | 4.30 | 3.44 | 3.05 | 2.82 | 2.66 | 2.55 | 2.46 | 2.40 | 2.34 | 2.30 | 2.23 | 2.15 | 2.07 | 2.03 | 1.98 | 1.94 | 1.89 | 1.84 | 1.78     |
| 23                       | 4.28 | 3.42 | 3.03 | 2.80 | 2.64 | 2.53 | 2.44 | 2.37 | 2.32 | 2.27 | 2.20 | 2.13 | 2.05 | 2.01 | 1.96 | 1.91 | 1.86 | 1.81 | 1.76     |
| 24                       | 4.26 | 3.40 | 3.01 | 2.78 | 2.62 | 2.51 | 2.42 | 2.36 | 2.30 | 2.25 | 2.18 | 2.11 | 2.03 | 1.98 | 1.94 | 1.89 | 1.84 | 1.79 | 1.73     |
| 25                       | 4.24 | 3.39 | 2.99 | 2.76 | 2.60 | 2.49 | 2.40 | 2.34 | 2.28 | 2.24 | 2.16 | 2.09 | 2.01 | 1.96 | 1.92 | 1.87 | 1.82 | 1.77 | 1.71     |
| 26                       | 4.23 | 3.37 | 2.98 | 2.74 | 2.59 | 2.47 | 2.39 | 2.32 | 2.27 | 2.22 | 2.15 | 2.07 | 1.99 | 1.95 | 1.90 | 1.85 | 1.80 | 1.75 | 1.69     |
| 27                       | 4.21 | 3.35 | 2.96 | 2.73 | 2.57 | 2.46 | 2.37 | 2.31 | 2.25 | 2.20 | 2.13 | 2.06 | 1.97 | 1.93 | 1.88 | 1.84 | 1.79 | 1.73 | 1.67     |
| 28                       | 4.20 | 3.34 | 2.95 | 2.71 | 2.56 | 2.45 | 2.36 | 2.29 | 2.24 | 2.19 | 2.12 | 2.04 | 1.96 | 1.91 | 1.87 | 1.82 | 1.77 | 1.71 | 1.65     |
| 29                       | 4.18 | 3.33 | 2.93 | 2.70 | 2.55 | 2.43 | 2.35 | 2.28 | 2.22 | 2.18 | 2.10 | 2.03 | 1.94 | 1.90 | 1.85 | 1.81 | 1.75 | 1.70 | 1.64     |
| 30                       | 4.17 | 3.32 | 2.92 | 2.69 | 2.53 | 2.42 | 2.33 | 2.27 | 2.21 | 2.16 | 2.09 | 2.01 | 1.93 | 1.89 | 1.84 | 1.79 | 1.74 | 1.68 | 1.62     |
| 40                       | 4.08 | 3.23 | 2.84 | 2.61 | 2.45 | 2.34 | 2.25 | 2.18 | 2.12 | 2.08 | 2.00 | 1.92 | 1.84 | 1.79 | 1.74 | 1.69 | 1.64 | 1.58 | 1.51     |
| 60                       | 4.00 | 3.15 | 2.76 | 2.53 | 2.37 | 2.25 | 2.17 | 2.10 | 2.04 | 1.99 | 1.92 | 1.84 | 1.75 | 1.70 | 1.65 | 1.59 | 1.53 | 1.47 | 1.39     |
| 120                      | 3.92 | 3.07 | 2.68 | 2.45 | 2.29 | 2.18 | 2.09 | 2.02 | 1.96 | 1.91 | 1.83 | 1.75 | 1.66 | 1.61 | 1.55 | 1.50 | 1.43 | 1.35 | 1.25     |
| $\infty$                 | 3.84 | 3.00 | 2.60 | 2.37 | 2.21 | 2.10 | 2.01 | 1.94 | 1.88 | 1.83 | 1.75 | 1.67 | 1.57 | 1.52 | 1.46 | 1.39 | 1.32 | 1.22 | 1.00     |

Fuente: E. S. Pearson y H. O. Hartley, *Biometrika Table for Statisticians*, vol. 2 (1972), tabla 5, página 178, con autorización.

## Apéndice VI

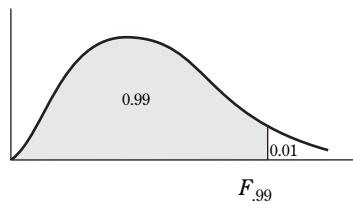
### Valores del percentil 99

correspondientes

a la distribución  $F$

( $\nu_1$  grados de libertad en el numerador)

( $\nu_2$  grados de libertad en el denominador)



