

# ESTRATEGIAS DE MUESTREO DISEÑO DE ENCUESTAS Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

SEGUNDA EDICIÓN



# ESTRATEGIAS DE MUESTREO DISEÑO DE ENCUESTAS Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

SEGUNDA EDICIÓN

Andrés Gutiérrez, PhD.

ISBN: 978-958-631-608-8

Derechos reservados

Bogotá, D.C., 2015



# Contenido

<b>1</b>	<b>Encuestas y estudios por muestreo</b>	<b>1</b>
1.1	Conceptos metodológicos . . . . .	1
1.1.1	Encuesta . . . . .	2
1.1.2	Marco de muestreo . . . . .	3
1.1.3	Sesgo . . . . .	5
1.2	Marco y Lucy . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Muestras probabilísticas y estimadores</b>	<b>17</b>
2.1	Población y muestra aleatoria . . . . .	17
2.1.1	Población finita . . . . .	17
2.1.2	Muestra aleatoria . . . . .	18
2.1.3	Soportes de muestreo . . . . .	19
2.1.4	Probabilidad de inclusión . . . . .	24
2.1.5	Característica de interés y parámetros de interés . . . . .	27
2.1.6	Estadística y estimador . . . . .	28
2.2	Estimadores de muestreo . . . . .	33
2.2.1	El estimador de Horvitz-Thompson . . . . .	34
2.2.2	El estimador de Hansen-Hurwitz . . . . .	41
2.2.3	El estimador de Horvitz-Thompson en los diseños con reemplazo . . . . .	55
2.3	Muestras representativas . . . . .	55
2.4	Ejercicios . . . . .	56
<b>3</b>	<b>Muestreo con probabilidades simples</b>	<b>59</b>
3.1	Muestreo aleatorio simple sin reemplazo . . . . .	60
3.1.1	Algoritmos de selección . . . . .	60
3.1.2	El estimador de Horvitz-Thompson . . . . .	62
3.1.3	Estimación de la media poblacional . . . . .	65
3.1.4	Estimación en dominios . . . . .	67
3.1.5	Marco y Lucy . . . . .	71
3.1.6	Probabilidades de inclusión en unidades de muestreo . . . . .	77

3.2	Diseño de muestreo Bernoulli . . . . .	77
3.2.1	Algoritmo de selección . . . . .	78
3.2.2	El estimador de Horvitz-Thompson . . . . .	80
3.2.3	El efecto de diseño . . . . .	81
3.2.4	Marco y Lucy . . . . .	82
3.3	Muestreo aleatorio simple con reemplazo . . . . .	83
3.3.1	Algoritmo de selección . . . . .	86
3.3.2	El estimador de Hansen-Hurwitz . . . . .	87
3.3.3	Marco y Lucy . . . . .	89
3.4	Diseño de muestreo sistemático . . . . .	91
3.4.1	Algoritmo de selección . . . . .	93
3.4.2	El estimador de Horvitz-Thompson . . . . .	94
3.4.3	Optimalidad de la estrategia . . . . .	96
3.4.4	Diseño de muestreo $q$ -sistemático . . . . .	100
3.4.5	Marco y Lucy . . . . .	102
3.5	Ejercicios . . . . .	106
<b>4</b>	<b>Muestreo con probabilidades proporcionales</b>	<b>111</b>
4.1	Diseño de muestreo de Poisson . . . . .	111
4.1.1	Algoritmo de selección . . . . .	113
4.1.2	El estimador de Horvitz-Thompson . . . . .	113
4.1.3	Optimalidad en la estrategia de muestreo Poisson . . . . .	114
4.1.4	Marco y Lucy . . . . .	116
4.2	Diseño de muestreo PPT . . . . .	119
4.2.1	Algoritmo de selección . . . . .	121
4.2.2	El estimador de Hansen-Hurwitz . . . . .	122
4.2.3	Eficiencia de la estrategia . . . . .	125
4.2.4	Marco y Lucy . . . . .	126
4.3	Diseño de muestreo $\pi$ PT . . . . .	132
4.4	Selección de muestras $\pi$ PT . . . . .	135
4.4.1	Método de Sunter . . . . .	137
4.4.2	Método de escisión . . . . .	139
4.4.3	Estimación de la varianza . . . . .	142
4.4.4	Marco y Lucy . . . . .	144
4.5	Ejercicios . . . . .	146
<b>5</b>	<b>Muestreo estratificado</b>	<b>149</b>
5.1	Fundamentos teóricos . . . . .	150
5.1.1	Estimación en el muestreo estratificado . . . . .	153

5.1.2	El estimador de Horvitz-Thompson . . . . .	154
5.2	Diseño de muestreo aleatorio estratificado . . . . .	155
5.2.1	Algoritmos de selección . . . . .	155
5.2.2	El estimador de Horvitz-Thompson . . . . .	157
5.2.3	Estimación de la media poblacional . . . . .	159
5.2.4	Asignación del tamaño de muestra . . . . .	160
5.2.5	Estimación en dominios . . . . .	164
5.2.6	El efecto de diseño . . . . .	167
5.2.7	Marco y Lucy . . . . .	168
5.3	Diseño de muestreo estratificado PPT . . . . .	176
5.3.1	Algoritmos de selección . . . . .	177
5.3.2	El estimador de Hansen-Hurwitz . . . . .	177
5.3.3	Marco y Lucy . . . . .	178
5.4	Ejercicios . . . . .	181
<b>6</b>	<b>Muestreo de conglomerados</b>	<b>183</b>
6.1	Fundamentos teóricos y notación . . . . .	185
6.1.1	El estimador de Horvitz-Thompson . . . . .	187
6.1.2	El estimador de Hansen-Hurwitz . . . . .	192
6.2	Muestreo aleatorio simple de conglomerados . . . . .	194
6.2.1	Algoritmos de selección . . . . .	194
6.2.2	El estimador de Horvitz-Thompson . . . . .	195
6.2.3	Eficiencia de la estrategia . . . . .	196
6.2.4	Marco I y Lucy . . . . .	198
6.3	Ejercicios . . . . .	203
<b>7</b>	<b>Muestreo en varias etapas</b>	<b>205</b>
7.1	Muestreo en dos etapas . . . . .	206
7.1.1	El estimador de Horvitz-Thompson . . . . .	211
7.2	Diseño de muestreo MAS-MAS . . . . .	216
7.2.1	Algoritmos de selección . . . . .	217
7.2.2	Tamaño de muestra . . . . .	218
7.2.3	Estimación de la varianza en muestreo de dos etapas . . . . .	220
7.2.4	Marco II y Lucy . . . . .	222
7.3	Diseño de muestreo en dos etapas estratificado . . . . .	226
7.3.1	Diseños auto-ponderados . . . . .	227
7.4	Diseños en $r$ etapas . . . . .	227
7.4.1	El estimador de Horvitz-Thompson . . . . .	228
7.4.2	El estimador de Hansen-Hurwitz . . . . .	228

7.5	Ejercicios . . . . .	230
-----	----------------------	-----



# Capítulo 1

## Encuestas y estudios por muestreo

Durante todo el siglo pasado, ha surgido una serie de teorías y principios que ofrecen un marco de referencia unificado en el diseño, implementación y evaluación de encuestas. Este marco de referencia se conoce comúnmente como el paradigma del «error total de muestreo» y ha encaminado la investigación moderna hacia una mejor calidad de las encuestas.

Groves, Fowler, Couper, Lepkowski, Singer & R. (2004)

Este capítulo, a manera de introducción, busca identificar los principios (no matemáticos) del diseño, recolección, procesamiento y análisis de los estudios por muestreo, cuyo crecimiento va en aumento al pasar de los años, pero que sigue teniendo ciertas limitantes de tipo económico y logístico. Un estudio por muestreo involucrará a profesionales de diferentes disciplinas quienes se ocupan de la reducción de costos y el aumento de la calidad de las estimaciones. Un gran campo de la ciencia estadística se preocupa por minimizar los errores muestrales mientras que, por otra parte, otro gran campo de las ciencias sociales se ocupa en minimizar los errores que pueden ser cometidos en el periodo de la recolección de los datos.

### 1.1 Conceptos metodológicos

El muestreo es un procedimiento que responde a la necesidad de información estadística precisa sobre la población y los conjuntos de elementos que la conforman; el muestreo trata con investigaciones parciales sobre la población que apuntan a inferir a la población completa. Es así como en las últimas décadas ha tenido bastante desarrollo en diferentes campos principalmente en el sector gubernamental con la publicación de las estadísticas oficiales que permiten realizar un seguimiento a las metas del gobierno, en el sector académico, en el sector privado y de comunicaciones. Según Lohr (2000) el gasto anual en encuestas por muestreo en Estados Unidos representa de 2 a 5 billones de dólares. Este aumento del uso de las técnicas de muestreo en la investigación es claro porque es un procedimiento que cuesta mucho menos dinero, consume menos tiempo y puede incluso ser más preciso que al realizar una enumeración completa, también llamada censo. Una muestra bien seleccionada de unos cuantos miles de individuos puede representar con gran precisión una población de millones.

Es requisito fundamental de una buena muestra que las características de interés que existen en la población se reflejen en la muestra de la manera más cercana posible, para esto se necesitan definir los siguientes conceptos

- **Población objetivo:** es la colección completa de todas las unidades que se quieren estudiar.

- **Muestra:** es un subconjunto de la población.
- **Unidad de muestreo:** es el objeto a ser seleccionado en la muestra que permitirá el acceso a la unidad de observación.
- **Unidad de observación:** es el objeto sobre el que finalmente se realiza la medición.
- **Variable de interés:** es la característica propia de los individuos sobre la que se realiza la inferencia para resolver los objetivos de la investigación.

En la teoría de muestreo la variable de interés no se supone como una variable aleatoria sino como una cantidad fija o una característica propia de las unidades que componen la población.

### 1.1.1 Encuesta

Por **encuesta** se entiende una investigación estadística con las siguientes características:

1. El objetivo de una encuesta es proveer información acerca de la población finita y/o acerca de subpoblaciones de interés especial.
2. Asociado con cada elemento de la población existe una o más variables de interés. Una encuesta permite conseguir información sobre características poblacionales desconocidas llamadas parámetros. Éstas son funciones de los valores de las variables de interés y son desconocidos y requeridos.
3. El acceso y observación de los elementos de la población se establece mediante un algoritmo de muestreo, que es un mecanismo que asocia los elementos de la población con unidades de muestreo.
4. Una muestra de elementos se escoge. Esto puede ser hecho mediante la selección de las unidades de observación en el esquema. Una muestra es probabilística si se realiza mediante un mecanismo probabilístico y se conoce la probabilidad de selección de todas las posibles muestras.
5. Los elementos seleccionados en la muestra son observados y se realiza el proceso de medición; es decir para cada elemento de la muestra la variable de interés se mide y sus valores se graban.
6. Los valores grabados de las variables son usados para calcular estimaciones de los parámetros de interés.
7. Las estimaciones son finalmente publicadas. Estas sirven para la toma de decisiones.

### Ciclo de vida de una encuesta

Groves, Fowler, Couper, Lepkowski, Singer & R. (2004) afirman que una encuesta va desde el diseño, pasando por la ejecución hasta, la entrega de las estimaciones. Si no se realiza un buen diseño no habrán buenas estimaciones. En este camino, el investigador debe transitar los siguientes pasos:

1. **Búsqueda de constructores:** los constructores son las ideas abstractas acerca de las cuales el investigador desea inferir. En una encuesta de victimización, se busca medir cuántos incidentes relacionados con crímenes tuvieron lugar en cierto periodo de tiempo; el investigador debe decidir acerca de ¿qué es un crimen?, ¿quién es una víctima?. En una encuesta de calidad de vida, se desea saber cuántas personas pobres hay en una determinada región; por tanto, es necesario decidir acerca de ¿qué es pobreza?

2. **Medición:** la cuestión clave para realizar una buena medición es diseñar preguntas que produzcan respuestas que reflejen perfectamente los constructores que se intentan medir. Por ejemplo, en la encuesta de victimización, se puede preguntar lo siguiente: «en los últimos seis meses ¿ha llamado usted a la policía para reportar algo que le haya sucedido y que usted considere que sea un crimen?». Por otro lado, en la encuesta de calidad de vida, un indicador de pobreza puede estar dado en términos del número de electrodomésticos que posee el hogar. Así, es posible preguntar lo siguiente: «¿cuántos televisores tiene en su hogar?» o también «¿cuántas bombillas eléctricas tiene su hogar?»
3. **Respuesta:** la naturaleza de las respuestas está determinada por la naturaleza de las preguntas. En algunas ocasiones la respuesta puede ser parte de la pregunta, siendo la tarea del respondiente escoger entre las categorías preguntadas; en otras ocasiones, el respondiente genera una respuesta concreta en sus propias palabras.
4. **Edición:** existen relaciones lógicas entre las preguntas de una encuesta. Por ejemplo, si el respondiente declara tener 12 años de edad y haber dado a luz a 5 hijos, debe existir un proceso de edición para este individuo. Este proceso intenta detectar datos atípicos y revisar la información para obtener la mejor medida del constructor buscado.
5. **Análisis y entrega de resultados:** el proceso estadístico arroja estimaciones que permiten la toma de decisiones y la resolución de los objetivos propuestos al comienzo de la investigación.

### 1.1.2 Marco de muestreo

Todo procedimiento de muestreo probabilístico requiere de un dispositivo que permita identificar, seleccionar y ubicar a todos y cada uno de los objetos pertenecientes a la población objetivo y que participarán en la selección aleatoria. Este dispositivo se conoce con el nombre de **marco de muestreo**. En investigaciones por muestreo se consideran dos tipos de objetos:

- **Elementos:** las unidades básicas e individuales sobre las que se realiza la medición.
- **Conglomerado:** agrupación de elementos cuya característica principal es que son homogéneos dentro de sí, y heterogéneos entre sí.

Cuando se dispone de un marco de elementos, se puede aplicar un diseño de muestreo de elementos; en muchas ocasiones se utilizan diseños de muestreo de conglomerados aunque se disponga de un marco de elementos. Si no se dispone de un marco de elementos (o es muy costoso construirlo) se debe recurrir a diseños de muestreo en conglomerados; es decir, que se utilizan marcos de conglomerados. Por ejemplo, al realizar una encuesta cuya unidad de observación sean las personas que viven en una ciudad, es muy difícil poder acceder a un marco de muestreo de las personas. Sin embargo, se puede tener acceso a la división sociodemográfica de la ciudad y así seleccionar algunos barrios de la ciudad, en una primera instancia y luego, seleccionar a las personas de los barrios en una segunda instancia. En el ejemplo anterior, los barrios son un ejemplo claro de conglomerados. Estas agrupaciones de elementos tienen la características de aparecer en el estado de la naturaleza. De esta forma, si se dispone de un marco de elementos, por ejemplo, el listado de empleados de una entidad, es posible aplicar un diseño de muestreo de elementos, realizar la selección aleatoria y de acuerdo a ese mismo diseño realizar las estimaciones necesarias. El lector debe recordar que los elementos son las entidades que componen la población y las unidades de muestreo son las entidades que conforman el marco muestral. Cuando no existe un marco de muestreo disponible es necesario construirlo. Existen dos tipos de marcos de muestreo, a saber:

- **De Lista:** listados físicos o magnéticos, ficheros, archivos de expedientes, historias clínicas que permiten identificar y ubicar a los objetos que participarán en el sorteo aleatorio.

- **De Área:** mapas de ciudades y regiones en formato físico o magnético, fotografías aéreas, imágenes de satélite o similares que permiten delimitar regiones o unidades geográficas en forma tal que su identificación y su ubicación sobre el terreno sea posible.

Es una virtud del marco si contiene **información auxiliar** que permite aplicar diseños muestrales y/o estimadores que conduzcan a estrategias más eficientes con respecto a la precisión de los resultados. O también si la información auxiliar<sup>1</sup> está organizada por órdenes deseables. Se llama información auxiliar **discreta**, si el marco de muestreo permite la desagregación de la población objetivo en categorías o grupos poblacionales más pequeños. Por ejemplo nivel socioeconómico, grupo industrial, etc. Se llama información auxiliar **continua** si existe una o varias características de interés de tipo continuo y positivas. Es deseable que la información auxiliar continua esté altamente relacionada con la característica de interés.

Por otra parte, un marco de muestreo es defectuoso si presenta alguno o varios de los siguientes casos:

- **Sobre-cobertura:** se presenta si en el dispositivo aparecen objetos que no pertenecen a la población objetivo. *No son todos los que están.*
- **Sub-cobertura:** se da cuando algunos elementos de la población objetivo no aparecen en el marco de muestreo o cuando no se ha actualizado la entrada de nuevos integrantes. *No están todos los que son.*
- **Duplicación:** La duplicación en un marco de muestreo se presenta si en el dispositivo aparecen varios registros para un mismo objeto. La razón más frecuente para la presencia de este defecto es la construcción no cuidadosa del marco a partir de la unión de registros administrativos de dos o más fuentes de información.

Estos defectos ocasionan errores en el cálculo de las expresiones que se utilizarán para generar las correspondientes estimaciones, generando sesgo, pérdida de precisión y, en algunos casos, que los resultados del estudio pierdan toda validez.

### Tipos de poblaciones objetivo

Groves, Fowler, Couper, Lepkowski, Singer & R. (2004) consideran que los tipos de poblaciones objetivo que se presentan de manera más frecuente en un estudio por muestreo son las siguientes

- **Hogares y personas:** el marco de muestreo más utilizado en estas poblaciones es de área. Como está basada en zonas geográficas, este tipo de marco requiere la vinculación de los hogares o personas a cada una de las áreas. Cuando se requiere seleccionar personas, este tipo de marcos hace necesarias muchas etapas de muestreo; de esta forma, se selecciona un subconjunto de zonas geográficas. Para cada zona seleccionada, se procede a seleccionar un subconjunto de secciones, luego de manzanas, luego de hogares y, finalmente, para cada hogar se seleccionan las personas; siendo éstas las unidades de observación.
- **Clientes, empleados o miembros de organizaciones:** por lo general, para la selección de miembros de organizaciones se manejan marcos de lista. Es importante que el estadístico esté al tanto de la frecuencia y manera de actualización de la lista pues pueden presentar los tres tipos de defectos vistos anteriormente.

<sup>1</sup> Toda información auxiliar disponible para todos y cada uno de los elementos del universo afecta directamente la estrategia empleada para obtener los objetivos de la investigación. Con respecto a la información auxiliar, es deseable que esté bien correlacionada con la característica de interés.

- **Organizaciones:** existen diversos tipos de organizaciones, como por ejemplo, iglesias, prisiones, empresas, hospitales, escuelas, etc. En encuestas a establecimientos comerciales, es frecuente tener acceso a marcos de lista que agrupan a negocios con gran dispersión entre sí. Así, se puede encontrar desde la tienda de barrio, cuyas ventas ascienden a 1000 dólares al mes, hasta un hipermercado que vende 500 millones de dólares al mes.
- **Eventos:** en algunas ocasiones, la población objetivo son eventos. Hay muchos tipos de eventos que clasifican para la realización de una encuesta; entre ellos están los matrimonios, nacimientos, fallecimientos, periodos de depresión, tránsito de un automóvil en un segmento de la vía. Los marcos de muestreo para los eventos, de manera frecuente, son marcos de personas. Así, una persona ya ha experimentado el evento o no. De hecho, puede haber experimentado varios eventos. Sin embargo, otro marco de muestreo para eventos puede estar dado en periodos de tiempo o espacio.
- **Poblaciones poco frecuentes:** cuando la incidencia es muy baja (por ejemplo las poblaciones de invidentes o con alguna enfermedad rara). Generalmente, la manera para acceder a este tipo de poblaciones es mediante un marco de muestreo que contenga a esta población como un subconjunto de elementos que pueden ser ubicados.

**Ejemplo 1.1.1.** Suponga que una entidad oficial del gobierno de su país está interesada en la realización de una encuesta de desempleo con el fin de determinar a) cuántas personas actualmente pertenecen a la fuerza laboral, tanto en el país en cuestión como en sus regiones o subdivisiones geográficas y b) qué proporción de éstas están desempleadas. Con base en lo anterior se tienen los siguientes aspectos para la realización de dicho estudio:

- *Población objetivo:* Todas las personas de Colombia.
- *Dominios o subgrupos de interés:* Grupos de edad, género, grupos ocupacionales y regiones del país.
- *Características de interés:* Pertenencia a la fuerza laboral y estado de empleo. Éstas toman valor uno o cero.
- *Parámetros de interés:* Número total de personas pertenecientes a la fuerza laboral, número total de desempleados, proporción de desempleo.
- *Muestra:* Se selecciona una muestra de la población con la ayuda de mecanismos de identificación y ubicación de las personas en el país.
- *Observaciones:* Cada persona incluida en la muestra es visitada por un encuestador entrenado, quien hará preguntas siguiendo un cuestionario estandarizado y recolectará las respuestas en un instrumento apropiado.
- *Procesamiento:* Los datos se editan y se preparan para la etapa de estimación.
- *Estimación:* Se calculan las estimaciones sobre los parámetros de interés y también indicadores acerca de la incertidumbre de estas estimaciones.

### 1.1.3 Sesgo

En el diseño y puesta en marcha de una encuesta puede ocurrir cierto tipo de situaciones que pueden sesgar las estimaciones finales. Este tipo de sesgos puede ocurrir antes, durante y después de la recolección de los datos. Es tarea del estadístico advertir ante todas las posibles instancias de los problemas que causan los sesgos y procurar que, en todas las etapas de la encuesta, se minimice el error humano y el error estadístico para que al final los resultados del estudio sean tan confiables como sea posible.

### Sesgo de selección

Este tipo de sesgo ocurre cuando parte de la población objetivo no está en el marco de muestreo. Una muestra a conveniencia<sup>2</sup> es sesgada pues las unidades más fáciles de elegir o las que más probablemente respondan a la encuesta no son representativas de las unidades más difíciles de elegir. (Lohr 2000) afirma que se presenta este tipo de sesgo si:

1. La selección de la muestra depende de cierta característica asociada a las propiedades de interés. Por ejemplo: Frecuencia con que los adolescentes hablan con los padres acerca del SIDA.
2. La muestra se realiza mediante elección deliberada o mediante un juicio subjetivo. Por ejemplo, si el parámetro de interés es la cantidad promedio de gastos en compras en un centro comercial y el encuestador elige a las personas que salen con muchos paquetes, entonces la información estaría sesgada puesto que no está reflejando el comportamiento promedio de las compras.
3. Existen errores en la especificación de la población objetivo. Por ejemplo, en encuestas electorales, cuando la población objetivo contiene a personas que no están registradas como votantes ante la organización electoral de su país.
4. Existe sustitución deliberada de unidades no disponibles en la muestra. Si, por alguna razón, no fue posible obtener la medición y consecuente observación de la característica de interés para algún individuo en la población, la sustitución de este elemento debe hacerse bajo estrictos procedimientos estadísticos y no debe ser subjetiva en ningún modo.
5. Existe ausencia de respuesta. Este fenómeno puede causar distorsión de los resultados cuando los que no responden a la encuesta difieren críticamente de los que si respondieron.
6. La muestra está compuesta por respondientes voluntarios. Los foros radiales, las encuestas de televisión y los estudios de portales de internet no proporcionan información confiable.

### Sesgo de medición

Este tipo de sesgo ocurre cuando el instrumento con el que se realiza la medición tiene una tendencia a diferir del valor verdadero que se desea averiguar. Éste sesgo debe ser considerado y minimizado en la etapa de diseño de la encuesta. Nótese que ningún análisis estadístico puede revelar que una pesa añadió a cada persona 2Kg de más en un estudio de salud. (Lohr 2000) cita algunas situaciones en donde se presenta este sesgo de medición:

1. Cuando el respondiente miente. Esta situación se presenta a menudo en encuestas que pregunta acerca del ingreso salarial, alcoholismo y drogadicción, nivel socioeconómico e incluso edad.
2. Dificil comprensión de las preguntas. Por ejemplo: ¿No cree que no este es un buen momento para invertir? La doble negación en la pregunta es muy confusa para el respondiente.
3. Las personas tienden a olvidar. Es bien sabido que las malas experiencias suelen ser olvidadas; esta situación debe acotarse si se está trabajando en una encuesta de criminalidad.
4. Distintas respuestas a distintos entrevistadores. En algunas regiones es muy probable que la raza, edad o género del encuestador afecte directamente la respuesta del entrevistado.

---

<sup>2</sup>A pesar de que las muestras por conveniencia o por juicio no pueden ser utilizadas para estimar parámetros de la población, éstas sí pueden proporcionar información valiosa en las primeras etapas de una investigación o cuando no es necesario generalizar los resultados a la población.

5. Leer mal las preguntas o polemizar con el respondiente. El encuestador puede influir notablemente en las respuestas. Por lo anterior, es muy importante que el proceso de entrenamiento del entrevistador sea riguroso y completo.
6. La muestra está compuesta por respondientes voluntarios. Los foros radiales, las encuestas de televisión y los estudios de portales de internet no proporcionan información confiable.

## 1.2 Marco y Lucy

Este libro toma como base de aplicación una investigación gubernamental que quiere responder al objetivo de *medir el crecimiento económico en el sector industrial*.

Suponga que para completar el objetivo se ha propuesto desarrollar una encuesta a las empresas que hacen parte del sector industrial, para conocer el comportamiento del sector en términos de **constructores** financieros, sociales y fiscales. Una vez termine el proceso de medición, se pueden calcular estimaciones y construir indicadores que permitan inferir acerca del crecimiento del sector en el periodo de interés.

La **población objetivo** la conforman todas las empresas cuya actividad principal esté ligada al sector industrial. El proceso de medición se hará con base en las **características de interés**; a saber: ingresos en el último año fiscal, impuestos declarados en el último año fiscal y número de empleados. Adicionalmente, se requiere conocer si la empresa envía periódicamente algún tipo de material publicitario por correo electrónico porque se sospecha que las empresas obtienen más ingresos cuando utilizan esta estrategia publicitaria, lo cual es favorable para el gobierno porque aumenta la contribución impositiva y aumenta la creación de empleos.

Para obtener las respuestas, un entrevistador visitará las instalaciones físicas de la empresa y realizará las siguientes preguntas:

1. En el último año fiscal, ¿a cuánto ascendieron los ingresos en esta empresa?
2. En el último año fiscal, ¿a cuánto ascendieron los impuestos declarados por esta empresa?
3. Actualmente, ¿cuántos empleados laboran para esta empresa?
4. ¿Esta empresa acostumbra a enviar periódicamente material publicitario por correo electrónico a sus clientes o potenciales clientes?

Se sabe que el tamaño de la población es de 2396 empresas. Dependiendo de la estrategia de muestreo que se vaya a utilizar y de la calidad del marco de muestreo, las unidades de muestreo pueden ser las mismas empresas.

Para abordar la selección de una muestra que permita la inferencia acerca del crecimiento económico del sector, se dispone de un marco de muestreo con las siguientes características para cada empresa que conforma la población.

1. **Identificador:** es una secuencia alfanumérica de dos letras y tres dígitos. Este número de identificación se le otorga a cada empresa en el momento de la constitución legal ante la entidad de registro pertinente.
2. **Ubicación:** es la dirección que se encuentra registrada en la declaración de impuestos.
3. **Zona:** la ciudad está conformada por barrios o zonas geográficas. Dependiendo de la dirección, la empresa pertenece a una y sólo una zona geográfica de la ciudad.

4. **Nivel:** según los registros tributarios, las empresas se catalogan en tres grupos:

- (a) Grandes: empresas que tributan 49 millones de dólares al año o más.
- (b) Medianas: empresas que tributan más de 11 millones y menos de 49 millones de dólares al año.
- (c) Pequeñas: empresas que tributan 11 millones de dólares al año o menos.

Nótese que una empresa sólo puede pertenecer a un sólo un nivel industrial.

## Visualización en R

El paquete **TeachingSampling** de R incluye dos archivos de datos. El marco de muestreo llamado **Marco** del cual se extraerá una muestra aleatoria de empresas que deben ser entrevistadas y que contiene la identificación, ubicación, zona y nivel de cada una de las empresas del sector industrial. Por otro lado, incorpora el conjunto de datos llamado **BigLucy** en donde, se encuentran los valores de las características de interés para todos los elementos de la población.

Para tener acceso a los dos conjuntos de datos es necesario cargar el paquete en el entorno de R. El paquete **TeachingSampling** puede ser cargado fácilmente mediante el uso de la siguiente instrucción:

```
library(TeachingSampling)
```

Una vez cargado el paquete **TeachingSampling**, la visualización del marco de muestreo, se realiza de la siguiente forma:

```
data(BigLucy)
BigLucy[1:10,c(1:4,11)]
```

##	ID	Ubication	Level	Zone	Segments
## 1	AB0000000001	C0212063K0089834	Small	County1	County1 1
## 2	AB0000000002	C0011268K0290629	Small	County1	County1 1
## 3	AB0000000003	C0077703K0224194	Small	County1	County1 1
## 4	AB0000000004	C0091012K0210885	Small	County1	County1 1
## 5	AB0000000005	C0301070K0000827	Small	County1	County1 1
## 6	AB0000000006	C0255289K0046608	Small	County1	County1 1
## 7	AB0000000007	C0280547K0021350	Small	County1	County1 1
## 8	AB0000000008	C0148379K0153518	Small	County1	County1 1
## 9	AB0000000009	C0111156K0190741	Small	County1	County1 1
## 10	AB0000000010	C0199974K0101923	Small	County1	County1 1

La instrucción `BigLucy[1:10,c(1:4,11)]` se utiliza para mostrar las diez primeras empresas del marco de muestreo. Si se quiere visualizar todo el conjunto de datos, la instrucción `BigLucy` mostrará la totalidad del marco de muestreo. La función `names` muestra cada uno de los objetos que componen el archivo de datos, mientras que la función `dim` muestra las dimensiones del conjunto de datos.

```
names(BigLucy)
```

##	[1]	"ID"	"Ubication"	"Level"	"Zone"	"Income"
## [6]	"Employees"	"Taxes"	"SPAM"	"ISO"	"Years"	
## [11]	"Segments"					



```
dim(BigLucy)
```

```
## [1] 85296    11
```

La lectura del archivo de datos se hace de la siguiente manera: tomando como referencia la fila número 3 (la tercera empresa del conjunto de datos), es una empresa cuyo número de identificación es AB0000000001, ubicada en la dirección C0212063K0089834, de nivel industrial Small, localizada en la zona County1 y en el segmento County1 1. Esta empresa registró en el último año fiscal un ingreso neto de 281 millones de dólares y realizó un tributo de 3 millones de dólares, actualmente da empleo a 41 empleados, no envía periódicamente publicidad a sus clientes o potenciales clientes mediante correo electrónico, tampoco tiene certificación de calidad ISO y tiene una antigüedad de 14 años.

```
BigLucy[1:10,5:10]
```

##	Income	Employees	Taxes	SPAM	ISO	Years
## 1	281	41	3.0	no	no	14.0
## 2	329	19	4.0	yes	no	17.6
## 3	405	68	7.0	no	no	13.6
## 4	360	89	5.0	no	no	44.7
## 5	391	91	7.0	yes	no	23.3
## 6	296	89	3.0	no	no	48.3
## 7	490	22	10.5	yes	yes	17.0
## 8	473	57	10.0	yes	no	7.5
## 9	350	84	5.0	yes	no	38.7
## 10	361	25	5.0	no	no	18.3

Nótese que el conjunto de datos poblacionales **BigLucy** contiene el valor de las características de interés para cada empresa. Hasta este momento no se ha seleccionado ninguna muestra, pero si se supone hipotéticamente que la muestra seleccionada hubiese sido las diez primeras empresas del marco de muestreo, la base de datos, después de la medición se vería como lo muestra la salida anterior y con estos datos se procede a realizar las estimaciones requeridas para el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

Las estadísticas concernientes a las variables en las población se visualizan fácilmente con la función **summary** aplicada al conjunto de datos **Lucy**.

```
summary(BigLucy[,5:10])
```

##	Income	Employees	Taxes	SPAM	ISO
## Min. :	1	Min. : 1.0	Min. : 0.5	no :33355	no :56896
## 1st Qu.:	230	1st Qu.: 38.0	1st Qu.: 2.0	yes:51941	yes:28400
## Median :	388	Median : 62.0	Median : 6.0		
## Mean :	430	Mean : 63.2	Mean : 11.8		
## 3rd Qu.:	570	3rd Qu.: 84.0	3rd Qu.: 15.0		
## Max. :	2510	Max. :263.0	Max. :305.0		
##	Years				
## Min. :	1.0				
## 1st Qu.:	13.1				
## Median :	25.4				
## Mean :	25.4				
## 3rd Qu.:	37.7				
## Max. :	50.0				

Por medio de la función `total`, tenemos acceso al total de las tres características de interés.

```
attach(BigLucy)
total <- function(x){length(x)*mean(x)}

total(Income)

## [1] 36634733

total(Employees)

## [1] 5391992

total(Taxes)

## [1] 1008426
```

El sector industrial tiene altos ingresos que ascienden a 36634733 millones de dólares, aporta al gobierno 1008426 millones de dólares en tarifas impositivas, emplea un total de 5391992 personas. La función `tapply` permite aplicar la función `total` y la función `mean` para calcular el total y el promedio, respectivamente, de las variables de interés en cada categoría de la variable `Level`. La función `table` hace un recuento del total de casos para una o más variables categóricas.

```
tapply(Income,Level,total)

##      Big      Medium      Small
## 3629710 17057285 15947738

table(SPAM,Level)

##      Level
## SPAM      Big Medium Small
##  no      910  10185 22260
##  yes     1995   15610 34336
```

Nótese que la mayoría del ingreso del sector industrial es adquirido por las empresas medianas y pequeñas. Sin embargo, en promedio las empresas grandes doblan el ingreso de las medianas que a su vez es tres veces el ingreso de las empresas pequeñas. En términos absolutos, la estrategia publicitaria de enviar SPAM a los clientes o potenciales clientes se implementa con mayor frecuencia en las empresas pequeñas.

La función `xtabs` permite realizar una tabulación cruzada entre las variables categóricas `Level` y `SPAM` de la base de datos. Los datos de las celdas indican el total de la variable `Income`. Nótese que el ingreso de las empresas que utilizan el SPAM como estrategia de publicidad dobla el ingreso de las empresas que no utilizan SPAM en casi todos los niveles industriales.

```
xtabs(Income~Level+SPAM)

##      SPAM
## Level      no      yes
```

```
## Big      1116990 2512720
## Medium  6679820 10377465
## Small   6288497 9659241
```

La función `boxplot` permite realizar el diagrama de cajas de cada una de las variables de interés. Nótese que, a excepción de la variable `Years`, existe una dependencia marcada en el comportamiento de las características cuantitativas con el nivel industrial.

```
p1 <- qplot(Level, Income, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
p2 <- qplot(Level, Employees, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
p3 <- qplot(Level, Taxes, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
p4 <- qplot(Level, Years, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
grid.arrange(p1, p2, p3, p4, ncol = 2)
```

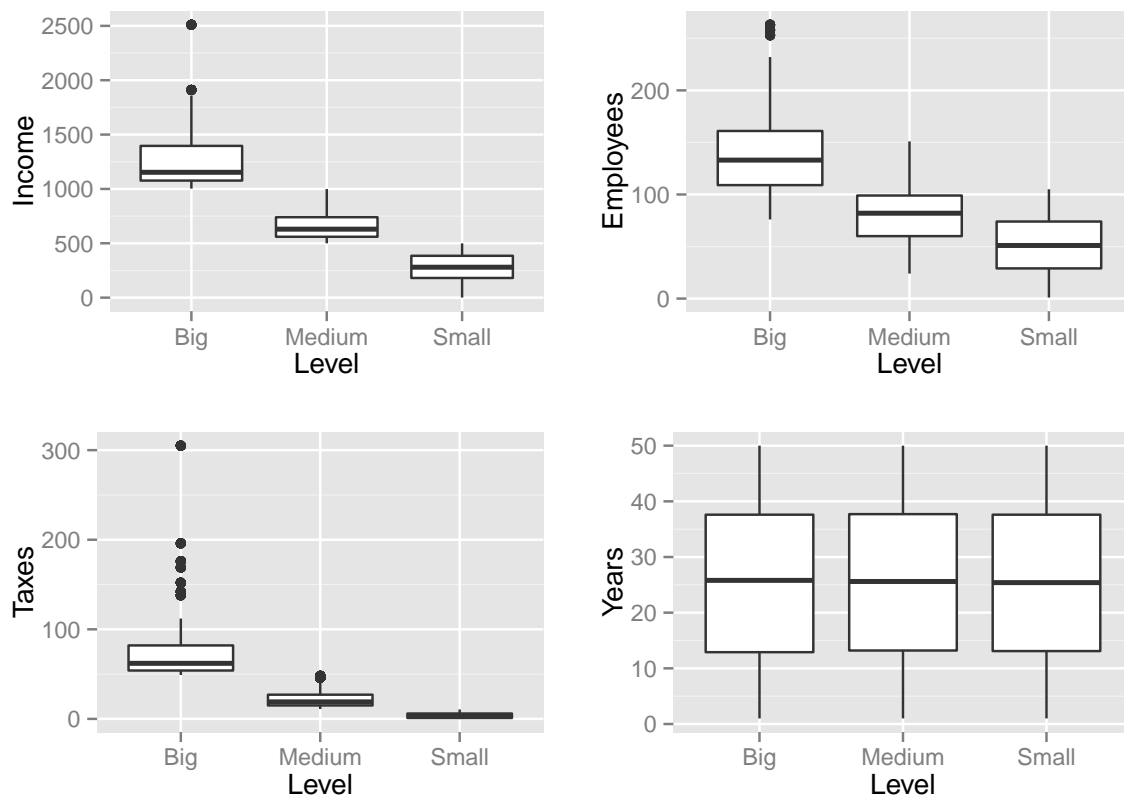


Figura 1.1: *Boxplot de las características de interés en cada nivel industrial.*

Sin embargo, a diferencia del caso anterior, no parece existir una dependencia en el comportamiento de las características cuantitativas con el hábito de enviar publicidad por internet.