| $\nu_1 \backslash \nu_2$ | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 12   | 15   | 20   | 24   | 30   | 40   | 60   | 120  | $\infty$ |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| 1                        | 4052 | 5000 | 5403 | 5625 | 5764 | 5859 | 5928 | 5981 | 6023 | 6056 | 6106 | 6157 | 6209 | 6235 | 6261 | 6287 | 6313 | 6339 | 6366     |
| 2                        | 98.5 | 99.0 | 99.2 | 99.2 | 99.3 | 99.3 | 99.4 | 99.4 | 99.4 | 99.4 | 99.4 | 99.4 | 99.4 | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5     |
| 3                        | 34.1 | 30.8 | 29.5 | 28.7 | 28.2 | 27.9 | 27.7 | 27.5 | 27.3 | 27.2 | 27.1 | 26.9 | 26.7 | 26.6 | 26.5 | 26.4 | 26.3 | 26.2 | 26.1     |
| 4                        | 21.2 | 18.0 | 16.7 | 16.0 | 15.5 | 15.2 | 15.0 | 14.8 | 14.7 | 14.5 | 14.4 | 14.2 | 14.0 | 13.9 | 13.8 | 13.7 | 13.7 | 13.6 | 13.5     |
| 5                        | 16.3 | 13.3 | 12.1 | 11.4 | 11.0 | 10.7 | 10.5 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 9.89 | 9.72 | 9.55 | 9.47 | 9.38 | 9.29 | 9.20 | 9.11 | 9.02     |
| 6                        | 13.7 | 10.9 | 9.78 | 9.15 | 8.75 | 8.47 | 8.26 | 8.10 | 7.98 | 7.87 | 7.72 | 7.56 | 7.40 | 7.31 | 7.23 | 7.14 | 7.06 | 6.97 | 6.88     |
| 7                        | 12.2 | 9.55 | 8.45 | 7.85 | 7.46 | 7.19 | 6.99 | 6.84 | 6.72 | 6.62 | 6.47 | 6.31 | 6.16 | 6.07 | 5.99 | 5.91 | 5.82 | 5.74 | 5.65     |
| 8                        | 11.3 | 8.65 | 7.59 | 7.01 | 6.63 | 6.37 | 6.18 | 6.03 | 5.91 | 5.81 | 5.67 | 5.52 | 5.36 | 5.28 | 5.20 | 5.12 | 5.03 | 4.95 | 4.86     |
| 9                        | 10.6 | 8.02 | 6.99 | 6.42 | 6.06 | 5.80 | 5.61 | 5.47 | 5.35 | 5.26 | 5.11 | 4.96 | 4.81 | 4.73 | 4.65 | 4.57 | 4.48 | 4.40 | 4.31     |
| 10                       | 10.0 | 7.56 | 6.55 | 5.99 | 5.64 | 5.39 | 5.20 | 5.06 | 4.94 | 4.85 | 4.71 | 4.56 | 4.41 | 4.33 | 4.25 | 4.17 | 4.08 | 4.00 | 3.91     |
| 11                       | 9.65 | 7.21 | 6.22 | 5.67 | 5.32 | 5.07 | 4.89 | 4.74 | 4.63 | 4.54 | 4.40 | 4.25 | 4.10 | 4.02 | 3.94 | 3.86 | 3.78 | 3.69 | 3.60     |
| 12                       | 9.33 | 6.93 | 5.95 | 5.41 | 5.06 | 4.82 | 4.64 | 4.50 | 4.39 | 4.30 | 4.16 | 4.01 | 3.86 | 3.78 | 3.70 | 3.62 | 3.54 | 3.45 | 3.36     |
| 13                       | 9.07 | 6.70 | 5.74 | 5.21 | 4.86 | 4.62 | 4.44 | 4.30 | 4.19 | 4.10 | 3.96 | 3.82 | 3.66 | 3.59 | 3.51 | 3.43 | 3.34 | 3.25 | 3.17     |
| 14                       | 8.86 | 6.51 | 5.56 | 5.04 | 4.70 | 4.46 | 4.28 | 4.14 | 4.03 | 3.94 | 3.80 | 3.66 | 3.51 | 3.43 | 3.35 | 3.27 | 3.18 | 3.09 | 3.00     |
| 15                       | 8.68 | 6.36 | 5.42 | 4.89 | 4.56 | 4.32 | 4.14 | 4.00 | 3.89 | 3.80 | 3.67 | 3.52 | 3.37 | 3.29 | 3.21 | 3.13 | 3.05 | 2.96 | 2.87     |
| 16                       | 8.53 | 6.23 | 5.29 | 4.77 | 4.44 | 4.20 | 4.03 | 3.89 | 3.78 | 3.69 | 3.55 | 3.41 | 3.26 | 3.18 | 3.10 | 3.02 | 2.93 | 2.84 | 2.75     |
| 17                       | 8.40 | 6.11 | 5.19 | 4.67 | 4.34 | 4.10 | 3.93 | 3.79 | 3.68 | 3.59 | 3.46 | 3.31 | 3.16 | 3.08 | 3.00 | 2.92 | 2.83 | 2.75 | 2.65     |
| 18                       | 8.29 | 6.01 | 5.09 | 4.58 | 4.25 | 4.01 | 3.84 | 3.71 | 3.60 | 3.51 | 3.37 | 3.23 | 3.08 | 3.00 | 2.92 | 2.84 | 2.75 | 2.66 | 2.57     |
| 19                       | 8.18 | 5.93 | 5.01 | 4.50 | 4.17 | 3.94 | 3.77 | 3.63 | 3.52 | 3.43 | 3.30 | 3.15 | 3.00 | 2.92 | 2.84 | 2.76 | 2.67 | 2.58 | 2.49     |
| 20                       | 8.10 | 5.85 | 4.94 | 4.43 | 4.10 | 3.87 | 3.70 | 3.56 | 3.46 | 3.37 | 3.23 | 3.09 | 2.94 | 2.86 | 2.78 | 2.69 | 2.61 | 2.52 | 2.42     |
| 21                       | 8.02 | 5.78 | 4.87 | 4.37 | 4.04 | 3.81 | 3.64 | 3.51 | 3.40 | 3.31 | 3.17 | 3.03 | 2.88 | 2.80 | 2.72 | 2.64 | 2.55 | 2.46 | 2.36     |
| 22                       | 7.95 | 5.72 | 4.82 | 4.31 | 3.99 | 3.76 | 3.59 | 3.45 | 3.35 | 3.26 | 3.12 | 2.98 | 2.83 | 2.75 | 2.67 | 2.58 | 2.50 | 2.40 | 2.31     |
| 23                       | 7.88 | 5.66 | 4.76 | 4.26 | 3.94 | 3.71 | 3.54 | 3.41 | 3.30 | 3.21 | 3.07 | 2.93 | 2.78 | 2.70 | 2.62 | 2.54 | 2.45 | 2.35 | 2.26     |
| 24                       | 7.82 | 5.61 | 4.72 | 4.22 | 3.90 | 3.67 | 3.50 | 3.36 | 3.26 | 3.17 | 3.03 | 2.89 | 2.74 | 2.66 | 2.58 | 2.49 | 2.40 | 2.31 | 2.21     |
| 25                       | 7.77 | 5.57 | 4.68 | 4.18 | 3.86 | 3.63 | 3.46 | 3.32 | 3.22 | 3.13 | 2.99 | 2.85 | 2.70 | 2.62 | 2.54 | 2.45 | 2.36 | 2.27 | 2.17     |
| 26                       | 7.72 | 5.53 | 4.64 | 4.14 | 3.82 | 3.59 | 3.42 | 3.29 | 3.18 | 3.09 | 2.96 | 2.82 | 2.66 | 2.58 | 2.50 | 2.42 | 2.33 | 2.23 | 2.13     |
| 27                       | 7.68 | 5.49 | 4.60 | 4.11 | 3.78 | 3.56 | 3.39 | 3.26 | 3.15 | 3.06 | 2.93 | 2.78 | 2.63 | 2.55 | 2.47 | 2.38 | 2.29 | 2.20 | 2.10     |
| 28                       | 7.64 | 5.45 | 4.57 | 4.07 | 3.75 | 3.53 | 3.36 | 3.23 | 3.12 | 3.03 | 2.90 | 2.75 | 2.60 | 2.52 | 2.44 | 2.35 | 2.26 | 2.17 | 2.06     |
| 29                       | 7.60 | 5.42 | 4.54 | 4.04 | 3.73 | 3.50 | 3.33 | 3.20 | 3.09 | 3.00 | 2.87 | 2.73 | 2.57 | 2.49 | 2.41 | 2.33 | 2.23 | 2.14 | 2.03     |
| 30                       | 7.56 | 5.39 | 4.51 | 4.02 | 3.70 | 3.47 | 3.30 | 3.17 | 3.07 | 2.98 | 2.84 | 2.70 | 2.55 | 2.47 | 2.39 | 2.30 | 2.21 | 2.11 | 2.01     |
| 40                       | 7.31 | 5.18 | 4.31 | 3.83 | 3.51 | 3.29 | 3.12 | 2.99 | 2.89 | 2.80 | 2.66 | 2.52 | 2.37 | 2.29 | 2.20 | 2.11 | 2.02 | 1.92 | 1.80     |
| 60                       | 7.08 | 4.98 | 4.13 | 3.65 | 3.34 | 3.12 | 2.95 | 2.82 | 2.72 | 2.63 | 2.50 | 2.35 | 2.20 | 2.12 | 2.03 | 1.94 | 1.84 | 1.73 | 1.60     |
| 120                      | 6.85 | 4.79 | 3.95 | 3.48 | 3.17 | 2.96 | 2.79 | 2.66 | 2.56 | 2.47 | 2.34 | 2.19 | 2.03 | 1.95 | 1.86 | 1.76 | 1.66 | 1.53 | 1.38     |
| $\infty$                 | 6.63 | 4.61 | 3.78 | 3.32 | 3.02 | 2.80 | 2.64 | 2.51 | 2.41 | 2.32 | 2.18 | 2.04 | 1.88 | 1.79 | 1.70 | 1.59 | 1.47 | 1.32 | 1.00     |

Fuente: E. S. Pearson y H. O. Hartley, *Biometrika Table for Statisticians*, vol. 2 (1972), tabla 5, página 180, con autorización.

## Apéndice VII

### Logaritmos comunes con cuatro cifras decimales

| N  | 0 1 2 3 4 |      |      |      |      | 5 6 7 8 9 |      |      |      |      | Partes proporcionales |   |    |    |    |    |    |    |    |
|----|-----------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|-----------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|
|    | 1         | 2    | 3    | 4    | 5    | 6         | 7    | 8    | 9    | 1    | 2                     | 3 | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |    |
| 10 | 0000      | 0043 | 0086 | 0128 | 0170 | 0212      | 0253 | 0294 | 0334 | 0374 | 4                     | 8 | 12 | 17 | 21 | 25 | 29 | 33 | 37 |
| 11 | 0414      | 0453 | 0492 | 0531 | 0569 | 0607      | 0645 | 0682 | 0719 | 0755 | 4                     | 8 | 11 | 15 | 19 | 23 | 26 | 30 | 34 |
| 12 | 0792      | 0828 | 0864 | 0899 | 0934 | 0969      | 1004 | 1038 | 1072 | 1106 | 3                     | 7 | 10 | 14 | 17 | 21 | 24 | 28 | 31 |
| 13 | 1139      | 1173 | 1206 | 1239 | 1271 | 1303      | 1335 | 1367 | 1399 | 1430 | 3                     | 6 | 10 | 13 | 16 | 19 | 23 | 26 | 29 |
| 14 | 1461      | 1492 | 1523 | 1553 | 1584 | 1614      | 1644 | 1673 | 1703 | 1732 | 3                     | 6 | 9  | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 |
| 15 | 1761      | 1790 | 1818 | 1847 | 1875 | 1903      | 1931 | 1959 | 1987 | 2014 | 3                     | 6 | 8  | 11 | 14 | 17 | 20 | 22 | 25 |
| 16 | 2041      | 2068 | 2095 | 2122 | 2148 | 2175      | 2201 | 2227 | 2253 | 2279 | 3                     | 5 | 8  | 11 | 13 | 16 | 18 | 21 | 24 |
| 17 | 2304      | 2330 | 2355 | 2380 | 2405 | 2430      | 2455 | 2480 | 2504 | 2529 | 2                     | 5 | 7  | 10 | 12 | 15 | 17 | 20 | 22 |
| 18 | 2553      | 2577 | 2601 | 2625 | 2648 | 2672      | 2695 | 2718 | 2742 | 2765 | 2                     | 5 | 7  | 9  | 12 | 14 | 16 | 19 | 21 |
| 19 | 2788      | 2810 | 2833 | 2856 | 2878 | 2900      | 2923 | 2945 | 2967 | 2989 | 2                     | 4 | 7  | 9  | 11 | 13 | 16 | 18 | 20 |
| 20 | 3010      | 3032 | 3054 | 3075 | 3096 | 3118      | 3139 | 3160 | 3181 | 3201 | 2                     | 4 | 6  | 8  | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |
| 21 | 3222      | 3243 | 3263 | 3284 | 3304 | 3324      | 3345 | 3365 | 3385 | 3404 | 2                     | 4 | 6  | 8  | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 |
| 22 | 3424      | 3444 | 3464 | 3483 | 3502 | 3522      | 3541 | 3560 | 3579 | 3598 | 2                     | 4 | 6  | 8  | 10 | 12 | 14 | 15 | 17 |
| 23 | 3617      | 3636 | 3655 | 3674 | 3692 | 3711      | 3729 | 3747 | 3766 | 3784 | 2                     | 4 | 6  | 7  | 9  | 11 | 13 | 15 | 17 |
| 24 | 3802      | 3820 | 3838 | 3856 | 3874 | 3892      | 3909 | 3927 | 3945 | 3962 | 2                     | 4 | 5  | 7  | 9  | 11 | 12 | 14 | 16 |
| 25 | 3979      | 3997 | 4014 | 4031 | 4048 | 4065      | 4082 | 4099 | 4116 | 4133 | 2                     | 3 | 5  | 7  | 9  | 10 | 12 | 14 | 15 |
| 26 | 4150      | 4166 | 4183 | 4200 | 4216 | 4232      | 4249 | 4265 | 4281 | 4298 | 2                     | 3 | 5  | 7  | 8  | 10 | 11 | 13 | 15 |
| 27 | 4314      | 4330 | 4346 | 4362 | 4378 | 4393      | 4409 | 4425 | 4440 | 4456 | 2                     | 3 | 5  | 6  | 8  | 9  | 11 | 13 | 14 |
| 28 | 4472      | 4487 | 4502 | 4518 | 4533 | 4548      | 4564 | 4579 | 4594 | 4609 | 2                     | 3 | 5  | 6  | 8  | 9  | 11 | 12 | 14 |
| 29 | 4624      | 4639 | 4654 | 4669 | 4683 | 4698      | 4713 | 4728 | 4742 | 4757 | 1                     | 3 | 4  | 6  | 7  | 9  | 10 | 12 | 13 |
| 30 | 4771      | 4786 | 4800 | 4814 | 4829 | 4843      | 4857 | 4871 | 4886 | 4900 | 1                     | 3 | 4  | 6  | 7  | 9  | 10 | 11 | 13 |
| 31 | 4914      | 4928 | 4942 | 4955 | 4969 | 4983      | 4997 | 5011 | 5024 | 5038 | 1                     | 3 | 4  | 6  | 7  | 8  | 10 | 11 | 12 |
| 32 | 5051      | 5065 | 5079 | 5092 | 5105 | 5119      | 5132 | 5145 | 5159 | 5172 | 1                     | 3 | 4  | 5  | 7  | 8  | 9  | 11 | 12 |
| 33 | 5185      | 5198 | 5211 | 5224 | 5237 | 5250      | 5263 | 5276 | 5289 | 5302 | 1                     | 3 | 4  | 5  | 6  | 8  | 9  | 10 | 12 |
| 34 | 5315      | 5328 | 5340 | 5353 | 5366 | 5378      | 5391 | 5403 | 5416 | 5428 | 1                     | 3 | 4  | 5  | 6  | 8  | 9  | 10 | 11 |
| 35 | 5441      | 5453 | 5465 | 5478 | 5490 | 5502      | 5514 | 5527 | 5539 | 5551 | 1                     | 2 | 4  | 5  | 6  | 7  | 9  | 10 | 11 |
| 36 | 5563      | 5575 | 5587 | 5599 | 5611 | 5623      | 5635 | 5647 | 5658 | 5670 | 1                     | 2 | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 10 | 11 |
| 37 | 5682      | 5694 | 5705 | 5717 | 5729 | 5740      | 5752 | 5763 | 5775 | 5786 | 1                     | 2 | 3  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| 38 | 5798      | 5809 | 5821 | 5832 | 5843 | 5855      | 5866 | 5877 | 5888 | 5899 | 1                     | 2 | 3  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| 39 | 5911      | 5922 | 5933 | 5944 | 5955 | 5966      | 5977 | 5988 | 5999 | 6010 | 1                     | 2 | 3  | 4  | 5  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| 40 | 6021      | 6031 | 6042 | 6053 | 6064 | 6075      | 6085 | 6096 | 6107 | 6117 | 1                     | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 8  | 9  | 10 |
| 41 | 6128      | 6138 | 6149 | 6160 | 6170 | 6180      | 6191 | 6201 | 6212 | 6222 | 1                     | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
| 42 | 6232      | 6243 | 6253 | 6263 | 6274 | 6284      | 6294 | 6304 | 6314 | 6325 | 1                     | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
| 43 | 6335      | 6345 | 6355 | 6365 | 6375 | 6385      | 6395 | 6405 | 6415 | 6425 | 1                     | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
| 44 | 6435      | 6444 | 6454 | 6464 | 6474 | 6484      | 6493 | 6503 | 6513 | 6522 | 1                     | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
| 45 | 6532      | 6542 | 6551 | 6561 | 6571 | 6580      | 6590 | 6599 | 6609 | 6618 | 1                     | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
| 46 | 6628      | 6637 | 6646 | 6656 | 6665 | 6675      | 6684 | 6693 | 6702 | 6712 | 1                     | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 7  | 8  |
| 47 | 6721      | 6730 | 6739 | 6749 | 6758 | 6767      | 6776 | 6785 | 6794 | 6803 | 1                     | 2 | 3  | 4  | 5  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 48 | 6812      | 6821 | 6830 | 6839 | 6848 | 6857      | 6866 | 6875 | 6884 | 6893 | 1                     | 2 | 3  | 4  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 49 | 6902      | 6911 | 6920 | 6928 | 6937 | 6946      | 6955 | 6964 | 6972 | 6981 | 1                     | 2 | 3  | 4  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 50 | 6990      | 6998 | 7007 | 7016 | 7024 | 7033      | 7042 | 7050 | 7059 | 7067 | 1                     | 2 | 3  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 51 | 7076      | 7084 | 7093 | 7101 | 7110 | 7118      | 7126 | 7135 | 7143 | 7152 | 1                     | 2 | 3  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 52 | 7160      | 7168 | 7177 | 7185 | 7193 | 7202      | 7210 | 7218 | 7226 | 7235 | 1                     | 2 | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 7  |
| 53 | 7243      | 7251 | 7259 | 7267 | 7275 | 7284      | 7292 | 7300 | 7308 | 7316 | 1                     | 2 | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 6  | 7  |
| 54 | 7324      | 7332 | 7340 | 7348 | 7356 | 7364      | 7372 | 7380 | 7388 | 7396 | 1                     | 2 | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 6  | 7  |