Las figuras 5.2 y 1.2 muestran la dispersión y locación de las características de interés por cada nivel industrial. En general, las empresas grandes tienen ingresos más altos, aportan una carga impositiva más alta y emplean a más personas que las empresas medianas y pequeñas. Es deseable que el marco de muestreo contenga la pertenencia al nivel industrial de cada empresa en la población porque es un buen discriminante y permite la implementación de estrategias de muestreo adecuadas que guíen a estimaciones más precisas. La función `n_barplot` muestra un diagrama de barras del total de la

```
p1 <- qplot(SPAM, Income, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
p2 <- qplot(SPAM, Employees, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
p3 <- qplot(SPAM, Taxes, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
p4 <- qplot(SPAM, Years, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
grid.arrange(p1, p2, p3, p4, ncol = 2)
```

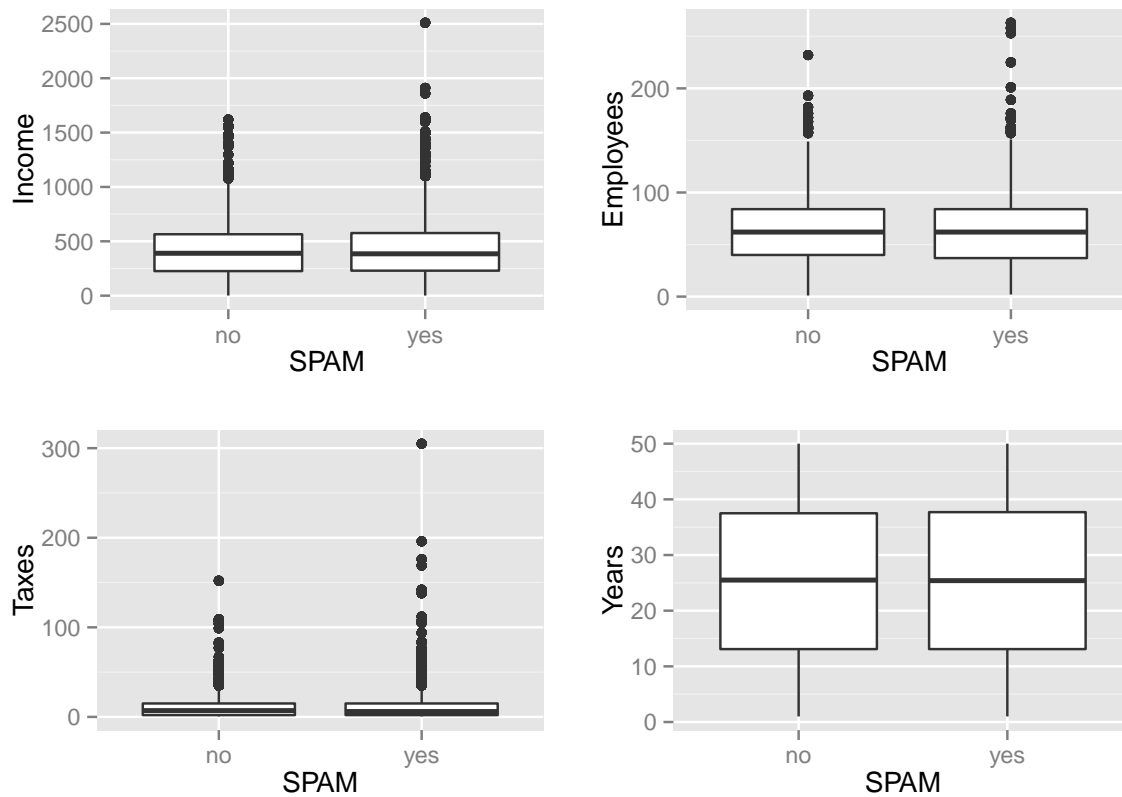


Figura 1.2: *Boxplot de las características de interés en cada nivel industrial.*

variable Level.

La figura 1.3 muestra que la distribución de las características de interés no es simétrica y es sesgada a la izquierda. Estos rasgos particulares se deben tener en cuenta al momento de escoger la mejor estrategia de muestreo. La función `hist` permite la creación de los histogramas y la función `pie` permite la creación de un gráfico de torta.

La correlación lineal entre las características de interés es alta; entre `Income` y `Taxes` existe una correlación de 0.91, esto se puede explicar porque las empresas tributan una mayor cantidad de dinero si han obtenido mayores ingresos y viceversa. Se utiliza la función `cor` para obtener la matriz de correlación entre las características de interés.

```
Datos <- data.frame(Income, Employees, Taxes, Years)
cor(Datos)

##           Income Employees   Taxes   Years
## Income      1.0000000  0.643304 0.9166732 -0.0001266
```

```
p1 <- qplot(Income, data=BigLucy, geom=c("histogram"))
p2 <- qplot(Employees, data=BigLucy, geom=c("histogram"))
p3 <- qplot(Taxes, data=BigLucy, geom=c("histogram"))
p4 <- qplot(Years, data=BigLucy, geom=c("histogram"))
grid.arrange(p1, p2, p3, p4, ncol = 2)

## stat_bin: binwidth defaulted to range/30. Use 'binwidth = x' to adjust this.
## stat_bin: binwidth defaulted to range/30. Use 'binwidth = x' to adjust this.
## stat_bin: binwidth defaulted to range/30. Use 'binwidth = x' to adjust this.
## stat_bin: binwidth defaulted to range/30. Use 'binwidth = x' to adjust this.
```

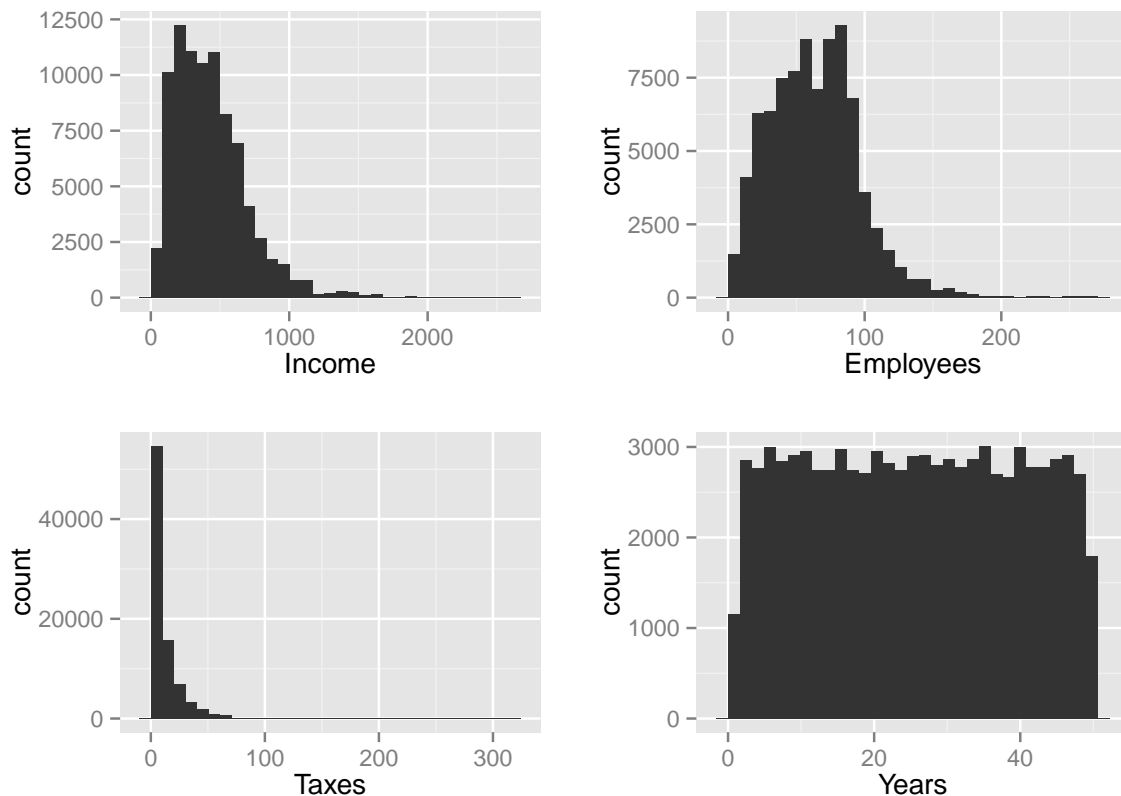


Figura 1.3: Histograma de las características de interés.

```
## Employees 0.6433037 1.000000 0.6448609 0.0039724
## Taxes     0.9166732 0.644861 1.0000000 0.0008152
## Years     -0.0001266 0.003972 0.0008152 1.0000000
```

Para visualizar la relación entre las variables de interés, se utiliza la función `pairs` para obtener los diagramas de dispersión para cada par de variables justo como lo muestra la figura 1.4.

La tabla 1.1. resume los parámetros de interés que, mediante una adecuada estrategia de muestreo, se deben estimar para resolver el objetivo principal de la investigación. Si se desean estimaciones discriminadas por nivel industrial, entonces la tabla 1.2. da cuenta del valor de estos parámetros dentro de los subgrupos poblacionales.

```
library(GGally)
ggpairs(Datos)
```

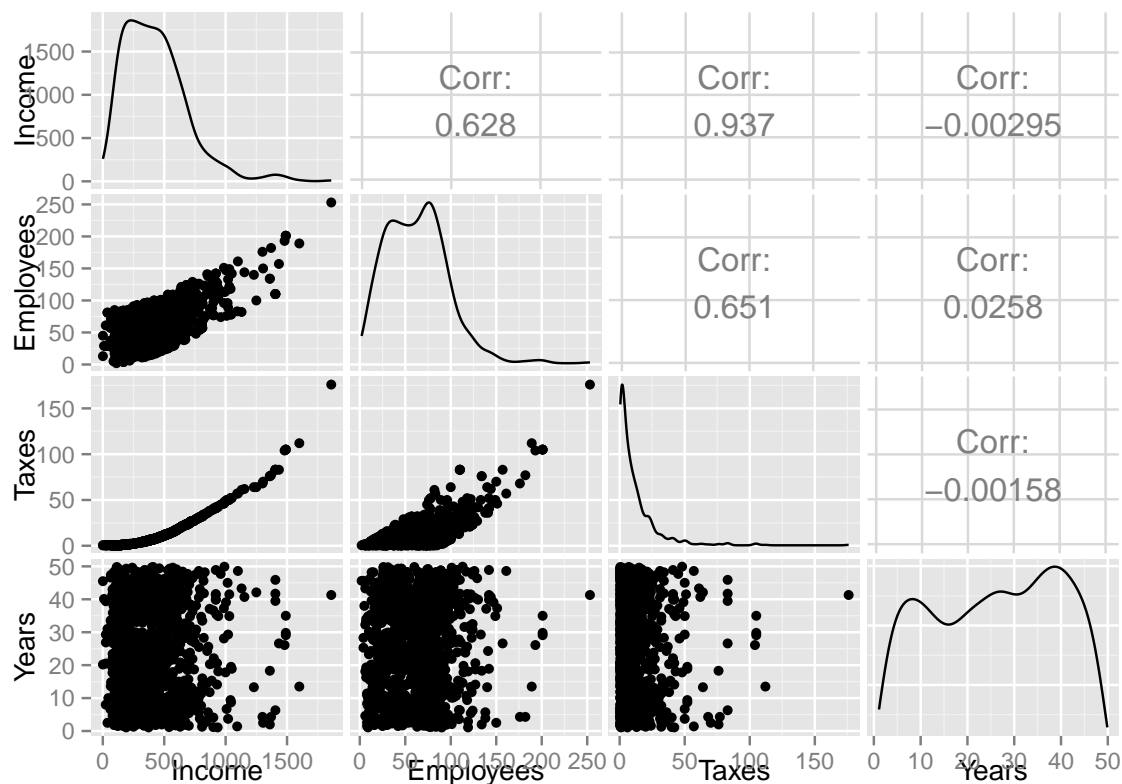


Figura 1.4: Relación entre las características de interés.

Consecuentemente, si se quieren estimaciones discriminadas por comportamiento publicitario, entonces la tabla 1.3. muestra el valor de cada uno de estos parámetros. Por último, si se buscan estimaciones discriminadas tanto por comportamiento publicitario cruzado con nivel industrial, entonces se cuenta con la tabla 1.4. que resume dicha información.

Tabla 1.1: Parámetros de la población.

	Ingreso	Impuestos	Empleados
N total	2.396	2.396	2.396
Suma	1.035.217	28.654	151.950
Media	432	12	63

Tabla 1.2: *Parámetros de la población discriminados por nivel industrial.*

			Ingreso	Impuestos	Empleados
Nivel	Grande	N total	83	83	83
		Suma	103.706	6.251	11.461
		Media	1.249	75	138
	Mediano	N total	737	737	737
		Suma	487.351	16.293	59.643
		Media	661	22	81
	Pequeño	N total	1.576	1.576	1.576
		Suma	444.160	6.110	80.846
		Media	282	4	51

Tabla 1.3: *Parámetros de la población discriminados por comportamiento publicitario.*

			Ingreso	Impuestos	Empleados
SPAM	no	N total	937	937	937
		Suma	397.952	10.593	59.600
		Media	425	11	64
	si	N total	1.459	1.459	1.459
		Suma	637.265	18.061	92.350
		Media	437	12	63

Tabla 1.4: *Parámetros de la población discriminados por nivel industrial y por comportamiento publicitario.*

		SPAM					
		no			si		
		N total	Suma	Media	N total	Suma	Media
Grande	Ingreso	26	31.914	1.227	57	71.792	1.260
	Impuestos	26	1.844	71	57	4.407	77
	Empleados	26	3.587	138	57	7.874	138
Mediano	Ingreso	291	190.852	656	446	296.499	665
	Impuestos	291	6.322	22	446	9.971	22
	Empleados	291	23.745	82	446	35.898	80
Pequeño	Ingreso	620	175.186	283	956	268.974	281
	Impuestos	620	2.427	4	956	3.683	4
	Empleados	620	32.268	52	956	48.578	51





## Capítulo 2

# Muestras probabilísticas y estimadores

La base matemática para el desarrollo del modelo de muestreo se encuentra en la teoría de la inferencia estadística y de manera más directa en la aplicación de los principios básicos de la teoría de probabilidad. Los resultados del modelo de muestreo sólo son válidos si se parte de la certeza de contar con una muestra que satisfaga las condiciones exigidas por la inferencia estadística.

Bautista (1998)

### 2.1 Población y muestra aleatoria

El proceso de estimación e inferencia en poblaciones finitas, que finalmente son las que fácilmente encontramos en la realidad y en las que se enfoca el muestreo, es muy diferente al proceso de inferencia de la estadística clásica. Esta última se trata a los valores observados como realizaciones de una variable aleatoria. En contravía con lo anterior, el muestreo asume que los valores observados corresponden a parámetros fijos poblacionales. Partiendo de este hecho formalicemos algunos conceptos que son de vital importancia en el estudio y análisis del muestreo.

#### 2.1.1 Población finita

**Definición 2.1.1.** Una **población finita** es un conjunto de  $N$  elementos  $\{e_1, e_2, \dots, e_N\}$ . Cada unidad puede ser identificada sin ambigüedad por un conjunto de rótulos. Sea  $U = \{1, 2, \dots, N\}$  el conjunto de rótulos de la población finita. El tamaño de la población no es necesariamente conocido.

Es el conjunto de  $N$ , donde  $N < \infty$ , unidades que conforman el universo de estudio.  $N$  es comúnmente llamado el tamaño poblacional. Cada elemento perteneciente a la población puede ser identificado por un rótulo. Sea  $U$  el conjunto de rótulos, tal que

$$U = \{1, \dots, k, \dots, N\}.$$

Se utilizará el subíndice  $k$  para denotar la existencia física del  $k$ -ésimo elemento. Nótese que el **tamaño de la población**,  $N$ , no siempre es conocido y en algunas ocasiones el objetivo de la investigación es poder estimarlo.

### 2.1.2 Muestra aleatoria

Es un subconjunto de la población que ha sido extraído mediante un mecanismo estadístico de selección. Notaremos con una letra mayúscula  $S$  a la muestra aleatoria<sup>1</sup> y con una letra minúscula  $s$  a una realización de la misma. De tal forma que, sin ambigüedad, una muestra seleccionada (realizada) es el conjunto de unidades pertenecientes a

$$s = \{1, \dots, k, \dots, n(S)\}.$$

El número de componentes de  $s$  es llamado el **tamaño de muestra** y no siempre es fijo. Es decir, en algunos casos  $n(S)$  es una cantidad aleatoria. El conjunto de todas las posibles muestras se conoce como **soporte**. Haciendo una analogía con la inferencia estadística clásica, el soporte generado por una muestra aleatoria corresponde al espacio muestral generado por una variable aleatoria.

La anterior definición de muestra, en donde los elementos incluidos se listan dentro de un conjunto, corresponde a la forma clásica de notación. Sin embargo, una muestra también puede ser notada como un vector de tamaño  $N$ . De esta manera, la  $k$ -ésima entrada del vector denotará el número de veces que el elemento fue incluido o seleccionado; si el valor es cero, indica que el elemento no fue incluido en la muestra seleccionada; si el valor es distinto de cero, indica que el elemento sí fue seleccionado. Aunque ambas formas de notación tienen la misma interpretación, para evitar confusiones, se denotará la muestra en forma de vector con una  $\mathbf{s}$  en negrilla, mientras que la muestra en forma de conjunto se denotará con una  $s$  simple sin negrilla. A continuación se dan definiciones más precisas acerca de la muestra aleatoria con o sin reemplazo.

#### Muestra aleatoria sin reemplazo

**Definición 2.1.2.** Una **muestra sin reemplazo** se denota mediante un vector columna

$$\mathbf{s} = (I_1, I_2, \dots, I_N)' \in \{0, 1\}^N \quad (2.1.1)$$

donde

$$I_k = \begin{cases} 1 & \text{si el } k\text{-ésimo elemento pertenece a la muestra,} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.1.2)$$

Una muestra aleatoria se dice sin reemplazo si la inclusión de cada uno de los elementos se hace entre los elementos que no han sido escogidos aún; de esta manera el conjunto  $s$  nunca tendrá elementos repetidos. El tamaño de muestra corresponde a la cardinalidad de  $s$ .

$$n(S) = \sum_{k \in U} I_k. \quad (2.1.3)$$

Como  $n(S)$  no es una cantidad fija, es posible que ocurran uno de los siguientes escenarios: a) que la muestra no contenga a ningún elemento, entonces esta muestra se dice vacía; b) que la muestra contenga a todos los elementos de la población, esta muestra se conoce con el nombre de **censo**.

#### Muestra aleatoria con reemplazo

**Definición 2.1.3.** Una **muestra con reemplazo** se denota mediante un vector columna

$$\mathbf{s} = (n_1, n_2, \dots, n_N)' \in \mathbb{N}^N \quad (2.1.4)$$

donde  $n_k$  es el número de veces que el elemento  $k$  está en la muestra

---

<sup>1</sup>Nótese que  $S$  es una variable aleatoria.

En algunos casos, por conveniencia del mecanismo de selección, el usuario prefiere tomar una muestra aleatoria con reemplazo si la inclusión de cada uno de los elementos tiene en cuenta a todos los elementos, ya sea que hayan sido escogidos para pertenecer en la muestra o no. De esta forma, el usuario puede seleccionar una muestra cuyo proceso de selección incluya a un individuo  $m$  veces (nótese que  $m$  puede ser mayor que  $N$ ). Sin embargo, en una muestra aleatoria con reemplazo, dos o más componentes pueden ser idénticos. Un elemento que esté incluido más de una vez en  $s$  es llamado **elemento repetido**.

En principio el tamaño de muestra está dado por

$$n(S) = m = \sum_{k \in U} n_k. \quad (2.1.5)$$

El número de elementos distintos en una muestra aleatoria  $S$  con reemplazo es llamado **tamaño de muestra efectivo** y con probabilidad uno es menor o igual a  $N$ .

### 2.1.3 Soportes de muestreo

En los próximos capítulos empezará el tratamiento particular para estrategias de muestreo específicas; es decir, diseños de muestreo que se ajustan a ciertas situaciones y estimadores que mejoran la eficiencia de la estrategia. Sin embargo, antes de proseguir, es necesario que el lector entienda que las estrategias de muestreo se definen en términos del tipo de muestreo que se utiliza para la selección de muestras. En general, existen dos distinciones básicas.

1. **Tipo de muestreo:** selección de unidades con reemplazo o sin reemplazo.
2. **Tamaño de muestra:** tamaño de muestra fijo o aleatorio.

Como se verá en los capítulos posteriores, dependiendo de las anteriores condiciones, se define la estrategia de muestreo, el tratamiento teórico para la estimación de parámetros y el tipo de soporte. Esta sección trata específicamente sobre las diferentes formas que puede tomar el soporte de un diseño de muestreo dependiendo de las dos distinciones básicas. Para entrar en materia, es necesario enunciar las siguientes definiciones.

**Definición 2.1.4.** *Un soporte  $Q$  es un conjunto de muestras.*

**Definición 2.1.5.** *Un soporte se llama **simétrico** si para cualquier  $s \in Q$ , todas las permutaciones de  $s$  están también en  $Q$ .*

En los siguientes capítulos, a menos que se mencione lo contrario, el término **soporte** hará referencia a un **soporte simétrico**. Algunos soportes simétricos particulares son:

- El *soporte simétrico sin reemplazo* definido como

$$\mathcal{S} = \{0, 1\}^N$$

Nótese que

$$\#(\mathcal{S}) = 2^N$$

Por ejemplo, si  $N = 3$ , entonces  $\mathcal{S}$  queda definido por las siguientes muestras:

$$\mathcal{S} = \{(0, 0, 0)', (1, 0, 0)', (0, 0, 1)', (1, 0, 1)', (0, 1, 0)', (1, 1, 0)', (0, 1, 1)', (1, 1, 1)'\}$$

- El *soporte simétrico sin reemplazo de tamaño fijo* definido como

$$\mathcal{S}_n = \left\{ \mathbf{s} \in \mathcal{S} \mid \sum_{k \in U} s_k = n \right\}$$

Nótese que

$$\#(\mathcal{S}_n) = \binom{N}{n}$$

Por ejemplo, si  $N = 3$  y  $n = 2$ , entonces  $\mathcal{S}_n$  queda definido por las siguientes muestras:

$$\mathcal{S}_n = \{(1, 0, 1)', (1, 1, 0)', (0, 1, 1)'\}$$

- El *soporte simétrico con reemplazo* definido como

$$\mathcal{R} = \mathbb{N}^N$$

donde  $\mathbb{N}$  es el conjunto de los números naturales. Nótese que este soporte es un conjunto contable pero infinito, por tanto

$$\#(\mathcal{R}) = \infty$$

- El *soporte simétrico con reemplazo de tamaño fijo* definido como

$$\mathcal{R}_m = \left\{ \mathbf{s} \in \mathcal{R} \mid \sum_{k \in U} n_k = m \right\}$$

Nótese que

$$\#(\mathcal{R}_m) = \binom{N + m - 1}{m}$$

Por ejemplo, si  $N = 3$  y  $m = 2$ , entonces  $\mathcal{R}_m$  queda definido por las siguientes muestras:

$$\mathcal{R}_m = \{(2, 0, 0)', (0, 0, 2)', (0, 2, 0)', (1, 1, 0)', (1, 0, 1)', (0, 1, 1)'\}$$

Tillé (2006) afirma que geoméricamente cada vector  $\mathbf{s}$  representa el vértice de un  $N$ -cubo. Además, se tiene el siguiente resultado:

**Resultado 2.1.1.** *Para los soportes definidos anteriormente, se tienen las siguientes propiedades:*

1.  $\mathcal{S}, \mathcal{S}_n, \mathcal{R}, \mathcal{R}_m$  son soportes simétricos.
2.  $\mathcal{S} \subset \mathcal{R}$ .
3. El conjunto  $\{\mathcal{S}_0, \mathcal{S}_1, \dots, \mathcal{S}_N\}$  es una partición de  $\mathcal{S}$ .
4. El conjunto  $\{\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_N, \dots\}$  es una partición infinita de  $\mathcal{R}$ .
5.  $\mathcal{S} \subset \mathcal{R}$  para todo  $n = 0, 1, \dots, N$ .

### Muestras probabilísticas

No todas las muestras aleatorias son de tipo probabilístico. Una muestra (con o sin reemplazo) es de tipo probabilístico sí:

- Es posible construir (o al menos definir teóricamente) un soporte  $Q$ , tal que  $Q = \{s_1, \dots, s_q, \dots, s_Q\}$ , de todas las muestras posibles obtenidas por un método de selección. En donde  $s_q$ ,  $q = 1, \dots, Q$ , es una muestra perteneciente al soporte  $Q$ .
- Las probabilidades de selección que el proceso aleatorio le otorga a cada posible muestra perteneciente al soporte son conocidas de antemano a la selección de la muestra final.

Nótese que una muestra al azar no necesariamente es una muestra probabilística. En la mala práctica, algunos investigadores utilizan métodos aleatorios de inclusión de elementos sin disponer de un marco de muestreo y sin cumplir las dos condiciones anteriores; de esta manera, aunque los elementos sean escogidos de manera aleatoria o al azar, la muestra resultante no se puede catalogar como una muestra probabilística. Desde aquí en adelante, a menos que se diga lo contrario, el término muestra se refiere a una muestra probabilística. Algunos comentarios de interés son:

1. El universo  $U$  es finito.
2. La muestra probabilística  $s$  puede contener objetos repetidos. Esto sucede cuando el procedimiento de muestreo es con reemplazo.
3. La muestra  $s$  con repeticiones, puede tener un tamaño mayor al de la población.
4. La muestra  $s$  sin repeticiones, puede tener un tamaño máximo igual a  $N$ .
5. Si se presenta la ausencia del marco de muestreo es imposible realizar un procedimiento de muestreo probabilístico. Excepto cuando se realiza un censo.
6. Si la muestra seleccionada no es de tipo probabilístico, entonces no se puede construir ninguna estimación de tipo estadístico.
7. El estadístico deberá responder por los engaños o fraudes, que por ignorancia, mala fe o por la comodidad de mantener un empleo o negocio, para el cual no está capacitado, cometa contra clientes, ciudades y países que confían en la cifras resultantes de sus análisis.

**Ejemplo 2.1.1.** Suponga una población finita de tamaño  $N = 5$ , en donde los integrantes de la población están identificados cada uno con su nombre. La población la conforman los siguientes elementos:

**Yves, Ken, Erik, Sharon, y Leslie,**

En R se utiliza un vector de cadena de texto para indexar la población. Nótese que los elementos pertenecientes al vector son especificados mediante el uso de las comillas. En este caso los identificadores de cada elemento de la población, son asignados al objeto  $U$ .

```
U <- c("Yves", "Ken", "Erik", "Sharon", "Leslie")
U[1]

## [1] "Yves"

U[2]

## [1] "Ken"
```

Para obtener el soporte  $Q$ , de todas las posibles muestras de tamaño  $n = 2$  de esta población de tamaño  $N = 5$ , se utiliza la función `Support` del paquete `TeachingSampling`. Esta función contiene tres argumentos: el tamaño de la población  $N$ , el tamaño fijo de cada una de las posibles muestras  $n$  y, por último, una característica  $y$  que puede ser de tipo numérico o puede ser un conjunto de rótulos, la salida de la función será un conjunto de datos conteniendo todas las posibles muestras de tamaño fijo. Cuando el argumento  $y$  es distinto de `FALSE`, el resultado de la función será la característica poblacional para cada individuo. En el siguiente ejemplo se utiliza la función `Support(N,n,y=FALSE)` para obtener el conjunto de posibles muestras de tamaño dos de la población  $U$ , mientras que la función `Support(N,n,U)` arroja el conjunto de los rótulos en cada una de las 10 posibles muestras.

```
N <- length(U)
N

## [1] 5

n <- 2

Support(N,n)

##      [,1] [,2]
## [1,]    1    2
## [2,]    1    3
## [3,]    1    4
## [4,]    1    5
## [5,]    2    3
## [6,]    2    4
## [7,]    2    5
## [8,]    3    4
## [9,]    3    5
## [10,]   4    5

Support(N,n,U)

##      [,1] [,2]
## [1,] "Yves" "Ken"
## [2,] "Yves" "Erik"
## [3,] "Yves" "Sharon"
## [4,] "Yves" "Leslie"
## [5,] "Ken"  "Erik"
## [6,] "Ken"  "Sharon"
## [7,] "Ken"  "Leslie"
## [8,] "Erik" "Sharon"
## [9,] "Erik" "Leslie"
## [10,] "Sharon" "Leslie"
```

**Definición 2.1.6.** Un *diseño de muestreo*  $p(\cdot)$  es una distribución de probabilidad multivariante definida sobre un soporte  $Q$ ; es decir,  $p(\cdot)$  es una función que va desde  $Q^2$  hasta  $(0, 1]$  tal que  $p(s) > 0$  para todo  $s \in Q$  y

$$\sum_{s \in Q} p(s) = 1 \quad (2.1.6)$$

---

<sup>2</sup>Nótese que  $Q$  es el espacio muestral cuyos elementos son vectores.

Dado el soporte  $Q$ , un **diseño de muestreo** es una función  $p(\cdot)$ , tal que  $p(s)$  arroja la probabilidad de selección de la muestra realizada  $s$  bajo un esquema de selección particular. En otras palabras, si  $S$  es una muestra aleatoria que toma el valor  $s$  con probabilidad  $p(s)$ , tal que

$$Pr(S = s) = p(s) \quad \text{para todo } s \in Q. \quad (2.1.7)$$

Entonces  $p(\cdot)$  es llamada diseño de muestreo.

El diseño muestreo, es una función que va desde el soporte  $Q$  hasta el intervalo  $]0, 1]$ . Por ser una distribución de probabilidad se tiene que  $p(\cdot)$  cumple que

1.  $p(s) \geq 0$  para todo  $s \in Q$
2.  $\sum_{s \in Q} p(s) = 1$

Nótese que el diseño de muestreo no se refiere a un algoritmo o procedimiento que permite la selección de muestras. Dado un diseño de muestreo, el trabajo del estadístico consiste en encontrar un algoritmo que permita la selección de muestras cuya probabilidad de selección corresponda a la probabilidad inducida por el diseño de muestreo. Para la realización de inferencias acerca de los parámetros de interés, el diseño de muestreo juega un papel muy importante porque las propiedades estadísticas (esperanza, varianza y otros) de las cantidades aleatorias que se calculan basadas en una muestra están determinadas por éste.

Dado un soporte  $Q$ , un diseño de muestreo puede ser:

- **Sin reemplazo** si todas las posibles muestras en  $Q$  son sin reemplazo.
- **Con reemplazo** si todas las posibles muestras en  $Q$  son con reemplazo.
- **De tamaño fijo** si todas las posibles muestras en  $Q$  tienen el mismo tamaño de muestra  $n(S) = n$ .

Cassel, Särndal & Wretman (1976a) explican que la posibilidad de identificar cada una de todas las posibles muestras que pertenecen al soporte  $Q$  es un factor crucial que permite:

- designar un conjunto de muestras a las cuales se les asigna una probabilidad positiva de selección y
- distribuir la totalidad de la masa de probabilidad entre los miembros de  $Q$ .

El rasgo más importante del muestreo probabilístico es que permite conocer, por lo menos teóricamente, la probabilidad de selección de todas las posibles muestras en el soporte  $Q$ . Sin embargo, un diseño de muestreo también deja conocer la probabilidad de inclusión del elemento  $k$  en la muestra  $S$ .

### Algoritmo de selección

Un diseño de muestreo es una distribución de probabilidad sobre un soporte  $Q$ ; pero, de ninguna manera, es un procedimiento que selecciona la muestra por se.

**Definición 2.1.7.** *Un **algoritmo de selección** es un procedimiento usado para seleccionar una muestra probabilística.*

Tillé (2006) afirma que una forma de seleccionar una muestra es listar todas las posibles muestras, generar una variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo  $[0, 1]$  para luego hacer la correspondiente selección. A este tipo de algoritmos que listan todas las posibles muestras se les conoce con el nombre de **algoritmos de selección enumerativos**; sin embargo, este tipo de algoritmos son ineficientes computacionalmente y sólo son posibles de implementar cuando el diseño de muestreo es conocido y el tamaño poblacional  $N$  es pequeño. A lo largo del libro se incluirán diversos algoritmos de selección específicos para cada diseño de muestreo que permitan la selección de una muestra probabilística.

### 2.1.4 Probabilidad de inclusión

La inclusión del elemento  $k$ -ésimo en una muestra  $s$  particular es un evento aleatorio definido por la función indicadora  $I_k(s)$ , que está dada por

$$I_k(s) = \begin{cases} 1 & \text{si } k \in s \\ 0 & \text{si } k \notin s. \end{cases} \quad (2.1.8)$$

Nótese que la función  $I_k(s)$  es una función de la variable aleatoria  $S$ . Para acortar la notación escribiremos  $I_k = I_k(s)$ , entendiéndose que  $I_k$  es la función indicadora para el elemento  $k$ -ésimo. Bajo un diseño de muestreo  $p(\cdot)$ , una **probabilidad de inclusión** es asignada a cada elemento de la población para indicar la probabilidad de que el elemento pertenezca a la muestra. Para el elemento  $k$ -ésimo de la población, la probabilidad de inclusión se denota como  $\pi_k$  y se conoce como la probabilidad de inclusión de **primer orden** y está dada por

$$\pi_k = Pr(k \in S) = Pr(I_k = 1) = \sum_{s \ni k} p(s). \quad (2.1.9)$$

En donde el subíndice  $s \ni k$  se refiere a la suma sobre todas las muestras que contienen al elemento  $k$ -ésimo. Nótese que de la anterior definición para que una muestra sea considerada probabilística, entonces todos los elementos en la población deben tener probabilidad de inclusión estrictamente mayor a cero.

**Definición 2.1.8.** La **esperanza de una muestra** aleatoria, en el sentido de las definiciones 2.1.2. y 2.1.3., está dada por

$$\mu = E(s) = \sum_{s \in Q} p(s)s \quad (2.1.10)$$

Si el diseño muestral es sin reemplazo, entonces  $\mu = \pi$ , donde  $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_N)'$  es el vector de probabilidades de inclusión inducido por el diseño de muestreo. El siguiente resultado provee una manera sencilla para computar y realizar el cálculo de las  $N$  probabilidades de inclusión.

**Resultado 2.1.2.** Dado un soporte  $Q$ , la probabilidad de inclusión  $\pi_k$  es la probabilidad de que el elemento  $k$ -ésimo pertenezca a la muestra aleatoria  $S$  y se puede escribir de la siguiente manera:

$$\pi_k = E(I_k(S)) = \sum_{s \in Q} I_k(s)p(s) \quad (2.1.11)$$

**Prueba.**  $I_k(S)$  es una función de la muestra aleatoria  $S$ , la demostración se sigue de la definición de la esperanza de una función de una variable aleatoria. Por otro lado,  $I_k(S)$  sólo puede tomar dos valores 1 y 0, luego

$$\begin{aligned} E(I_k(S)) &= (1)Pr(I_k(S) = 1) + (0)Pr(I_k(S) = 0) \\ &= Pr(I_k(S) = 1) = Pr(k \in S) = \pi_k \end{aligned}$$





Análogamente,  $\pi_{kl}$  se conoce como la probabilidad de inclusión de **segundo orden** y denota la probabilidad de que los elementos  $k$  y  $l$  pertenezcan a la muestra, ésta se denota como  $\pi_{kl}$  y está dada por

$$\pi_{kl} = Pr(k \in S \text{ y } l \in S) = Pr(I_k I_l = 1) = \sum_{s \ni k \text{ y } l} p(s). \quad (2.1.12)$$

En donde el subíndice  $s \ni k$  y  $l$  se refiere a la suma sobre todas las muestras que contienen a los elementos  $k$ -ésimo y  $l$ -ésimo.

**Ejemplo 2.1.2.** Considere el siguiente diseño de muestreo  $p(\cdot)$  tal que asigna las siguientes probabilidades de selección a cada una de las 10 posibles muestras de tamaño 2 del soporte  $Q$  de la población  $U$ .

```
p <- c(0.13,0.2,0.15,0.1,0.15,0.04,0.02,0.06,0.07,0.08)
p
## [1] 0.13 0.20 0.15 0.10 0.15 0.04 0.02 0.06 0.07 0.08
```

Es decir, la primera muestra tiene una probabilidad de selección de 0.13, la segunda muestra tiene una probabilidad de selección de 0.15, y así sucesivamente hasta la décima cuya probabilidad de selección es de 0.08. Con las siguientes instrucciones verificamos que las propiedades de diseño muestral sean satisfechas.

```
sum(p)
## [1] 1
p < 0
## [1] FALSE FALSE FALSE FALSE FALSE FALSE FALSE FALSE FALSE
```

Mediante el uso de la función `Ik` del paquete **TeachingSampling**, es posible crear las  $N = 5$  funciones indicadoras de los elementos pertenecientes a la población para cada una de las 10 posibles muestras de tamaño fijo y sin reemplazo. Esta función contiene dos argumentos: el tamaño de la población  $N$ , el tamaño fijo de cada una de las posibles muestras  $n$ . Una tabla de datos es creada a partir de los rótulos, la probabilidad de selección y las 5 funciones indicadoras de las posibles muestras contenidas en el soporte  $Q$ .

```
Ind <- Ik(N, n)
Q <- Support(N, n, U)
data.frame(Q, p, Ind)
##      X1      X2      p X1.1 X2.1 X3 X4 X5
## 1  Yves   Ken 0.13     1     1  0  0  0
## 2  Yves  Erik 0.20     1     0  1  0  0
## 3  Yves Sharon 0.15     1     0  0  1  0
## 4  Yves Leslie 0.10     1     0  0  0  1
```

```
## 5    Ken    Erik 0.15    0    1    1    0    0
## 6    Ken Sharon 0.04    0    1    0    1    0
## 7    Ken Leslie 0.02    0    1    0    0    1
## 8    Erik Sharon 0.06    0    0    1    1    0
## 9    Erik Leslie 0.07    0    0    1    0    1
## 10 Sharon Leslie 0.08    0    0    0    1    1
```

Una vez son calculadas las variables indicadoras para cada elemento y en cada posible muestra, el cálculo de las probabilidades de inclusión se hace muy sencillo al multiplicar las probabilidades de selección con cada una de las variables indicadoras. El resultado se suma por columnas y la salida es un vector de tamaño  $N = 5$  de probabilidades de inclusión.

```
multip <- p * Ind
colSums(multip)

## [1] 0.58 0.34 0.48 0.33 0.27
```

La función `Pik` del paquete `TeachingSampling` arroja el vector de probabilidades de inclusión para todos los elementos de la población. Ésta tiene dos argumentos: un vector `p` de probabilidades de selección de todas las posibles muestras y una matriz `Ind` de  $N$  variables indicadoras. Nótese que la suma de probabilidades de inclusión es el tamaño de muestra esperado, en este caso igual a 2.

```
pik <- Pik(p, Ind)
pik

##      [,1] [,2] [,3] [,4] [,5]
## [1,] 0.58 0.34 0.48 0.33 0.27
```

Luego, el elemento de la población que tiene una mayor probabilidad de ser incluido es **Yves**, mientras que el elemento con una menor probabilidad de inclusión es **Sharon**. Por otra parte, haciendo uso de la función `Pikl` del paquete `TeachingSampling` es posible calcular la matriz de probabilidades de inclusión de segundo orden para el diseño `p` en cuestión. Esta función sólo tiene tres argumentos: `N`, el tamaño de la población, `n`, el tamaño de muestra fijo y `p`, el diseño de muestreo utilizado. La salida de esta función es una matriz cuadrada y simétrica de tamaño  $N \times N$  cuyas entradas corresponden a las probabilidades de inclusión de segundo orden. Para este caso particular tenemos que la función se ejecuta de la siguiente manera.

```
pikl <- Pikl(N, n, p)
pikl

##      [,1] [,2] [,3] [,4] [,5]
## [1,] 0.58 0.13 0.20 0.15 0.10
## [2,] 0.13 0.34 0.15 0.04 0.02
## [3,] 0.20 0.15 0.48 0.06 0.07
## [4,] 0.15 0.04 0.06 0.33 0.08
## [5,] 0.10 0.02 0.07 0.08 0.27
```

Nótese que, bajo este diseño de muestreo, **Yves** y **Erik** corresponden al par de elementos que tienen la más alta probabilidad de inclusión.