| N | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

**Logaritmos comunes con cuatro cifras decimales (continuación)**

| N         | 0 1 2 3 4 |      |      |      |      | 5 6 7 8 9 |      |      |      |      | Partes proporcionales |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-----------|-----------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
|           | 1         | 2    | 3    | 4    | 5    | 6         | 7    | 8    | 9    | 1    | 2                     | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |   |
| 55        | 7404      | 7412 | 7419 | 7427 | 7435 | 7443      | 7451 | 7459 | 7466 | 7474 | 1                     | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 7 |
| 56        | 7482      | 7490 | 7497 | 7505 | 7513 | 7520      | 7528 | 7536 | 7543 | 7551 | 1                     | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 7 |
| 57        | 7559      | 7566 | 7574 | 7582 | 7589 | 7597      | 7604 | 7612 | 7619 | 7627 | 1                     | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 7 |
| 58        | 7634      | 7642 | 7649 | 7657 | 7664 | 7672      | 7679 | 7686 | 7694 | 7701 | 1                     | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 59        | 7709      | 7716 | 7723 | 7731 | 7738 | 7745      | 7752 | 7760 | 7767 | 7774 | 1                     | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| <b>60</b> | 7782      | 7789 | 7796 | 7803 | 7810 | 7818      | 7825 | 7832 | 7839 | 7846 | 1                     | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 |
| 61        | 7853      | 7860 | 7868 | 7875 | 7882 | 7889      | 7896 | 7903 | 7910 | 7917 | 1                     | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 |
| 62        | 7924      | 7931 | 7938 | 7945 | 7952 | 7959      | 7966 | 7973 | 7980 | 7987 | 1                     | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 |
| 63        | 7993      | 8000 | 8007 | 8014 | 8021 | 8028      | 8035 | 8041 | 8048 | 8055 | 1                     | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 |
| 64        | 8062      | 8069 | 8075 | 8082 | 8089 | 8096      | 8102 | 8109 | 8116 | 8122 | 1                     | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 |
| 65        | 8129      | 8136 | 8142 | 8149 | 8156 | 8162      | 8169 | 8176 | 8182 | 8189 | 1                     | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 |
| 66        | 8195      | 8202 | 8209 | 8215 | 8222 | 8228      | 8235 | 8241 | 8248 | 8254 | 1                     | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 |
| 67        | 8261      | 8267 | 8274 | 8280 | 8287 | 8293      | 8299 | 8306 | 8312 | 8319 | 1                     | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 |
| 68        | 8325      | 8331 | 8338 | 8344 | 8351 | 8357      | 8363 | 8370 | 8376 | 8382 | 1                     | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 |
| 69        | 8388      | 8395 | 8401 | 8407 | 8414 | 8420      | 8426 | 8432 | 8439 | 8445 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 |
| <b>70</b> | 8451      | 8457 | 8463 | 8470 | 8476 | 8482      | 8488 | 8494 | 8500 | 8506 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 |
| 71        | 8513      | 8519 | 8525 | 8531 | 8537 | 8543      | 8549 | 8555 | 8561 | 8567 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| 72        | 8573      | 8579 | 8585 | 8591 | 8597 | 8603      | 8609 | 8615 | 8621 | 8627 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| 73        | 8633      | 8639 | 8645 | 8651 | 8657 | 8663      | 8669 | 8675 | 8681 | 8686 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| 74        | 8692      | 8698 | 8704 | 8710 | 8716 | 8722      | 8727 | 8733 | 8739 | 8745 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| 75        | 8751      | 8756 | 8762 | 8768 | 8774 | 8779      | 8785 | 8791 | 8797 | 8802 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 |
| 76        | 8808      | 8814 | 8820 | 8825 | 8831 | 8837      | 8842 | 8848 | 8854 | 8859 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 |
| 77        | 8865      | 8871 | 8876 | 8882 | 8887 | 8893      | 8899 | 8904 | 8910 | 8915 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| 78        | 8921      | 8927 | 8932 | 8938 | 8943 | 8949      | 8954 | 8960 | 8965 | 8971 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| 79        | 8976      | 8982 | 8987 | 8993 | 8998 | 9004      | 9009 | 9015 | 9020 | 9025 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| <b>80</b> | 9031      | 9036 | 9042 | 9047 | 9053 | 9058      | 9063 | 9069 | 9074 | 9079 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| 81        | 9085      | 9090 | 9096 | 9101 | 9106 | 9112      | 9117 | 9122 | 9128 | 9133 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| 82        | 9138      | 9143 | 9149 | 9154 | 9159 | 9165      | 9170 | 9175 | 9180 | 9186 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| 83        | 9191      | 9196 | 9201 | 9206 | 9212 | 9217      | 9222 | 9227 | 9232 | 9238 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| 84        | 9243      | 9248 | 9253 | 9258 | 9263 | 9269      | 9274 | 9279 | 9284 | 9289 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| 85        | 9294      | 9299 | 9304 | 9309 | 9315 | 9320      | 9325 | 9330 | 9335 | 9340 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| 86        | 9345      | 9350 | 9355 | 9360 | 9365 | 9370      | 9375 | 9380 | 9385 | 9390 | 1                     | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| 87        | 9395      | 9400 | 9405 | 9410 | 9415 | 9420      | 9425 | 9430 | 9435 | 9440 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 88        | 9445      | 9450 | 9455 | 9460 | 9465 | 9469      | 9474 | 9479 | 9484 | 9489 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 89        | 9494      | 9499 | 9504 | 9509 | 9513 | 9518      | 9523 | 9528 | 9533 | 9538 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| <b>90</b> | 9542      | 9547 | 9552 | 9557 | 9562 | 9566      | 9571 | 9576 | 9581 | 9586 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 91        | 9590      | 9595 | 9600 | 9605 | 9609 | 9614      | 9619 | 9624 | 9628 | 9633 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 92        | 9638      | 9643 | 9647 | 9652 | 9657 | 9661      | 9666 | 9671 | 9675 | 9680 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 93        | 9685      | 9689 | 9694 | 9699 | 9703 | 9708      | 9713 | 9717 | 9722 | 9727 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 94        | 9731      | 9736 | 9741 | 9745 | 9750 | 9754      | 9759 | 9763 | 9768 | 9773 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 95        | 9777      | 9782 | 9786 | 9791 | 9795 | 9800      | 9805 | 9809 | 9814 | 9818 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 96        | 9823      | 9827 | 9832 | 9836 | 9841 | 9845      | 9850 | 9854 | 9859 | 9863 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 97        | 9868      | 9872 | 9877 | 9881 | 9886 | 9890      | 9894 | 9899 | 9903 | 9908 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 98        | 9912      | 9917 | 9921 | 9926 | 9930 | 9934      | 9939 | 9943 | 9948 | 9952 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 99        | 9956      | 9961 | 9965 | 9969 | 9974 | 9978      | 9983 | 9987 | 9991 | 9996 | 0                     | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 |