### 2.1.5 Característica de interés y parámetros de interés

El propósito de cualquier estudio por muestreo es estudiar una **característica** de interés  $y$  que se encuentra asociada a cada unidad de la población. Es decir, la característica de interés toma el valor  $y_k$  para la unidad  $k$ . Es importante notar que los  $y_k$ s no se consideran variables aleatorias sino cantidades fijas, por tanto la notación de éstas se hace con un letra minúscula  $y$ . El objetivo de la investigación por muestreo es estimar una función de interés  $T$ , llamada **parámetro**, de la característica de interés en la población.

$$T = f\{y_1, \dots, y_k, \dots, y_N\}.$$

Algunos de los parámetros de interés más comunes son:

1. El total poblacional,

$$t_y = \sum_{k \in U} y_k \quad (2.1.13)$$

2. La media poblacional,

$$\bar{y}_U = \frac{\sum_{k \in U} y_k}{N} = \frac{t_y}{N} \quad (2.1.14)$$

3. La varianza poblacional,

$$S_{yU}^2 = \frac{\sum_{k \in U} (y_k - \bar{y}_U)^2}{N - 1} \quad (2.1.15)$$

Existen otros parámetros de interés como la mediana poblacional, los percentiles poblacionales, la razón entre dos totales poblacionales o, como se mencionó anteriormente, el tamaño de una población, en cuyo caso estaríamos interesados en  $N$ . Entre otros, algunos ejemplos de investigaciones por muestreo interesadas en los anteriores parámetros son:

- Total de personas que pertenecen a la fuerza laboral.
- Porcentaje de personas que usarían un producto.

Obviamente, estas cantidades poblacionales son desconocidas y ésta es la razón por la que se requiere realizar una investigación por muestreo, porque mediante ésta se pueden estimar estos parámetros poblacionales a partir de una muestra seleccionada.

**Ejemplo 2.1.3.** Suponga que en nuestra población de ejemplo se quiere estimar el total de la variable  $y$ . El valor para cada uno de los elementos de la población es el siguiente:

```
y <- c(32, 34, 46, 89, 35)
y
## [1] 32 34 46 89 35
```

La función `data.frame` crea el conjunto de datos conteniendo los nombres (rótulos) y el valor de la característica de interés para cada elemento de la población

```
data.frame(U,y)
```

```
##      U   y
## 1   Yves 32
## 2    Ken 34
## 3   Erik 46
## 4 Sharon 89
## 5 Leslie 35
```

Algunos parámetros poblacionales de interés de la característica  $y$  son, el total poblacional y la media dados por  $t_y$  y  $\bar{y}_U$ , respectivamente.

```
ty <- sum(y)
ty

## [1] 236

ybar <- ty / N
ybar

## [1] 47
```

### 2.1.6 Estadística y estimador

Una **estadística** es una función  $G$  (que toma valores reales) de la muestra aleatoria  $S$  y sólo depende de los elementos pertenecientes a  $S$ . Cuando una estadística se usa para estimar un parámetro se dice **estimador** y las realizaciones del estimador en una muestra seleccionada  $s$  se dicen **estimaciones**.

Siendo  $G$  una estadística, sus propiedades estadísticas están determinadas por el diseño de muestreo. Es decir, dada la probabilidad de selección de cada muestra  $s \in Q$ , la esperanza, la varianza y otras propiedades de interés están definidas a partir de  $p(s)$ .

La **esperanza** de una estadística  $G$  es

$$E(G) = \sum_{s \in Q} p(s)G(s). \quad (2.1.16)$$

La **varianza** de la estadística  $G$  está definida como

$$Var(G) = E[G - E(G)]^2 \quad (2.1.17)$$

$$= \sum_{s \in Q} p(s)[G(s) - E(G)]^2. \quad (2.1.18)$$

Donde  $G(s)$  es el valor real que toma la estadística  $G$  en la muestra seleccionada (realizada)  $s$  y  $Q$  es el soporte inducido por el diseño muestral. Nótese que las propiedades de las estadísticas y, por consiguiente, de los estimadores, están definidas con sumas porque el diseño de muestreo induce una distribución de probabilidad discreta sobre todas las posibles muestras  $s$  pertenecientes al soporte  $Q$ .

La **estadística**  $I_k$

La cantidad  $I_k$  dada por (2.1.8) es una estadística que toma valores aleatoriamente dependiendo del diseño de muestreo utilizado.

**Resultado 2.1.3.** *Las propiedades más importantes de esta estadística son:*

- $E(I_k) = \pi_k$
- $Var(I_k) = \pi_k(1 - \pi_k)$
- $Cov(I_k, I_l) = \pi_{kl} - \pi_k\pi_l$  para todo  $k \neq l$

**Prueba.** Por el resultado 2.1.2., la primera propiedad se tiene de inmediato, ahora de la definición de varianza se tiene

$$\begin{aligned} Var(I_k(S)) &= E[I_k(S) - E(I_k(S))]^2 \\ &= Pr(I_k(S) = 1)[1 - \pi_k]^2 + Pr(I_k(S) = 0)[0 - \pi_k]^2 \\ &= \pi_k(1 - \pi_k) \end{aligned}$$

y finalmente, de la definición de covarianza se tiene

$$\begin{aligned} Cov(I_k(S), I_l(S)) &= E[I_k(S)I_l(S)] - E[I_k(S)]E[I_l(S)] \\ &= (1)Pr(I_k(S)I_l(S) = 1) + (0)Pr(I_k(S)I_l(S) = 0) - \pi_k\pi_l \\ &= \pi_{kl} - \pi_k\pi_l \end{aligned}$$

■

A la covarianza de las estadísticas indicadoras para los elementos  $k$  y  $l$ ,  $Cov(I_k, I_l)$ , se le conoce como  $\Delta_{kl}$ . Esta cantidad, dependiendo del diseño, puede tomar valores positivos, negativos o incluso nulos.

### La estadística $n(S)$ o tamaño de muestra

Como ya se vio, el tamaño de muestra es una cantidad aleatoria, dependiendo del diseño. Nótese que este valor puede ser expresado como función de las estadísticas de inclusión.

$$n(S) = \sum_U I_k. \quad (2.1.19)$$

**Resultado 2.1.4.** *Algunas propiedades de interés son:*

- $E(n(S)) = \sum_U \pi_k$
- $Var(n(S)) = \sum_U \pi_k - (\sum_U \pi_k)^2 + \sum \sum_{k \neq l} \pi_{kl}$ .

**Prueba.** Para la primera propiedad, se tiene que

$$E[n(S)] = E\left[\sum_U I_k\right] = \sum_U E[I_k] = \sum_U \pi_k$$

Recordando que las propiedades de la varianza de una suma se tiene

$$\begin{aligned}
 \text{Var}[n(S)] &= \text{Var} \left[ \sum_U I_k \right] \\
 &= \sum_U \text{Var}[I_k] + \sum_{k \neq l} \sum \text{Cov}[I_k, I_l] \\
 &= \sum_U \pi_k - \sum_U \pi_k^2 - \sum_{k \neq l} \sum \pi_k \pi_l + \sum_{k \neq l} \sum \pi_{kl} \\
 &= \sum_U \pi_k - \left( \sum_U \pi_k \right)^2 + \sum_{k \neq l} \sum \pi_{kl}
 \end{aligned}$$

■

Además, cuando la variación del tamaño de muestra es nula porque se ha decidido utilizar un diseño de tamaño muestral fijo, se tienen las siguientes propiedades.

**Resultado 2.1.5.** Si el diseño de muestreo es de tamaño fijo e igual a  $n$ ,

- $E(n(S)) = \sum_U \pi_k = n$
- $\sum_U \pi_{kl} = n\pi_l$
- $\sum_U \Delta_{kl} = 0$
- $\pi_k(1 - \pi_k) = \sum_{l \neq k} (\pi_k \pi_l - \pi_{kl})$

**Prueba.** La primera propiedad se tiene recordando que la esperanza de una constante es ella misma. Nótese que  $\pi_{kl} = E[I_k(S)I_l(S)]$ , así

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in U} \pi_{kl} &= \sum_{l \in U} E[I_k(S)I_l(S)] = \sum_{l \in U} \sum_{s \in Q} p(s) I_k(s) I_l(s) \\
 &= \sum_{s \in Q} p(s) I_k(s) \sum_{l \in U} I_l(s) \\
 &= n(S) \sum_{s \in Q} p(s) I_k(s) = n\pi_k
 \end{aligned}$$

La tercera propiedad se tiene pues

$$\begin{aligned}
 \sum_U \Delta_{kl} &= \sum_U (\pi_{kl} - \pi_k \pi_l) \\
 &= \sum_U \pi_{kl} - \pi_k \sum_U \pi_l \\
 &= n\pi_k - n\pi_k = 0
 \end{aligned}$$

Para demostrar la última propiedad es necesario redefinir el tamaño de muestra, de tal manera que

$n = \sum_{l \neq k} I_l(S) + I_k(S)$ . Luego,

$$\begin{aligned} \pi_k(1 - \pi_k) &= \text{Var}(I_k(S)) \\ &= \text{Cov}(I_k(S), I_k(S)) \\ &= \text{Cov}\left(I_k(S), n - \sum_{l \neq k} I_l(S)\right) \\ &= - \sum_{l \neq k} \text{Cov}(I_k(S), I_l(S)) \\ &= \sum_{l \neq k} (\pi_k \pi_l - \pi_{kl}) \end{aligned}$$

■

**Ejemplo 2.1.4.** Continuando con el desarrollo del ejemplo 2.1.3, ahora utilizaremos el vector de probabilidades de inclusión y la matriz de probabilidades de segundo orden para verificar los resultados 2.1.4 y 2.1.5. En primer lugar, nótese que la esperanza del tamaño de muestra, que corresponde a 2 pues el diseño es de tamaño fijo, se obtiene de la siguiente manera.

```
A <- sum(pik)
A

## [1] 2
```

Ahora, el cuadrado de la suma de las probabilidades de inclusión se obtiene así

```
B <- (sum(pik))^2
B

## [1] 4
```

Y la suma de los elementos distintos de la matriz de probabilidades de inclusión de segundo orden es

```
C <- sum(pikl) - sum(diag(pikl))
C

## [1] 2
```

Para comprobar la segunda parte del resultado 2.1.4. basta realizar la siguiente operación  $A-B+C$ . Esta suma es nula y efectivamente corresponde a la varianza del tamaño de muestra en este diseño de muestreo; como, en este caso particular, el tamaño de muestra siempre fue fijo e igual a 2, la varianza debe ser cero.

El siguiente paso de este ejemplo consiste en la verificación de la segunda parte del resultado 2.1.5. En resumidas cuentas, este apartado dice que la suma por filas (o columnas) de la matriz de probabilidades de inclusión de segundo orden debe corresponder exactamente a la multiplicación del tamaño de muestra y el vector de probabilidades de inclusión de primer orden. Lo anterior se corrobora fácilmente por medio del siguiente código.

```

n * pik

##      [,1] [,2] [,3] [,4] [,5]
## [1,]  1.2 0.68 0.96 0.66 0.54

colSums(pikl)

## [1]  1.16 0.68 0.96 0.66 0.54

rowSums(pikl)

## [1]  1.16 0.68 0.96 0.66 0.54

```

Nótese que la suma por filas y por columnas coincide perfectamente con  $n \times \pi_k$  para todo  $k \in U$ . Por otro lado, verificaremos la tercera propiedad que afirma que la suma por filas (o columnas) de la matriz de varianzas-covarianzas de las variables indicadoras de membresía muestral debe dar como resultado un vector de ceros de tamaño cinco. Para esto, se utiliza la función `Deltakl` del paquete `TeachingSampling`. Esta función tiene tres argumentos: `N`, el tamaño de la población, `n`, el tamaño de muestra fijo y `p`, el diseño de muestreo utilizado. La salida de esta función corresponde a una matriz cuadrada y simétrica de tamaño  $N \times N$  cuyas entradas corresponden a las varianzas-covarianzas de las variables indicadoras de membresía muestral. Para este ejemplo, la implementación del siguiente código permite obtener la matriz buscada y la verificación del resultado.

```

Delta <- Deltakl(N, n, p)
Delta

##      [,1] [,2] [,3] [,4] [,5]
## [1,]  0.244 -0.067 -0.078 -0.0414 -0.0566
## [2,] -0.067  0.224 -0.013 -0.0722 -0.0718
## [3,] -0.078 -0.013  0.250 -0.0984 -0.0596
## [4,] -0.041 -0.072 -0.098  0.2211 -0.0091
## [5,] -0.057 -0.072 -0.060 -0.0091  0.1971

rowSums(Delta)

## [1] -0.000000000000000139 -0.000000000000000083 -0.000000000000000056
## [4] -0.000000000000000069 -0.000000000000000014

colSums(Delta)

## [1] -0.000000000000000139 -0.000000000000000083 -0.000000000000000056
## [4] -0.000000000000000069 -0.000000000000000014

```

De esta manera la suma por filas (o columnas) de la matriz de varianzas-covarianzas de las variables indicadoras de membresía muestral es cero en cada columna (o fila).

Cuando una estadística se construye con la intención de estimar un parámetro, recibe el nombre de **estimador**. Así, las propiedades más comúnmente utilizadas de un estimador  $\hat{T}$  de un parámetro de



interés  $T$  son el sesgo, definido por

$$B(\hat{T}) = E(\hat{T}) - T \quad (2.1.20)$$

y el error cuadrático medio, dado por

$$ECM(\hat{T}) = E[\hat{T} - T]^2 \quad (2.1.21)$$

$$= Var(\hat{T}) + B^2(\hat{T}). \quad (2.1.22)$$

Si el sesgo de un estimador es nulo se dice que el estimador es **insesgado** y cuando esto ocurre el error cuadrático medio se convierte en la varianza del estimador.

Särndal, Swensson & Wretman (1992) afirman que el objetivo en un estudio por muestreo es estimar uno a más parámetros poblacionales. Las decisiones más importantes a la hora de abordar un problema de estimación por muestreo son

- La escogencia de un diseño de muestreo y un algoritmo de selección que permita implementar el diseño.
- La elección de una fórmula matemática o estimador que calcule una estimación del parámetro de interés en la muestra seleccionada.

Las anteriores no son decisiones independientes. Es decir, la escogencia de un estimador dependerá, usualmente, del diseño de muestreo utilizado.

**Definición 2.1.9.** Siendo  $\hat{T}$  un estimador de un parámetro  $T$  y  $p(\cdot)$  un diseño de muestreo definido sobre un soporte  $Q$ , se define una **estrategia de muestreo** como la dupla  $(p(\cdot), \hat{T})$ .

Este libro, como su nombre lo indica, está enfocado en la búsqueda de la mejor combinación de diseño de muestreo y estimador; este problema ha sido considerado a través del desarrollo de la teoría de muestreo. La escogencia de la estrategia de muestreo se lleva a cabo en dos etapas, a saber: **Etapas de diseño**, refiriéndose al periodo durante el cual se decide el diseño de muestreo a utilizar junto con el algoritmo de muestreo que permita la selección de la muestra y finalmente se selecciona la muestra probabilística. Una vez que la información es recogida y grabada entra la **Etapas de estimación** en donde se calculan las estimaciones para la característica de interés utilizando el estimador propio de la estrategia de muestreo escogida.

## 2.2 Estimadores de muestreo

Cada elemento perteneciente a la población tiene una característica de interés asociada  $y$ . Para el elemento  $k$ -ésimo el valor que toma esta característica de interés es  $y_k$ . El objetivo de la investigación por muestreo es estimar un parámetro  $T$  que resulta de interés. El objetivo del estadístico es poder inferir acerca de  $T$  con base en una muestra  $s$ . Un indicador de la precisión de un estimador está dado por el **coeficiente de variación estimado** dado por

$$cve(\hat{T}) = \frac{\sqrt{\widehat{Var}(\hat{T})}}{\hat{T}} \quad (2.2.1)$$

donde  $\widehat{Var}(\hat{T})$  es el estimador de la varianza basado en la muestra seleccionada  $s$ . El coeficiente de variación estimado es una medida comúnmente usada para expresar el error cometido al seleccionar

una muestra y ni utilizar a toda la población en la medición de la variable de interés. Si se realizara un censo y el estimador reprodujera el parámetro poblacional, entonces  $\widehat{Var}(\hat{T})$  sería nula y, por lo tanto, el *cve* también sería nulo.

A continuación, se revisan algunos de los estimados más utilizados en la historia del muestreo. A medida que se avance en la lectura del libro, nuevos estimadores surgirán y, por consiguiente, nuevas estrategias de muestreo que permiten llegar a resultados con una precisión casi clínica. La mayoría de los estimadores presentados en este libro son estimadores de totales o de funciones de totales.

### 2.2.1 El estimador de Horvitz-Thompson

#### Estimador del total poblacional

Narain (1951) descubrió este estimador, aunque su artículo fue editado y publicado por una revista india de poca rotación. Más adelante Horvitz & Thompson (1952) publicaron similares resultados en la revista más importante de estadística en ese tiempo, JASA (Journal of the American Statistical Society). Desde entonces, este estimador se conoce como el estimador de Horvitz-Thompson o estimador  $\pi$ , aunque rigurosamente debería ser llamado estimador de Narain-Horvitz-Thompson. En este libro seguiremos la notación internacional y clásica.

Para un universo  $U$ , se quiere estimar el total poblacional  $t_y$  de la característica de interés  $y$  dado por (2.1.13). Se define el estimador de Horvitz-Thompson (HT) para  $t_y$  como:

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_S \frac{y_k}{\pi_k} = \sum_S d_k y_k \quad (2.2.2)$$

Donde  $\pi_k$  es la probabilidad de inclusión para el  $k$ -ésimo elemento, y  $d_k$  es conocido como **factor de expansión** y corresponde al inverso de la probabilidad de inclusión. Nótese que el estimador de Horvitz-Thompson es aleatorio porque está construido con base en una suma sobre la muestra aleatoria  $S$ . La motivación detrás de este estimador, como Brewer (2002) lo indica, descansa en el **principio de representatividad** que afirma que cada elemento incluido en una muestra se representa a sí mismo y a un grupo de unidades que no pertenecen a la muestra seleccionada, cuyas características son cercanas a las del elemento incluido en la muestra. El factor de expansión no es otra cosa que el número de elementos menos uno de la población (no incluidos en la muestra) representados por el elemento incluido.

**Resultado 2.2.1.** Si todas las probabilidades de inclusión de primer orden son mayores a cero ( $\pi_k > 0$  para todo  $k$ ), el estimador de Horvitz-Thompson es insesgado para el total poblacional. Por tanto, se tiene que

$$E(\hat{t}_{y,\pi}) = t_y \quad (2.2.3)$$

**Prueba.** Reescribiendo el estimador de Horvitz-Thompson como  $\hat{t}_{y,\pi} = \sum_S I_k(S) \frac{y_k}{\pi_k}$ , se tiene

$$E(\hat{t}_{y,\pi}) = E\left(\sum_U I_k(S) \frac{y_k}{\pi_k}\right) = \sum_U \frac{y_k}{\pi_k} E(I_k(S)) = \sum_U \pi_k \frac{y_k}{\pi_k} = t_y$$

■

Si el diseño de muestreo es tal que las probabilidades de inclusión de primer orden conservan una buena correlación positiva con la medición de la característica de interés; en otras palabras, si  $\pi_k \propto y_k$ , el estimador de Horvitz-Thompson se reduce a una constante, por lo tanto tendrá varianza nula. En la práctica, una estrategia de muestreo óptima (Cassel, Särndal & Wretman 1976a) es aquella que utiliza el estimador de Horvitz-Thompson junto con un diseño de muestreo que induzca una buena

correlación entre el vector de probabilidades de inclusión y el vector de valores de la característica de interés. Sin embargo, en encuestas multi-propósito, en donde se quiere estimar parámetros para varias características de interés entre las cuales no hay una buena correlación, al utilizar el estimador de Horvitz-Thompson es difícil evadir la débil, e incluso negativa, correlación que existe entre las características de interés y el vector de probabilidades de inclusión. Sin embargo, al incluir información auxiliar en la construcción del estimador se puede palear este hecho.

### Varianza del estimador de Horvitz-Thompson

**Resultado 2.2.2.** *La varianza del estimador de Horvitz-Thompson está dada por la siguiente expresión*

$$Var_1(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_U \sum \Delta_{kl} \frac{y_k}{\pi_k} \frac{y_l}{\pi_l}. \quad (2.2.4)$$

**Prueba.** De la definición de varianza, se obtiene lo siguiente

$$\begin{aligned} Var_1(\hat{t}_{y,\pi}) &= Var \left( \sum_U I_k(S) \frac{y_k}{\pi_k} \right) \\ &= \sum_U \frac{y_k^2}{\pi_k^2} Var(I_k(S)) + \sum_{k \neq l} \sum \frac{y_k}{\pi_k} \frac{y_l}{\pi_l} Cov(I_k(S), I_l(S)) \\ &= \sum_U \frac{y_k^2}{\pi_k^2} (\pi_k - \pi_k^2) + \sum_{k \neq l} \sum \frac{y_k}{\pi_k} \frac{y_l}{\pi_l} (\pi_{kl} - \pi_k \pi_l) \\ &= \sum_U \sum \frac{y_k}{\pi_k} \frac{y_l}{\pi_l} (\pi_{kl} - \pi_k \pi_l) \\ &= \sum_U \sum \Delta_{kl} \frac{y_k}{\pi_k} \frac{y_l}{\pi_l} \end{aligned}$$

■

Sen (1953) y Yates & Grundy (1953) dedujeron el siguiente resultado cuando el diseño de muestreo es de tamaño fijo.

**Resultado 2.2.3.** *Si el diseño  $p(\cdot)$  es de tamaño de muestra fijo, entonces, la varianza del estimador de Horvitz-Thompson se escribe como*

$$Var_2(\hat{t}_{y,\pi}) = -\frac{1}{2} \sum_U \sum \Delta_{kl} \left( \frac{y_k}{\pi_k} - \frac{y_l}{\pi_l} \right)^2 \quad (2.2.5)$$

**Prueba.** Utilizando las propiedades del resultado 2.1.5, se tiene que

$$\begin{aligned}
 Var_2(\hat{t}_{y,\pi}) &= -\frac{1}{2} \sum \sum_U \Delta_{kl} \left( \frac{y_k}{\pi_k} - \frac{y_l}{\pi_l} \right)^2 \\
 &= -\frac{1}{2} \sum \sum_U \Delta_{kl} \left( \frac{y_k^2}{\pi_k^2} + \frac{y_l^2}{\pi_l^2} - 2 \frac{y_k}{\pi_k} \frac{y_l}{\pi_l} \right) \\
 &= -\frac{1}{2} \left[ \sum \sum_U \Delta_{kl} \frac{y_k^2}{\pi_k^2} + \sum \sum_U \Delta_{kl} \frac{y_l^2}{\pi_l^2} - 2 \sum \sum_U \Delta_{kl} \frac{y_l}{\pi_k} \frac{y_k}{\pi_l} \right] \\
 &= -\frac{1}{2} \left[ 2 \sum \sum_U \Delta_{kl} \frac{y_k^2}{\pi_k^2} - 2 \sum \sum_U \Delta_{kl} \frac{y_l}{\pi_k} \frac{y_k}{\pi_l} \right] \\
 &= -\sum \sum_U \frac{y_k^2}{\pi_k^2} \Delta_{kl} + \sum \sum_U \Delta_{kl} \frac{y_l}{\pi_k} \frac{y_k}{\pi_l} \\
 &= \sum \sum_U \Delta_{kl} \frac{y_l}{\pi_k} \frac{y_k}{\pi_l} = Var_1(\hat{t}_{y,\pi})
 \end{aligned}$$

puesto que  $\sum_U \Delta_{kl} = 0$  para diseños de tamaño fijo. Por lo tanto, en los casos de diseños de muestreo con tamaño fijo, la varianza del estimador de Horvitz-Thompson puede calcularse por medio de  $Var_2(\hat{t}_{y,\pi})$ . ■

### Estimación de la varianza

Es posible construir dos estimadores insesgados para las expresiones (2.2.4) y (2.2.5). Para esto, se requiere que todas las probabilidades de inclusión de segundo orden sean estrictamente positivas ( $\pi_{kl} > 0$  para todo  $k$ ). Con el anterior supuesto, se tienen los siguientes resultados.

**Resultado 2.2.4.** Un estimador insesgado para la expresión (2.2.4) está dada por

$$\widehat{Var}_1(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum \sum_S \frac{\Delta_{kl}}{\pi_{kl}} \frac{y_k}{\pi_k} \frac{y_l}{\pi_l} \quad (2.2.6)$$

**Resultado 2.2.5.** Si el diseño es de tamaño de muestra fijo, un estimador insesgado para la expresión (2.2.5) está dado por

$$\widehat{Var}_2(\hat{t}_{y,\pi}) = -\frac{1}{2} \sum \sum_S \frac{\Delta_{kl}}{\pi_{kl}} \left( \frac{y_k}{\pi_k} - \frac{y_l}{\pi_l} \right)^2 \quad (2.2.7)$$

**Prueba.** Los anteriores resultados son inmediatos al reescribir los estimadores  $\widehat{Var}_1(\hat{t}_{y,\pi})$  y  $\widehat{Var}_2(\hat{t}_{y,\pi})$  en términos de  $U$  y multiplicar por el producto de las funciones indicadoras  $I_k(S)I_l(S)$ . Al aplicar la esperanza se tiene que  $E[I_k(S)I_l(S)] = \pi_{kl}$  y con esto se tiene la demostración. ■

Bautista (1998) resalta los tres siguientes comentarios importantes acerca de las estimaciones arrojadas por anteriores expresiones.

1. Si las probabilidades de inclusión de segundo orden son mayores que cero para todos los elementos en la muestra, pero no para los restantes elementos que no fueron incluidos en la muestra, no se puede garantizar el insesgamiento de las anteriores expresiones.
2. Es posible que las estimaciones de la varianza arrojen resultados negativos, que no pueden ser utilizados ni interpretados. Para evitar esta situación, es necesario garantizar que la covarianza entre las estadísticas de inclusión para cada par de elementos en la población sea negativa ( $\Delta_{kl} < 0 \forall k \neq l$ ).

3. No necesariamente las estimaciones arrojadas por las anteriores expresiones coinciden en todos los casos.

Por su parte, Tillé (2006) agrega que en la práctica, la utilización de las expresiones de los estimadores de la varianza es muy difícil de implementar pues la doble suma hace que el proceso de cálculo computacional sea muy largo e ineficiente. Por lo tanto, para cada diseño de muestreo que se utilice, se deben crear expresiones que pueden ser simplificadas o en algunos casos se deben utilizar aproximaciones.

### Intervalo de confianza para el estimador de Horvitz-Thompson

Hájek (1960) demuestra la convergencia asintótica del estimador de Horvitz-Thompson a una distribución normal. Cuando el tamaño de muestra es suficientemente grande (que dependiendo del comportamiento de la población puede bastar con algunas docenas de individuos), se puede construir un intervalo de confianza de nivel  $(1 - \alpha)$  para el total poblacional  $t_y$  de acuerdo con:

$$IC(1 - \alpha) = \left[ \hat{t}_{y,\pi} - z_{1-\alpha/2} \sqrt{Var(\hat{t}_{y,\pi})}, \hat{t}_{y,\pi} + z_{1-\alpha/2} \sqrt{Var(\hat{t}_{y,\pi})} \right] \quad (2.2.8)$$

donde  $z_{1-\alpha/2}$  se refiere al cuantil  $(1 - \alpha/2)$  de una variable aleatoria con distribución normal estándar. Nótese que

$$1 - \alpha = \sum_{Q_0 \supset s} p(s),$$

donde  $Q_0$  es el conjunto de todas las posible muestras cuyo intervalo de confianza contiene al total poblacional  $t_y$ . En la práctica muy pocas veces se conoce la varianza del estimador; por lo tanto, el intervalo de confianza estimado de nivel  $(1 - \alpha)$  puede ser obtenido con los datos de la muestra seleccionada reemplazando en (2.2.8) la varianza del estimador por su correspondiente estimación y tomaría la siguiente expresión

$$IC_s(1 - \alpha) = \left[ \hat{t}_{y,\pi} - z_{1-\alpha/2} \sqrt{\widehat{Var}(\hat{t}_{y,\pi})}, \hat{t}_{y,\pi} + z_{1-\alpha/2} \sqrt{\widehat{Var}(\hat{t}_{y,\pi})} \right]. \quad (2.2.9)$$

Al utilizar una estrategia de muestreo en la estimación de un parámetro en poblaciones finitas, las propiedades de la estrategia se estudian en términos de:

- **Confiabilidad:** definida como la suma de las probabilidades de las muestras cuyo intervalo de confianza contiene al parámetro.
- **Precisión:** definida como la longitud del intervalo de confianza.

Nótese que las anteriores propiedades están en función del intervalo de confianza. Para determinar la confiabilidad se debe conocer al parámetro  $T$  (desconocido) por tanto, en términos prácticos la confiabilidad no se puede calcular. Para determinar la precisión y la confiabilidad se requiere conocer la varianza, basada en el diseño de muestreo, del estimador utilizado, digamos  $\hat{T}$ ; sin embargo, el cálculo de esta varianza  $Var(\hat{T})$  implica, casi siempre, el requerimiento de conocer los valores  $y_k$  para todo  $k = 1, \dots, N$ . Luego la precisión tampoco se puede calcular. Sin embargo se debe proponer un estimador de  $Var(\hat{T})$  (ojalá insesgado) que junto con  $\hat{T}$  proporción una cota para el sesgo y para la precisión.

### Estimación de otros parámetros

Aunque (2.2.2) es un estimador del total poblacional de la característica de interés, se puede utilizar para estimar otras cantidades poblacionales de interés. Si el tamaño poblacional  $N$  es conocido, la media poblacional definida en (2.1.14) puede ser estimada con el estimador de Horvitz-Thompson.

**Resultado 2.2.6.** *La media poblacional es estimada insesgadamente mediante el uso de la siguiente expresión*

$$\hat{y}_\pi = \frac{1}{N} (\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{1}{N} \sum_s \frac{y_k}{\pi_k} \quad (2.2.10)$$

La varianza y la varianza estimada del estimador de la media poblacional están dadas por

$$Var(\hat{y}_\pi) = \frac{1}{N^2} Var(\hat{t}_{y,\pi}) \quad (2.2.11)$$

$$\hat{Var}(\hat{y}_\pi) = \frac{1}{N^2} \hat{Var}(\hat{t}_{y,\pi}) \quad (2.2.12)$$

respectivamente,

Sin embargo, es la regla más que la excepción que en la mayoría de casos en donde el usuario se enfrenta a una investigación cuyos objetivos están supeditados a la realización de un estudio por muestreo que el tamaño poblacional sea desconocido. En tal caso, podemos usar el estimador de Horvitz-Thompson para estimarlo puesto que  $N$  puede ser escrito de la siguiente manera

$$N = \sum_U 1, \quad (2.2.13)$$

tomando la conocida forma de un total poblacional. Luego, tenemos el siguiente resultado.

**Resultado 2.2.7.** *El tamaño poblacional es estimado insesgadamente mediante el uso de la siguiente expresión*

$$\hat{N}_\pi = \sum_S \frac{1}{\pi_k}. \quad (2.2.14)$$

Cuando se ha estimado el total poblacional de una característica de interés y el tamaño poblacional mediante el uso del estimador de Horvitz-Thompson, surge un estimador para la media poblacional dado por

$$\tilde{y}_S = \frac{\hat{t}_{y,\pi}}{\hat{N}_\pi} \quad (2.2.15)$$

$$= \sum_S \frac{y_k}{\pi_k} / \sum_S \frac{1}{\pi_k}. \quad (2.2.16)$$

La anterior expresión es una razón, o un cociente entre dos totales poblacionales. Las propiedades estadísticas de los anteriores estimadores serán tratados más adelante en las secciones pertinentes del libro.

Tillé (2006) cita que aun al conocer  $N$ , una mala propiedad del estimador de Horvitz-Thompson para la media poblacional se tiene al utilizarlo cuando la característica de interés es constante para todos los elementos de la población ( $y_k = C \forall k \in U$ ). Por supuesto, bajo las anteriores condiciones es claro que

la media poblacional es igual a la constante ( $\bar{y}_U = C$ ). Sin embargo, el estimador  $\hat{y}_\pi$  toma la siguiente forma

$$\hat{y}_\pi = \frac{1}{N} \sum_s \frac{y_k}{\pi_k} = \frac{1}{N} \sum_s \frac{C}{\pi_k} = \frac{C}{N} \sum_s \frac{1}{\pi_k} = C \frac{\hat{N}_\pi}{N}. \quad (2.2.17)$$

Al respecto, Bautista (1998) afirma que en aquellos casos en los que se conoce el valor de  $N$  es preferible ignorarlo y utilizar el estimador  $\tilde{y}_S$  puesto que su variación es menor y cuando  $y_k = C \forall k \in U$  reproduce la media poblacional con varianza nula puesto que

$$\tilde{y}_S = \frac{\hat{t}_{y,\pi}}{\hat{y}_\pi} = \frac{C \hat{y}_\pi}{\hat{y}_\pi} = C.$$

Cuando el tamaño poblacional es conocido y, como se verá más adelante, para algunos diseños de muestreo sin reemplazo, se puede crear un nuevo estimador alternativo del total poblacional inspirado en el siguiente argumento: Si  $\tilde{y}_S$  estima la media poblacional, entonces  $N\tilde{y}_S$  estimará el total poblacional. Por tanto, el estimador alternativo está dado por la siguiente expresión

$$\hat{t}_{y,alt} = N\tilde{y}_S = \hat{t}_{y,\pi} \frac{N}{\hat{N}_\pi} \quad (2.2.18)$$

que se puede ver como una corrección del estimador de Horvitz-Thompson mediante la estimación del tamaño de la población. La varianza y la estimación de la varianza serán tema de capítulos posteriores.

**Ejemplo 2.2.1.** La función HT del paquete **TeachingSampling** arroja la estimación del total poblacional de una o varias características de interés. Esta función tiene dos argumentos: el vector de tamaño  $n$  de probabilidades de inclusión **pik** y el conjunto de valores de la característica o características de interés en los individuos pertenecientes a la muestra, y puede ser un vector en el caso de una sola característica de interés o una matriz en el caso de varias.