## Apéndice VIII

### Valores de $e^{-\lambda}$

$(0 < \lambda < 1)$

| $\lambda$ | 0      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.0       | 1.0000 | .9900 | .9802 | .9704 | .9608 | .9512 | .9418 | .9324 | .9231 | .9139 |
| 0.1       | .9048  | .8958 | .8869 | .8781 | .8694 | .8607 | .8521 | .8437 | .8353 | .8270 |
| 0.2       | .8187  | .8106 | .8025 | .7945 | .7866 | .7788 | .7711 | .7634 | .7558 | .7483 |
| 0.3       | .7408  | .7334 | .7261 | .7189 | .7118 | .7047 | .6977 | .6907 | .6839 | .6771 |
| 0.4       | .6703  | .6636 | .6570 | .6505 | .6440 | .6376 | .6313 | .6250 | .6188 | .6126 |
| 0.5       | .6065  | .6005 | .5945 | .5886 | .5827 | .5770 | .5712 | .5655 | .5599 | .5543 |
| 0.6       | .5488  | .5434 | .5379 | .5326 | .5273 | .5220 | .5169 | .5117 | .5066 | .5016 |
| 0.7       | .4966  | .4916 | .4868 | .4819 | .4771 | .4724 | .4677 | .4630 | .4584 | .4538 |
| 0.8       | .4493  | .4449 | .4404 | .4360 | .4317 | .4274 | .4232 | .4190 | .4148 | .4107 |
| 0.9       | .4066  | .4025 | .3985 | .3946 | .3906 | .3867 | .3829 | .3791 | .3753 | .3716 |

$(\lambda = 1, 2, 3, \dots, 10)$

| $\lambda$      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
|----------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $e^{-\lambda}$ | .36788 | .13534 | .04979 | .01832 | .006738 | .002479 | .000912 | .000335 | .000123 | .000045 |

*Nota:* Para obtener valores de  $e^{-\lambda}$  correspondientes a otros valores de  $\lambda$ , úsese las leyes de los exponentes.

**Ejemplo:**  $e^{-3.48} = (e^{-3.00})(e^{-.48}) = (0.04979)(0.6188) = 0.03081$ .

## Apéndice IX

### Números aleatorios

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 51772 | 74640 | 42331 | 29044 | 46621 | 62898 | 93582 | 04186 | 19640 | 87056 |
| 24033 | 23491 | 83587 | 06568 | 21960 | 21387 | 76105 | 10863 | 97453 | 90581 |
| 45939 | 60173 | 52078 | 25424 | 11645 | 55870 | 56974 | 37428 | 93507 | 94271 |
| 30586 | 02133 | 75797 | 45406 | 31041 | 86707 | 12973 | 17169 | 88116 | 42187 |
| 03585 | 79353 | 81938 | 82322 | 96799 | 85659 | 36081 | 50884 | 14070 | 74950 |
| 64937 | 03355 | 95863 | 20790 | 65304 | 55189 | 00745 | 65253 | 11822 | 15804 |
| 15630 | 64759 | 51135 | 98527 | 62586 | 41889 | 25439 | 88036 | 24034 | 67283 |
| 09448 | 56301 | 57683 | 30277 | 94623 | 85418 | 68829 | 06652 | 41982 | 49159 |
| 21631 | 91157 | 77331 | 60710 | 52290 | 16835 | 48653 | 71590 | 16159 | 14676 |
| 91097 | 17480 | 29414 | 06829 | 87843 | 28195 | 27279 | 47152 | 35683 | 47280 |
| 50532 | 25496 | 95652 | 42457 | 73547 | 76552 | 50020 | 24819 | 52984 | 76168 |
| 07136 | 40876 | 79971 | 54195 | 25708 | 51817 | 36732 | 72484 | 94923 | 75936 |
| 27989 | 64728 | 10744 | 08396 | 56242 | 90985 | 28868 | 99431 | 50995 | 20507 |
| 85184 | 73949 | 36601 | 46253 | 00477 | 25234 | 09908 | 36574 | 72139 | 70185 |
| 54398 | 21154 | 97810 | 36764 | 32869 | 11785 | 55261 | 59009 | 38714 | 38723 |
| 65544 | 34371 | 09591 | 07839 | 58892 | 92843 | 72828 | 91341 | 84821 | 63886 |
| 08263 | 65952 | 85762 | 64236 | 39238 | 18776 | 84303 | 99247 | 46149 | 03229 |
| 39817 | 67906 | 48236 | 16057 | 81812 | 15815 | 63700 | 85915 | 19219 | 45943 |
| 62257 | 04077 | 79443 | 95203 | 02479 | 30763 | 92486 | 54083 | 23631 | 05825 |
| 53298 | 90276 | 62545 | 21944 | 16530 | 03878 | 07516 | 95715 | 02526 | 33537 |

# ÍNDICE

## A

- Abscisa, 4
- Ajuste de curva, 316
  - método a mano de, 318
  - método de mínimos cuadrados de, 319
- Ajuste de datos, 19 (*ver también* Ajuste de curva)
  - empleando papel para probabilidad, 177
  - mediante una distribución binomial, 195
  - mediante una distribución de Poisson, 198
  - mediante una distribución normal, 196
- Aleatorio/a(s):
  - errores, 403
  - muestra, 203
  - números, 203
  - variable, 142
- Aleatorización completa, 413
- Análisis combinatorio, 146
- Análisis de varianza, 362-401
  - experimentos de dos factores usando, 407
  - experimentos de un factor usando, 403
  - modelo matemático para, 403
  - objetivo de, 403
  - tablas, 406
  - usando cuadrados grecolatinos, 413
  - usando cuadrados latinos, 413
- Aproximación de curvas, ecuaciones de, 317
- Aproximación de Stirling a  $n!$ , 146
- Aproximación normal a la distribución binomial, 174
- Áreas:
  - en la distribución ji-cuadrada, 277
  - en la distribución  $F$ , 279
  - en la distribución normal, 173
  - en la distribución  $t$ , 275
- Artículo defectuoso, 487
- Artículo no conforme, 486
- Asintóticamente normal, 204
- Atributos, correlación de, 298
- Autocorrelación, 351

## B

- Base, 2
  - de logaritmos comunes, 6
  - de logaritmos naturales, 6

## Bivariada:

- distribución normal, 351
- población, 351
- tabla o distribución de frecuencia, 366