Así, si la primera muestra (cuyos elementos son **Yves** y **Ken**) hubiese sido seleccionada y dado que las probabilidades de inclusión de estos dos elementos son 0.58 y 0.34, respectivamente y los valores de la característica de interés son 32 y 34, respectivamente, el estimador de Horvitz-Thompson arrojaría la siguiente estimación:

```
y.s <- c(32, 34)
pik.s <- c(0.58, 0.34)
HT(y.s, pik.s)

##      [,1]
## [1,] 155
```

Nótese que el total poblacional para la variable de interés  $y$  es igual a 236. Por otro lado, el cálculo o estimación de la varianza del estimador de Horvitz-Thompson no se encuentra implementado pues la doble suma hace que los procesos computacionales sean muy largos y demorado. Por tanto, si se quieren conocer estos valores, el proceso se debe realizar manualmente. La estimación de la varianza se realiza teniendo en cuenta que  $\pi_{12} = 0.13$ . Así,

$$\begin{aligned}\frac{\Delta_{11}}{\pi_{11}} &= \frac{\pi_{11} - \pi_1 \pi_1}{\pi_{11}} = \frac{0.58 - 0.58^2}{0.58} = 0.42 \\ \frac{\Delta_{12}}{\pi_{12}} &= \frac{\pi_{12} - \pi_1 \pi_2}{\pi_{12}} = \frac{0.13 - 0.58 * 0.34}{0.13} = -0.52 \\ \frac{\Delta_{21}}{\pi_{21}} &= \frac{\pi_{11} - \pi_2 \pi_1}{\pi_{21}} = \frac{0.13 - 0.34 * 0.58}{0.13} = -0.52 \\ \frac{\Delta_{22}}{\pi_{22}} &= \frac{\pi_{22} - \pi_2 \pi_2}{\pi_{22}} = \frac{0.34 - 0.34^2}{0.34} = 0.66\end{aligned}$$

Por tanto, utilizando (2.2.6), el estimador de la varianza será

$$\widehat{Var}(\hat{t}_\pi) = \frac{\Delta_{11}}{\pi_{11}} \frac{y_1}{\pi_1} \frac{y_1}{\pi_1} + \frac{\Delta_{12}}{\pi_{12}} \frac{y_1}{\pi_1} \frac{y_2}{\pi_2} + \frac{\Delta_{21}}{\pi_{21}} \frac{y_2}{\pi_2} \frac{y_1}{\pi_1} + \frac{\Delta_{22}}{\pi_{22}} \frac{y_2}{\pi_2} \frac{y_2}{\pi_2}$$

y su respectiva estimación será

$$0.42 \left( \frac{32}{0.58} \right)^2 - 2(0.52) \left( \frac{32}{0.58} \frac{34}{0.34} \right) + 0.66 \left( \frac{34}{0.34} \right)^2 \cong 2140$$

El coeficiente de variación estimado es

$$cve(\hat{t}_\pi) = \frac{\sqrt{2140}}{155.1724} \cong 0.3$$

Y el intervalo de confianza estimado con un nivel de confianza del 95 por ciento para esta estimación es el siguiente:

$$\begin{aligned}IC_s(0.95) &\cong [155 - (1.96)\sqrt{2140}, 155 + (1.96)\sqrt{2140}] \\ &\cong [64, 246]\end{aligned}$$

Continuando con el ejercicio léxico-gráfico de la estimación del total poblacional  $t_y$  en todas las posibles muestras de tamaño 10 de la población  $U$ , tenemos la tabla 2.1 que puede ser reproducida mediante la ejecución del siguiente código computacional.

```
all.pik <- Support(N, n, pik)
all.y <- Support(N, n, y)
all.HT <- rep(0, 10)

for(k in 1:10){
  all.HT[k] <- HT(all.y[k,], all.pik[k,])
}

all.HT

## [1] 155 151 325 185 196 370 230 366 225 399

AllSamples=data.frame(Q, p, all.pik, all.y, all.HT)
```



	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Yves	Ken	0.13	0.58	0.34	32.00	34.00	155.17
2	Yves	Erik	0.20	0.58	0.48	32.00	46.00	151.01
3	Yves	Sharon	0.15	0.58	0.33	32.00	89.00	324.87
4	Yves	Leslie	0.10	0.58	0.27	32.00	35.00	184.80
5	Ken	Erik	0.15	0.34	0.48	34.00	46.00	195.83
6	Ken	Sharon	0.04	0.34	0.33	34.00	89.00	369.70
7	Ken	Leslie	0.02	0.34	0.27	34.00	35.00	229.63
8	Erik	Sharon	0.06	0.48	0.33	46.00	89.00	365.53
9	Erik	Leslie	0.07	0.48	0.27	46.00	35.00	225.46
10	Sharon	Leslie	0.08	0.33	0.27	89.00	35.00	399.33

Tabla 2.1: Estimación para todas las posibles muestras del ejemplo

El vector `all.est` contiene las estimaciones Horvitz-Thompson para cada una de las 10 posibles muestras, su esperanza se calcula como

```
sum(p * all.HT)

## [1] 236
```

Nótese que la esperanza del estimador de Horvitz-Thompson reproduce exactamente el total poblacional. La varianza se calcula de la siguiente manera

$$\begin{aligned} Var(\hat{t}_\pi) = & (0.13)(155.2 - 236)^2 + (0.2)(151.0 - 236)^2 + \dots \\ & + (0.08)(399.3 - 236)^2 = 7847.2 \end{aligned}$$

Acudiendo a la función `VarHT`, del paquete `TeachignSampling`, es posible reproducir este mismo calculo de la varianza. Sin embargo, esta función utiliza la expresión teórica de la varianza  $Var_1(\hat{t}_{y,\pi})$  dada por (2.2.4) para diseños de muestreo de tamaño fijo. Tiene cuatro argumentos: `y`, que es un vector que contiene los valores de la característica de interés en todos y cada uno de los elementos de la población; `N`, el tamaño de la población; `n`, el tamaño de muestra fijo y `p`, el diseño de muestreo utilizado. El resultado de esta función es el cálculo del valor de la varianza teórica del estimador de Horvitz-Thompson para un diseño de muestreo y una configuración de valores poblacionales particular. Siguiendo con el diseño de muestreo dado en el ejemplo 2.1.2 y la configuración de valores de la característica de interés del ejemplo 2.1.3, tenemos que el calculo de la varianza es exactamente igual al dado por el ejercicio léxico-gráfico.

```
VarHT(y, N, n, p)

## [1] 7847
```

### 2.2.2 El estimador de Hansen-Hurwitz

#### Sobre el muestreo con reemplazo

Considere una población finita de  $N$  elementos y un diseño de muestreo que permite la selección de una muestra realizada  $s$ , con reemplazo, de tamaño  $m$ . Como Lohr (2000) lo afirma, la manera más

intuitiva de entender este tipo de diseños muestrales con reemplazo es pensar en la extracción de  $m$  muestras independientes de tamaño 1. Se extrae un elemento de la población para ser incluido en la muestra con una probabilidad  $p_k$ ; sin embargo, ese mismo elemento participa en el siguiente sorteo aleatorio. Este proceso se repite  $m$  veces; es decir, se tiene un total de  $m$  sorteos aleatorios.

Bajo el anterior esquema de selección, es claro que un elemento puede ser seleccionado en la muestra más de una vez; por lo tanto, aunque el tamaño de la muestra seleccionada con reemplazo es  $m$ , el tamaño de muestra efectivo no es necesariamente  $m$ . Nótese que la selección de un elemento que se repite más de una vez no proporciona información nueva. Es por esto que en la práctica, se prefieren los diseños de muestreo que permita la selección de muestras sin duplicados.

Särndal, Swensson & Wretman (1992) afirman que el marco general del muestreo con reemplazo tiene las siguientes características:

- Cada elemento de la población está relacionado directamente con un número positivo  $p_k$  ( $k = 1, \dots, N$ ) de tal forma que

$$\sum_U p_k = 1.$$

A  $p_k$  se le conoce como la **probabilidad de selección** del elemento  $k$ -ésimo. Nótese que estas probabilidades no son necesariamente iguales.

- Para seleccionar el primer elemento que pertenecerá a la muestra de tamaño  $m$ , se lleva a cabo un sorteo aleatorio de tal forma que

$$Pr(\text{Seleccionar el elemento } k) = p_k, \quad k \in U.$$

- El elemento seleccionado es reemplazado en la población y vuelva a ser parte del próximo sorteo aleatorio con la misma probabilidad de selección  $p_k$ .
- El mismo conjunto de probabilidades es usado para seleccionar los restantes elementos. En total se realizan  $m$  sorteos aleatorios independientes.

Ahora, en muestreo con reemplazo la probabilidad de selección de un elemento no es lo mismo que la probabilidad de inclusión<sup>3</sup> del mismo. Se tienen los siguientes resultados.

**Definición 2.2.1.** *Bajo un diseño con reemplazo, se define la variable aleatoria  $n_k(S)$  como el número de veces que el elemento  $k$ -ésimo es seleccionado en la muestra aleatoria  $S$ .*

**Resultado 2.2.8.** *La variable aleatoria  $n_k(S)$  sigue una distribución binomial tal que*

$$E(n_k(S)) = mp_k, \quad Var(n_k(S)) = mp_k(1 - p_k)$$

**Prueba.** Dado que cada una de las  $m$  extracciones inducen eventos estadísticos independientes, la selección en una extracción particular del  $k$ -ésimo elemento sigue una distribución de Bernoulli, con parámetro  $p_k$ . Como se trata de  $m$  extracciones,  $n_k(S)$  sigue una distribución binomial y puede tomar los valores  $0, 1, \dots, m$ ; al definir éxito como la selección del elemento  $k$ -ésimo en la muestra, entonces se tiene la demostración del resultado. ■

**Definición 2.2.2.** *De manera general, un diseño de muestreo con reemplazo se define como*

$$p(s) = \begin{cases} \frac{m!}{n_1(s)! \dots n_N(s)!} \prod_U (p_k)^{n_k(s)} & \text{si } \sum_U n_k(s) = m \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.2.19)$$

Donde  $n_k(s)$  es el número de veces que el elemento  $k$ -ésimo es seleccionado en la muestra realizada  $s$ .

<sup>3</sup>Nótese que la probabilidad de inclusión se refiere a la probabilidad de que el elemento sea seleccionado al menos una vez en la muestra.

Nótese la diferencia (y a la vez similitud) de la variable  $n_k(S)$  con la variable  $I_k(S)$ , además por la definición anterior se tiene que el diseño de muestreo con reemplazo sigue una distribución multinomial, por lo tanto cumple las condiciones de diseño muestral; es decir,  $\sum_{s \in Q} p(s) = 1$ , donde  $Q$  es el soporte que contiene todas las posibles muestras con reemplazo de tamaño  $m$ . La cardinalidad de  $Q$ , es

$$\#Q = \binom{N + m - 1}{m} \quad (2.2.20)$$

**Resultado 2.2.9.** En muestreo con reemplazo, la probabilidad de inclusión de primer orden del elemento  $k$ -ésimo está dada por:

$$\pi_k = 1 - (1 - p_k)^m \quad (2.2.21)$$

**Prueba.** Dado que se trata de eventos independientes los cuales tienen asociada una probabilidad de éxito (éxito equivalente a que el elemento  $k \in s$ )  $p_k$ , entonces cada uno de estos sorteos aleatorios está determinado por una distribución de probabilidad de tipo Bernoulli. Por consiguiente, cuando se realizan  $m$  ensayos independientes, se utiliza la distribución de probabilidad binomial para hallar las probabilidades de inclusión de primer orden de cada uno de los elementos en la población

$$\begin{aligned} \pi_k &= Pr(k \in S) = 1 - Pr(k \notin s) \\ &= 1 - \binom{m}{m} (1 - p_k)^m (p_k)^{m-m} \\ &= 1 - (1 - p_k)^m \end{aligned}$$

■

**Resultado 2.2.10.** En muestreo con reemplazo, las probabilidades de inclusión de segundo orden  $\pi_{kl}$ , están dadas por:

$$\pi_{kl} = 1 - (1 - p_k)^m - (1 - p_l)^m + (1 - p_k - p_l)^m \quad k \neq l = 1 \dots, N \quad (2.2.22)$$

**Prueba.** Para hallar esta probabilidad debemos negar que  $(k \in S \text{ y } l \in s)$ . Esta negación da como resultado  $(k \notin s \text{ ó } l \notin s)$ . Suponga que tenemos dos eventos,  $A = (k \notin s)$  y  $B = (l \notin s)$ ; por tanto,  $Pr(A \cup B) = Pr(A) + Pr(B) - Pr(A \cap B)$ . Las probabilidades anteriores se rigen por un modelo binomial, luego:

$$\begin{aligned} \pi_{kl} &= Pr(k \in S \text{ y } l \in s) \\ &= 1 - Pr(k \notin s) - Pr(l \notin s) + Pr(k, l \notin s) \\ &= 1 - (1 - p_k)^m - (1 - p_l)^m + \binom{m}{m} (1 - p_k - p_l)^m (p_k + p_l)^{m-m} \\ &= 1 - (1 - p_k)^m - (1 - p_l)^m + (1 - p_k - p_l)^m \end{aligned}$$

El cuarto sumando en la igualdad anterior se obtiene considerando que cada ensayo se toma como un proceso Bernoulli, donde el éxito es *no escoger ni a k ni a l*. Por tanto

$$\begin{aligned} Pr(\text{Éxito}) &= 1 - Pr(\text{Fracaso}) \\ &= 1 - Pr(\text{Escoger a } k) - Pr(\text{Escoger a } l) + Pr(\text{Escoger a ambos}) \\ &= 1 - p_k - p_l \end{aligned}$$

Puesto que se trata de un sólo ensayo, la probabilidad de escoger a ambos es nula. ■

Esto se nota más claramente con el típico ejemplo del dado. Si el evento es el lanzamiento de un dado y el éxito es *no sacar 3 o 5*, entonces la probabilidad de obtener éxito será:  $1 - Pr(\text{Fracaso})$ , es decir  $1 - Pr(\text{Sale } 5) - Pr(\text{Sale } 1) + Pr(\text{Sale } 5 \text{ y } 1)$ . Es obvio que el último sumando es cero dado que se trata de un sólo lanzamiento.

**Ejemplo 2.2.2.** El lector no debe confundir el concepto de **muestra con reemplazo** con el concepto de **extracción ordenada**. En nuestra población ejemplo el tamaño poblacional es  $N = 5$ . Si se utiliza un diseño de muestreo que induzca muestras de tamaño fijo igual a  $m = 2$ , entonces existirían  $N^m = 5^2 = 25$  posibles extracciones ordenadas. Sin embargo, sólo existen  $\binom{N+m-1}{m} = \binom{6}{2} = 15$  posibles muestras con reemplazo. Este escenario es evidenciado fácilmente con la ayuda de la variable aleatoria  $n_k(S)$ . Las posibles extracciones ordenadas están dadas de la siguiente manera.

(1,1)	(2,1)	(3,1)	(4,1)	(5,1)
(1,2)	(2,2)	(3,2)	(4,2)	(5,2)
(1,3)	(2,3)	(3,3)	(4,3)	(5,3)
(1,4)	(2,4)	(3,4)	(4,4)	(5,4)
(1,5)	(2,5)	(3,5)	(4,5)	(5,5)

Sin embargo, aunque todas las posibles extracciones ordenadas no constituyen el soporte de muestreo, éstas sí ayudan a definirlo. De hecho, el primer paso para la construcción del soporte de muestreo con reemplazo es la determinación de todas las posibles extracciones. La función `OrderWR`<sup>4</sup> del paquete `TeachingSampling` permite conocer todas las posibles extracciones de tamaño fijo para un diseño de muestreo con reemplazo.

Esta función cuenta con tres argumentos: el primer argumento correspondiente al tamaño de la población `N`, el segundo, correspondiente al tamaño de las selecciones, `m`, que no necesariamente debe ser menor que el tamaño poblacional<sup>5</sup> y, el último corresponde a una característica `ID` que puede ser un conjunto de rótulos o cualquier otro tipo de identificador continuo. El resultado de la función `OrderWR` será un conjunto de todas las posibles extracciones ordenadas con tamaño fijo `m`. Cuando el argumento `ID` es distinto de `FALSE`, la salida de la función corresponderá al rótulo o identificador continuo para cada elemento de la población. En el siguiente ejemplo se utiliza esta función en nuestra población ejemplo `U`.

```
N <- length(U)
N

## [1] 5

m <- 2

OrderWR(N, m, ID = FALSE)

##      [,1] [,2]
## [1,]    1    1
## [2,]    1    2
## [3,]    1    3
## [4,]    1    4
## [5,]    1    5
## [6,]    2    1
## [7,]    2    2
## [8,]    2    3
## [9,]    2    4
## [10,]   2    5
```

<sup>4</sup>El autor desea recalcar que el resultado de esta función no corresponde al soporte de muestreo con reemplazo sino al conjunto de todas las posibles extracciones ordenadas con reemplazo y de tamaño fijo.

<sup>5</sup>Se enfatiza que para este tipo de diseños de muestreo con reemplazo es posible que el tamaño de muestra sea mayor al tamaño poblacional.

```
## [11,] 3 1
## [12,] 3 2
## [13,] 3 3
## [14,] 3 4
## [15,] 3 5
## [16,] 4 1
## [17,] 4 2
## [18,] 4 3
## [19,] 4 4
## [20,] 4 5
## [21,] 5 1
## [22,] 5 2
## [23,] 5 3
## [24,] 5 4
## [25,] 5 5

OrderWR(N, m, ID = U)

##      [,1]      [,2]
## [1,] "Yves"    "Yves"
## [2,] "Yves"    "Ken"
## [3,] "Yves"    "Erik"
## [4,] "Yves"    "Sharon"
## [5,] "Yves"    "Leslie"
## [6,] "Ken"     "Yves"
## [7,] "Ken"     "Ken"
## [8,] "Ken"     "Erik"
## [9,] "Ken"     "Sharon"
## [10,] "Ken"    "Leslie"
## [11,] "Erik"   "Yves"
## [12,] "Erik"   "Ken"
## [13,] "Erik"   "Erik"
## [14,] "Erik"   "Sharon"
## [15,] "Erik"   "Leslie"
## [16,] "Sharon" "Yves"
## [17,] "Sharon" "Ken"
## [18,] "Sharon" "Erik"
## [19,] "Sharon" "Sharon"
## [20,] "Sharon" "Leslie"
## [21,] "Leslie" "Yves"
## [22,] "Leslie" "Ken"
## [23,] "Leslie" "Erik"
## [24,] "Leslie" "Sharon"
## [25,] "Leslie" "Leslie"
```

Nótese que el conjunto de extracciones ordenadas contiene al soporte de muestreo con reemplazo. Sin embargo, con ayuda de la función `SupportWR` del paquete `TeachingSampling` se define el verdadero soporte inducido por el diseño de muestreo con reemplazo. Los argumentos de esta función son los mismos tres de la función `OrderWR`: `N`, `m` y `ID`. El resultado de la función es el conjunto de todas las posibles muestras con reemplazo de tamaño fijo. Para este ejemplo particular, el soporte está dado por las siguientes muestras y no por todas las posibles extracciones ordenadas.

```
SupportWR(N, m, ID=FALSE)
```

```
##      [,1] [,2]
## [1,]    1    1
## [2,]    1    2
## [3,]    1    3
## [4,]    1    4
## [5,]    1    5
## [6,]    2    2
## [7,]    2    3
## [8,]    2    4
## [9,]    2    5
## [10,]   3    3
## [11,]   3    4
## [12,]   3    5
## [13,]   4    4
## [14,]   4    5
## [15,]   5    5
```

```
SupportWR(N,m,ID=U)
```

```
##      [,1]      [,2]
## [1,] "Yves"    "Yves"
## [2,] "Yves"    "Ken"
## [3,] "Yves"    "Erik"
## [4,] "Yves"    "Sharon"
## [5,] "Yves"    "Leslie"
## [6,] "Ken"     "Ken"
## [7,] "Ken"     "Erik"
## [8,] "Ken"     "Sharon"
## [9,] "Ken"     "Leslie"
## [10,] "Erik"   "Erik"
## [11,] "Erik"   "Sharon"
## [12,] "Erik"   "Leslie"
## [13,] "Sharon" "Sharon"
## [14,] "Sharon" "Leslie"
## [15,] "Leslie" "Leslie"
```

Por supuesto, cada una de las posibles muestras con reemplazo que pertenecen al soporte tiene distintas probabilidades de selección dependiendo de la configuración de las probabilidades de selección individuales para cada elemento,  $p_k$ . Supongamos que cada uno de los cinco elementos de la población tiene probabilidad de selección dadas por

$$p_k = \begin{cases} 1/4, & \text{para } k = \mathbf{Yves, Ken, Leslie}, \\ 1/8, & \text{para } k = \mathbf{Sharon, Erik} \end{cases}$$

Nótese que  $\sum_U p_k = 1$ . Para esta configuración particular, y siguiendo la expresión (2.2.19), las probabilidades de selección  $p(s)$  de las muestras en el soporte y el valor de la variable  $n_k(S)$  estarían dadas por la configuración mostrada en la tabla 2.2, la cual es producida por el siguiente código.

```
pk <- c(0.25, 0.25, 0.125, 0.125, 0.25)
QWR <- SupportWR(N,m,ID=U)
pWR <- p.WR(N, m, pk)
nkWR <- nk(N, m)
SamplesWR <- data.frame(QWR, pWR, nkWR)
```

	1	2	3	n1	n2	n3	n4	n5
1	Yves	Yves	0.06	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Yves	Ken	0.13	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
3	Yves	Erik	0.06	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00
4	Yves	Sharon	0.06	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
5	Yves	Leslie	0.13	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
6	Ken	Ken	0.06	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00
7	Ken	Erik	0.06	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00
8	Ken	Sharon	0.06	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
9	Ken	Leslie	0.13	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
10	Erik	Erik	0.02	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00
11	Erik	Sharon	0.03	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00
12	Erik	Leslie	0.06	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
13	Sharon	Sharon	0.02	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00
14	Sharon	Leslie	0.06	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
15	Leslie	Leslie	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00

Tabla 2.2: Todas las posibles muestras con reemplazo para el ejercicio

Nótese que la suma de las probabilidades de selección inducidas por el diseño de muestreo es igual a uno y que cada una de ellas es mayor que cero. El lector debe fijarse en que la muestra perteneciente al soporte está dada en términos de  $n_k(S)$ . De esta manera, si se ha seleccionado la séptima muestra dada por 1 0 1 0 0, en realidad, no importa si **Yves** fue seleccionado primero o después que **Erik** y la probabilidad de selección de esta muestra particular es 0.125 pues

$$\begin{aligned}
 p(s) &= \frac{2!}{1!0!1!0!0!} \left[ \left(\frac{1}{4}\right)^1 \left(\frac{1}{4}\right)^0 \left(\frac{1}{8}\right)^1 \left(\frac{1}{8}\right)^0 \left(\frac{1}{4}\right)^0 \right] \\
 &= 2 \left(\frac{1}{32}\right) = 0.0625
 \end{aligned}$$

### Estimador del total poblacional

Hansen, Hurwitz & Madow (1953) proponen un estimador conveniente para el total de una población  $t_y$  cuando el diseño de muestreo es con reemplazo. La lógica que sigue en la construcción de este estimador está dada a continuación. Sea el evento aleatorio:

Seleccionar el elemento  $k$  ( $k \in U$ ) en el  $i$ -ésimo sorteo ( $i = 1, \dots, m$ ).

Este evento define la creación de variables aleatorias, que serán utilizadas más adelante, cuyo comportamiento es posible modelar mediante el siguiente resultado.

**Resultado 2.2.11.** Sean  $U_1, U_2, \dots, U_m$  es una sucesión de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas con  $E(U_i) = \mu$  y  $Var(U_i) = \sigma^2$ . Sea  $\bar{U} = \sum_{i=1}^m U_i / m$ . Entonces  $E(\bar{U}) = \mu$ ,

$Var(\bar{U}) = \sigma^2/m$  y un estimador insesgado de  $Var(\bar{U})$  está dado por la siguiente expresión

$$\widehat{Var}(\bar{U}) = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m (U_i - \bar{U})^2 \quad (2.2.23)$$

y por consiguiente, un estimador insesgado para  $\sigma^2$  está dado por

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (U_i - \bar{U})^2. \quad (2.2.24)$$

**Prueba.** La esperanza de  $\bar{U}$  es

$$E(\bar{U}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E(U_i) = \mu \quad (2.2.25)$$

La varianza está determinada por

$$Var(\bar{U}) = \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m Var(U_i) = \sigma^2/m \quad (2.2.26)$$

Nótese que los términos de covarianza son nulos puesto que las variables son independientes entre ellas. Ahora como

$$\sum_{i=1}^m (U_i - \bar{U})^2 = \sum_{i=1}^m U_i^2 - m\bar{U}^2 \quad (2.2.27)$$

entonces,

$$E\left(\sum_{i=1}^m (U_i - \bar{U})^2\right) = \sum_{i=1}^m E(U_i^2) - mE(\bar{U}^2) \quad (2.2.28)$$

Por otro lado

$$\begin{aligned} E(U_i^2) &= Var(U_i) + [E(U_i)]^2 = \sigma^2 + \mu^2 \\ E(\bar{U}^2) &= Var(\bar{U}) + [E(\bar{U})]^2 = \sigma^2/m + \mu^2 \end{aligned}$$

Esto conduce a la demostración del teorema puesto que

$$E\left(\sum_{i=1}^m (U_i - \bar{U})^2\right) = (m-1)\sigma^2 \quad (2.2.29)$$

■

El anterior es un resultado muy potente que puede ser utilizado para cualquier tipo de variables aleatorias que sean independientes e idénticamente distribuidas y será la base para la demostración de resultados en la estimación de parámetros que utilicen diseños de muestreo con reemplazo. Siguiendo con el marco teórico del muestreo con reemplazo tenemos la siguiente definición.

**Definición 2.2.3.** Se define la variable aleatoria  $Z_i$  tal que

$$Z_i = y_{k_i}/p_{k_i} \quad k \in U \quad i = 1, \dots, m \quad (2.2.30)$$

donde la cantidad  $y_{k_i}$  es el valor de la característica de interés del  $k$ -ésimo elemento seleccionado en la  $i$ -ésima extracción. Análogamente,  $p_{k_i}$  es el valor de la probabilidad de selección del  $k$ -ésimo elemento seleccionado en la  $i$ -ésima extracción.



**Resultado 2.2.12.** La distribución de la variable aleatoria  $Z_i$  está dada por

$$Pr\left(Z_i = \frac{y_k}{p_k}\right) = p_k, \quad (2.2.31)$$

por tanto la esperanza y varianza de la variable aleatoria  $Z_i$  son

$$E(Z_i) = t_y \quad (2.2.32)$$

y

$$Var(Z_i) = \sum_U p_k \left(\frac{y_k}{p_k} - t_y\right)^2, \quad (2.2.33)$$

respectivamente.

**Prueba.** Dado que se trata de  $m$  sorteos aleatorios independientes, la variable aleatoria  $Z_i$  puede tomar los siguientes valores

$$\frac{y_1}{p_1}, \frac{y_2}{p_2}, \dots, \frac{y_N}{p_N}$$

con probabilidades

$$p_1, p_2, \dots, p_N$$

respectivamente. Luego, acudiendo a la definición genérica del operador esperanza, se tiene

$$E(Z_i) = \sum_U \frac{y_k}{p_k} Pr\left(Z_i = \frac{y_k}{p_k}\right) = \sum_U \frac{y_k}{p_k} p_k = t_y$$

y análogamente se tiene la varianza

$$Var(Z_i) = \sum_U \left(\frac{y_k}{p_k} - E(Z_i)\right)^2 Pr\left(Z_i = \frac{y_k}{p_k}\right) = \sum_U \left(\frac{y_k}{p_k} - t_y\right)^2 p_k$$

■

Dado que las  $m$  extracciones son eventos independientes, también lo son las variables  $Z_i$ <sup>6</sup>. Nótese que la cantidad  $Z_i$  es una estimación del total poblacional con la  $i$ -ésima muestra seleccionada de tamaño 1. Ahora, como existen  $m$  sorteos habrán  $m$  estimaciones del total poblacional; por tanto, como en mucho otros procedimientos estadísticos utilizamos el promedio de estas  $m$  estimaciones para obtener una estimación unificada para  $t_y$ . El estimador de Hansen-Hurwitz toma la siguiente forma

$$\hat{t}_{y,p} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{y_{k_i}}{p_{k_i}} \quad (2.2.34)$$

Para tener una estrategia de muestreo que resulte eficiente en la estimación de  $t_y$ , es conveniente utilizar el estimador de Hansen-Hurwitz, cuando las probabilidades de selección son proporcionales a la característica de interés; esto es, cuando  $p_k \propto y_k$ . Si lo anterior sucede, el estimador tendrá una varianza casi nula y la estimación será muy precisa.

**Resultado 2.2.13.** Si  $p_k > 0$ , para todo  $k \in U$ , el estimador  $\hat{t}_{y,p}$  es insesgado

<sup>6</sup>  $Z_1, \dots, Z_m$  define una sucesión de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, o si se quiere, en términos de la inferencia clásica, define una **muestra aleatoria**.

**Prueba.** Las variables aleatorias  $Z_i$  son independientes (porque cada ensayo es independiente) y su distribución está inducida por  $Pr(Z_i = y_k/p_k) = p_k$ ,  $k \in U$ ; es decir, son idénticamente distribuidas. Por tanto, el estimador de Hansen-Hurwitz puede escribirse como:

$$\hat{t}_{y,p} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{y_i}{p_i} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_i = \bar{Z}$$

y así con  $p_k > 0$  para todo  $k \in U$ , tenemos

$$E(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E(Z_i) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_y = t_y$$

■

### Varianza del estimador de Hansen-Hurwitz

Una de las características más importantes del estimador de Hansen-Hurwitz es la sencillez de la expresión de su varianza. Esta misma hace que aunque el muestreo sea con reemplazo, el estimador de Hansen-Hurwitz sea utilizado de manera frecuente por los usuarios de los estudios por muestreo.

**Resultado 2.2.14.** *La varianza del estimador de Hansen-Hurwitz está dada por la siguiente expresión*

$$Var(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^N p_k \left( \frac{y_k}{p_k} - t_y \right)^2 \quad (2.2.35)$$

**Prueba.** Por la independencia de las selecciones se tiene que

$$\begin{aligned} Var(\hat{t}_{y,p}) &= Var\left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_i\right) \\ &= \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m Var(Z_i) \\ &= \frac{1}{m} Var(Z_i) \\ &= \frac{1}{m} \sum_U \left( \frac{y_k}{p_k} - t_y \right)^2 p_k \end{aligned}$$

■

La anterior expresión hace que el cálculo computacional de la varianza del estimador de Hansen-Hurwitz sea muy sencillo. Sin embargo, esta varianza se puede escribir de varias formas, algunas de ellas muy útiles para el desarrollo teórico de las propiedades del estimador.

**Resultado 2.2.15.** *De manera general, la varianza del estimador de Hansen-Hurwitz se puede escribir de la siguiente manera*

$$Var(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m} \left( \sum_{k=1}^N \frac{y_k^2}{p_k} - t_y^2 \right) \quad (2.2.36)$$

**Prueba.**

$$\begin{aligned}
 \text{Var}(\hat{t}_{y,p}) &= \frac{1}{m} \sum_{k=1}^N p_k \left( \frac{y_k}{p_k} - t_y \right)^2 \\
 &= \frac{1}{m} \sum_{k=1}^N p_k \left( \frac{y_k^2}{p_k^2} - 2t_y \frac{y_k}{p_k} + t_y^2 \right) \\
 &= \frac{1}{m} \sum_{k=1}^N \left( \frac{y_k^2}{p_k} - 2t_y y_k + p_k t_y^2 \right) \\
 &= \frac{1}{m} \left( \sum_{k=1}^N \frac{y_k^2}{p_k} - 2t_y \sum_{k=1}^N y_k + t_y^2 \sum_{k=1}^N p_k \right) \\
 &= \frac{1}{m} \left( \sum_{k=1}^N \frac{y_k^2}{p_k} - 2t_y^2 + t_y^2 \right) = \frac{1}{m} \left( \sum_{k=1}^N \frac{y_k^2}{p_k} - t_y^2 \right)
 \end{aligned}$$

■

### Estimación de la varianza

**Resultado 2.2.16.** Un estimador insesgado de la expresión (2.2.35) es

$$\widehat{\text{Var}}(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m \left( \frac{y_i}{p_i} - \hat{t}_{y,p} \right)^2 \quad (2.2.37)$$

**Prueba.** Al desarrollar la varianza del estimador llegamos a que ésta es igual a

$$\frac{1}{m} \text{Var}(Z_i).$$

Ahora, utilizando el resultado 2.2.11, como  $Z_1, \dots, Z_m$  conforman una muestra aleatoria de variables con esperanza  $t_y$  e idéntica varianza, entonces un estimador natural e insesgado para la varianza de  $Z_i$  es

$$\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (Z_i - \bar{Z})^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \left( \frac{y_i}{p_i} - \hat{t}_{y,p} \right)^2$$

por tanto, un estimador insesgado de la varianza del estimador de Hansen-Hurwitz será

$$\widehat{\text{Var}}(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m} \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \left( \frac{y_{k_i}}{p_{k_i}} - \hat{t}_{y,p} \right)^2$$

■

**Resultado 2.2.17.** Una expresión alternativa para la estimación de la varianza del estimador de Hansen-Hurwitz en muestreo con reemplazo es

$$\widehat{\text{Var}}(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m \left( \frac{y_{k_i}}{p_{k_i}} \right)^2 - m \hat{t}_{y,p}^2$$

**Prueba.** Partiendo del resultado anterior, se tiene que

$$\begin{aligned}
 m(m-1)\widehat{Var}(\hat{t}_{y,p}) &= \sum_{i=1}^m \left( \frac{y_{k_i}}{p_{k_i}} - \hat{t}_{y,p} \right)^2 \\
 &= \sum_{i=1}^m \left( \frac{y_{k_i}^2}{p_{k_i}^2} - 2\hat{t}_{y,p} \frac{y_{k_i}}{p_{k_i}} + \hat{t}_{y,p}^2 \right) \\
 &= \sum_{i=1}^m \left( \frac{y_{k_i}^2}{p_{k_i}^2} \right) - 2\hat{t}_{y,p} \sum_{i=1}^m \frac{y_{k_i}}{p_{k_i}} + m\hat{t}_{y,p}^2 \\
 &= \sum_{i=1}^m \left( \frac{y_{k_i}^2}{p_{k_i}^2} \right) - 2m\hat{t}_{y,p}^2 + m\hat{t}_{y,p}^2 \\
 &= \sum_{i=1}^m \left( \frac{y_{k_i}}{p_{k_i}} \right)^2 - m\hat{t}_{y,p}^2
 \end{aligned}$$

■

Aunque el diseño muestral sea con reemplazo, es posible utilizar el estimador de Horvitz-Thompson, pues conserva su insesgamiento. La comparación entre la precisión del estimador de Horvitz-Thompson y el estimador de Hansen-Hurwitz, en un diseño con repetición depende de la configuración de los valores de la característica de interés en la población  $y_k \forall k = 1, 2, \dots, N$ . Sin embargo, generalmente el estimador de Horvitz-Thompson es más eficiente que el estimador de Hansen-Hurwitz, aunque éste último es más fácil de calcular. Cuando el diseño de muestreo es de tamaño fijo, el estimador de Horvitz-Thompson y Hansen-Hurwitz coinciden.

**Ejemplo 2.2.3.** Continuando con el ejercicio léxico-gráfico de la estimación del total poblacional  $t_y$  para todas las posibles muestras con reemplazo de tamaño 2 de la población  $U$ , tenemos la siguiente tabla que da cuenta del soporte de muestreo con ayuda de la función **SupportWR**

```

all.y <- SupportWR(N, n, y)
all.pk <- SupportWR(N, n, pk)
all.HH <- rep(0, 15)

for(k in 1:15){
  all.HH[k] <- HH(all.y[k,], all.pk[k,])
}

AllSamplesWR <- data.frame(QWR, all.pk, pWR, all.y, all.HH)

```

El vector **Est** contiene las estimaciones de Hansen-Hurwitz para cada una de las posibles 15 muestras con reemplazo, su esperanza se calcula como

```

sum(all.HH * pWR)

## [1] 236

```

Nótese que la esperanza del estimador equivale al total de la característica de interés, corroborando su insesgamiento. Por otro lado, para seleccionar una muestra con reemplazo, R incorpora la función **sample**, cuyos principales argumentos son

**x, size, replace, prob.**

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Yves	Yves	0.25	0.25	0.06	32.00	32.00	128.00
2	Yves	Ken	0.25	0.25	0.13	32.00	34.00	132.00
3	Yves	Erik	0.25	0.12	0.06	32.00	46.00	248.00
4	Yves	Sharon	0.25	0.12	0.06	32.00	89.00	420.00
5	Yves	Leslie	0.25	0.25	0.13	32.00	35.00	134.00
6	Ken	Ken	0.25	0.25	0.06	34.00	34.00	136.00
7	Ken	Erik	0.25	0.12	0.06	34.00	46.00	252.00
8	Ken	Sharon	0.25	0.12	0.06	34.00	89.00	424.00
9	Ken	Leslie	0.25	0.25	0.13	34.00	35.00	138.00
10	Erik	Erik	0.12	0.12	0.02	46.00	46.00	368.00
11	Erik	Sharon	0.12	0.12	0.03	46.00	89.00	540.00
12	Erik	Leslie	0.12	0.25	0.06	46.00	35.00	254.00
13	Sharon	Sharon	0.12	0.12	0.02	89.00	89.00	712.00
14	Sharon	Leslie	0.12	0.25	0.06	89.00	35.00	426.00
15	Leslie	Leslie	0.25	0.25	0.06	35.00	35.00	140.00

Tabla 2.3: *Estimaciones de Hansen-Hurwitz para todas las posibles muestras del ejemplo*

`x` es el tamaño de la población, `size` es un número entero que determina el tamaño de la muestra. Para seleccionar una muestra con reemplazo, el argumento `replace` debe tomar el valor `TRUE`, así `replace = TRUE`. Cada elemento perteneciente a la población debe tener asociado un vector de probabilidades de selección cuya suma sea igual a la unidad. En R, el argumento `prob` contiene este vector de probabilidades; cuando se omite este argumento, la función `sample` asume que las probabilidades de selección son idénticas para cada individuo en la población. Así, por ejemplo, para seleccionar una muestra con reemplazo del marco de muestreo de  $U$  de tamaño  $m = 3$ , con las probabilidades de selección dadas por

```
pk
## [1] 0.25 0.25 0.12 0.12 0.25
```

Nótese que la suma de las probabilidades de selección es igual a uno y que los rótulos o nombres para cada individuo en la población están contenidos en el objeto `U`.

```
U
## [1] "Yves" "Ken" "Erik" "Sharon" "Leslie"
```

Para seleccionar una muestra con reemplazo de tamaño  $m = 3$  se debe escribir el siguiente código

```
sam <- sample(N, 3, replace=TRUE, prob = pk)
sam
## [1] 2 4 3
```

Para la selección anterior, fue escogido dos veces el primer elemento y una vez el tercer elemento. La indexación de los rótulos (nombres) y valores de la característica de interés de los elementos escogidos en la muestra se hace utilizando

```
pkm <- pk[sam]
pkm

## [1] 0.25 0.12 0.12

ym <- y[sam]
ym

## [1] 34 89 46
```

Nótese que el tamaño de muestra es 3, pero el tamaño efectivo de muestra es  $n(S) = 2$ . Siendo **pkm** el vector de probabilidades de selección para los individuos pertenecientes a la muestra y **ym** el vector de valores de la característica de interés para los individuos pertenecientes a la muestra. La función **HH** del paquete **TeachingSampling** realiza la estimación del total poblacional para la característica de interés. Esta función consta de dos argumentos: **y**, el vector de valores de la característica de interés de los individuos en la muestra y **pk** sus correspondientes probabilidades de selección.

```
est <- HH(ym, pkm)[1]
est

## [1] 405
```

Para realizar la estimación de la varianza se crea un vector de diferencias **dif** entre  $\frac{y_i}{p_i}$  y la estimación. Luego se procede a elevarlo al cuadrado, sumarlo y dividir por  $m(m-1)$ .

```
dif <- rep(0, 3)
dif[1] <- (ym[1] / pkm[1]) - est
dif[2] <- (ym[2] / pkm[2]) - est
dif[3] <- (ym[3] / pkm[3]) - est

dif

## [1] -269 307 -37

Var <- (1 / 3) * (1 / 2) * sum(dif^2)
Var

## [1] 27996

sqrt(Var)

## [1] 167
```

Luego, el respectivo coeficiente de variación estimado es

$$cve(\hat{t}_p) = \frac{167.32}{405.33} \cong 41\%$$

Nótese que utilizando la función **HH**, el resultado que arroja el procedimiento es el mismo.

```
HH(ym, pkm)
```

```
##          y
## Estimation 405
## Standard Error 167
## CVE      41
```

Podemos pensar en el coeficiente de variación estimado como una medida de precisión. Así, las anteriores estimaciones se podrían decir inaceptables porque esta medida es muy alta.

El objetivo de este libro es que el lector esté en la capacidad de proponer estrategias de muestreo que permitan estimaciones precisas y confiables. Es decir, estimaciones cuyo coeficiente de variación sea aceptable<sup>7</sup> cuya longitud del intervalo de confianza sea corta con un nivel de confianza satisfactorio.

### 2.2.3 El estimador de Horvitz-Thompson en los diseños con reemplazo

## 2.3 Muestras representativas

La teoría de muestreo se ha visto enriquecida en las últimas décadas por valiosos aportes a nivel mundial; aunque la base de la teoría de muestreo es la teoría de probabilidad, cuyo desarrollo axiomático cuenta varios centenares de años, su desarrollo práctico no sucedió sino hasta comienzos del siglo XX. Sin embargo, en la teoría clásica de inferencia estadística, basados en el pensamiento de Ronald Fisher y otros, asumen que la población es infinita. Un aspecto fundamental de la teoría de muestreo es que está basada en la realidad, en donde las poblaciones por más grandes que sean son de naturaleza finita.

Partiendo de este hecho es posible fundamentar la inferencia basada en una muestra aleatoria pero que proviene de una población finita y desde esta perspectiva los resultados de las inferencias diferirán de una manera significativa. De hecho, el llamado de atención es para que las personas que hacen inferencia con datos provenientes de un estudio por muestreo, se actualicen y no cometan grandes equivocaciones a la hora de presentar los resultados de la inferencia (Chambers & Skinner 2003). Por eso la teoría de muestreo cubre aspectos fundamentales de la estadística, porque desde un experimento controlado, hasta una encuesta por muestreo (Survey sampling), se debe pensar en el mecanismo de recolección de la información, y desde allí en la inferencia.

Un ejemplo común en las aulas de clase es describir la población en el tablero mediante una carita feliz, el profesor dice que una muestra representativa de la población es aquella muestra en donde se sigue viendo la misma carita feliz. Es decir, existe la creencia que una muestra representativa es un modelo reducido de la población y de aquí se desprende un argumento de validez sobre la muestra: una buena muestra es aquella que se parece a la población, de tal forma que las categorías aparecen con las mismas proporciones que en la población. Nada más falso que esta creencia. En algunos casos es fundamental sobre-representar algunas categorías o incluso seleccionar unidades con probabilidades desiguales.

Tillé (2006) cita el siguiente ejemplo: suponga que el objetivo es estimar la producción de hierro en un país y que nosotros sabemos que el hierro es producido, por dos compañías gigantes con miles de empleados y por cientos de pequeñas compañías con pocos empleados. ¿La mejor forma de seleccionar la muestra consiste en asignar la misma probabilidad a cada compañía? Claro que no. Primero averiguamos la producción de las grandes compañías. Después, seleccionamos una muestra de las compañías pequeñas.

La muestra no debe ser un modelo reducido de la población; debe ser una herramienta usada para obtener estimaciones. Es así como el concepto de muestra representativa pierde peso. Más aún, para

<sup>7</sup>En muchos casos un coeficiente de variación aceptable es menor al 3 por ciento.

Hájek (1981), una estrategia de muestreo es una dupla: diseño de muestreo (distribución de probabilidad sobre todas las posibles muestras) y estimador. La teoría de muestreo se ha ocupado de estudiar estrategias óptimas que permitan asegurar la calidad de las estimaciones. Entonces, el concepto de representatividad debería estar asociado con las estrategias de muestreo y no sólo con las muestras.

Siguiendo con Tillé (2006), una estrategia se dice representativa si permite estimar un total poblacional exactamente; es decir, sin sesgo y con varianza nula. Si se utiliza, por ejemplo, el estimador de Horvitz-Thompson junto con un diseño de muestreo apropiado, esta estrategia es representativa sólo si, junto con la muestra seleccionada, el estimador reproduce algunos totales de la población; tales muestras se llaman muestras balanceadas. Existen también, estimadores que brindan a la estrategia el calificativo de representativa, algunos de ellos son conocidos como estimadores de calibración.

## 2.4 Ejercicios

2.1 Pruebe que bajo un diseño de muestreo  $p(s)$ , el error cuadrático medio de cualquier estimador  $\hat{T}(s)$  de un parámetro  $T$  es igual a la varianza  $Var(\hat{T})$  más el sesgo al cuadrado  $B^2(\hat{T})$ .

$$\text{Sugerencia: } ECM(\hat{T}) = E_p(\hat{T}(s) - T)^2 = \sum_{s \in Q} (\hat{T}(s) - T)^2 p(s).$$

2.2 Demuestre que  $\pi_{kl} = E_p(I_k(s)I_l(s))$ .

2.3 Suponga que tiene acceso a la población finita de tamaño  $N = 5$  del ejemplo 2.2.1. y asuma el siguiente diseño de muestreo sin reemplazo

$$p(S = s) = \begin{cases} 0.2, & \text{para } s = \{Ken, Erik, Sharon\}, s = \{Ken, Leslie\}, \\ 0.3, & \text{para } s = \{Yves, Erik, Leslie\}, s = \{Yves, Sharon\}, \\ 0, & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

- Calcule todas las probabilidades de inclusión de primer y de segundo orden.
- ¿Es el anterior un diseño de muestreo de tamaño de muestra fijo? Explique.
- Enumere todos los valores que toma la variable aleatoria  $n(S)$  y verifique las relaciones  $E_p(n(S)) = \sum_U \pi_k$  y  $Var_p(n(S)) = \sum_U \pi_k - (\sum_U \pi_k)^2 + \sum \sum_{k \neq l} \pi_{kl}$ .

2.4 Suponga que tiene acceso a la población finita de tamaño  $N = 5$  del ejemplo 2.2.1. y asuma el siguiente diseño de muestreo sin reemplazo

$$p(S = s) = \begin{cases} 0.1, & \text{Si } n(S) = 3, \\ 0, & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

- Defina todas las posibles muestras que pertenecen al soporte inducido por el anterior diseño de muestreo.
- Calcule todas las probabilidades de inclusión de primer y de segundo orden.
- Verifique que  $\sum_U \pi_k = 3$  y que  $\sum_U \pi_k - (\sum_U \pi_k)^2 + \sum \sum_{k \neq l} \pi_{kl} = 0$ . Explique.
- Verifique que  $\sum_U \pi_{k1} = 3 \times \pi_1$ ,  $\sum_U \pi_{k2} = 3 \times \pi_2$ , hasta  $\sum_U \pi_{k5} = 3 \times \pi_5$ .
- Calcule todas las posibles covarianzas  $\Delta_{kl}$  y verifique que  $\sum_U \Delta_{k1} = 0$ , hasta  $\sum_U \Delta_{k5} = 0$ .

2.5 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «Bajo cualquier diseño de muestreo, la suma poblacional de las probabilidades de inclusión de primer orden es siempre igual al tamaño de muestra».

2.6 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «Bajo cualquier diseño de muestreo, el estimador de Horvitz-Thompson puede ser utilizado para obtener una estimación insesgada del total poblacional».



2.7 Suponga que tiene acceso a la población finita de tamaño  $N = 5$  del ejemplo 2.2.1 y que  $y_k$  denota el valor de la característica de interés en el  $k$ -ésimo individuo. De esta manera, se tiene que:

$$y_{Yves} = 32, \quad y_{Ken} = 34, \quad y_{Erik} = 46, \quad y_{Sharon} = 89, \quad y_{Leslie} = 35$$

- Para el diseño de muestreo del ejercicio 2.3, en cada una de las posibles muestras calcule la estimación de Horvitz-Thompson, la estimación de la varianza, el *cve* y la estimación del intervalo de confianza al 95 %. Por último, muestre que el estimador es insesgado y calcule la varianza del estimador utilizando la expresión (2.2.4).
  - Para el diseño de muestreo del ejercicio 2.4, en cada una de las posibles muestras calcule la estimación de Horvitz-Thompson, la estimación de la varianza, el *cve* y la estimación del intervalo de confianza al 95 %. Por último, muestre que el estimador es insesgado y calcule la varianza del estimador utilizando la expresión (2.2.4) y (2.2.5). ¿Son iguales estas varianzas? Explique.
  - Para el diseño de muestreo del ejercicio 2.3, en cada una de las posibles muestras calcule la estimación de Horvitz-Thompson de la media (expresión 2.2.10), la estimación del tamaño poblacional (expresión 2.2.14), la estimación alternativa de la media (expresión 2.2.15) y la estimación alternativa del total (expresión 2.2.18).
  - Para el diseño de muestreo del ejercicio 2.4, en cada una de las posibles muestras calcule la estimación de Horvitz-Thompson de la media (expresión 2.2.10), la estimación del tamaño poblacional (expresión 2.2.14), la estimación alternativa de la media (expresión 2.2.15) y la estimación alternativa del total (expresión 2.2.18).
- 2.8 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «Bajo cualquier diseño de muestreo con reemplazo, el estimador de Hansen-Hurwitz puede ser utilizado para obtener una estimación insesgada del total poblacional».
- 2.9 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «La probabilidad de selección de un individuo es siempre igual a su probabilidad de inclusión».
- 2.10 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «Cualquier diseño de muestreo con reemplazo se puede ver como un caso particular de la distribución multinomial».
- 2.11 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «Para una población de tamaño  $N$ , el número de posibles muestras con reemplazo de tamaño  $m$  es  $N^m$ ».
- 2.12 Suponga que tiene acceso a la población finita de tamaño  $N = 5$  de los anteriores ejercicios y asuma las siguientes probabilidades de selección

$$p_k = \begin{cases} 0.3, & \text{para } k = Yves, Leslie, \\ 0.2, & \text{para } k = Erik, \\ 0.1, & \text{para } k = Ken, Sharon. \end{cases}$$

- ¿Cuántas muestras con reemplazo de tamaño  $m = 3$  se pueden seleccionar? Especifique explícitamente el diseño de muestreo para estas muestras y compruebe que  $\sum_{s \in Q} p(s) = 1$ .
  - Para este diseño de muestreo, y teniendo en cuenta los valores de la característica de interés del ejercicio 2.7, en cada una de las posibles muestras calcule la estimación de Hansen-Hurwitz, la estimación de la varianza, el *cve* y la estimación del intervalo de confianza al 95 %. Por último, muestre que el estimador es insesgado y calcule la varianza del estimador utilizando la expresión (2.2.35).
  - ¿Es posible utilizar otro tipo de estimadores para obtener estimaciones insesgadas del total poblacional?
- 2.13 Demuestre rigurosamente que el estimador de la varianza del estimador de Hansen-Hurwitz corresponde a la expresión (2.2.36).



## Capítulo 3

# Muestras con probabilidades simples

Las muestras no están dadas, las muestras deben ser seleccionadas, asignadas o capturadas. El tamaño de la muestra no siempre es fijo. En estudios por muestreo, el tamaño de muestra es casi siempre una variable aleatoria. Los datos no siempre son independientes o idénticamente distribuidos y usualmente no son seleccionados de una sola población, sino de sub-poblaciones compuestas o complementarias. Más aún, no se produce una sola estimación, se produce un conjunto de estimaciones. Así que la historia que siempre nos han contado está equivocada.

Leslie Kish en Frankel & King (1996)

Cuando el marco de muestreo disponible para la selección de la muestra es una lista conteniendo la identificación y la ubicación de los elementos en la población, se utilizan diseños de muestreo que permitan la inclusión de éstos en la muestra de forma directa. Es decir, en la selección de la muestra, los elementos poblacionales son las mismas unidades de muestreo. Una vez que el procedimiento de muestreo ha seleccionado la muestra de elemento, el siguiente paso a realizar es la medición de la característica de interés  $y_k$  en cada elemento de la muestra seleccionada ( $k \in s$ ).

En este capítulo se describen los diseños de muestreo para elementos más importantes, algunos de los cuales son ampliamente utilizados en la práctica, otros tienen la característica de ser de tamaño de muestra variable o aleatorio. Cuando el marco de muestreo contiene información auxiliar de tipo continuo para cada elemento de la población, se utilizará esta información en la selección de la muestra, induciendo los diseños proporcionales al tamaño. Cuando el marco de muestreo contiene información auxiliar discreta, se utilizarán diseños de muestra estratificados que permiten, a menudo, mayor precisión cuando la característica de interés presenta comportamientos diferentes en cada estrato o grupo poblacional.

Para cada diseño de muestreo se realiza una descripción teórica, se utilizará la población  $U$  para realizar algunos ejercicios léxico-gráficos que describan el comportamiento de la estrategia de muestreo. Por otro lado, se utilizará la población Lucy y, con ayuda del paquete **TeachingSampling**, se seleccionará una única muestra para la posterior estimación de los parámetros de interés. También habrá ejemplos prácticos de la vida real que permiten una mayor comprensión de las características del diseño y un mayor conocimiento a la hora de decidir qué diseño de muestreo debe ser implementado en determinados casos.

Las estrategias de muestreo implementadas en este capítulo corresponden a la utilización del estimador de Horvitz-Thompson junto con diseños de muestreo sin reemplazo y/o al uso del estimador de Hansen-Hurwitz en diseños de muestra con reemplazo.

### 3.1 Muestreo aleatorio simple sin reemplazo

El muestreo aleatorio simple puede ser visto como la forma más básica de selección de muestras. Supone la existencia de homogeneidad en los valores poblacionales de la característica de interés. Partiendo de esta asunción, este diseño provee probabilidades de selección idénticas para cada una de las posibles muestras pertenecientes al soporte  $Q$ . Lohr (2000) cita un ejemplo al respecto del uso del diseño de muestreo aleatorio simple diciendo que, cuando la población es homogénea, el investigador no necesita examinar todos los elementos de la población así como el encargado del análisis médico no necesita obtener toda la sangre para medir la cantidad de glóbulos rojos.

Una **muestra aleatoria simple sin reemplazo** de tamaño  $n$  se elige de modo que cada posible muestra realizada de tamaño  $n$  tenga la misma probabilidad de ser seleccionada. A diferencia del diseño de muestreo Bernoulli, el diseño de muestreo aleatorio simple sin reemplazo tiene la característica de ser de tamaño fijo. Una **muestra aleatoria simple con reemplazo**, de tamaño  $m$  de una población de  $N$  elementos es la extracción de  $m$  muestras independientes de tamaño 1, en donde cada elemento se extrae de la población con la misma probabilidad.

Lehtonen & Pahkinen (2003) afirman que este diseño de muestreo no es muy común en la práctica y básicamente desempeña dos funciones. Primero, plantean una línea de comparación de la eficiencia relativa con otros diseños de muestreo. Segundo, dentro de los diseños de muestreo más sofisticados como diseños de muestreo estratificado o diseños de muestreo por conglomerados, el muestreo aleatorio simple puede ser utilizado como un método final de selección de unidades primarias.

**Definición 3.1.1.** *Un diseño de muestreo se dice aleatorio simple sin reemplazo si todas las posibles muestras de tamaño  $n$  tienen la misma probabilidad de ser seleccionadas. Así,*

$$p(s) = \begin{cases} \frac{1}{\binom{N}{n}} & \text{si } \#s = n \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.1.1)$$

**Resultado 3.1.1.** *Definiendo a  $Q$  como el soporte que contiene a todas las posibles muestras de tamaño  $n$ , existen  $\binom{N}{n}$  muestras pertenecientes a  $Q$ . En otras palabras,*

$$\#(Q) = \binom{N}{n}$$

Nótese que  $\sum_{s \in Q} p(s) = 1$  porque  $\#Q = \binom{N}{n}$ .

#### 3.1.1 Algoritmos de selección

Durante muchos años, la teoría de muestreo se centró en la parte de la extracción de muestras aleatorias, más que en la construcción de los estimadores. Con la gran ventaja de los nuevos procesadores, lo anterior pasa a un segundo plano. A continuación se presentan dos métodos de selección de una muestra aleatoria simple de tamaño  $n$  de una población de tamaño  $N$ . Existen bastantes métodos de selección de una muestra aleatoria sin reemplazo, en esta sección se abordan dos algoritmos de selección. El primero da una asunción más simple, y puede ser comparado con el conocido método de la extracción de una balota; sin embargo, Tillé (2006) afirma que este método es ineficiente computacionalmente. El segundo método basado en un algoritmo secuencial, permite la selección de la muestra con una sola revisión del marco de muestreo.

#### Método coordinado negativo

Sunter (1977) ha probado que el siguiente método de ordenamiento aleatorio arroja como resultado una muestra aleatoria simple. Para extraer la muestra de tamaño  $n$  de un universo de  $N$  objetos,

1. Generar  $N$  realizaciones de una variable aleatoria  $\xi_k$  ( $k \in U$ ) con distribución uniforme  $(0,1)$ .
2. Asignar  $\xi_k$  al elemento  $k$ -ésimo de la población.
3. Ordenar la lista de elementos descendente (o ascendentemente) con respecto a este número aleatorio  $\xi_k$ .
4. A continuación, seleccionar los  $n$  primeros (o los  $n$  últimos) elementos. Esta selección corresponde a la muestra realizada.

Es necesario tener la seguridad de que exista un número grande de décimas en cada  $\xi_k$  para evitar problemas de empates (números aleatorios repetidos).

### Método de selección y rechazo

Fan, Muller & Rezucha (1962) implementaron el siguiente algoritmo de muestreo secuencial (porque se recorre el marco de muestreo, elemento por elemento, y se decide la pertenencia o el rechazo del objeto en la muestra). Es interesante que, más tarde Bebbington (1975) trece años más tarde publica (en un artículo de una página) el mismo método, aunque sin escribir ninguna fórmula.

En general se supone que el marco de muestreo tiene  $N$  individuos, y se quiere seleccionar una muestra aleatoria de  $n$  individuos. Así, para el individuo  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ), se tiene que

1. Realizar  $\xi_k \sim U(0, 1)$

2. Calcular

$$c_k = \frac{n - n_k}{N - k + 1}$$

donde  $n_k$  es la cantidad de objetos seleccionados en los  $k - 1$  ensayos anteriores.

3. Si  $\xi_k < c_k$ , entonces el elemento  $k$  pertenece a la muestra.
4. Detener el proceso cuando  $n = n_k$ .

Dado que este algoritmo se detiene cuando  $n = n_k$ , resulta muy eficiente porque asegura una muestra aleatoria simple y en algunas ocasiones no se requiere recorrer todo el marco de muestreo.

**Ejemplo 3.1.1.** Para seleccionar muestras aleatorias simples, R incorpora la función `sample`. Ésta, por defecto selecciona muestras sin reemplazo. Así, por ejemplo, para seleccionar una muestra aleatoria de tamaño  $n = 2$ , de la población de ejemplo `U` de tamaño  $N = 5$ , sin reemplazo se tiene

```
N <- length(U)
sam <- sample(N, 2, replace=FALSE)
U[sam]

## [1] "Sharon" "Leslie"
```

El algoritmo de selección y rechazo está implementado en la función `S.SI` del paquete `TeachingSampling` cuyos argumentos son el tamaño de la población `N`, el tamaño de muestra deseado `n` y un vector de números aleatorios `e` que, por defecto, se asigna mediante la generación de  $N$  realizaciones de una variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo  $]0, 1[$ .

Para seleccionar una muestra aleatoria sin reemplazo de tamaño  $n = 2$  por el método de selección y rechazo, de la población de ejemplo `U` de tamaño  $N = 5$ , sólo basta digitar el siguiente código.

```
sam <- S.SI(N, 2)
U[sam]

## [1] "Erik" "Sharon"
```

Nótese que el resultado de la función **S.SI** es un vector de índices, que aplicados al identificador resulta en una muestra seleccionada que está conformada por los elementos **Erik** y **Leslie**.

La siguiente salida muestra cada uno de los  $N=5$  pasos del algoritmo. Los números aleatorios que se utilizaron están en la columna llamada **ek** y los índices de la muestra seleccionada están en la columna **sam**.

k	Nombre	ek	ck	nk	sam
1	Yves	0.4938	0.4000000	0	0
2	Ken	0.7044	0.5000000	0	0
3	Erik	0.4585	0.6666667	1	3
4	Sharon	0.6747	0.5000000	1	0
5	Leslie	0.8565	1.0000000	2	5

**Resultado 3.1.2.** *El diseño de muestreo Bernoulli coincide con el diseño de muestreo aleatorio simple sin reemplazo cuando el tamaño de muestra se considera fijo e igual a  $n$ .*

**Prueba.** Utilizando las propiedades de la probabilidad condicional se tiene que

$$\begin{aligned} Pr(S = s | n(S) = n) &= \frac{Pr(S = s \text{ y } n(S) = n)}{Pr(n(S) = n)} \\ &= \frac{\pi^n (1 - \pi)^{N-n}}{\binom{N}{n} \pi^n (1 - \pi)^{N-n}} = \frac{1}{\binom{N}{n}} \end{aligned}$$

el cual coincide con la expresión (3.2.1). ■

Una consecuencia inmediata del anterior resultado es que otro método de selección de muestras para un diseño de muestreo Bernoulli es escoger aleatoriamente el tamaño de muestra de acuerdo a una distribución binomial  $Bin(N, \pi)$  y luego seleccionar una muestra mediante uno de los anteriores algoritmos de selección de muestras aleatorias simples sin reemplazo (Tillé 2006).

### 3.1.2 El estimador de Horvitz-Thompson

**Resultado 3.1.3.** *Para un diseño de muestreo aleatorio simple, las probabilidades de inclusión de primer y segundo orden están dadas por:*

$$\pi_k = \frac{n}{N} \tag{3.1.2}$$

$$\pi_{kl} = \frac{n(n-1)}{N(N-1)} \tag{3.1.3}$$

respectivamente. La covarianza de las variables indicadoras está dada por

$$\Delta_{kl} = \begin{cases} \pi_{kl} - \pi_k \pi_l = -\frac{n}{N^2} \frac{(N-n)}{(N-1)} & \text{para } k \neq l \\ \pi_k(1 - \pi_k) = \frac{n(N-n)}{N^2} & \text{para } k = l \end{cases} \tag{3.1.4}$$

**Prueba.** Recurriendo a la definición de probabilidad de inclusión de primer orden, se tiene que

$$\begin{aligned}\pi_k &= Pr(I_k(S) = 1) \\ &= \frac{\binom{1}{1}\binom{N-1}{n-1}}{\binom{N}{n}} = \frac{n}{N}\end{aligned}$$

por otro lado,

$$\begin{aligned}\pi_{kl} &= Pr(k \in S \text{ y } l \in S) \\ &= Pr(I_k(S) = 1 \text{ y } I_l(S) = 1) \\ &= Pr(I_k(S) = 1 | I_l(S) = 1) Pr(I_l(S) = 1) \\ &= \frac{n-1}{N-1} \frac{n}{N} = \frac{n(n-1)}{N(N-1)}\end{aligned}$$

■

**Resultado 3.1.4.** Para un diseño de muestreo aleatorio simple, el estimador de Horvitz-Thompson del total poblacional  $t_y$ , su varianza y su varianza estimada están dados por:

$$\hat{t}_{y,\pi} = \frac{N}{n} \sum_S y_k \quad (3.1.5)$$

$$Var_{MAS}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{yU}^2 \quad (3.1.6)$$

$$\widehat{Var}_{MAS}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{yS}^2 \quad (3.1.7)$$

respectivamente, con

$$S_{yU}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k \in U} (y_k - \bar{y}_U)^2, \quad (3.1.8)$$

la **varianza poblacional** de la característica de interés en el universo  $U$  y con

$$S_{yS}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k \in S} (y_k - \bar{y}_S)^2 \quad (3.1.9)$$

la **varianza muestral** de los valores de la característica de interés en la muestra aleatoria  $S$ . Además,  $\bar{y}_S = \frac{\sum_S y_k}{n}$ . Por otro lado, nótese que  $\hat{t}_{y,\pi}$  es insesgado para el total poblacional  $t_y$  de la característica de interés  $y$ , y que  $\widehat{Var}_{MAS}(\hat{t}_{y,\pi})$  es insesgado para  $Var_{MAS}(\hat{t}_{y,\pi})$ .

**Prueba.** Por el resultado anterior, tenemos

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_S \frac{y_k}{\pi_k} = \frac{N}{n} \sum_S y_k. \quad (3.1.10)$$

La demostración de las varianzas es inmediata al reemplazar las cantidades apropiadas en la expresión genérica del capítulo anterior y teniendo en cuenta que

$$\sum_{k \neq l} y_k y_l = \sum_k \sum_l y_k y_l - \sum_{k=l} y_k y_l = \left( \sum_U y_k \right)^2 - \sum_U y_k^2$$

De tal forma que,

$$\begin{aligned}
 \text{Var}(\hat{t}_{y,\pi}) &= \frac{N^2}{n^2} \text{Var} \left( \sum_U I_k(s) y_k \right) \\
 &= \frac{N^2}{n^2} \left( \sum_U \text{Var}(I_k(s)) y_k^2 + \sum_{k \neq l} \text{Cov}(I_k(s), I_l(s)) y_k y_l \right) \\
 &= \frac{N^2}{n^2} \left( \frac{n(N-n)}{N^2} \sum_U y_k^2 - \frac{n}{N^2} \frac{(N-n)}{(N-1)} \sum_{k \neq l} y_k y_l \right) \\
 &= \frac{(N-n)}{n} \left( \sum_U y_k^2 - \frac{1}{N-1} \sum_{k \neq l} y_k y_l \right) \\
 &= \frac{(N-n)}{n} \frac{1}{N-1} \left( (N-1) \sum_U y_k^2 - \left[ \left( \sum_U y_k \right)^2 - \sum_U y_k^2 \right] \right) \\
 &= \frac{N(N-n)}{n} \frac{1}{N-1} \left( \sum_U y_k^2 - \frac{(\sum_U y_k)^2}{N} \right) \\
 &= \frac{N^2}{n} \left( 1 - \frac{n}{N} \right) S_{yU}^2
 \end{aligned}$$

Para demostrar el insesgamiento de la varianza estimada es suficiente demostrar que  $S_{ys}^2$  es insesgado para  $S_{yU}^2$ .

$$\begin{aligned}
 E(S_{ys}^2) &= E \left( \frac{1}{n-1} \left[ \sum_S y_k^2 - n \bar{y}_S^2 \right] \right) \\
 &= \frac{1}{n-1} \left( E \left[ \sum_S y_k^2 \right] - n E \left[ \frac{\hat{t}_{y,\pi}}{N} \right]^2 \right) \\
 &= \frac{1}{n-1} \left( \frac{n}{N} \left[ \sum_U y_k^2 \right] - \frac{n}{N^2} E \left[ \hat{t}_{y,\pi} \right]^2 \right) \\
 &= \frac{1}{n-1} \left( \frac{n}{N} \left[ \sum_U y_k^2 \right] - \frac{n}{N^2} \left[ \frac{N^2}{n} \left( 1 - \frac{n}{N} \right) S_{yU}^2 - t_y^2 \right] \right) \\
 &= \frac{n}{n-1} \left( \frac{1}{N} \left[ \sum_U y_k^2 \right] - \frac{1}{n} \left( 1 - \frac{n}{N} \right) S_{yU}^2 - \frac{t_y^2}{N^2} \right) \\
 &= \frac{n}{n-1} \left( \frac{N-1}{N} S_{yU}^2 - \frac{N-n}{nN} S_{yU}^2 \right) \\
 &= S_{yU}^2
 \end{aligned}$$

En donde se utilizó el hecho de que  $\bar{y}_S = \frac{\hat{t}_{y,\pi}}{N}$  y además

$$E(\hat{t}_{y,\pi})^2 = \text{Var}(\hat{t}_{y,\pi}) + t_y^2.$$

■

**Ejemplo 3.1.2.** Para nuestra población de ejemplo  $U$ , existen  $\binom{5}{2} = 10$  posibles muestras de tamaño  $n = 2$ . Realice el cálculo léxico-gráfico del estimador de Horvitz-Thompson y compruebe el insesgamiento y la varianza.



### 3.1.3 Estimación de la media poblacional

**Resultado 3.1.5.** Para un diseño de muestreo aleatorio simple, el estimador de Horvitz-Thompson para la media poblacional  $\bar{y}_U$ , su varianza y su varianza estimada están dados por:

$$\hat{y}_\pi = \frac{\hat{t}_{y,\pi}}{N} = \frac{\sum_S y_k}{n} = \bar{y}_S \quad (3.1.11)$$

$$Var_{MAS}(\hat{y}_\pi) = \frac{1}{N^2} Var(\hat{t}_{y,\pi}) = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{S_{yU}^2}{n} \quad (3.1.12)$$

$$\widehat{Var}_{MAS}(\hat{y}_\pi) = \frac{1}{N^2} Var(\hat{t}_{y,\pi}) = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{S_{ys}^2}{n} \quad (3.1.13)$$

respectivamente, con  $S_{yU}^2$  y  $S_{ys}^2$  el estimador de la varianza de los valores de la característica de interés  $y$  en el universo y en la muestra. Nótese que  $\hat{t}_{y,\pi}$  es insesgado para el total poblacional  $t_y$  de la característica de interés  $y$ , y que  $\widehat{Var}_{MAS}(\hat{t}_{y,\pi})$  es insesgado para  $Var_{MAS}(\hat{t}_{y,\pi})$ .

Nótese que la construcción, cálculo y estimación de la varianza son muy intuitivas. Haciendo un símil con la inferencia clásica, suponga que tenemos una muestra aleatoria  $X_1, \dots, X_n$  i.i.d., tal que  $X_i \sim (\mu, \sigma^2)$ . Se sabe que un estimador insesgado para la media  $\mu$  es  $\bar{X}$ , además se sabe que la variación de este estimador es  $\frac{\sigma^2}{n}$ .

Al operador  $\left(1 - \frac{n}{N}\right)$  se le conoce con el nombre de **factor de corrección para poblaciones finitas**. Sólo existe una sola muestra que contiene a todos los elementos de la población, por tanto, si esa muestra es seleccionada, esperamos que no haya variación en el estimador pues reproducirá con exactitud al parámetro, por tanto la varianza del mismo se debe anular. Entre más grande sea el tamaño de muestra  $n$ , al utilizar un diseño de muestreo aleatorio simple, la variabilidad de las estimaciones se debe hacer más pequeña dado que la muestra tenderá a parecerse más a la población finita. Lohr (2000) afirma que el tamaño de muestra es el que determina la precisión de las estimaciones (no así, el porcentaje de la población muestreada):

Si su sopa está bien revuelta, sólo necesita dos o tres cucharadas para probar el sazón, así tenga uno o veinte litros de sopa. Una muestra de tamaño  $n = 100$  de una población de  $N = 100mil$  elementos, tiene casi la misma precisión que una muestra de tamaño  $n = 100$  de una población de  $N = 100millones$  de elementos:

1. Para el primer caso,  $Var_{MAS}(\hat{y}_\pi) = \frac{99900}{100000} \frac{S_{yU}^2}{100} = 0.999 \frac{S_{yU}^2}{100}$
2. Para el último caso,  $Var_{MAS}(\hat{y}_\pi) = \frac{9999900}{100000000} \frac{S_{yU}^2}{100} = 0.999999 \frac{S_{yU}^2}{100}$

#### Tamaño de muestra

Bajo muestreo aleatorio simple sin reemplazo, un intervalo de confianza de  $100(1 - \alpha)\%$  para la media de la población es:

$$\left[ \bar{y}_S - z_{1-\alpha/2} \sqrt{\left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{S_{yU}}{\sqrt{n}}}, \bar{y}_S + z_{1-\alpha/2} \sqrt{\left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{S_{yU}}{\sqrt{n}}} \right] \quad (3.1.14)$$

y como usualmente no se conoce  $S_{yU}^2$ , lo usual es sustituirlo por el valor muestral  $S_{ys}^2$ . Por lo general, sólo los investigadores del estudio pueden decidir sobre la precisión mínima del mismo. Ésta se expresa como:

$$Pr(|\bar{y}_S - \bar{y}_U| \leq c) = 1 - \alpha$$

Por tanto, la cantidad a minimizar es  $c$ ,

$$c = z_{1-\alpha/2} \sqrt{\left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{S_{yU}}{\sqrt{n}}} \quad (3.1.15)$$

y despejando  $n$ , se tiene:

$$n \geq \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} \quad (3.1.16)$$

con  $n_0 = \frac{z_{1-\alpha/2}^2 S_{yU}^2}{c^2}$ . La desigualdad se tiene porque cuando se aumenta el tamaño de muestra,  $c$  decrece su valor. En algunas ocasiones se quiere lograr una precisión relativa dada por:

$$P\left(\left|\frac{\bar{y}_S - \bar{y}_U}{\bar{y}_U}\right| \leq c\right) = 1 - \alpha$$

que se puede escribir equivalentemente como:

$$P(|\bar{y}_S - \bar{y}_U| \leq c|\bar{y}_U|) = 1 - \alpha$$

la cantidad a minimizar es:

$$c|\bar{y}_U| = z_{1-\alpha/2} \sqrt{\left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{S_{yU}}{\sqrt{n}}} \quad (3.1.17)$$

y despejando  $n$ , se tiene:

$$n \geq \frac{k_0}{1 + \frac{k_0}{N}} \quad (3.1.18)$$

con  $k_0 = \frac{z_{1-\alpha/2}^2 S_{yU}^2}{\bar{y}_U^2 c^2} = \frac{z_{1-\alpha/2}^2 CV^2}{c^2}$ . La desigualdad se tiene porque cuando se aumenta el tamaño de muestra,  $c|\bar{y}_U|$  decrece su valor.

Bajo un diseño aleatorio simple, un intervalo de confianza del  $100(1 - \alpha \%)$  para la media poblacional  $\bar{y}_U$  puede ser escrito como

$$\bar{y}_S(1 \pm A) \quad (3.1.19)$$

Donde  $A$  está dada por

$$A = z_{1-\alpha/2} \sqrt{\left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{S_{ys}}{\sqrt{n}\bar{y}_S}} = z_{1-\alpha/2} \sqrt{\left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{cv}{\sqrt{n}}} \quad (3.1.20)$$

Asumiendo que  $CV \doteq cv$  y que  $\frac{n}{N}$  es una cantidad despreciable, podemos determinar un tamaño de muestra para mantener una precisión dada. Por tanto  $A$  se reescribe como

$$A \doteq z_{1-\alpha/2} \frac{CV}{\sqrt{n}}$$

y despejando  $n$ , tenemos que

$$n \geq z_{1-\alpha/2}^2 \frac{CV^2}{A^2}$$

Con un nivel de confianza del  $\alpha = 5\%$ , asumiendo que el coeficiente de variación estimado converge al coeficiente de variación poblacional y que la fracción de muestreo es despreciable para obtener una precisión  $A < 3\%$  si a)  $CV = 0.5$ , el tamaño de muestra debe ser mayor que 1067 unidades; b)  $CV = 1.0$ , el tamaño de muestra debe ser mayor que 4268 unidades y c)  $CV = 1.5$ , el tamaño de muestra debe ser mayor que 9604 unidades. Es decir, entre más dispersa sea la población, con respecto a la media, mayor debe ser el tamaño de muestra para conseguir una precisión dada.

Para poder utilizar las anteriores fórmulas es necesario contar un buen tamaño de muestra, dado que el teorema central del límite clásico (universo infinito) no es el mismo que se ha aplicado aquí. Hájek (1960) demuestra que al utilizar muestreo aleatorio simple (universo finito) y bajo ciertas condiciones de regularidad conocidas como las condiciones de Noether y si  $n$ ,  $N$ , y  $N - n$  son grandes, es decir la fracción muestral  $f = n/N$  se aleja de 0 y de 1, entonces

$$\frac{\bar{y}_S - \bar{y}_U}{\sqrt{\left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{S_{yU}}{\bar{y}_U}}} \rightarrow Normal(0, 1)$$

Cuando se quiere establecer un intervalo de confianza, la confiabilidad del intervalo está garantizada por el insesgamiento del estimador de Horvitz-Thompson. Para asegurar determinada precisión es necesario conocer la varianza poblacional de la característica de interés o el coeficiente de variación del estimador; en estos términos, cuando el coeficiente de variación estimado (cve) es menor del 3% es un caso excelente; entre el 3 y el 5% es bueno; entre el 5 y el 10% es regular; entre el 10 y 15% es apenas presentable; si es más del 15% no es considerado bueno; en este caso algunas agencias de estadísticas oficiales no presentan el coeficiente de variación, aunque se conozca.

Por supuesto, algunas cantidades poblacionales necesarias para estimar el tamaño de muestra no se conocen; de hecho, si se conocieran, no habría necesidad de realizar estudio alguno, porque directamente se conocerían los parámetros poblacionales de interés. Lohr (2000) considera tres escenarios para realizar una estimación previa de los parámetros de interés:

1. Realizar una **prueba piloto**, unas cuantas entrevistas conforman la muestra piloto, seleccionada con el mismo diseño de muestreo genérico. En algunas ocasiones, este método además de servir para estimar las cantidades necesarias para establecer el tamaño de muestra, sirve para confrontar y calibrar el instrumento de medición, ya sea un cuestionario o un instrumento técnico.
2. Utilizar información a priori de estudios anteriores. No siempre el investigador que realiza un estudio por muestreo ha sido el primero en cuestionarse acerca de los objetivos de la investigación. Si esto es así, existen referencias bibliográficas disponibles, en donde se pueden hallar estimaciones de la varianza poblacional o del error estándar. Esta última medida tiende a ser más estable contra el tiempo o posición geográfica.
3. Estimar la varianza ajustando una distribución teórica a la característica de interés. Ospina (2001) afirma que este ajuste se hace con base en supuestos adecuados acerca de la estructura poblacional de la característica de interés (normal, exponencial, uniforme, etc.). La identificación de una distribución apropiada permite hacer uso de sus propiedades para obtener una estimación más realista de la varianza. Cuando el desconocimiento es absoluto, se recomienda utilizar la distribución uniforme. Wu (2003) afirma que las características de interés en poblaciones económicas son sesgadas a la derecha y tienden a ser modeladas mediante distribuciones como la Gamma o la Ji cuadrado.

### 3.1.4 Estimación en dominios

El primer caso concerniente a la estimación de subgrupo poblacionales es el de las sub-poblaciones llamadas dominios. En muchas investigaciones es necesario llevar a cabo estimaciones sobre la población

en general, y también sobre subgrupos de ella (denominados dominios por la subcomisión en muestreo de las Naciones Unidas). La identificación de los dominios se logra una vez la información de los elementos ha sido registrada. Los dominios tienen que cumplir las siguientes características:

1. Ningún elemento de la población puede pertenecer a dos dominios.
2. Todo elemento de la población debe pertenecer a un único dominio.
3. La reunión de todos los dominios es la población del estudio.

Por ejemplo, al estimar el total de la fuerza laboral en empresas con menos de dos años de funcionamiento. Claramente la población se divide en dos dominios; el primero concerniente a las empresas con menos de dos años de funcionamiento y el segundo dado por las empresas con dos años o más de funcionamiento.

**Definición 3.1.2.** *Un dominio  $U_d$  es una sub-población específica o subgrupo poblacional que cumple las siguientes condiciones:*

1.  $U_d \subset U$ , tal que  $U = \bigcup_{d=1}^D U_d$
2. Si  $k \in U_l$ , entonces  $k \notin U_d$  para  $d \neq l$
3. El número de elementos en el dominio  $U_d$  es  $N_d$  y es llamado **tamaño absoluto** del dominio.
4. La proporción de elementos en el dominio  $U_d$  con respecto al tamaño poblacional es  $P_d = \frac{N_d}{N}$  y se conoce como **tamaño relativo** del dominio.

La estimación por dominios se caracteriza por el desconocimiento de la pertenencia de las unidades poblacionales al dominio. Es decir, para conocer cuáles unidades de la población pertenecen al dominio, es necesario realizar el proceso de medición.