Bloques aleatorizados, 413

## C

- Cálculos, 3
  - reglas para, 3
  - reglas para, empleando logaritmos, 7
- Carta-C, 490
- Carta de control de atributos, 481
- Categorías, 37
- Causas asignables, 480
- Causas comunes, 480
- Causas especiales, 480
- Centro de gravedad, 320
- Centroide, 320
- Clase, 37 (*ver también* Intervalos de clase)
- Clase modal, 43
- Clasificación en un sentido, 403
- Clasificaciones de dos sentidos, 407
- Coeficiente cuartílico de asimetría, 125
- Coeficiente cuartílico de dispersión relativa, 116
- Coeficiente de asimetría de Pearson, 125
- Coeficiente de correlación, 348
  - de tablas de contingencia, 298
  - fórmula producto momento para, 350
  - para datos agrupados, 350
  - rectas de regresión y, 351
  - teoría del muestreo y, 351
- Coeficiente de correlación de orden cero, 383
- Coeficiente momento de curtosis, 125
- Coeficiente momento de sesgo, 125
- Coeficiente percentil de curtosis, 125
- Coeficientes binomiales, 173
  - triángulo de Pascal para, 180
- Coeficientes de regresión parcial, 382
- Combinaciones, 146
- Comprobación de Charlier, 99
  - para la media y la varianza, 99
  - para momentos, 124

- Conjunto nulo, 146  
 Constante, 1  
 Conteos o enumeraciones, 2  
 Contingencia, coeficiente de, 310  
 Coordenadas, rectangulares, 4  
 Corrección de Sheppard para momentos, 124  
 Corrección de Sheppard para varianza, 100  
 Corrección de Yates para continuidad, 297  
 Correlación, 345  
     auto-, 351  
     coeficiente de (*ver* Coeficiente de correlación)  
     de atributos, 311  
     espuria, 549  
     lineal, 345  
     medidas de, 346  
     parcial, 385  
     positiva y negativa, 345  
     rango de, 450  
     simple, 345  
 Correlación espuria, 349  
 Correlación múltiple, 382  
 Correlación parcial, 382  
 Correlación positiva, 346  
 Correlación simple, 382  
 Correlación sin sentido, 350  
 Correlación tetracórica, 299  
 Corridas, 449  
 Cuadrado latino ortogonal, 413  
 Cuadrados grecolatinos, 413  
 Cuadrados latinos, 413  
     ortogonales, 413  
 Cuadrantes, 4  
 Cuadrática:  
     curva, 317  
     ecuación, 35  
     función, 17  
 Cuantiles, 66  
 Cuartiles, 66  
 Curtosis, 125  
     coeficiente momento de, 125  
     coeficiente percentílico de, 125  
     de una distribución binomial, 173  
     de una distribución de Poisson, 176  
     de una distribución normal, 125  
 Curva cuártica, 317  
 Curva cúbica, 317  
 Curva de frecuencia bimodal, 41  
 Curva de frecuencia multimodal, 41  
 Curva de Gompertz, 318  
 Curva de grado  $n$ , 317  
 Curva exponencial, 318  
 Curva geométrica, 318  
 Curva logística, 318  
 Curva normal, 173  
     áreas bajo la, 173  
     forma estándar de, 173  
     ordenadas de, 187  
 Curvas de frecuencia, 41  
     relativa, 41  
     tipos de, 41  
 Curvas de frecuencia en forma de U, 41  
 Curvas de frecuencia sesgadas, 41  
 Curva simétrica o en forma de campana, 41
- D**
- Datos:  
     agrupados, 38  
     dispersión o variación de, 89  
     en bruto, 37  
 Datos agrupados, 38  
 Datos continuos, 1  
     representación gráfica de, 57  
 Datos de atributos, 481  
 Datos discretos, 2  
     representación gráfica de, 54  
 Datos en bruto, 76  
 Deciles, 66  
     de datos agrupados, 87  
     errores estándar para, 206  
 Decisiones estadísticas, 245  
 Defectos, 487  
 Desigualdades, 5  
 Desviación de la media aritmética, 63  
 Desviación estándar, 96  
     de datos agrupados, 98  
     de distribuciones muestrales, 204  
     de una distribución de probabilidad, 155  
     intervalo de confianza para, 230  
     método abreviado de cálculo, 98  
     método de codificación para, 96  
     propiedades de, 98  
     propiedad minimal de, 98  
     relación con la desviación media, 100  
     relación entre poblacional y muestral, 97  
 Desviación media, 95  
     de la distribución normal, 174  
     para datos agrupados, 96  
 Determinación:  
     coeficiente de, 348  
     múltiple, coeficiente de, 384  
 Determinación múltiple, coeficiente de, 384  
 Diagrama de Euler, 146  
 Diagrama de Venn (*ver* Diagrama de Euler)  
 Diagramas (*ver* Gráficas)  
 Dígitos o cifras significativas, 3  
 Diseño de experimentos, 412  
 Diseño experimental, 412  
 Dispersión, 87 (*ver también* Variación)  
     absoluta, 95  
     coeficiente de, 100  
     medidas de, 95  
     relativa, 100  
 Dispersión absoluta, 100  
 Dispersión del proceso, 282

- Dispersión relativa o varianza, 95
- Distribución acumulada “o más”, 40
- Distribución binomial, 172
  - ajuste de datos, 195
  - propiedades de, 172
  - prueba de hipótesis usando, 250
  - relación con la distribución de Poisson, 175
  - relación con la distribución normal, 174
- Distribución ji-cuadrada, 297 (*ver también* Ji-cuadrada)
  - intervalos de confianza usando, 278
  - pruebas de hipótesis y significancia, 294
- Distribución de Bernoulli (*ver* Distribución binomial)
- Distribución de Poisson, 175
  - ajuste de datos mediante, 198
  - propiedades de, 175
  - relación con las distribuciones binomial y normal, 176
- Distribución en forma de  $J$  inversa, 41
- Distribuciones de frecuencia, 37
  - acumulada, 40
  - porcentual o relativa, 39
  - reglas para la elaboración de, 38
- Distribuciones de probabilidad acumulada, 143
- Distribuciones de probabilidad continua, 143
- Distribuciones de probabilidad discreta, 142
- Distribuciones muestrales, 204
  - de diferencias y sumas, 205
  - de diversos estadísticos, 204
  - de medias, 204
  - de proporciones, 205
  - experimentales, 208
- Distribuciones unilaterales y bilaterales, 247
- Distribución  $F$ , 279 (*ver también* Análisis de varianza)
- Distribución multinomial, 177
- Distribución normal, 173
  - forma estándar de, 174
  - proporciones de, 174
  - relación con la distribución binomial, 174
  - relación con la distribución de Poisson, 176
- Distribución  $t$ , 275
- Distribución unimodal, 64
- Dominio de una variable, 1
  
- E**
- Ecuaciones, 5
  - cuadráticas, 35
  - de curvas de aproximación, 317
  - de regresión, 382
  - equivalentes, 5
  - miembros izquierdo y derecho de, 5
  - simultáneas, 25, 34
  - solución de, 5
  - trasposición en, 26
- Ecuaciones normales:
  - para el plano de mínimos cuadrados, 321
  - para la parábola de mínimos cuadrados, 320
  - para la recta de mínimos cuadrados, 320
- Ecuaciones simultáneas, 5
  