Fue Hartley (1959) quien desarrolló y unificó la teoría de la estimación en dominios aplicable a cualquier diseño de muestreo. Durbin (1967) obtuvo resultados similares. Las pautas para la estimación en dominios se dan a continuación: para estimar el total de un dominio  $U_d$ , dado por

$$t_{yd} = \sum_{U_d} y_k \quad (3.1.21)$$

es necesario, en primer lugar construir una función indicadora  $z_{dk}$ , para cada elemento de la población, de la pertenencia del elemento al dominio, dada por la siguiente definición.

**Definición 3.1.3.** *Sea  $z_{dk}$  la función indicatriz del dominio  $U_d$ , dada por*

$$z_{dk} = \begin{cases} 1 & \text{si } k \in U_d \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.1.22)$$

Ahora, al multiplicar la variable de pertenencia  $z_{dk}$  por el valor de la característica de interés  $y_k$ , se crea una nueva variable  $y_{dk}$  dada por  $y_{dk} = z_{dk}y_k$ , y una vez construida se pueden utilizar los principios del estimador de Horvitz-Thompson para hallar un estimador insesgado del total de la característica de interés en el dominio  $U_d$ .

**Resultado 3.1.6.** *El total de la variable de interés en el dominio  $U_d$  está dado por*

$$t_{yd} = \sum_U y_{dk}, \quad (3.1.23)$$

el tamaño del dominio  $U_d$  toma la siguiente expresión

$$N_d = \sum_U z_{dk}, \quad (3.1.24)$$

de tal forma que la media de la característica de interés en el dominio  $U_d$  se escribe como

$$\bar{y}_{U_d} = \frac{t_{yd}}{N_d} = \frac{\sum_U y_{dk}}{N_d} \quad (3.1.25)$$

### Estimación del total en un dominio

**Resultado 3.1.7.** Bajo muestreo aleatorio simple sin reemplazo, el estimador de Horvitz-Thompson para el total del dominio  $t_{yd}$ , su varianza y su varianza estimada están dados por

$$\hat{t}_{yd,\pi} = \frac{N}{n} \sum_S y_{dk} = \frac{N}{n} \sum_{S_d} y_k \quad (3.1.26)$$

$$Var(\hat{t}_{yd,\pi}) = \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{y_d U}^2 \quad (3.1.27)$$

$$\widehat{Var}(\hat{t}_{yd,\pi}) = \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{y_d S}^2 \quad (3.1.28)$$

respectivamente, donde  $S_d = U_d \cap S$  se refiere al conjunto formado por la intersección de la muestra  $S$ . Además,

$$S_{y_d U}^2 = \frac{1}{N-1} \left( \sum_{k \in U} y_{dk}^2 - \frac{(\sum_{k \in U} y_{dk})^2}{N} \right)$$

representa la varianza poblacional de la característica de interés y

$$S_{y_d S}^2 = \frac{1}{n-1} \left( \sum_{k \in S} y_{dk}^2 - \frac{(\sum_{k \in S} y_{dk})^2}{n} \right)$$

la varianza muestral de los valores de la característica de interés.

Nótese que en la expresión  $S_{y_d U}^2$  los valores que intervienen son los de la característica de interés si el elemento pertenece al dominio y ceros si el elemento no pertenece al dominio, lo mismo sucede con  $S_{y_d S}^2$ . Por tanto, las anteriores expresiones van a tomar valores grandes por la inclusión de los ceros; éste es el precio que se debe pagar por el desconocimiento de la pertenencia de los elementos a los dominios.

### Estimación del tamaño absoluto de un dominio

**Resultado 3.1.8.** Bajo muestreo aleatorio simple sin reemplazo, el estimador de Horvitz-Thompson para el tamaño absoluto de un dominio  $N_d$ , su varianza y su varianza estimada están dados por

$$\hat{N}_{d,\pi} = \frac{N}{n} \sum_S z_{dk} = \frac{N}{n} \sum_{S_d} z_k \quad (3.1.29)$$

$$Var(\hat{N}_{d,\pi}) = \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{z_d U}^2 \quad (3.1.30)$$

$$\widehat{Var}(\hat{N}_{d,\pi}) = \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{z_{ds}}^2 \quad (3.1.31)$$

respectivamente, con  $S_{z_{dU}}^2$  y  $S_{z_{ds}}^2$  la varianza poblacional y la varianza muestral de los valores de la característica de interés  $z_{dk}$ .

Nótese que en la expresión  $S_{z_{dU}}^2$  los valores que intervienen son unos si el elemento pertenece al dominio y ceros si el elemento no pertenece al dominio, lo mismo sucede con  $S_{y_{ds}}^2$ .

### Estimación del tamaño relativo de un dominio

**Resultado 3.1.9.** Bajo muestreo aleatorio simple sin reemplazo, el estimador de Horvitz-Thompson para el tamaño relativo de un dominio  $P_d$ , su varianza y su varianza estimada están dados por

$$\hat{P}_{d,\pi} = \frac{1}{N} \sum_S \frac{N}{n} z_{dk} = \frac{1}{n} \sum_S z_{dk} = \frac{n_d}{n} \quad (3.1.32)$$

$$Var(\hat{P}_{d,\pi}) = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{z_{dU}}^2 \quad (3.1.33)$$

$$\widehat{Var}(\hat{P}_{d,\pi}) = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{z_{ds}}^2 \quad (3.1.34)$$

respectivamente, con  $S_{z_{dU}}^2$  y  $S_{z_{ds}}^2$  el estimador de la varianza de los valores de la característica de interés  $y_d$  en el universo y en la muestra.

### Estimación de la media de un dominio

**Resultado 3.1.10.** Bajo muestreo aleatorio simple sin reemplazo, el estimador de Horvitz-Thompson para la media de la característica de interés en un dominio  $\bar{y}_{U_d}$ , su varianza y su varianza estimada están dados por

$$\hat{\bar{y}}_{U_d,\pi} = \frac{\frac{N}{n} \sum_S y_{dk}}{N_d} \quad (3.1.35)$$

$$Var(\hat{\bar{y}}_{U_d,\pi}) = \frac{1}{N_d^2} \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{y_{dU}}^2 \quad (3.1.36)$$

$$\widehat{Var}(\hat{\bar{y}}_{U_d,\pi}) = \frac{1}{N_d^2} \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{y_{ds}}^2 \quad (3.1.37)$$

Para poder utilizar el anterior estimador, es necesario conocer de antemano el valor del tamaño absoluto del dominio  $N_d$ . En la práctica, pocas veces se conoce este valor, por lo tanto un estimador alternativa y completamente intuitivo de la media de la característica de interés en un dominio es la media muestral de la misma en el dominio de interés. De tal forma que el estimador alternativo, toma la siguiente expresión

$$\hat{\bar{y}}_{S_d} = \frac{\hat{t}_{y_d,\pi}}{\hat{N}_{d,\pi}} = \frac{\sum_S y_{dk}}{z_{dk}} = \frac{\sum_{S_d} y_k}{n_d} \quad (3.1.38)$$

Como las dos cantidades en el numerador y denominador son aleatorias, se está estimando una razón, de tal manera que el cálculo y estimación de la varianza del anterior estimador están fuera del alcance de este capítulo, y serán explicados en los lugares donde sea conveniente.

### 3.1.5 Marco y Lucy

Una de las razones por las que el gobierno realiza la encuesta de crecimiento económico del sector industrial es, no sólo para medir el impacto social e impositivo sino para buscar nuevas estrategias de crecimiento enfocadas en las empresas que conforman este sector. Recientemente, con el boom de la tecnología y el uso masivo de internet, las estrategias de mercadeo han cambiado su forma y su fondo.

Hace unos años, las empresas con un rendimiento muy alto, catalogadas dentro de un nivel industrial grande, podían acceder a pautar un comercial discreto de 900 TRP's<sup>1</sup> en televisión, mientras que las empresas medianas tenían un presupuesto con el cual apenas podían pautar un comercial en la radio. Por supuesto, la estrategia publicitaria de las empresas pequeñas consistía en editar un aviso en las páginas amarillas.

Sin embargo, a medida que cambia y evoluciona la tecnología, también lo hacen los hábitos de las personas. Es muy común que las operaciones financieras, contables y estratégicas de una empresa estén centradas en un servidor conectado a internet. La misma comunicación verbal ha sido reemplazada por altos estándares de tecnología mediante conversaciones virtuales, la comunicación oficial ha desplazado el casillero de correo postal por el correo electrónico que permite la recepción en tiempo real de mensajes sin importar la ubicación espacio temporal del receptor ni de la persona que envía el mensaje. Siendo así, las personas pasan más tiempo frente a un computador que frente al televisor, o escuchando la radio; las páginas amarillas están siendo reemplazadas por los meta-buscadores de la red mundial de información, gigantes como Google, Yahoo y MSN.

Los gerentes de mercadeo (en los casos pertinentes) junto con los presidentes o gerentes de las empresas del sector industrial, han replanteado sus viejas estrategias publicitarias y han hecho, poco a poco, la migración de canal publicitario. Las empresas grandes siguen pautando en televisión, las empresas medianas siguen haciéndolo en la radio y las pequeñas siguen teniendo el mismo viejo aviso clasificado en la sección de las páginas amarillas. Sin embargo, en todos los niveles del sector industrial, se ha empezado a realizar una mejor gestión de sus clientes y/o de sus potenciales clientes.

Las empresas están utilizando listas de correo electrónico masivas para dar a conocer las ventajas competitivas de sus empresas, mediante el envío de portafolios virtuales de los productos y servicios que brindan. Se cree que esta práctica de mercadeo ha aumentado la productividad empresarial porque por medio de la publicidad por internet o SPAM, las empresas consiguen más clientes, por lo tanto consiguen más contratos, por tanto ayudan a la disminución del desempleo y obtienen ventajas fiscales.

El gobierno quiere corroborar esta hipótesis y dependiendo de los resultados del estudio implementar un programa de capacitación gratuita a las empresas que aún no han entrado en el ámbito de la información mediante el uso masivo de la red informática internet. El presupuesto del gobierno es de unos cuantos millones de dólares, por lo tanto se necesitan estimaciones muy precisas que respondan al objetivo de la investigación.

### Estimación del tamaño de muestra

La estrategia de muestreo que se va a utilizar es la siguiente: el estimador de Horvitz-Thompson aplicado a un diseño de muestreo aleatorio simple sin reemplazo. Se selecciona una muestra piloto de tamaño 30 de la población. Para esto, una vez cargado el archivo de datos Lucy, utilizamos la función `sample` para extraer la muestra piloto. Como la característica de interés es el ingreso de las empresas, tomamos los valores de la varianza y de la media como estimaciones que servirán para el cálculo del tamaño de la muestra.

---

<sup>1</sup>Puntos acumulados de rating del grupo objetivo obtenidos considerando sólo consumidores viendo el comercial de televisión de una marca dada

```
data(BigLucy)
attach(BigLucy)

N <- dim(BigLucy)[1]
sam <- sample(N,100)
Inc.pilot <- Income[sam]

mean(Inc.pilot)

## [1] 441

var(Inc.pilot)

## [1] 67280
```

Los valores que se utilizarán en la estimación del tamaño de muestra son la varianza muestral igual a 66.952, el promedio muestral igual a 455; con estos valores se tiene una estimación del coeficiente de variación igual a 0,57. Se debe escoger un tamaño de muestra que proporcione estimaciones precisas, el tamaño de muestra depende de la precisión que se requiera para cumplir con los objetivos del estudio.

- Error absoluto: el margen de error para este estudio es de 25 millones de dólares.
- Nivel de confianza del 95 %.
- Mediante (3.1.16) se tiene que  $n_0 = 411$ .
- Al utilizar el factor de corrección de poblaciones finitas, llegamos a que  $n \geq 351$ .

Sin embargo, este cálculo se puede cotejar restringiendo las estimaciones mediante un error relativo.

- Error relativo: se requieren estimaciones con menos del 7 % de error.
- Nivel de confianza del 95 % y una estimación de  $CV = 0.57$ .
- Mediante (3.1.18) se tiene que  $k_0 = 446$ .
- Al utilizar el factor de corrección de poblaciones finitas, llegamos a que  $n \geq 376$ .

Suponga que mediante fuentes oficiales se ha tenido acceso a información de estudios pasados que han modelado la característica de interés **Income** utilizando la familia de distribuciones Gamma con parámetro de forma 2,7 y parámetro de escala 180. Haciendo una simulación de  $N = 2396$  valores provenientes de una distribución gamma con los anteriores parámetros, se pueden estimar los valores de la varianza para la característica de interés y así una estimación del tamaño de muestra.

```
bary <- mean(Income)
sdy <- sd(Income)
x <- seq(min(Income),max(Income),by=10)
a <- 2.7
b <- 180
```

La determinación del tamaño de muestra para esta investigación utilizando la estrategia de muestreo mencionada al principio de la sección y consideraciones respecto a que la estimación de la varianza de



```
ggplot(BigLucy, aes(x=Income)) +
  geom_histogram(aes(y=..density..)) +
  stat_function(fun=dgamma, args=list(shape=a, scale=b), colour="red")
```

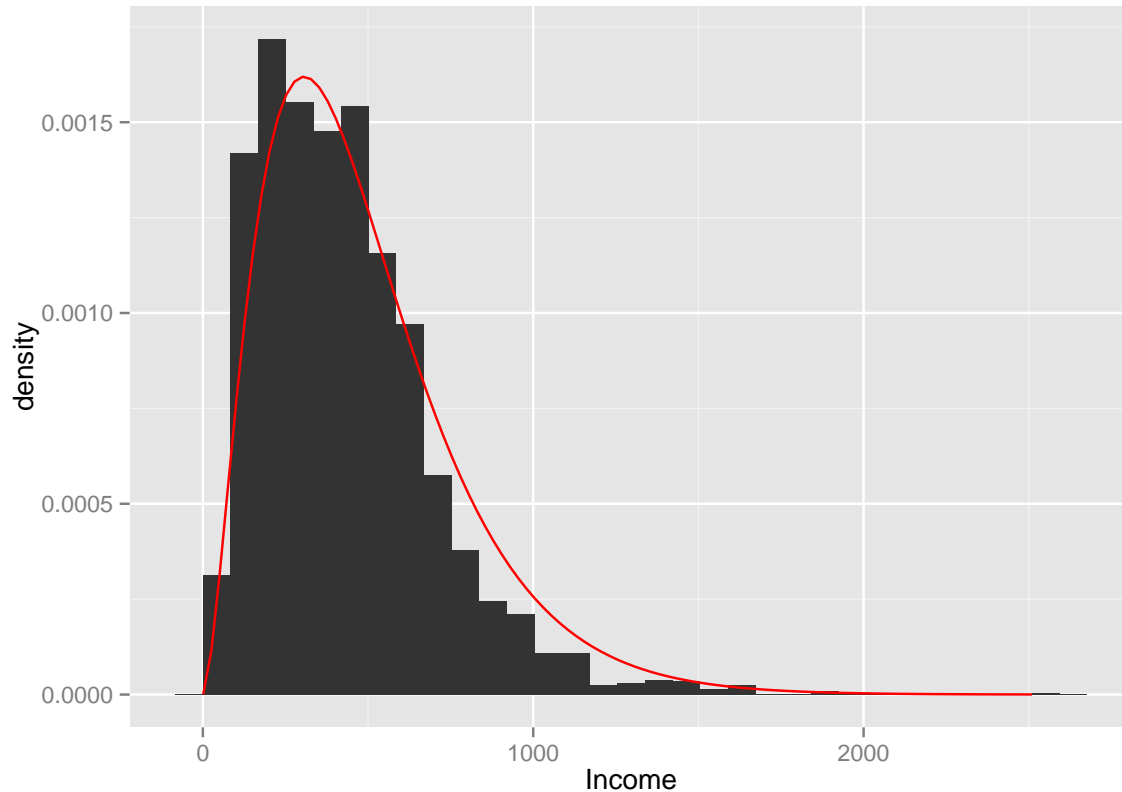


Figura 3.1: Distribución de la característica *Income* y su posible modelamiento bajo la distribución *gamma*.

la muestra piloto puede ser pequeña, da como resultado una muestra de tamaño  $n = 400$  empresas del sector industrial. Como el tamaño de la población es  $N = 2396$ , entonces el valor de la probabilidad de inclusión para todos los elementos es de  $\pi_k = \frac{400}{2396} \cong 0.17$ .

R incorpora la función `sample` para la selección de muestras con o sin reemplazo. En este caso puede ser utilizada como en la selección de la muestra piloto. Sin embargo, para seleccionar una muestra mediante el algoritmo de selección y rechazo, el paquete `TeachingSampling` adjunta la función `S.SI` que se utilizará en la selección de 400 empresas del sector industrial.

Primero se carga en R el archivo `Marco` que contiene el marco de muestreo para la selección de la muestra. Se fijan los parámetros de la función, `N` y `pik`. Esta función devuelve un vector conteniendo el índice de los elementos seleccionados en la muestra. En este caso particular, el primer elemento seleccionado es el número 7 y el último el número 2395.

```
data(BigLucy)
attach(BigLucy)
```

```

N <- dim(BigLucy)[1]
n <- 2000
sam <- S.SI(N,n)
muestra <- BigLucy[sam,]

attach(muestra)
head(muestra)

##           ID           Ubication Level      Zone Income Employees Taxes
## 12  AB0000000012 C0033329K0268568 Small County1      419          20      7
## 89  AB0000000089 C0016430K0285467 Small County1      491          26     10
## 150 AB0000000150 C0241162K0060735 Small County1      384          70      6
## 177 AB0000000177 C0063734K0238163 Small County1      319          55      4
## 193 AB0000000193 C0178986K0122911 Small County1      350          48      5
## 221 AB0000000221 C0158483K0143414 Small County1      295          57      3
##      SPAM ISO Years      Segments
## 12     no   no  41.5  County1 2
## 89     no   no  20.3  County1 9
## 150    no   no  21.7  County1 15
## 177   yes   no   3.1  County1 18
## 193   yes   no   3.7  County1 20
## 221    no   no  13.0  County1 23

n <- dim(muestra)[1]
n

## [1] 2000

```

Aplicando los índices obtenidos por la función `S.SI` al marco de muestreo obtenemos la identificación y ubicación de las empresas seleccionadas en la muestra. Una vez que la etapa de recolección de datos se haya realizado; es decir, la medición de todos y cada uno de los elementos seleccionados ya ha sido realizada, se realiza la estimación. Obtendremos un archivo de datos de `Lucy` conteniendo los valores de las características de interés para las empresas seleccionadas que será adjuntado a R mediante la función `attach`.

La etapa de estimación de resultados se hace utilizando la función `E.SI(N,n,y)` del paquete `TeachingSampling` cuyos argumentos son `y`, un vector conteniendo los valores de la característica de interés en la muestra, `N` el tamaño de la población y `n` el tamaño de la muestra seleccionada. En este caso la longitud de cada vector es de  $n = 400$ . Esta función arroja la estimación del total poblacional de `y` usando el estimador de Horvitz-Thompson, la estimación de la varianza y el coeficiente de variación del mismo. Por ejemplo, la variable `Income` dentro del objeto `estima` contiene los valores del ingreso declarado en el último año por 400 empresas del sector industrial pertenecientes a la muestra. La estimación para esta característica se hace mediante el siguiente código:

```

estima <- data.frame(Income, Employees, Taxes)
E.SI(N,n,estima)

```

La tabla 3.1 muestra los resultados obtenidos para este caso particular. Nótese que se obtienen mejores resultados que al utilizar un diseño de muestreo Bernoulli. Sin embargo, comparar estos resultados de ingreso total en el sector industrial con el de las mediciones pasadas, no es suficiente y se desea tener estimaciones para el dominio o subgrupo de las empresas que utilizan el envío de SPAM como estrategia publicitaria.

	N	Income	Employees	Taxes
Estimation	85296.00	37120648.61	5436212.62	1031335.26
Standard Error	0.00	503724.19	61441.76	30446.62
CVE	0.00	1.36	1.13	2.95
DEFF		1.00	1.00	1.00

Tabla 3.1: *Estimaciones para el diseño de muestreo aleatorio simple sin reemplazo*

La función `Domains` contenida en el paquete `TeachingSampling` es utilizada para obtener las variables indicadoras  $z_{dk}$  para cada dominio, el único argumento de la función es un vector de pertenencia de cada individuo. En este caso, el vector de pertenencia es SPAM, la salida de esta función es una matriz de unos y ceros, en donde cada columna está dicotomizada. Existen tantas columnas como subgrupos poblacionales, y en cada columna el número uno implica la pertenencia del elemento al dominio y cero la no pertenencia del elemento al dominio.

```
Dominios <- Domains(SPAM)
head(Dominios)
```

```
##      no yes
## [1,]  1  0
## [2,]  1  0
## [3,]  1  0
## [4,]  0  1
## [5,]  0  1
## [6,]  1  0
```

Para estimar el tamaño absoluto de cada dominio, lo único que se debe hacer es multiplicar la matriz de características de interés (en este caso, la matriz llamada `estima`) por cada columna de la matriz resultante de la dicotomización. La siguiente salida lo muestra claramente para el dominio de la población que sí utiliza el SPAM como método publicitario.

```
SPAM.si <- Dominios[,2]*estima
head(SPAM.si)
```

```
##      Income Employees Taxes
## 1         0          0      0
## 2         0          0      0
## 3         0          0      0
## 4        319         55      4
## 5        350         48      5
## 6         0          0      0
```

Mientras que para el dominio que no utiliza el SPAM se tiene la siguiente salida

```
SPAM.no <- Dominios[,1]*estima
head(SPAM.no)
```

```
##      Income Employees Taxes
## 1        419         20      7
## 2        491         26     10
```

## 3	384	70	6
## 4	0	0	0
## 5	0	0	0
## 6	295	57	3

Utilizando la función `E.SI` en la matriz resultante de la dicotomización obtenemos la estimación de los tamaños absolutos de cada dominio. En este caso, se estima que 1420 empresas ya están utilizando otras técnicas radicales de publicidad, mientras que las restantes 976 no lo hacen. Nótese que la varianza de cada estimación es la misma, esto es claro porque los valores de esta característica de interés son ceros y uno y por tanto la estructura de varianza resulta idéntica en cada caso.

```
E.SI(N,n,Dominios)
```

##	N	no	yes
## Estimation	85296	34758.1	50537.9
## Standard Error	0	926.4	926.4
## CVE	0	2.7	1.8
## DEFF	NaN	1.0	1.0

Está claro que existe una tendencia en el sector industrial de publicidad virtual mediante el envío de SPAM por correo electrónico. Las siguientes cifras son las verdaderamente importantes pues muestran que las empresas que utilizan SPAM tienen mayores ingresos, emplean a más gente y contribuyen con una mayor cantidad de dinero en cuanto a impuestos se refiere, esto se da porque hay más empresas que utilizan el SPAM de las que no lo hacen.

```
E.SI(N, n, SPAM.no)
E.SI(N, n, SPAM.si)
```

Como  $N_d$  es desconocido, podemos utilizar el estimador alternativo dado por la expresión (3.2.38), para obtener una estimación (aunque no la varianza ni el c.v.e) de la media de la característica de interés en cada dominio. Simplemente tomamos las estimaciones  $t_{yd}$  y las dividimos por la estimación de  $N_d$ . Las siguientes tablas resumen las estimaciones para cada uno de los dominios de interés<sup>2</sup>.

	N	Income	Employees	Taxes
Estimation	85296.00	15146479.85	2225543.23	412064.98
Standard Error	0.00	508712.72	71010.05	20887.82
CVE	0.00	3.36	3.19	5.07
DEFF		1.00	1.00	1.00

Tabla 3.2: Estimaciones para el diseño de muestreo aleatorio simple en el dominio que no envía SPAM

	N	Income	Employees	Taxes
Estimation	85296.00	21974168.76	3210669.38	619270.28
Standard Error	0.00	565808.43	75591.61	27203.24
CVE	0.00	2.57	2.35	4.39
DEFF		1.00	1.00	1.00

Tabla 3.3: Estimaciones para el diseño de muestreo aleatorio simple en el dominio que sí envía SPAM

<sup>2</sup>Nótese que el anterior procedimiento asegura la estimación de los parámetros de dominios no sólo en MAS sino para cualquier diseño de muestreo.

### 3.1.6 Probabilidades de inclusión en unidades de muestreo

En Särndal, Swensson & Wretman (1992) se considera una encuesta para medir los ingresos de los hogares. El marco de muestreo es una lista de individuos y una muestra de tamaño  $n$  se selecciona mediante muestreo aleatorio simple sin reemplazo, el hogar correspondiente al individuo es identificado y se procede a realizar la medición correspondiente. La probabilidad de inclusión de un hogar  $h$  compuesto por  $M < n$  individuos, puede modelarse por medio de la distribución hipergeométrica, así:

$$\begin{aligned}
 \pi_H &= Pr(H \in s) \\
 &= 1 - Pr(H \notin s) \\
 &= 1 - Pr(\text{Ninguno de los } M \text{ salió en la muestra de tamaño } n) \\
 &= 1 - \frac{\binom{M}{0} \binom{N-M}{n}}{\binom{N}{n}} \\
 &= 1 - \frac{(N-M)!/n!(N-M-n)!}{N!/(N-M)!n!} \\
 &= 1 - \frac{(N-M)!}{N!} \frac{(N-n)!}{(N-M-n)!} \\
 &= 1 - \frac{(N-n) \dots (N-n-M+1)}{N \dots (N-M+1)}
 \end{aligned}$$

Asumiendo que  $N$  y  $n$  son grandes ( $f > 0$ ), se obtienen las siguientes aproximaciones:

- $M = 1$ ,

$$\begin{aligned}
 \pi_H &= 1 - \frac{N-n}{N} \\
 &= 1 - \left(1 - \frac{n}{N}\right) = 1 - (1-f)
 \end{aligned}$$

- $M = 2$ ,

$$\begin{aligned}
 \pi_H &= 1 - \frac{(N-n)(N-n-1)}{N(N-1)} \\
 &= 1 - \left(1 - \frac{n}{N}\right) \left(1 - \frac{n}{N-1}\right) \doteq 1 - (1-f)^2
 \end{aligned}$$

- $M = 3$ ,

$$\begin{aligned}
 \pi_H &= 1 - \frac{(N-n)(N-n-1)(N-n-2)}{N(N-1)(N-2)} \\
 &= 1 - \left(1 - \frac{n}{N}\right) \left(1 - \frac{n}{N-1}\right) \left(1 - \frac{n}{N-2}\right) \doteq 1 - (1-f)^3
 \end{aligned}$$

## 3.2 Diseño de muestreo Bernoulli

En el diseño de muestreo Bernoulli se fija a priori (por experiencia o alguna otra razón) la probabilidad de inclusión de todos los individuos, la cual permanece constante para todo el universo. Es decir,  $\pi_k = \pi$  para todo  $k \in U$ . Un típico ejemplo de la implementación de este diseño en la práctica es la revisión

de equipajes de pasajeros por los funcionarios de la aduana en un aeropuerto; se fija la probabilidad de inclusión para cada pasajero y mediante cierto mecanismo de selección (muy simple) se selecciona la muestra, conforme las personas van ingresando al sitio. Nótese que el tamaño de muestra  $n(S)$  es aleatorio porque una muestra realizada mediante este mecanismo de selección puede incluir a todos los pasajeros o a ningún pasajero de la población.

**Definición 3.2.1.** Siendo  $n(s)$  el tamaño de muestra, el diseño de muestreo Bernoulli selecciona la muestra  $s$  con probabilidad

$$p(s) = \begin{cases} \pi^{n(s)}(1 - \pi)^{N - n(s)} & \text{si } s \text{ tiene tamaño igual a } n(s) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.2.1)$$

### 3.2.1 Algoritmo de selección

La selección de una muestra con diseño Bernoulli conlleva los siguientes pasos:

1. Fijar el valor de  $\pi$  tal que  $0 < \pi < 1$ .
2. Obtener  $\varepsilon_k$  para  $k \in U$  como  $N$  realizaciones independientes de una variable aleatoria con distribución uniforme sobre el intervalo  $[0, 1]$ .
3. El elemento  $k$ -ésimo pertenece a la muestra con probabilidad  $\pi$ . Es decir, si  $\varepsilon_k < \pi$  el individuo  $k$ -ésimo es seleccionado.

Dado que  $\varepsilon_k \sim \text{Unif}[0, 1]$ , se tiene que  $\Pr(\varepsilon_k < \pi) = \pi$  para  $k \in U$ . Por tanto, la inclusión de los individuos  $k$ -ésimo y  $l$ -ésimo, para  $k \neq l$ , es independiente. Esto implica que la distribución de  $I_k(S)$  es Bernoulli  $\text{Ber}(\pi)$  y se tiene el siguiente resultado.

**Resultado 3.2.1.** Definiendo a  $Q_r$  como el soporte que contiene a todas las posibles muestras de tamaño  $r$ , existen  $\binom{N}{r}$  muestras pertenecientes a  $Q_r$ . En otras palabras

$$\#(Q_r) = \binom{N}{r} \quad r = 0, \dots, N$$

Sin embargo, al definir  $Q$  como el soporte general de todas las posibles muestras de tamaños entre  $r = 0$  y  $r = N$ , se tiene que

$$\#(Q) = \sum_{r=0}^N \binom{N}{r} = 2^N$$

**Resultado 3.2.2.** Bajo muestreo Bernoulli, la distribución del tamaño de muestra  $n(S)$  es binomial  $\text{Bin}(N, \pi)$  y

$$\Pr(n(S) = r) = \sum_{s \in Q_r} p(s) = \binom{N}{r} \pi^r (1 - \pi)^{N-r}, \quad (3.2.2)$$

con  $r = 1, \dots, N$  y  $Q_r$  el soporte que contiene a todas las posibles muestras de tamaño  $r$ , donde  $Q_r \subset Q$ .

**Prueba.** La distribución de  $I_k(S)$  es Bernoulli  $\text{Ber}(\pi)$ , las inclusiones de los individuos en la muestra son eventos independientes, entonces  $n(S) = \sum_U I_k$  sigue una distribución binomial. Ahora, dado el diseño de muestreo (3.2.1), para cualquier  $s \in Q_r$ , se cumple que  $p(s) = \pi^r (1 - \pi)^{N-r}$ . Como existen  $\binom{N}{r}$  maneras de seleccionar una muestra de  $r$  elementos de una población de tamaño  $N$ , se tiene que  $\#(Q_r) = \binom{N}{r}$ . Luego, al sumar  $p(s)$  sobre todas las muestras del soporte  $Q_r$  se obtiene el resultado. ■

Como  $n(S)$  es aleatorio, existen  $2^N$  posibles muestras en el soporte  $Q$ . Nótese que  $n(S)$  tiene una distribución Binomial y, por tanto, su esperanza y varianza están dadas por:

$$E(n(S)) = N\pi \quad \text{Var}(n(S)) = N(\pi)(1 - \pi), \quad (3.2.3)$$

Aunque el investigador haya fijado las probabilidades de inclusión, se puede verificar que realmente el diseño de muestreo Bernoulli cumple las condiciones establecidas en el capítulo anterior y también que las probabilidades de inclusión, inducidas por el diseño de muestreo, son idénticas para cada elemento en la población  $\pi_k = \pi$ .

**Resultado 3.2.3.** *Bajo el diseño de muestreo Bernoulli, se verifica que*

$$\sum_{s \in Q} p(s) = 1 \quad (3.2.4)$$

**Prueba.** Para una población de tamaño  $N$ , el tamaño de muestra puede ser  $r$  con  $r = 0, 1, \dots, N$ . Es suficiente probar que  $\sum_{r=0}^N Pr(n(S) = r) = 1$ , utilizando el teorema binomial se tiene de inmediato porque  $n(S) \sim \text{Bin}(N, \pi)$ . Más aún, se tiene que

$$\begin{aligned} \sum_{s \in Q} p(s) &= \sum_{s \in Q_0} p(s) + \sum_{s \in Q_1} p(s) + \dots + \sum_{s \in Q_N} p(s) \\ &= \binom{N}{0} \pi^0 (1 - \pi)^{N-0} + \dots + \binom{N}{N} \pi^N (1 - \pi)^{N-N} \\ &= \sum_{r=0}^N \binom{N}{r} \pi^r (1 - \pi)^{N-r} = (\pi + 1 - \pi)^N = 1 \end{aligned}$$

■

**Resultado 3.2.4.** *Para el diseño de muestreo Bernoulli, las probabilidades de inclusión de primer y segundo orden están dadas por:*

$$\pi_k = \pi \quad (3.2.5)$$

$$\pi_{kl} = \begin{cases} \pi & \text{para } k = l \\ \pi^2 & \text{Para } k \neq l \end{cases} \quad (3.2.6)$$

**Prueba.** Teniendo en cuenta que existen  $\binom{N-1}{r-1}$  muestras de tamaño  $r$  que contienen al elemento  $k$ -ésimo, tenemos

$$\begin{aligned} \pi_k &= \sum_{\substack{s \ni k \\ s \subset Q}} p(s) \\ &= \sum_{\substack{s \ni k \\ s \subset Q_0}} p(s) + \sum_{\substack{s \ni k \\ s \subset Q_1}} p(s) + \dots + \sum_{\substack{s \ni k \\ s \subset Q_N}} p(s) \\ &= 0 + \binom{N-1}{0} \pi (1 - \pi)^{N-1} + \dots + \binom{N-1}{N-1} \pi (1 - \pi)^{N-1} \\ &= \sum_{r=0}^{N-1} \binom{N-1}{r} \pi^{r+1} (1 - \pi)^{N-1-r} \\ &= \pi \sum_{r=0}^{N-1} \binom{N-1}{r} \pi^r (1 - \pi)^{N-1-r} = \pi (\pi + (1 - \pi))^{N-1} = \pi \end{aligned}$$

Donde se utiliza el resultado del teorema binomial (Mood, Graybill & Boes 1974) que afirma que

$$\sum_{r=0}^m \binom{m}{r} a^r b^{m-r} = (a+b)^m. \quad (3.2.7)$$

Ahora como las inclusiones de los elementos de la población en la muestra son eventos independientes, entonces

$$Pr(k \in S \text{ y } l \in S) = Pr(I_k = 1)Pr(I_l = 1) = \pi^2 \quad (3.2.8)$$

■

### 3.2.2 El estimador de Horvitz-Thompson

**Resultado 3.2.5.** Para el diseño de muestreo Bernoulli, el estimador de Horvitz-Thompson, su varianza y su varianza estimada están dados por:

$$\hat{t}_{y,\pi} = \frac{1}{\pi} \sum_S y_k \quad (3.2.9)$$

$$Var_{BER}(\hat{t}_{y,\pi}) = \left( \frac{1}{\pi} - 1 \right) \sum_U y_k^2 \quad (3.2.10)$$

$$\widehat{Var}_{BER}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{\pi} - 1 \right) \sum_S y_k^2, \quad (3.2.11)$$

respectivamente

**Prueba.** El resultado es inmediato porque

$$\Delta_{kl} = \begin{cases} \pi_{kl} - \pi_k \pi_l = \pi^2 - \pi^2 = 0 & \text{para } k \neq l \\ \pi_{kk} - \pi_k \pi_k = \pi(1 - \pi) & \text{para } k = l \end{cases} \quad (3.2.12)$$

luego la doble suma en la varianza del estimador de Horvitz-Thompson pasa a ser una sola suma; lo anterior sucede análogamente con la expresión de la estimación de la varianza. ■

Nótese que en caso de que la muestra realizada o seleccionada esté compuesta por todas las unidades de la población, es decir se deba realizar un censo<sup>3</sup>, la probabilidad de inclusión para cada elemento de la población estaría dada por  $\pi_k = \pi$ . En este caso, el estimador de Horvitz-Thompson estaría dado por la siguiente expresión

$$\hat{t}_{y,\pi} = \frac{1}{\pi} \sum_U y_k = \frac{t_y}{\pi} \neq t_y \quad (3.2.13)$$

En este caso, el estimador de Horvitz-Thompson es deficiente para la estimación del total poblacional  $t_y$  y se sugiere la utilización del estimador alternativo para el total poblacional que, para el caso particular del diseño de muestreo Bernoulli, estaría dado por

$$\hat{t}_{y,alt} = N\tilde{y}_S = N \frac{\sum_S y_k}{n(S)} = N\bar{y}_S. \quad (3.2.14)$$

Fácilmente se verifica que si  $s = U$ , entonces  $\hat{t}_{y,alt} = t_y$ .

<sup>3</sup>En el diseño de muestreo Bernoulli, la probabilidad de seleccionar todas las unidades de la población en la muestra es equivalente a  $\pi^N$ .



**Ejemplo 3.2.1.** Para nuestra población de ejemplo  $U$ , existen  $2^5 = 32$  posibles muestras. Si la probabilidad de inclusión es fija para cada elemento e igual a 0,3, realice el cálculo léxico-gráfico del estimador de Horvitz-Thompson y compruebe el insesgamiento y la varianza.

### 3.2.3 El efecto de diseño

Una medida que compara la eficiencia entre dos estrategias de muestreo es el efecto de diseño. Ésta herramienta práctica muestra la ganancia o pérdida, de precisión, al utilizar una estrategia de muestreo más compleja que un diseño aleatorio simple sin reemplazo junto con el estimador de Horvitz-Thompson y está definida de la siguiente manera:

**Definición 3.2.2.** Siendo  $(\hat{T}, p(\cdot))$  y  $(\hat{T}_\pi, MAS)$  dos estrategias de muestreo utilizadas para la estimación del parámetro  $T$ , se define el efecto de diseño como

$$Def f = \frac{Var_p(\hat{T})}{Var_{MAS}\hat{T}_\pi}. \quad (3.2.15)$$

en particular, el efecto de diseño, restringido a la estimación de un total poblacional y al usar el estimador de Horvitz-Thompson en ambas estrategias, toma la siguiente forma

$$Def f = \frac{Var_p(\hat{t}_{y,\pi})}{\frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{yU}^2}. \quad (3.2.16)$$

Cuando el efecto de diseño es más grande que la unidad, la varianza de la estrategia del numerador es más grande que la denominador, por tanto, se ha perdido precisión al utilizar una estrategia de muestreo más compleja; si el cociente es menor que uno, se ha ganado precisión. Fue Cornfield (1951) quien sugirió evaluar la eficiencia de una estrategia de muestreo al hacer el cociente entre la varianza de la misma y la del diseño aleatorio simple sin reemplazo con el estimador de Horvitz-Thompson. Más adelante Kish (1965) lo llamo DEFF (efecto de diseño, por sus siglas en inglés).

Sin embargo, en la mayoría de ocasiones, el cálculo de este cociente no es sencillo. Lehtonen & Pahkinen (2003) plantea una estimación del efecto de diseño para totales mediante la estimación de las varianzas que intervienen en la expresión. De esta forma, se tiene

**Resultado 3.2.6.** Un estimador del efecto de diseño  $Def f$  para el total poblacional  $t_y$  es

$$\widehat{Def f} = \frac{\widehat{Var_p(\hat{T})}}{\frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{ys}^2}. \quad (3.2.17)$$

No todos los parámetros tienen el mismo comportamiento, por lo tanto, los efectos de diseño para estos no tendrán un mismo criterio de optimalidad. Es decir, si existe un criterio de optimalidad con respecto a un parámetro, digamos el total poblacional  $t_y$ , no necesariamente se cumplirá ese criterio con un parámetro distinto, digamos la mediana poblacional.

Dado que el tamaño de muestra en diseños diferentes al muestreo aleatorio simple sin reemplazo puede ser variable, es necesario asegurarse que  $n = E_{MAS}(n(S)) = E_p(n(S))$  para que exista un punto objetivo de comparación. Por ejemplo, para comparar la eficiencia del estimador de Horvitz-Thompson en el diseño de muestreo Bernoulli, es necesario fijar el tamaño de muestra, dado que este diseño no es de tamaño fijo; es decir que  $n = E_{MAS}(n(S)) = E_{BER}(n(S)) = N\pi$ . Por lo que resulta que  $\pi = n/N$ .

De esta manera podemos introducir la medida de eficiencia del diseño de muestreo Bernoulli con respecto al MAS, así

$$def f = \frac{Var_{BER}(\hat{t}_{y,\pi})}{Var_{MAS}(\hat{t}_{y,\pi})} = 1 - \frac{1}{N} + \frac{1}{CV_y^2} \cong 1 + \frac{1}{CV_y^2} \quad (3.2.18)$$

Por tanto, si el efecto de diseño *deff* es igual a 1.8, esto implica que la varianza del  $\pi$  estimador bajo diseño de muestreo Bernoulli es 1.8 veces la varianza del  $\pi$  estimador bajo MAS.

### 3.2.4 Marco y Lucy

Suponga que se debe seleccionar una muestra con un diseño de muestreo Bernoulli. Se quiere que el tamaño esperado de muestra sea de  $N\pi = 400$  empresas del sector industrial. Como el tamaño de la población es  $N = 2396$ , entonces el valor que se fija para  $\pi$  es de 0.1669. Para seleccionar la muestra se utiliza la función `S.BE(N,prob)` del paquete `TeachingSampling` cuyos parámetros son `N`, el tamaño poblacional y `prob` el valor de la probabilidad de inclusión para cada elemento de la población. Esta función utiliza el algoritmo secuencial descrito en la anterior sección.

Primero se carga en R el archivo `Marco` que contiene el marco de muestreo para la selección de la muestra. Se fijan los parámetros de la función, `N` y `prob`. Esta función devuelve un vector conteniendo el índice de los elementos seleccionados en la muestra. En este caso particular, el primer elemento seleccionado es el número 2 y el último el número 2394.

```
data(BigLucy)
N <- dim(BigLucy)[1]
pik <- 0.025
sam <- S.BE(N,pik)
muestra <- BigLucy[sam,]
attach(muestra)
head(muestra)
```

##	ID	Ubication	Level	Zone	Income	Employees	Taxes
## 86	AB0000000086	C0246025K0055872	Small	County1	456	75	9
## 118	AB0000000118	C0140163K0161734	Small	County1	436	77	8
## 159	AB0000000159	C0045680K0256217	Small	County1	230	10	2
## 200	AB0000000200	C0035648K0266249	Small	County1	310	54	4
## 325	AB0000000325	C0059021K0242876	Small	County1	208	22	1
## 373	AB0000000373	C0079681K0222216	Small	County1	270	72	3

##	SPAM	ISO	Years	Segments
## 86	yes	no	22	County1 9
## 118	yes	no	49	County1 12
## 159	yes	no	7	County1 16
## 200	yes	no	22	County1 20
## 325	no	no	28	County1 33
## 373	yes	no	26	County1 38

```
n <- dim(muestra)[1]
n
## [1] 2228
```

Aplicando los índices obtenidos por la función `S.BE` al marco de muestreo obtenemos la identificación y ubicación de las empresas seleccionadas en la muestra. Nótese que el tamaño de muestra efectivo es de 2228 empresas. Una vez que la etapa de recolección de datos se haya realizado, obtendremos un archivo de datos de `Lucy` conteniendo los valores de las características de interés para las empresas seleccionadas que será adjuntado a R mediante la función `attach`.

La etapa de estimación de resultados se hace utilizando la función `E.BE(y,prob)` del paquete `TeachingSampling`

cuyos argumentos son **y**, un vector o matriz conteniendo los valores de las características de interés en la muestra y **prob**, la probabilidad de inclusión. En este caso la longitud de cada vector es de  $n = 2228$ . Esta función arroja la estimación del total poblacional de **y** usando el estimador de Horvitz-Thompson, la estimación de la varianza y el coeficiente de variación del mismo. Por ejemplo, la variable **Income** contiene los valores del ingreso declarado en el último año por 396 empresas del sector industrial pertenecientes a la muestra. La estimación para esta característica se hace mediante el siguiente código:

```
estima <- data.frame(Income, Employees, Taxes)
E.BE(estima,pik)
```

	N	Income	Employees	Taxes
Estimation	89120.00	37281880.00	5541240.00	988720.00
Standard Error	1864.32	910626.84	130608.04	35971.57
CVE	2.09	2.44	2.36	3.64
DEFF	Inf	3.75	4.71	1.49

Tabla 3.4: *Estimaciones para el diseño de muestreo Bernoulli*

La tabla 3.4 muestra los resultados obtenidos para este caso particular, donde la desviación relativa de una estimación, medida en porcentaje está definida como

Por otro lado, nótese que, aunque la distribución asintótica del estimador de Horvitz-Thompson es normal, es necesario verificar el comportamiento del estimador con el tamaño de muestra esperado. Se realizaron varios experimentos de Monte Carlo con el propósito de tener un examen más cercano del estimador de Horvitz-Thompson del total de la característica **Income** en la población **Lucy**. El resultado de la simulación se muestra en los histogramas de la figura 3.1. Se espera que el promedio de las estimaciones en cada experimento coincida con el total poblacional y la varianza de éstas debe acercarse a la varianza basada en el diseño de muestreo Bernoulli.

```
bary <- mean(Income)
sdy <- sd(Income)
x <- seq(min(Income),max(Income),by=10)
a <- (bary/sdy)^2
b <- sdy^2/bary
```

La media de las estimaciones de  $t_y$  es 1035176 que ajusta bien con el parámetro correspondiente  $t_y = 1035217$ . La distribución parece ser simétrica con forma de campana (los valores de la distribución teórica se muestran en la curva sólida y roja) y no se notan grandes discrepancias entre lo observado y lo teórico. En algunos casos, en donde el tamaño de muestra no es lo suficientemente grande, se debe verificar el comportamiento normal del estimador.

### 3.3 Muestreo aleatorio simple con reemplazo

Una **muestra aleatoria simple con reemplazo**, de tamaño  $m$  de una población de  $N$  elementos es la extracción de  $m$  muestras independientes de tamaño 1, en donde cada elemento se extrae de la población con la misma probabilidad

$$p_k = \frac{1}{N} \quad \forall k \in U$$

```
p1 <- ggplot(BigLucy, aes(x=Income)) +
  geom_histogram(aes(y=..density..)) +
  stat_function(fun=dgamma, args=list(shape=a, scale=b), colour="red")
p2 <- ggplot(BigLucy, aes(x=Income)) +
  geom_histogram(aes(y=..density..)) +
  stat_function(fun=dnorm, args=list(mean=bary, sd=sdy), colour="blue")
grid.arrange(p1, p2, ncol = 2)
```

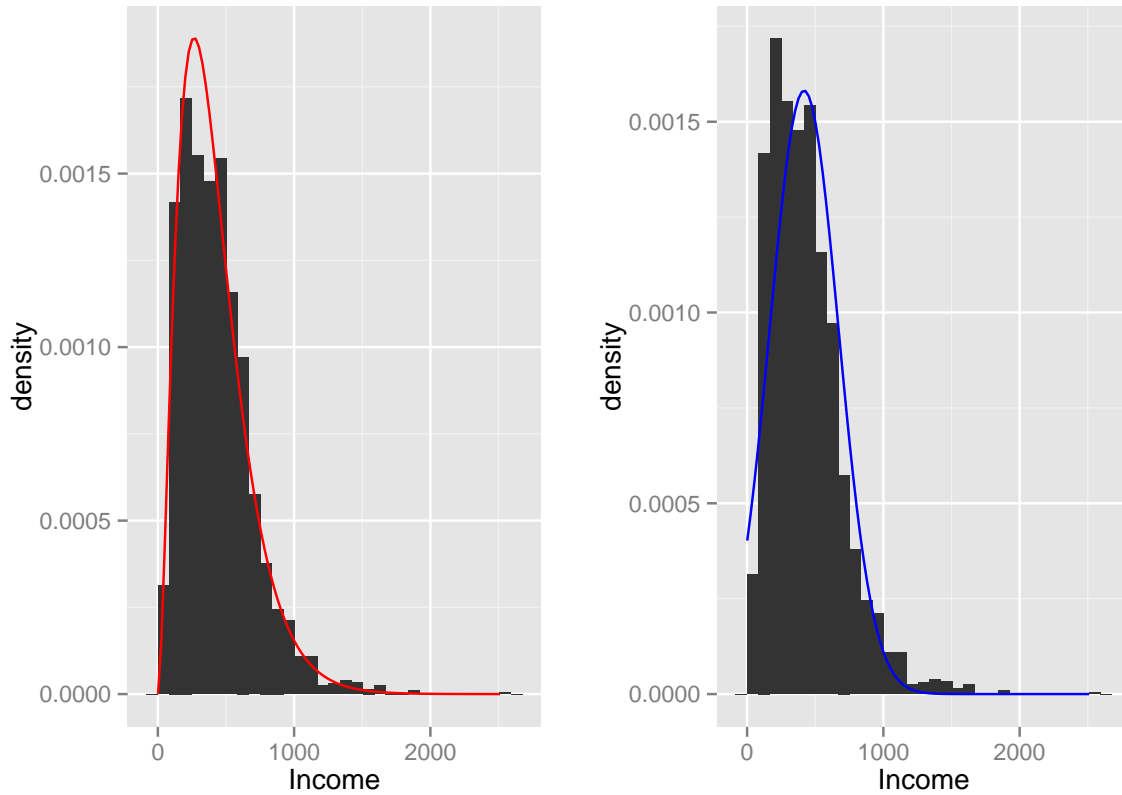


Figura 3.2: Distribución de la característica *Income* y su posible modelamiento bajo la distribución gamma (izquierda) y norma (derecha).

**Definición 3.3.1.** Un diseño de muestreo aleatorio simple con reemplazo se define como

$$p(s) = \begin{cases} \frac{m!}{n_1(s)! \dots n_N(s)!} \prod_U \left(\frac{1}{N}\right)^{n_k(s)} & \text{si } \sum_U n_k(s) = m \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.3.1)$$

Donde  $n_k(s)$  es el número de veces que el elemento  $k$ -ésimo es seleccionado en la muestra realizada  $s$ .

**Resultado 3.3.1.** Para este diseño de muestreo, existen  $\binom{N+m-1}{m}$  posibles muestras de tamaño  $m$ ; es decir

$$\#(Q) = \binom{N+m-1}{m}$$

**Resultado 3.3.2.** Dado el soporte  $Q$ , de todas las posibles muestras con reemplazo de tamaño  $m$ , se verifica que el diseño de muestreo aleatorio simple con reemplazo es tal que

$$\sum_{s \in Q} p(s) = 1$$

**Prueba.** La demostración es inmediata porque este diseño de muestro es una función de densidad multinomial discreta sobre  $Q$ .

$$\begin{aligned} \sum_{s \in Q} p(s) &= \sum_{s \in Q} \frac{m!}{n_1(s)! \dots n_N(s)!} \prod_U \left( \frac{1}{N} \right)^{n_k(s)} \\ &= \sum_{s \in Q} \frac{m!}{n_1(s)! \dots n_N(s)!} \left( \frac{1}{N} \right)^{n_1(s)} \dots \left( \frac{1}{N} \right)^{n_N(s)} \\ &= \sum_{\substack{n_1(s) \dots n_N(s) \\ \sum_U n_k(s) = m}} \frac{m!}{n_1(s)! \dots n_N(s)!} \left( \frac{1}{N} \right)^{n_1(s)} \dots \left( \frac{1}{N} \right)^{n_N(s)} \\ &= \underbrace{\left( \frac{1}{N} + \dots + \frac{1}{N} \right)^m}_{N \text{ veces}} \\ &= 1 \end{aligned}$$

donde se utiliza el resultado del teorema multinomial que afirma que

$$\sum_{\substack{n_1 \dots n_N \\ \sum_U n_k = m}} \frac{m!}{n_1! \dots n_N!} (p_1)^{n_1} \dots (p_N)^{n_N} = \left( \sum_{k=1}^N p_k \right)^m \quad (3.3.2)$$

■

**Resultado 3.3.3.** Para un diseño aleatorio simple con reemplazo, las probabilidades de inclusión de primer y segundo orden están dadas por

$$\pi_k = 1 - \left( 1 - \frac{1}{N} \right)^m \quad (3.3.3)$$

$$\pi_{kl} = 1 - 2 \left( 1 - \frac{1}{N} \right)^m + \left( 1 - \frac{2}{N} \right)^m \quad (3.3.4)$$

respectivamente.

**Prueba.** Utilizando los resultados 2.2.9. y 2.2.10., respectivamente, se llega a la demostración. ■

**Ejemplo 3.3.1.** En nuestra población ejemplo el tamaño poblacional es  $N = 5$ . Si se quisiera seleccionar una muestra aleatoria simple con reemplazo de tamaño  $m = 2$ , entonces existirían  $N^m = 5^2 = 25$  posibles extracciones ordenadas. Sin embargo, sólo existen  $\binom{N+m-1}{m} = \binom{6}{2} = 15$  posibles muestras. Cada una de las posibles muestras que pertenecen al soporte con reemplazo tienen las siguientes probabilidades de selección.

	V1	V2	p	n1	n2	n3	n4	n5
1	Yves	Yves	0.04	2	0	0	0	0
2	Ken	Ken	0.04	0	2	0	0	0

3	Erik	Erik	0.04	0	0	2	0	0
4	Sharon	Sharon	0.04	0	0	0	2	0
5	Leslie	Leslie	0.04	0	0	0	0	2
6	Yves	Ken	0.08	1	1	0	0	0
7	Yves	Erik	0.08	1	0	1	0	0
8	Yves	Sharon	0.08	1	0	0	1	0
9	Yves	Leslie	0.08	1	0	0	0	1
10	Ken	Erik	0.08	0	1	1	0	0
11	Ken	Sharon	0.08	0	1	0	1	0
12	Ken	Leslie	0.08	0	1	0	0	1
13	Erik	Sharon	0.08	0	0	1	1	0
14	Erik	Leslie	0.08	0	0	1	0	1
15	Sharon	Leslie	0.08	0	0	0	1	1

Nótese que la suma de las probabilidades inducidas por el diseño de muestreo es igual a uno y que cada una de ellas es mayor que cero.

### 3.3.1 Algoritmo de selección

Tillé (2006) presenta dos algoritmos para seleccionar una muestra aleatoria simple con reemplazo. El primero, de manera general induce  $m$  selecciones individuales y el segundo, es un método secuencial que implementa la selección mediante la distribución binomial.

#### Método de $m$ selecciones

El siguiente método de selección se implementa en  $m$  pasos, y aunque no es eficiente computacionalmente, es muy conocido.

- Seleccionar un primer elemento con probabilidad  $\frac{1}{N}$  de todo el conjunto de datos.
- Seleccionar un segundo elemento con probabilidad  $\frac{1}{N}$  de todo el conjunto de datos.
- ...
- Seleccionar un  $m$ -ésimo elemento con probabilidad  $\frac{1}{N}$  de todo el conjunto de datos.

Hace unas pocas décadas, cuando no existía la ayuda tecnológica de ahora, no imagino como los encargados de la selección de la muestra pudieron haber utilizado este algoritmo. Imagine seleccionar una muestra de 3000 elementos sin la facilidad de un computador.

#### Método secuencial

Tillé (2006) afirma que este procedimiento es mejor que el anterior porque permite seleccionar una muestra de tamaño  $m$  en una sola pasada por el conjunto de datos.

- Seleccionar  $n_k$  veces el elemento  $k$ -ésimo de acuerdo a una distribución binomial.

$$Bin \left( m - \sum_{i=1}^{k-1} n_i, \frac{1}{N - k + 1} \right) \quad (3.3.5)$$

Para todo  $k \in U$ .

**Ejemplo 3.3.2.** Como se ha visto en los capítulos anteriores, R incorpora en la función `sample`, la selección de muestras aleatorias simples con reemplazo, simplemente el argumento `replace` debe ser activado mediante, `replace=TRUE`. Así, para seleccionar una muestra con reemplazo de tamaño  $m = 3$ , sólo es necesario escribir el siguiente código.

```
N <- length(U)
sam <- sample(N, 3, replace=TRUE)
U[sam]

## [1] "Yves" "Sharon" "Leslie"
```

El procedimiento de selección de una muestra aleatoria con reemplazo de tamaño  $m$  mediante el uso del algoritmo secuencial está implementado en la función `S.WR(N,m)` cuyos argumentos son  $N$ , el tamaño de la población y  $m$ , el tamaño de la muestra con reemplazo. Así, para seleccionar una muestra aleatoria simple con reemplazo de la población  $U$  de tamaño  $N = 5$ , se tiene

```
m <- 3
sam <- S.WR(N,m)
U[sam]

## [1] "Ken" "Leslie" "Leslie"
```

Una vez más, la salida de la función es un vector de índices (no necesariamente distintos) de los elementos pertenecientes a la muestra seleccionada  $s$ . Este algoritmo utiliza la distribución binomial en cada uno de sus pasos, de tal forma que para la selección de la anterior muestra conformada por **Ken**, **Leslie** y **Leslie** cada uno de los  $N = 5$  pasos del algoritmo arrojaron los siguientes resultados.

k	Nombre	Bin n	Bin p	nk
1	Yves	3	0.2000	0
2	Ken	3	0.2500	1
3	Erik	2	0.3333	0
4	Sharon	2	0.5000	2
5	Leslie	0	1.0000	0

Donde `Bin n` y `Bin p` son los parámetros de la distribución binomial asociada al algoritmo secuencial. Note que la cantidad `nk` se refiere a la realización de la variable  $n_k(s)$ .

### 3.3.2 El estimador de Hansen-Hurwitz

Cuando se tienen las cantidades del resultado 3.3.3 se pueden implementar los principios del estimador de Horvitz-Thompson para estimar el total poblacional  $t_y$ ; sin embargo, el cálculo y estimación de la varianza de esta estrategia de muestreo resulta ser muy compleja (computacionalmente). Por esta razón, utilizaremos el estimador de Hansen-Hurwitz dado por (2.2.34) que estima de manera insesgada al parámetro de interés  $t_y$ .

**Resultado 3.3.4.** Para un diseño de muestreo aleatorio simple con reemplazo, el estimador de Hansen-Hurwitz del total poblacional  $t_y$ , su varianza y su varianza estimada están dados por:

$$\hat{t}_{y,p} = \frac{N}{m} \sum_{i=1}^m y_i \quad (3.3.6)$$

$$Var_{MRAS}(\hat{t}_{y,p}) = N \frac{(N-1)}{m} S_{yU}^2 \quad (3.3.7)$$

$$\widehat{Var}_{MRAS}(\hat{t}_{y,p}) = \frac{N^2}{m} S_{y_{sr}}^2 \quad (3.3.8)$$

respectivamente, con  $S_{yU}^2$  el estimador de la varianza de los valores de la característica de interés  $y$  en el universo y  $S_{y_{sr}}^2$  el estimador de la varianza de los valores  $y_i$  que pertenecen a la muestra seleccionada ( $\forall i \in m$ ) (no necesariamente distintos) en la muestra. Esto es,

$$S_{y_{sr}}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_S)^2.$$

Nótese que  $\hat{t}_{y,p}$  es insesgado para el total poblacional  $t_y$  de la característica de interés  $y$ , y que  $\widehat{Var}_{MRAS}(\hat{t}_{y,p})$  es insesgado para  $Var_{MRAS}(\hat{t}_{y,p})$ .

**Prueba.** Los resultados se obtienen escribiendo el estimador de Hansen-Hurwitz de la siguiente manera,

$$\hat{t}_{y,p} = \frac{1}{m} \sum_U n_k(S) \frac{y_k}{p_k} = \frac{N}{m} \sum_U n_k(S) y_k \quad (3.3.9)$$

Por tanto, utilizando el resultado 2.2.8., se tiene que

$$\begin{aligned} E(\hat{t}_{y,p}) &= \frac{N}{m} \sum_U E(n_k(S)) y_k \\ &= \frac{N}{m} \sum_U \frac{m}{N} y_k = t_y \end{aligned}$$

Por otro lado, asumiendo que las variables  $Z_i$  son independientes e idénticamente distribuidas

$$\begin{aligned} Var(\hat{t}_{y,p}) &= Var\left(\frac{1}{m} \sum_i^m Z_i\right) \\ &= \frac{1}{m^2} \sum_i^m Var(Z_i) \\ &= \frac{1}{m^2} \sum_i^m \left(\sum_U \frac{1}{N} (Ny_k - t)^2\right) \\ &= \frac{1}{m} \left(\frac{N^2}{N} \sum_U (y_k - \bar{y}_U)^2\right) \\ &= N \frac{(N-1)}{m} S_{yU}^2 \end{aligned}$$

Escribiendo el estimador de la varianza como

$$\widehat{Var}(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m} \frac{1}{m-1} \sum_U n_k(S) (Ny_k - \hat{t}_{y,p})^2 \quad (3.3.10)$$



se tiene el insesgamiento dado por

$$\begin{aligned}
 E\left(\widehat{Var}(\hat{t}_{y,p})\right) &= \frac{1}{m} \frac{1}{m-1} \sum_U E\left(n_k(S)(Ny_k - \hat{t}_{y,p})^2\right) \\
 &= \frac{1}{m} \frac{1}{m-1} \sum_U E\left(n_k(S)(Ny_k - t_y)^2 - n_k(S)(\hat{t}_{y,p} - t_y)^2\right) \\
 &= \frac{1}{m} \frac{1}{m-1} E\left(\sum_U n_k(S)(Ny_k - t_y)^2\right) \\
 &\quad - \frac{1}{m} \frac{1}{m-1} E\left((\hat{t}_{y,p} - t_y)^2 \sum_U n_k(S)\right) \\
 &= \frac{1}{m} \frac{1}{m-1} \left[ E\left(\sum_U n_k(S)(Ny_k - t_y)^2\right) - m E\left((\hat{t}_{y,p} - t_y)^2\right) \right] \\
 &= \frac{1}{m} \frac{1}{m-1} \left[ m \left( \sum_U \frac{m}{N} (Ny_k - t_y)^2 \right) - m Var(\hat{t}_{y,p}) \right] \\
 &= \frac{1}{m} \frac{1}{m-1} [m^2 Var(\hat{t}_{y,p}) - m Var(\hat{t}_{y,p})] \\
 &= Var(\hat{t}_{y,p})
 \end{aligned}$$

■

**Ejemplo 3.3.3.** Para nuestra población de ejemplo  $U$ , existen  $\binom{N+m-1}{m} = 20$  posibles muestras con reemplazo de tamaño  $m = 2$ . Realice el cálculo léxico-gráfico del estimador de Hansen-Hurwitz y compruebe el insesgamiento y la varianza.

### 3.3.3 Marco y Lucy

Suponga que se quiere seleccionar una muestra aleatoria simple con reemplazo de tamaño  $m = 400$  empresas del sector industrial. Para la selección de la muestra es posible usar la función `sample` que viene integrada con R. En primer lugar se debe cargar el marco de muestreo que permite la selección, identificación y posterior ubicación de cada individuo en la muestra con reemplazo. Para la selección de la muestra es necesario ingresar los parámetros de la función, en este caso  $N=2396$ , el tamaño poblacional, está dado por la cantidad de filas (registros de empresas del sector industrial) del marco de muestreo y  $m=400$  empresas que se seleccionaran con reemplazo.

```
data(BigLucy)
attach(BigLucy)
N <- dim(BigLucy)[1]
m <- 2000
sam <- sample(N, m, replace=TRUE)
```

Sin embargo, para seleccionar la muestra con reemplazo utilizando el método secuencial, el paquete `TeachingSampling` adjunta la función `S.WR` cuyos argumentos son  $N$ , el tamaño de la población y  $m$ , el tamaño de la muestra con reemplazo. El resultado de la función es un conjunto de índices (no necesariamente distintos) que aplicados a la población resulta en los valores de la característica de interés para las empresas (no necesariamente distintas) seleccionadas. Nótese que una empresa seleccionada se tendrá en cuenta en la etapa de estimación tantas veces como haya sido seleccionada.

```
sam <- S.WR(N,m)
muestra <- BigLucy[sam,]
attach(muestra)
```

```
head(muestra)
```

```
##           ID           Ubication Level   Zone Income Employees Taxes
## 62  AB0000000062 C0196110K0105787 Small County1    456         71   9.0
## 63  AB0000000063 C0242126K0059771 Small County1    340         28   5.0
## 63.1 AB0000000063 C0242126K0059771 Small County1    340         28   5.0
## 93  AB0000000093 C0159050K0142847 Small County1    441         66   8.0
## 115 AB0000000115 C0123025K0178872 Small County1     10         65   0.5
## 296 AB0000000296 C0129476K0172421 Small County1    245         67   2.0
##      SPAM ISO Years   Segments
## 62    yes  no     12 County1 7
## 63    yes  no     20 County1 7
## 63.1  yes  no     20 County1 7
## 93     no  no     11 County1 10
## 115    no  no     28 County1 12
## 296    no  no      2 County1 30
```

```
dim(muestra)
```

```
## [1] 2000   11
```

La primera empresa en ser seleccionada mediante el método secuencial es la empresa que ocupa la segunda posición en el marco de muestreo; es decir, la empresa cuyo número único de identificación corresponde a **AB002**, la segunda y tercera empresa en ser seleccionadas corresponde a la empresa identificada con el número único **AB015**. Si un elemento ha sido seleccionada más de una vez, R codifica automáticamente las posteriores selecciones con un punto seguido de un número que indica el número de veces menos uno que ha sido seleccionada la misma unidad.

Una vez que las empresas son seleccionadas, se programa la visita del encuestador en la cual se registran los valores de las características de interés. Cuando se tiene la base de datos con la información pertinente para todas las empresas seleccionadas en la muestra con reemplazo, se procede a estimar los totales de las características de interés. La función **E.WR** del paquete **TeachingSampling** permite la estimación de una o varias características de interés simultáneamente. Para ello, se debe crear un conjunto de datos con la información recolectora para cada una de las 400 empresas en las características de interés. En este caso creamos un conjunto de datos con las tres características de interés **Income**, **Employees** y **Taxes**.

La función **E.WR** del paquete **TeachingSampling** tiene tres argumentos, **N**, el tamaño de la población y **m**, el tamaño de la muestra con reemplazo y el conjunto de datos (conteniendo los valores para la(s) característica(s) de interés). El resultado de la función es la estimación del total, la varianza estimada y el respectivo coeficiente de variación de la(s) característica(s) de interés.

```
estima <- data.frame(Income, Employees, Taxes)
E.WR(N, m, estima)
```

La tabla **??**. muestra los resultados particulares de esta estrategia de muestreo. Nótese que con un menor tamaño de muestra, se obtienen mejores resultados que al utilizar una estrategia de muestreo que contempla un diseño Bernoulli y el estimador de Horvitz-Thompson.

	N	Income	Employees	Taxes
Estimation	85296.00	36809829.98	5404439.86	1021547.54
Standard Error	0.00	512237.40	62252.04	31822.36
CVE	0.00	1.39	1.15	3.12
DEFF		1.02	1.02	1.02

Tabla 3.5: *Estimaciones para el diseño de muestreo aleatorio simple con reemplazo*

### El efecto de diseño

Sin embargo, utilizando el efecto de diseño podemos comparar la eficiencia de la anterior estrategia utilizada en Lucy mediante el efecto de diseño. Utilizando la definición podemos aproximar la medida mediante

$$\begin{aligned}
 Deff &= \frac{Var_{MRAS}(\hat{t}_{y,p})}{Var_{MAS}(\hat{t}_{y,\pi})} \\
 &= \frac{1}{1-f} \left(1 - \frac{1}{N}\right) \cong \frac{1}{1-f}
 \end{aligned}$$

Por tanto, para la estrategia de muestreo utilizada anteriormente, tenemos  $Deff = \frac{1}{1 - \frac{2000}{85296}} = 1.02$ .

Lo anterior indica que existe una pérdida del 2% de precisión al utilizar la estrategia de muestreo con reemplazo y el estimador de Hansen-Hurwitz. En general se tiene que, para tamaños de muestra muy pequeños, en comparación a  $N$ , las dos estrategias arrojan resultados muy similares. Sin embargo, a medida que el tamaño de muestra crece, en comparación a  $N$ , la medida  $Deff$  aumenta significativamente; es decir, existe una pérdida muy grande de eficiencia.

Dado que el diseño de muestreo es con reemplazo, se quiere verificar que la distribución asintótica del estimador de Hansen-Hurwitz sea normal. Se realiza una simulación de Monte Carlo, con los mismos lineamientos utilizados en la sección 3.1.3 en donde se realizaron varios experimentos de Monte Carlo para examinar el comportamiento del estimador de Hansen-Hurwitz en la característica ingreso. El resultado de la simulación se muestra en los histogramas de la figura 3.3. En este experimento de Monte Carlo el promedio de las estimaciones de cada experimento coincide con el total poblacional y se espera que la varianza de las estimaciones debe acercarse a la varianza basada en el diseño de muestreo aleatorio simple.

La media de las estimaciones de  $t_y$  es 36631139.13 que ajusta bien con el parámetro correspondiente  $t_y = 1035217$ . Nótese que la varianza del estimador (mediante este experimento de Monte Carlo) no es muy grande y que la distribución del estimador no muestra valores atípicos. Hay que tener cuidado con las afirmaciones acerca de normalidad en este caso pues la distribución, aunque parece ser simétrica y con forma de campana, en realidad puede estar sesgada a derecha o a izquierda.

## 3.4 Diseño de muestreo sistemático

En algunas ocasiones, cuando no se dispone de un marco de muestreo, por lo menos no de forma explícita, o cuando el marco disponible está ordenado de forma particular, con respecto a los rótulos del mismo, es posible utilizar el diseño de muestreo sistemático como una opción para la selección de muestras. La característica más particular de este diseño de muestreo es que todas las unidades se suponen enumeradas del 1 al  $N$ , al menos implícitamente, y se tiene conocimiento de que la población se encuentra particionada en  $a$  grupos poblacionales latentes. En este orden de ideas el tamaño poblacional

```

HHest <- c()
for(i in 1:1000){
  sam <- sample(N, m, replace=TRUE)
  HHest[i] = E.WR(N, m, BigLucy$Income[sam])[1,2]
}

barHH <- mean(HHest)
sdHH <- sd(HHest)
x <- seq(min(HHest),max(HHest),by=10)

ggplot(as.data.frame(HHest), aes(x=HHest)) +
  geom_histogram(aes(y=..density..)) +
  stat_function(fun=dnorm, args=list(mean=barHH, sd=sdHH), colour="red")

## stat_bin: binwidth defaulted to range/30. Use 'binwidth = x' to adjust this.

```

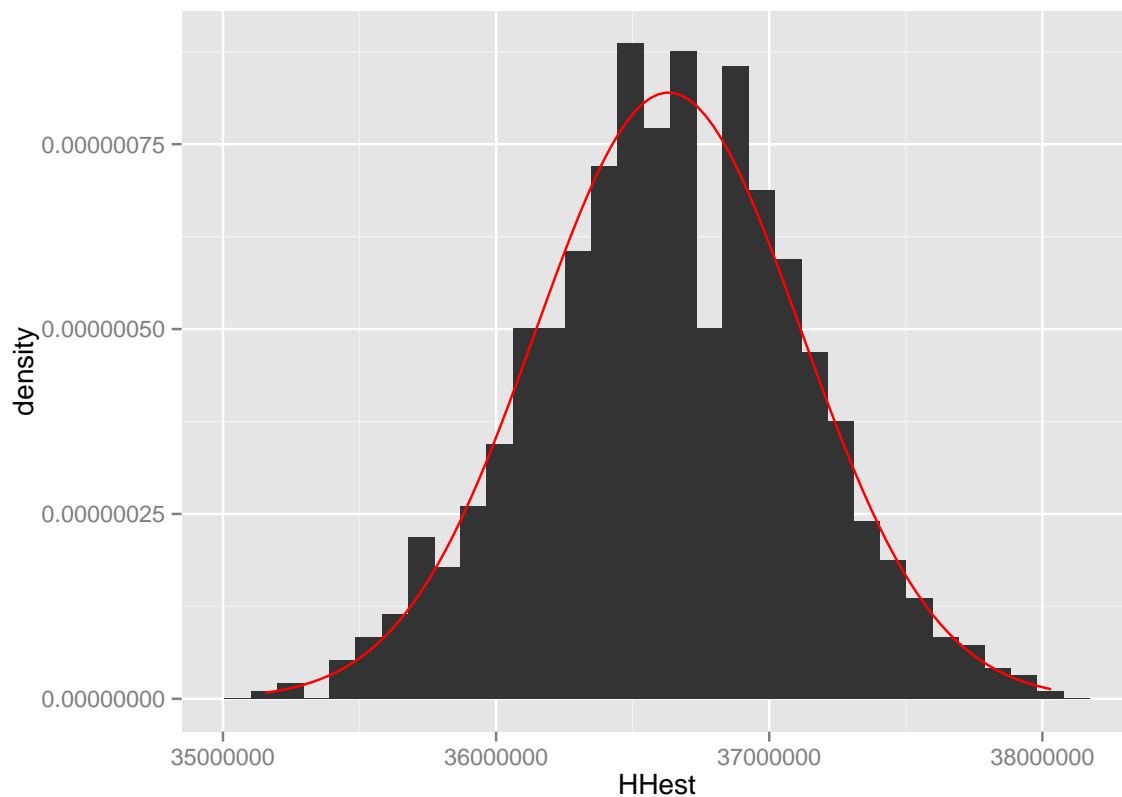


Figura 3.3: Distribución empírica del estimador de Hansen-Hurwitz para el diseño de muestreo aleatorio simple con reemplazo.

$N$  puede ser escrito como

$$N = na + c \quad (3.4.1)$$

en donde  $0 \leq c < a$  y  $n$ , el tamaño de muestra esperado, se define como la parte entera del cociente  $N/a$ . Nótese que  $c$  es un entero que representa el residuo algebraico del total poblacional y se puede

ver fácilmente que toma la siguiente forma

$$c = N - \left\| \frac{N}{a} \right\| a \quad (3.4.2)$$

En donde  $\left\| \frac{N}{a} \right\|$  representa la parte entera del cociente  $N/a$ . Una vez que los grupos han sido conformados, se procede a escoger de manera aleatoria, un número entre 1 y  $a$ , por ejemplo  $r$ . La muestra estará conformada sistemáticamente por los elementos  $r, r+a, r+2a, \dots, r+(n-1)a$ . Nótese que en el caso en donde  $c = 0$ , el tamaño de muestra estará dado por  $n = N/a$ ; de otra forma, si  $c > 0$ , el tamaño de muestra puede ser  $n = \left\| \frac{N}{a} \right\|$  ó  $n = \left\| \frac{N}{a} \right\| + 1$ . Como lo señala Raj (1968) este diseño de muestreo es un caso especial de un muestreo por conglomerados, como se verá en los siguientes capítulos.

Tabla 3.6: Posible configuración del muestreo sistemático.

Grupo	$s_1$	$\dots$	$s_r$	$\dots$	$s_a$
$n = 1$	1	$\dots$	$r$	$\dots$	$a$
$n = 2$	$1 + a$	$\dots$	$r + a$	$\dots$	$2a$
$n = 3$	$1 + 2a$	$\dots$	$r + 2a$	$\dots$	$3a$
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
$n = \left\  \frac{N}{a} \right\ $	$1 + (n-1)a$	$\dots$	$r + (n-1)a$	$\dots$	$na$
$n = \left\  \frac{N}{a} \right\  + 1$	$1 + na$	$\dots$	$\square$	$\dots$	$\square$

El anterior esquema permite una mejor comprensión del funcionamiento del diseño de muestreo sistemático. Nótese el ordenamiento por grupos de las unidades que pertenecen a la población. En particular, esta tabla corresponde a una población, en donde, si se seleccionara el último grupo  $s_a$ , entonces el tamaño de muestra sería  $n = \left\| \frac{N}{a} \right\|$ , mientras que si se escogiera el primer grupo  $s_1$ , el tamaño de muestra estaría dado por  $n = \left\| \frac{N}{a} \right\| + 1$ .

Por otro lado, nótese que cada grupo  $s_r$  constituye una posible muestra, de tal forma que

$$U = \bigcup_{r=1}^a s_r. \quad (3.4.3)$$

El soporte  $Q$  de todas las posible muestras sistemáticas, queda entonces definido como

$$Q_r = \{s_1, s_2, \dots, s_r, \dots, s_a\}. \quad (3.4.4)$$

**Resultado 3.4.1.** Para este diseño de muestreo, la cardinalidad del soporte es igual al número de grupos formados. Es decir

$$\#Q_r = a$$

**Definición 3.4.1.** Suponga que el tamaño poblacional es tal que  $N = na + c$ , con  $0 \leq c < a$ . Se define un diseño de muestreo sistemático de la siguiente manera

$$p(s) = \begin{cases} \frac{1}{a} & \text{si } s \in Q_r \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.4.5)$$

Dado que sólo existen  $a$  posibles muestras, el diseño de muestreo sistemático cumple que  $\sum_{s \in Q} p(s) = 1$ .

### 3.4.1 Algoritmo de selección

El siguiente algoritmo secuencial permite la extracción de una muestra mediante el diseño de muestreo sistemático.

1. Seleccionar con probabilidad  $\frac{1}{a}$  un arranque aleatorio. Es decir un entero  $r$ , tal que  $1 \leq r \leq a$ .
2. La muestra estará definida por el siguiente conjunto

$$s_r = \{k : k = r + (j-1)a; j = 1, \dots, n(S)\} \quad (3.4.6)$$

**Ejemplo 3.4.1.** Nuestra población ejemplo  $U$  está ordenada de la siguiente forma

$$U = \{\mathbf{Yves}, \mathbf{Ken}, \mathbf{Erik}, \mathbf{Sharon}, \mathbf{Leslie}\}$$

Suponga que sistemáticamente se divide en  $a = 2$  grupos. El primero dado por:

$$s_1 = \{\mathbf{Yves}, \mathbf{Erik}, \mathbf{Leslie}\}$$

y el segundo conformado por:

$$s_2 = \{\mathbf{Ken}, \mathbf{Sharon}\}$$

De tal forma que  $N = (2)(2) + 1$ . Para seleccionar un arranque aleatorio  $r$  se utilizará un dado, de tal forma que si el resultado de un lanzamiento es par, entonces la muestra seleccionada será  $s_1$ , de lo contrario la muestra seleccionada será  $s_2$ .