- Ejes  $X$  y  $Y$  de un sistema de coordenadas rectangulares, 4
- Eje  $Y$ , 4
- Empates en la prueba  $H$  de Kruskal-Wallis, 448
  - en la prueba  $U$  de Mann-Whitney, 447
- Entrada de una tabla, 42
- Enumeraciones, 2
- Error de agrupación, 39
- Error estándar de estimación, 348
  - modificado, 348
- Error probable, 230
- Errores:
  - de agrupación, 39
  - de redondeo, 2
  - probables, 230
- Errores de redondeo, 2
- Errores de redondeo acumulados, 2
- Errores estándar de distribuciones muestrales, 206
- Errores tipo I y tipo II, 246
- Espacio de cuatro dimensiones, 385
- Espacio muestral, 146
- Esperanza matemática, 144
- Estadística, 1
  - deductiva o descriptiva, 1
  - definición de, 1
  - inductiva o inferencial, 1
- Estadística deductiva, 1
- Estadística descriptiva, 1
- Estadística inductiva o inferencial, 1
- Estadístico de prueba, 247
- Estadístico  $H$ , 448
- Estadístico muestral, 1
- Estadístico  $U$ , 447
- Estadísticos muestrales, 203
- Estimación, 227
- Estimaciones (*ver también* Estimación)
  - eficientes e ineficientes, 228
  - puntual y de intervalo, 228
  - sesgadas y no sesgadas, 227
- Estimaciones insesgadas, 227
- Estimaciones por intervalo, 228
- Estimaciones y estimadores eficientes, 228
- Estimaciones y estimadores ineficientes, 228
- Estimación puntual, 228
- Estimación sesgada, 227
- Evento compuesto, 143
- Eventos, 140
  - compuestos, 140
  - dependientes, 140
  - independientes, 140
  - mutuamente excluyentes, 141
- Eventos dependientes, 140
- Eventos independientes, 140
- Eventos mutuamente excluyentes, 141
- Éxito, 139
- Expansión multinomial, 177
- Experimento de dos factores, 407
- Experimento de un factor, 403
- Exponente, 2

**F**

Factores de ponderación, 62  
 Factorial, 143  
 Fórmula de Spearman para la correlación por rangos, 450  
 Fórmula de Stirling para, 146  
 Fórmula o expansión binomial, 173  
 Fórmula para el interés compuesto, 85  
 Fórmula producto momento para el coeficiente de correlación, 350  
 Fracaso, 139  
**Frecuencia** (*ver también* Frecuencia de clase)  
 acumulada, 40  
 modal, 41  
 relativa, 40  
 Frecuencia acumulada, 40  
 Frecuencia de clase, 37  
 Frecuencia relativa, 39  
 curvas, 39  
 definición de probabilidad, 139  
 distribución, 39  
 tabla, 39  
 Frecuencias de celda, 496  
 Frecuencias esperadas o teóricas, 181  
 Frecuencias marginales, 294  
 Frecuencias observadas, 294  
 Frecuencias teóricas, 295  
 Fronteras de clase, inferior y superior, 38  
 Función, 4  
 de distribución, 142  
 de frecuencia, 142  
 de probabilidad, 139  
 lineal, 318  
 multivaluada, 4  
 univaluada, 4  
 Función de densidad, 144  
 Función de distribución, 142  
 Función de frecuencia, 142  
 Función de probabilidad, 142  
 Funciones univaluadas, 4

**G**

Gosset, 276  
 Grados de libertad, 276  
 Gráfica, 5  
 de barras, 18  
 de pastel, 5  
 Gráfica cero, 489  
 Gráfica circular (*ver* Gráfica o carta de pastel)  
 Gráfica Cusum, 490  
 Gráfica de efectos principales, 429  
 Gráfica de interacción, 429  
 Gráfica de medianas, 489  
 Gráfica de Pareto, 504  
 Gráfica EWMA, 490  
 Gráfica *NP*, 487  
 Gráfica o carta de pastel, 5  
 Gráfica-*P*, 487  
 Gráfica *U*, 490

**Gráficas de control**, 480

Gráficas individuales, 489  
 Gráficas o cartas de barras, parte componente, 4  
 Gráficas *X* barra y *R*, 481  
 Gran media, 404

**H**

Hipérbola, 318  
 Hiperplano, 385  
 Hipótesis, 245  
 alternativa, 245  
 nula, 245  
 Hipótesis alternativa, 245  
 Hipótesis nula, 245  
 Histogramas, 39  
 cálculo de medianas para, 64  
 de frecuencia porcentual o relativa, 39  
 de probabilidad, 153  
 Hoja de conteo, 39

**I**

Identidad, 5  
 Índice CP, 485  
 Índice CPK, 485  
 Índice de capacidad del proceso, 485  
 Índice de capacidad inferior, 485  
 Índice de capacidad superior, 485  
 Interacción, 411  
 Interés compuesto, 85  
 Interpolación, 7  
 Intersección, 319  
 Intersección con el eje *X*, 283, 289-291  
 Intersección de conjuntos, 146  
 Intervalo de confianza:  
 en correlación y regresión, 374  
 para desviaciones estándar, 230  
 para diferencias y sumas, 230  
 para medias, 229  
 para proporciones, 229  
 usando la distribución ji-cuadrada, 278  
 usando la distribución normal, 229-230  
 usando la distribución *t*, 276

**Intervalos de clase**, 38

abierto, 38  
 amplitud o tamaño de, 38  
 desiguales, 51  
 mediano, 64  
 modal, 43

**J**

Ji-cuadrada, 294  
 correlación de Yates para, 297  
 definición de, 294  
 fórmulas para, en tablas de contingencia, 297  
 para bondad de ajuste, 295  
 propiedad aditiva de, 299  
 prueba, 295

- L**
- Leptocúrtica, 125
  - Límite inferior de control, 480
  - Límite inferior de especificación, 484
  - Límite superior de control, 480
  - Límite superior de especificación, 484
  - Límites de clase, 38
    - inferior y superior, 38
    - verdaderos, 38
  - Límites de confianza, 229
  - Límites de control, 480
  - Límites de especificación, 484
  - Línea central, 480
  - Línea recta, 317
    - ecuación de, 317
    - mínimos cuadrados, 318
    - pendiente de, 318
    - regresión, 321
  - Logaritmos, 6
    - base de, 6
    - cálculos usando, 7
    - comunes, 6
    - naturales, 6
  - Logaritmos comunes, 6
  - Logaritmos naturales, base de, 6
  - Longitud, tamaño o amplitud de clase, 38
- M**
- Marca de clase, 38
  - Media aritmética, 61
    - calculada a partir de datos agrupados, 63
    - comprobación de Charlier para, 99
    - de medias aritméticas, 63
    - de una población y de una muestra, 144
    - distribuciones de probabilidad, 142
    - efecto de valores extremos (o atípicos) en, 71
    - método de codificación para calcularla, 63
    - método largo y método abreviado para calcularla, 63
    - ponderada, 62
    - propiedades de la, 63
    - relación con la mediana y la moda, 64
    - relación con las medias geométrica y armónica, 66
    - supuesta o adivinada, 63
  - Media armónica, 65
    - ponderada, 86
    - relación con las medias aritmética y geométrica, 66
  - Media del grupo, 404
  - Media geométrica, 65
    - de datos agrupados, 83
    - idoneidad para promedios de cocientes, 84
    - ponderada, 84
    - relación con las medias aritmética y armónica, 66
  - Mediana, 64
    - calculada a partir de un histograma o de una ojiva porcentual, 64
    - de datos agrupados, 64
    - efecto de valores atípicos sobre la, 78
    - relación con la media aritmética y con la moda, 64
  - Medias de renglón, 403
  - Medias de tratamiento, 345
  - Mediciones, 2
  - Medidas de tendencia central, 61
  - Mejor estimación, 228
  - Mesocúrtica, 125
  - Método a mano para el ajuste de curvas, 318
  - Método de conteo en la prueba *U* de Mann-Whitney, 447
  - Métodos de codificación, 63
    - para el coeficiente de correlación, 350
    - para el momento, 124
    - para la desviación estándar, 98
    - para la media, 63
  - Mínimos cuadrados:
    - curva, 319
    - parábola, 320
    - plano, 321
    - recta, 319
  - Moda, 64
    - de datos agrupados, 64
    - fórmulas para, 64
    - relación con la media y la mediana, 65
  - Modelo o distribución teórica, 177
  - Momentos, 123
    - adimensionales, 124
    - correcciones de Sheppard para, 124
    - definición de, 123
    - método de codificación para el cálculo de, 124
    - para datos agrupados, 123
    - relaciones entre, 124
    - verificación de Charlier para el cálculo de, 124
  - Momentos adimensionales, 124
  - Muestra, 1
  - Muestreo:
    - con reemplazo, 204
    - sin reemplazo, 204
- N**
- Nivel de significancia, 246
  - Niveles de confianza, tablas de, 229
  - No aleatoria, 449
  - No lineal:
    - correlación y regresión, 346
    - ecuaciones, reducibles a forma lineal, 320
    - regresión múltiple, 382
    - relación entre variables, 316
  - Notación científica, 2
  - Número muestral, 213
- O**
- Ojivas, 40
    - deciles, percentiles y cuartiles obtenidos de, 87
    - mediana obtenida de, 78
    - “menos de”, 52
    - “o más”, 52
    - porcentual, 53
    - suavizada, 53

- Ordenaciones, 37  
 Ordenadas, 4  
 Origen, 5
- P**
- Papel para gráficas  
 de probabilístico, 177  
 log-log, 339  
 semilogarítmico, 318  
 Papel semilog, 318  
 Parábola, 320  
 Parámetros, estimación de, 227  
 Parámetros poblacionales, 228  
 Partes por millón (ppm), 484  
 Patrón cíclico en pruebas de corridas, 449  
 Pendiente de una recta, 318  
 Percentiles, 66  
 Permutaciones, 145  
 Plano, 4  
 Plano XY, 4  
 Platicúrtica, 125  
 Población, 1  
 Polígonos de frecuencia, 39  
 porcentuales o relativos, 39  
 suavizados, 41  
 Polinomios, 318  
 Ponderada:  
 media aritmética, 62  
 media armónica, 85  
 media geométrica, 83  
 Porcentual:  
 distribución, 39  
 distribuciones acumuladas, 39  
 frecuencia acumulada, 39  
 histograma, 38  
 ojivas, 39  
 Probabilidad, 139  
 análisis combinatorio y, 143  
 axiomática, 140  
 condicional, 140  
 definición clásica de, 139  
 definición de, mediante frecuencias relativas, 140  
 distribuciones de, 142  
 empírica, 140  
 reglas fundamentales de, 146  
 relación con la teoría de conjuntos, 146  
 Probabilidad condicional, 140  
 Probabilidad empírica, 139  
 Progresión aritmética:  
 momentos de, 136  
 varianza de, 120  
 Promedio, 62  
 Proporción de no conformes, 484  
 Proporciones, 205  
 distribución muestral de, 205  
 intervalo de confianza para, 229  
 pruebas de hipótesis para, 245
- Prueba de bondad de ajuste, 177 (*véase también* Ajuste de datos)  
 Prueba de dos lados o de dos colas, 247  
 Prueba de homogeneidad de la varianza, 285  
 Prueba de los signos, 446  
 Prueba de normalidad, 196  
 Prueba H de Kruskal-Wallis, 448  
 Pruebas:  
 de hipótesis y de significancia, 245  
 en las que interviene la distribución binomial, 250  
 en las que interviene la distribución normal, 246  
 para causas especiales, 484  
 para diferencias de medias y proporciones, 249  
 para medias y proporciones, 249  
 relacionadas con correlación y regresión, 352  
 Pruebas no paramétricas, 446  
 para correlación, 450  
 prueba de corridas, 449  
 prueba de los signos, 449  
 prueba H de Kruskal-Wallis, 448  
 prueba U de Mann-Whitney, 447  
 Prueba U de Mann Whitney, 454  
 Punto cero, 4  
 Puntuaciones estándar, 101  
 Puntuación o estadístico  $t$ , 275
- Q**
- Quintiles, 87
- R**
- Raíz cuadrada media, 66  
 Rango, 95  
 intercuartílico, 96  
 percentil 10-90, 96  
 semiintercuartílico, 96  
 Rango, coeficiente de correlación por, 450  
 Rango intercuartílico, 96  
 semi-, 96  
 Rango percentil, 96  
 Rango percentílico 10-90, 96  
 Rango semiintercuartílico, 96  
 Redondeo de datos, 2  
 Región crítica, 247  
 Región de aceptación, 247 (*ver también* Hipótesis)  
 Reglas de decisión, 246 (*ver también* Decisiones estadísticas)  
 Regresión, 321  
 curva de, 321  
 múltiple, 345  
 plano, 321  
 recta, 321  
 simple, 343  
 superficie, 322  
 teoría muestral de, 352  
 Relación empírica entre media, mediana y moda, 64  
 Relación empírica entre medidas de dispersión, 100  
 Residual, 319

**S**

- Sesgo, 41  
 coeficiente cuartílico de, 125  
 coeficiente de sesgo percentílico 10-90, 125  
 coeficientes de Pearson de, 125  
 distribución binomial, 172  
 distribución de Poisson, 175  
 distribución normal, 173  
 negativo, 41  
 Signos de desigualdad, 5  
 Solución de ecuaciones, 5  
 Subgrupos, 418  
 Subíndices, 61  
 Sumatoria, 61

**T**

- Tabla, 4  
 Tabla de correlación, 350  
 Tablas de contingencia, 296  
 coeficiente de correlación de, 298  
 fórmulas para ji-cuadrada en, 298  
 Tablas de frecuencia (*ver también* Distribuciones de frecuencia)  
 acumulada, 40  
 relativa, 40  
 Teorema del límite central, 204  
 Teorema o regla de Bayes, 170  
 Teoría de las muestras pequeñas, 275  
 Teoría del muestreo, 203  
 de correlación, 351  
 de regresión, 352  
 muestras grandes, 207  
 uso de, en estimación, 227  
 uso de, en pruebas de hipótesis y de significancia, 245  
 Teoría exacta del muestreo o teoría de las muestras pequeñas, 181  
 Tratamiento, 345  
 Triángulo de Pascal, 180

**U**

- Unidad de inspección, 489  
 Unión de conjuntos, 146

**V**

- Valor absoluto, 95  
 Valores críticos, 248  
 Valores críticos (o coeficientes de confianza), 228  
 valor-*p*, 245  
 Variable, 1  
 continua, 1  
 datos, 480  
 dependiente, 4  
 discreta, 1  
 distribuida normalmente, 173  
 dominio de, 1  
 estandarizada, 101  
 gráfica de control, 480  
 independiente, 4  
 relación entre, 316 (*ver también* Ajuste de curva; Correlación; Regresión)  
 Variable continua, 1  
 Variable dependiente, 4  
 cambio de, en ecuaciones de regresión, 284  
 Variable discreta, 1  
 Variable estandarizada, 101  
 Variable independiente, 4  
 Variación, 95 (*ver también* Dispersión)  
 coeficiente cuartílico de, 116  
 coeficiente de, 100  
 explicada y no explicada, 348  
 residual, 408  
 total, 348  
 Variación explicada, 348  
 Variación no explicada, 348  
 Variación residual, 409  
 Variación total, 348  
 Varianza, 97 (*ver también* Desviación estándar)  
 combinada o conjunta, 98  
 comprobación de Charlier para, 99  
 corrección de Sheppard para, 100  
 de una distribución de probabilidad, 204  
 muestral modificada, 227  
 relación entre poblacional y muestral, 14