**Resultado 3.4.2.** Para un diseño de muestreo sistemático, las probabilidades de inclusión de primer y segundo orden están dadas por

$$\pi_k = \frac{1}{a} \quad (3.4.7)$$

$$\pi_{kl} = \begin{cases} \frac{1}{a} & \text{si } k \text{ y } l \text{ pertenecen a } s_r \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.4.8)$$

respectivamente.

**Prueba.** considerando que el elemento  $k$ -ésimo sólo puede pertenecer a una y sólo una muestra  $s_r$ , tenemos que

$$\pi_k = Pr(k \in S) = Pr(\text{seleccionar la muestra } s_r) = \frac{1}{a} \quad (3.4.9)$$

Por otra parte, suponga que los elementos  $k$ -ésimo y  $l$ -ésimo pertenecen al grupo  $s_r$ . De esta manera, estos elementos son incluidos en la muestra sí y sólo sí se selecciona el grupo  $s_r$ , por tanto, la probabilidad de inclusión de segundo orden está dada por la probabilidad de selección del grupo  $s_r$  igual a  $\frac{1}{a}$ . Si los elementos  $k$ -ésimo y  $l$ -ésimo pertenecen a grupos distintos, la probabilidad de ser incluidos en la muestra realizada es nula. ■

### 3.4.2 El estimador de Horvitz-Thompson

Una vez que el diseño de muestreo es definido, la estrategia se completa con el uso del estimador de Horvitz-Thompson, por ser este un diseño sin reemplazo. El siguiente resultado será útil para definir las propiedades de varianza del estimador.

**Resultado 3.4.3.** Para un diseño  $p(\cdot)$  con soporte  $Q$ , la varianza del estimador de Horvitz-Thompson, se puede escribir como

$$Var(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum \sum_U \frac{\pi_{kl}}{\pi_k \pi_l} y_k y_l - \left( \sum_U y_k \right)^2 \quad (3.4.10)$$

**Prueba.** Partiendo del resultado 2.2.2., se tiene que

$$Var(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum \sum_U \Delta_{kl} \frac{y_k}{\pi_k} \frac{y_l}{\pi_l} \quad (3.4.11)$$

$$= \sum \sum_U (\pi_{kl} - \pi_k \pi_l) \frac{y_k}{\pi_k} \frac{y_l}{\pi_l} \quad (3.4.12)$$

$$= \sum \sum_U \left( \frac{\pi_{kl}}{\pi_k \pi_l} - 1 \right) y_k y_l \quad (3.4.13)$$

$$= \sum \sum_U \frac{\pi_{kl}}{\pi_k \pi_l} y_k y_l - \sum \sum_U y_k y_l \quad (3.4.14)$$

$$= \sum \sum_U \frac{\pi_{kl}}{\pi_k \pi_l} y_k y_l - \left( \sum_U y_k \right)^2 \quad (3.4.15)$$

En donde se utiliza el hecho de que

$$\sum \sum_U y_k y_l = \sum \sum_{k \neq l} y_k y_l + \sum_U y_k^2 = \left( \sum_U y_k \right)^2 \quad (3.4.16)$$

■

**Resultado 3.4.4.** Para el diseño de muestreo sistemático, el estimador de Horvitz-Thompson y su varianza están dados por:

$$\hat{t}_{y,\pi} = at_{sr}, \quad (3.4.17)$$

con  $t_{sr} = \sum_{k \in S_r} y_k$ , y

$$Var_{SIS}(\hat{t}_{y,\pi}) = a \sum_{r=1}^a (t_{sr} - t)^2 \quad (3.4.18)$$

En este caso no existe estimador de la varianza.

**Prueba.** De la definición del estimador de Horvitz-Thompson y dado que las probabilidades de inclusión de primer orden son todas iguales al valor  $1/a$ , entonces

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_{S_r} \frac{y_k}{\pi_k} = at_{sr} \quad (3.4.19)$$

Utilizando los dos anteriores resultados, se sigue que

$$Var(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum \sum_U \frac{\pi_{kl}}{\pi_k \pi_l} y_k y_l - \left( \sum_U y_k \right)^2 \quad (3.4.20)$$

$$= a \sum_{r=1}^a \left( \sum_{s_r} \sum_{s_r} y_k y_l \right) - t^2 \quad (3.4.21)$$

$$= a \sum_{r=1}^a \left( \sum_{k \in s_r} y_k \sum_{l \in s_r} y_l \right) - t^2 \quad (3.4.22)$$

$$= a \sum_{r=1}^a t_{s_r}^2 - t^2 \quad (3.4.23)$$

$$= a \sum_{r=1}^a (t_{s_r} - \bar{t})^2 \quad (3.4.24)$$

donde

$$\bar{t} = \sum_{r=1}^a \frac{t_{s_r}}{a} = \frac{t}{a} \quad (3.4.25)$$

Por la definición 3.4.1, algunas probabilidades de inclusión de segundo orden son nulas, por ell no se tiene un estimador de la varianza. ■

Más allá de que los principios del estimador de Horvitz-Thompson no permitan estimar la varianza para este diseño, la razón genérica radica en que, de una forma u otra, se está seleccionando uno y sólo un grupo de elementos y se calcula un sólo total para el grupo. Como la selección es de sólo un grupo, no se tiene un marco de comparación y no se puede llegar a una estimación de la varianza.

### 3.4.3 Optimalidad de la estrategia

Una vez que la estrategia de muestreo queda definida, es indispensable tocar el tema de la configuración de los valores de la característica de interés mediante el ordenamiento particular que se tiene en el marco de muestreo. Bautista (1998) utiliza el siguiente esquema para explicar la eficiencia de esta estrategia de muestreo.

Tabla 3.7: *Configuración de totales por grupo.*

Grupo	$s_1$	$\dots$	$s_r$	$\dots$	$s_a$
	$y_1$		$y_r$		$y_k$
Valor de	$y_{1+a}$		$y_{r+a}$		$y_{2a}$
la	$y_{1+2a}$		$y_{r+2a}$		$y_{3a}$
característica	$\dots$		$\dots$		$\dots$
	$y_{1+(n-1)a}$		$y_{r+(n-1)a}$		$y_{na}$
Total de grupo	$t_{s_1}$	$\dots$	$t_{s_r}$	$\dots$	$t_{s_a}$

Este diseño de muestreo puede resultar más eficiente que el diseño de muestreo aleatorio simple, dependiendo del ordenamiento del marco de muestreo. Es usado para palear las posibles imperfecciones generadas por un diseño de muestreo aleatorio simple. Por ejemplo, puede resultar que en una muestra simple, todos los elementos de la muestra seleccionada compartan una característica latente que perjudique la precisión de las estimaciones. En el caso de una población de personas, puede resultar que una muestra simple sólo incluya hombres. Cuando se sabe que el marco de muestreo está ordenado



de manera aleatoria, es recomendable utilizar el diseño de muestreo aleatorio simple, porque asegura una muestra bien mezclada. Por ejemplo, si el marco de muestreo está ordenado alfabéticamente, es casi seguro que se obtendrá una muestra que sea representativa de la población, puesto que la posición alfabética no debería estar asociada con la característica de interés.

Además, mediante este diseño de muestreo, no es necesario poseer un marco de muestreo de forma física para poder realizar una muestra probabilística. Sin embargo, se debe tener cuidado con la especificación del diseño, pues como lo afirma Lohr (2000) no es lo mismo seleccionar una de cada 10 personas que entran a una biblioteca que seleccionar una de cada 10 personas que salen de un avión. En el segundo caso, existe de forma implícita, un marco de muestreo.

Como se verá más adelante, el diseño de muestreo sistemático puede ser más preciso que el diseño de muestreo aleatorio simple cuando los grupos  $s_r$  poseen mucha variación interna. De manera contraria, si el valor de los elementos dentro de los grupos proporciona la misma información, entonces la eficiencia del diseño se verá disminuida significativamente con respecto al diseño aleatorio simple.

La figura 3.4 muestra los tres casos más particulares en el uso de esta estrategia de muestreo cuyas características son las siguientes:

1. **Ordenamiento aleatorio:** cuando el ordenamiento del marco de muestreo no está relacionado con la característica de interés, la eficiencia de este diseño es comparable con la de muestreo aleatorio simple. Ordenamiento por orden alfabético.
2. **Ordenamiento lineal:** cuando el ordenamiento del marco de muestreo es tal que se puede observar una tendencia lineal, entonces la selección de una muestra sistemática obliga a que los valores de los elementos incluidos tengan una alta dispersión haciendo que el comportamiento de los grupos formados sea heterogéneo con respecto al valor de la característica de interés. Ordenamiento de registros contables.
3. **Ordenamiento periódico:** si la población es tal que se observa un patrón de tipo periódico, el muestreo sistemático puede arrojar peores resultado que una muestra aleatoria simple pues si el intervalo de muestreo coincide con el patrón de periodicidad, la muestra seleccionada incluiría elementos cuyos valores de la característica de interés serían muy parecidos. Una muestra seleccionada de esta manera no sería representativa de la población. En algunos casos es posible encontrar poblaciones con este tipo de comportamiento periódico; por ejemplo, el flujo vehicular durante las 24 horas del día o las ventas en negocios durante cierta temporada del año.

### Descomposición de la varianza

Algunos críticos de la teoría del muestreo han querido separar el pensamiento estadístico de la metodología de estudios por muestreo. Lo anterior sumado a la falta de preparación del usuario del muestreo ha abierto una brecha entre dos mundos. La verdad es que la estadística sin muestreo no está completa y viceversa Kish (1965). En estos apartes, debemos considerar uno de los resultados más importantes de la estadística que ha permitido el desarrollo de la misma en diversos campos de la vida práctica.

**Resultado 3.4.5.** *Suponga que la población se divide en  $a$  grupos, de tal forma que existen  $n$  elementos por grupo y el tamaño poblacional toma la forma  $N = an$ , entonces*

$$(N - 1)S_{y_U}^2 = \underbrace{\sum_U (y_k - \bar{y}_U)^2}_{SCT} = \underbrace{\sum_{r=1}^a \sum_{s_r} (y_{rk} - \bar{y}_{s_r})^2}_{SCD} + \underbrace{\sum_{r=1}^a n (\bar{y}_{s_r} - \bar{y}_U)^2}_{SCE} \quad (3.4.26)$$

La sigla **SCT** se refiere a la suma de cuadros del total de la población y no es otra cosa que el numerador en la fórmula del estimador de la varianza. El anterior resultado es importante porque

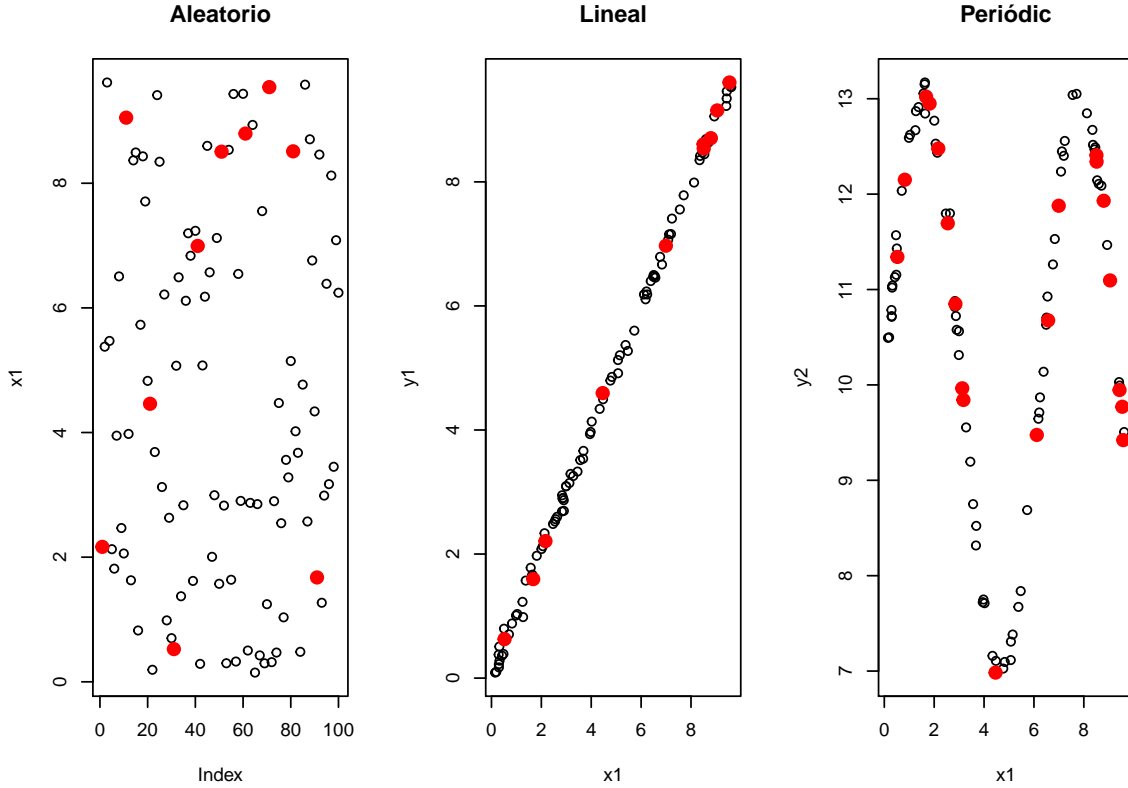


Figura 3.4: *Casos de ordenamiento en muestreo sistemático.*

permite descomponer la suma de cuadrados total en dos cantidades. Primero, **SCD** que denota la suma de cuadrados dentro (al interior) de los grupos y segundo, **SCE** que hace referencia a la suma de cuadrados entre los grupos. Por supuesto, la varianza como parámetro poblacional es fija, por tanto si

1. **SCE** es alta, entonces **SCD** es baja, indicando así que los grupos están contruidos de tal forma que resultan ser muy heterogéneos entre sí, pero dentro de ellos existe homogeneidad.
2. **SCE** es baja, entonces **SCD** es alta, lo que quiere decir que los grupos son muy disímiles en su interior, pero entre ellos tienen un comportamiento similar.

Esta representación de la descomposición de la varianza, se puede ver claramente en una tabla de ANOVA (análisis de varianza, por sus siglas en inglés), de la siguiente manera.

Desde un punto de vista totalmente pragmático, la estrategia de muestreo tendrá un mejor desempeño cuando la variabilidad total entre los grupos sea mínima y la variabilidad dentro de los grupos sea máxima. El siguiente resultado da una mejor comprensión de la descomposición de la varianza en los grupos. Es decir, la varianza del estimador de Horvitz-Thompson, bajo muestreo sistemático, será cercana a cero cuando el ordenamiento de los grupos en la población es tal que los totales  $t_{s_r}$  con  $r = 1, \dots, a$  son similares

$$t_{s_1} \approx t_{s_2} \approx \dots \approx t_{s_a} \approx \bar{t} \quad (3.4.27)$$

Tabla 3.8: *Tabla de ANOVA inducida por el muestreo sistemático.*

Fuente	gl	Suma de cuadrados	Cuadrado medio
Entre	$a - 1$	$SCE = \sum_{r=1}^a n (\bar{y}_{s_r} - \bar{y}_U)^2$	$\frac{SCE}{a - 1}$
Dentro	$N - a$	$SCD = \sum_{r=1}^a \sum_{s_r} (y_{rk} - \bar{y}_{s_r})^2$	$\frac{SCD}{N - a}$
Total	$N - 1$	$SCT = \sum_U (y_k - \bar{y}_U)^2$	$s_{yU}^2$

**Resultado 3.4.6.** Sin pérdida de generalidad, considere que el tamaño muestral es tal que  $N = na$ , entonces la varianza del estimador de Horvitz-Thompson bajo un diseño de muestreo sistemático toma la siguiente forma

$$Var_{SIS}(\hat{t}_{y,\pi}) = N \sum_{r=1}^a n (\bar{y}_{s_r} - \bar{y}_U)^2 = N(SCE) \quad (3.4.28)$$

**Prueba.** Partiendo de la definición de la varianza del estimador de Horvitz-Thompson en muestreo sistemático, se tiene que

$$\begin{aligned}
 Var_{SIS}(\hat{t}_{y,\pi}) &= a \sum_{r=1}^a (t_{s_r} - \bar{t})^2 \\
 &= \frac{N}{n} \sum_{r=1}^a (n\bar{y}_{s_r} - n\bar{y}_U)^2 \\
 &= \frac{N}{n} \sum_{r=1}^a n^2 (\bar{y}_{s_r} - \bar{y}_U)^2 \\
 &= N \sum_{r=1}^a n (\bar{y}_{s_r} - \bar{y}_U)^2 = N(SCE)
 \end{aligned}$$

■

Por tanto, se quiere que toda la variabilidad esté por dentro de cada uno de los grupos.

**Definición 3.4.2.** Se define el coeficiente de correlación intra-clase como

$$\rho = 1 - \frac{n}{n-1} \frac{SCD}{SCT} \quad (3.4.29)$$

Esta medida de correlación entre los pares de elementos de los grupos formados toma un valor máximo igual a uno cuando **SCE** es nula y toma un valor mínimo igual a  $-\frac{1}{n-1}$  cuando **SCE** es máxima. En particular, es deseable para esta estrategia que  $\rho$  tome valores cercanos a cero.

**Resultado 3.4.7.** Utilizando la relación 3.4.26  $SCT = SCE + SCD$  se tiene que

$$SCE = SCT \left[ (\rho - 1) \frac{n-1}{n} + 1 \right] \quad (3.4.30)$$

**Prueba.** De la definición del coeficiente de correlación intra-clase se tiene que

$$\begin{aligned}
 (\rho - 1) \frac{n-1}{n} + 1 &= 1 - \frac{SCD}{SCT} \\
 &= \frac{SCE}{SCT}
 \end{aligned}$$

por tanto al despejar  $SCE$  se tiene el resultado. ■

**Resultado 3.4.8.** *Con el anterior resultado no es difícil verificar que la varianza del estimador de Horvitz-Thompson bajo muestreo sistemático se puede escribir como*

$$Var_{SIS}(\hat{t}_{y,\pi}) = \underbrace{\frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{yU}^2}_{Var_{MAS}(\hat{t}_{y,\pi})} \left\{ \frac{N-1}{N-n} [1 + (n-1)\rho] \right\} \quad (3.4.31)$$

**Prueba.** Partiendo de la última expresión tenemos que

$$\begin{aligned} \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) S_{yU}^2 \left\{ \frac{N-1}{N-n} [1 + (n-1)\rho] \right\} &= \frac{N}{n} SCT [1 + (n-1)\rho] \\ &= N(SCT) \left[ 1 - \frac{SCD}{SCT} \right] \\ &= N(SCE) \\ &= Var_{SIS}(\hat{t}_{y,\pi}) \end{aligned}$$

que coincide con la varianza del estimador de Horvitz-Thompson en muestreo sistemático ■

Nótese que la primera parte de la anterior ecuación se refiere al valor del estimador de Horvitz-Thompson bajo un diseño de muestreo aleatorio simple sin reemplazo. Siguiendo esta idea, el efecto de diseño está dado por el siguiente resultado.

**Resultado 3.4.9.** *El efecto de diseño de la estrategia de muestreo que utiliza un diseño sistemático y el estimador de Horvitz-Thompson está dado por*

$$Def = \frac{Var_{SIS}\hat{t}_{\pi}}{Var_{MAS}\hat{t}_{\pi}} = \frac{N-1}{N-n} [1 + (n-1)\rho] \quad (3.4.32)$$

Dado el efecto de diseño, se concluye que esta estrategia de muestreo es

1. Igual de eficiente al muestreo aleatorio simple sí  $\rho = \frac{1}{1-N}$ .
2. Menos eficiente que el muestreo aleatorio simple sí  $\rho > \frac{1}{1-N}$ .
3. Más eficiente que el muestreo aleatorio simple sí  $\rho < \frac{1}{1-N}$ .

**Prueba.** La demostración es inmediata teniendo en cuenta el anterior resultado. ■

### 3.4.4 Diseño de muestreo $q$ -sistemático

Cuando la periodicidad es un problema o cuando se quiere tener un estimativo insesgado de la varianza del estimador de Horvitz-Thompson, Mahalanobis (1946) propone el uso de muestras sistemáticas interpenetradas. Este método consiste en seleccionar, no una, sino  $q$  muestras sistemáticas. De esta manera se seleccionan  $q$  arranques aleatorios en grupos de tamaño  $aq$ , de tal manera que el tamaño poblacional se escribe como  $N = a\frac{n}{q} + c$ .

**Definición 3.4.3.** *El diseño de muestreo sistemático con  $q$  réplicas está definido como*

$$p(s) = \frac{1}{\binom{a}{q}} \quad \text{para todo } s \in Q_r \quad (3.4.33)$$

con  $Q_r$  definido en 3.4.4.

Por supuesto, la cardinalidad del soporte es  $\#Q_r = \binom{a}{q}$ , por tanto este diseño de muestreo cumple las propiedades del capítulo anterior. Teniendo en cuenta que se han formado  $a$  grupos, entonces el diseño de muestreo  $q$ -sistemático puede ser visto como un diseño MAS de tamaño de muestra igual a  $q$  de los totales de todos los grupos. Una vez más, estos grupos también pueden ser vistos como conglomerados.

**Resultado 3.4.10.** *Para un diseño de muestreo sistemático, las probabilidades de inclusión de primer y segundo orden están dadas por*

$$\pi_k = \frac{q}{a} \quad (3.4.34)$$

$$\pi_{kl} = \begin{cases} \frac{q}{a} & \text{si } k \text{ y } l \text{ pertenecen a } s_r \\ \frac{q}{a} \frac{q-1}{a-1} & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.4.35)$$

respectivamente.

**Resultado 3.4.11.** *Para el diseño de muestreo sistemático con  $q$  réplicas, el estimador de Horvitz-Thompson y su varianza están dados por:*

$$\hat{t}_{y,\pi} = \frac{a}{q} \sum_S t_{sr} \quad (3.4.36)$$

$$Var_{SIS}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{a^2}{q} \left(1 - \frac{q}{a}\right) S_{t_{sr},U}^2 \quad (3.4.37)$$

$$\widehat{Var}_{SIS}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{a^2}{q} \left(1 - \frac{q}{a}\right) S_{t_{sr},s}^2 \quad (3.4.38)$$

respectivamente, con  $S_{t_{sr},U}^2$  y  $S_{t_{sr},s}^2$  el estimador de la varianza de los totales de la característica de interés  $y$  en cada grupo  $s_r$  del universo y en la muestra. Nótese que  $\hat{t}_{y,\pi}$  es insesgado para el total poblacional  $t_y$  de la característica de interés  $y$ , y que  $\widehat{Var}_{SIS}(\hat{t}_{y,\pi})$  es insesgado para  $Var_{SIS}(\hat{t}_{y,\pi})$ .

Al respecto de esta estrategia, el lector debe notar que:

- La varianza del estimador de Horvitz-Thompson bajo el diseño de muestro  $q$ -sistemático crece cuando se aplica a un universo que está ordenado igualmente de forma sistemática.
- La varianza del estimador de Horvitz-Thompson bajo el diseño de muestro  $q$ -sistemático depende del ordenamiento de los valores de la característica de interés por lo que puede suceder que ésta no sea monótonamente decreciente en función del tamaño de muestra.
- El efecto de la correlación intra-clase tiene una gran repercusión en el tamaño de muestra; si existe una alta correlación intra-clase entonces el tamaño de muestra debe ser mayor para tener un *c.v.e* pequeño y viceversa.
- En estudios de tipo electoral se dice que un candidato tiene alta correlación intra-clase (por ejemplo en los barrios) cuando la imagen del candidato está polarizada. Es decir, la mayoría de votación en determinado barrio es muy alta por el candidato o muy baja. Por otro lado, se dice que la campaña electoral tiene baja correlación intra-clase cuando la votación en los barrios no es ni muy baja ni muy alta.

### 3.4.5 Marco y Lucy

En nuestro intento de obtener estimaciones precisas para la evaluación del comportamiento del sector industrial en lo corrido del último año fiscal, hemos notado que el marco de muestreo está ordenado de manera alfanumérica en orden ascendente por el rótulo de identificación industrial. Además, se sabe que el número de identificación de cada empresa no tiene una secuencia específica, sino que es asignado de acuerdo a la fecha de registro de la empresa. De tal forma, la primera empresa en ser registrada ante el organismo gubernamental competente es la identificada con el número de identificación **AB001** y la última empresa en ser registrada es la identificada con el número **AB987**.

Nótese que las características de interés son Ingreso, número de empleados e impuestos declarados en el último año fiscal y se supone, de manera correcta, que estas características no tienen ninguna relación con la fecha de registro de la empresa. Así, puede suceder que una empresa joven, tenga unos altos réditos, pocos empleados y una alta declaración de impuestos, pero puede suceder lo contrario; de hecho, este comportamiento está sujeto a la estrategia de *marketing* utilizada en cada periodo comercial y no a la antigüedad del negocio. Por las anteriores razones, se supone que el ordenamiento del marco de muestreo es completamente aleatorio.

Se ha decidido que la población va a ser particionada en seis grupos, de tal forma que el tamaño efectivo de muestra será 399 o 400. El marco de muestreo es cargado en el ambiente de R.

```
data(BigLucy)
attach(BigLucy)
```

```
N <- dim(BigLucy)[1]
a <- 40
floor(N/a)

## [1] 2132
```

El procedimiento que se sigue es la creación de los grupos sistemáticos. Esto puede realizarse con la función `(array(1:a,N))` que permite la creación de la secuencia **1,2,3,4,5,6,1,2,3,4,5,6,1,2...**; sin embargo, es indispensable definir este arreglo como un factor, es decir como una variable de tipo categórica nominal cuyos rótulos significan la pertenencia de un individuo a un grupo.

La selección de la muestra se realiza mediante la función `S.SY` del paquete `TeachingSampling` cuyos argumentos son `N`, el tamaño de la población y `a`, el número de grupos. Esta función sigue el algoritmo secuencial descrito en esta estrategia de muestreo y lo que hace es aleatoriamente asignar un arranque aleatorio y saltar, en este caso, de seis en seis elementos hasta barrer toda la lista. El resultado de la función es un listado de índices que aplicados a la población resulta en los valores de las características de interés de los elementos incluidos en la muestra realizada.

```
sam <- S.SY(N, a)
muestra <- BigLucy[sam,]
attach(muestra)
```

```
head(muestra)
```

##	ID	Ubication	Level	Zone	Income	Employees	Taxes
## 2	AB0000000002	C0011268K0290629	Small	County1	329	19	4
## 42	AB0000000042	C0141009K0160888	Small	County1	444	34	8

```
## 82 AB0000000082 C0170801K0131096 Small County1 238 83 2
## 122 AB0000000122 C0059592K0242305 Small County1 270 56 3
## 162 AB0000000162 C0041928K0259969 Small County1 310 90 4
## 202 AB0000000202 C0274937K0026960 Small County1 290 57 3
## SPAM ISO Years Segments
## 2 yes no 18 County1 1
## 42 yes no 24 County1 5
## 82 yes no 29 County1 9
## 122 no no 20 County1 13
## 162 yes no 35 County1 17
## 202 yes no 22 County1 21

n <- dim(muestra)[1]
n

## [1] 2133
```

En el anterior caso particular, el arranque aleatorio fue igual a tres; por tanto, la muestra está conformada por los elementos **3, 9, ..., 2385 y 2391** del marco de muestreo. Una vez recolectada la información de la muestra, se procede a realizar la estimación mediante el uso de la función<sup>4</sup> **E.SY** del paquete **TeachingSampling** cuyos argumentos son **N**, **a** y un conjunto de datos conteniendo la información de las características de interés para cada elemento en la muestra.

```
estima <- data.frame(Income, Employees, Taxes)
E.SY(N, a, estima)
```

Los resultados de la estimación se muestran en la tabla 3.9. Es de considerar que la eficiencia de esta estrategia de muestreo es mucho mayor a la de una estrategia que utilice un diseño de muestreo aleatorio simple. Nótese que los coeficientes de variación son mucho menores y también, aunque este es un argumento un poco más débil, la desviación relativa es menor.

	N	Income	Employees	Taxes
Estimation	85320.00	36497640.00	5397600.00	1026360.00
Standard Error	0.00	502285.99	62422.05	37756.97
CVE	0.00	1.38	1.16	3.68
DEFF		1.00	1.00	1.00

Tabla 3.9: *Estimaciones para el diseño de muestreo sistemático*

Es hora de preguntarse, ¿por qué los resultados de las estimaciones son mejores que en otro tipo de estrategias de muestreo? Vamos a realizar un procedimiento de evaluación, puramente académico, y vamos a suponer que tenemos acceso a la información de la característica de interés a nivel poblacional.

En primer lugar, se realiza un análisis de varianza para obtener la descomposición de las sumas de cuadrados para la característica de interés **Income**. Para esto usamos la función **lm** que relaciona a la variable de interés con un factor de agrupamiento. La variable grupo fue creada como un vector de cinco niveles y puede ser usada en este caso. Aplicando la función **anova** al modelo, se obtiene una tabla de sumas de cuadrados.

<sup>4</sup>Dado que no existe el estimador genérico para la varianza del estimador de Horvitz-Thompson, esta función utiliza una aproximación conservadora de la varianza suponiendo que se realizó un muestreo aleatorio simple.

```
data(BigLucy)
attach(BigLucy)
```

```
N<-dim(BigLucy)[1]
n<-2133
a<-floor(N/n)
c<-N-floor(N/n)*n
a*n+c

## [1] 85296

grupo<-as.factor(array(1:a,N))
anova(lm(Income~grupo))

## Analysis of Variance Table
##
## Response: Income
##           Df      Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
## grupo      38       58913    1550    0.02    1
## Residuals 85257 6029937065    70727
```

Siguiendo a Dalgaard (2008), en la mayoría de textos estadísticos (incluyendo el que el lector tiene en sus manos) las sumas de cuadrados son rotuladas como **SCD**, **SCE** y **SCT**. Sin embargo, R usa una rotulación diferente. La variación **entre** los grupos es rotulada con el nombre del factor de agrupación, en este caso **grupo**. La variación **dentro** de los factores de agrupación es rotulada como **Residuals**. Por tanto, se observa que la variación total se encuentra dentro de los grupos; mientras que existe una baja variación entre los grupos. Esto es bueno para efectos de la eficiencia de la estrategia.

Por un lado, al observar la gráfica de la característica de interés con respecto al ordenamiento natural del marco de muestreo, no es posible identificar un patrón lineal o de periodicidad, cuando realizamos el gráfico con respecto a los grupos, nos damos cuenta de que dentro de ellos existe una muy alta variabilidad y más aún, los cinco grupos tiene un comportamiento parecido entre ellos. El código necesario para la creación de este gráfico está dado a continuación.

Por otro lado, el ordenamiento aleatorio se observa muy claramente en la figura 3.6., en dónde los puntos marcados corresponden a los elementos seleccionados. Nótese la buena dispersión de la muestra en la población, haciéndola representativa. El código necesario para la creación de este gráfico es el siguiente.

Es claro que esta estrategia de muestreo resulto más eficiente que la estrategia de muestreo aleatorio simple. Pero, ¿cuánto más eficiente?. Con unos simple cálculos algebraicos se obtiene un coeficiente de correlación intra-clase muy cercano a cero y esto es bueno puesto que cumple con los requerimientos en la definición de  $\rho$ .

```
SCD <- anova(lm(Income~grupo))$Sum[1]
SCE <- anova(lm(Income~grupo))$Sum[2]
rho <- 1 - (n / (n-1)) * (SCE / (SCD + SCE))
rho

## [1] -0.00046

rho > 1 / (1 - N)
```



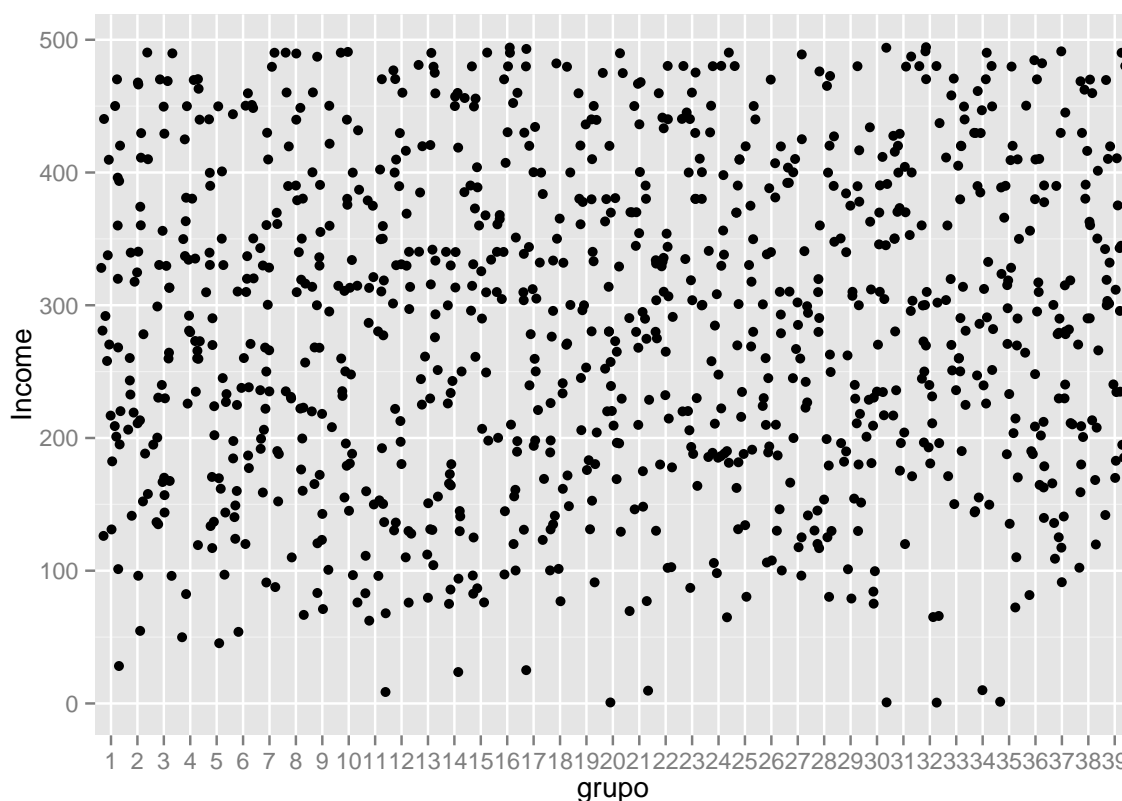


Figura 3.5: Distribución de la característica *Income* con respecto a los grupos creados en el muestreo sistemático.

```
## [1] FALSE
```

Sin embargo, lo verdaderamente asombroso es que la ganancia en eficiencia al usar este diseño es de veintinueve veces puesto que el efecto de diseño es aproximadamente 0.02.

```
VarHT <- N * SCD
VarHT

## [1] 5025031348

Deff <- (N - 1) * (1 + (n - 1) * rho) / (N - n)
Deff

## [1] 0.021
```

Los anteriores diseños de muestreo pertenecen al grupo de los diseños de probabilidad de inclusión constante. En el siguiente capítulo veremos diseños con probabilidad de inclusión proporcional al tamaño que hace uso de información auxiliar continua en el marco de muestreo.

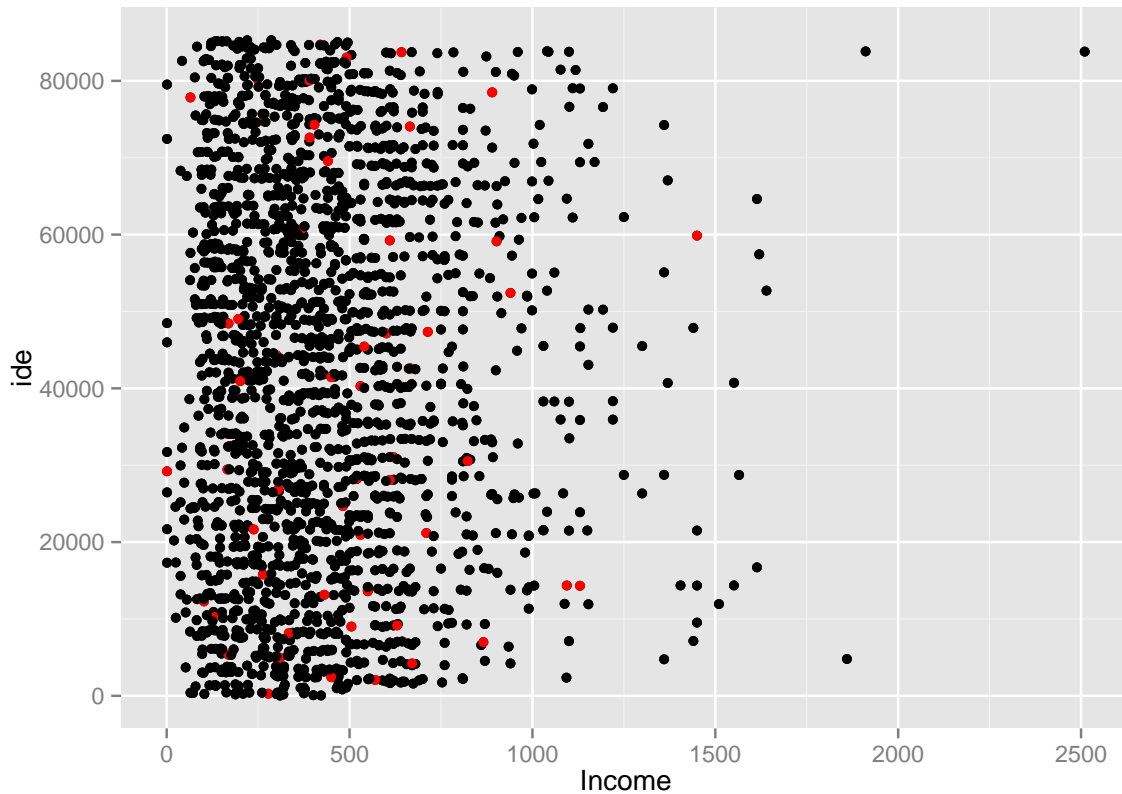


Figura 3.6: Casos seleccionados en muestreo sistemático.

## 3.5 Ejercicios

3.1 Suponga una población de 10 elementos  $U = \{e_1, e_2, \dots, e_{10}\}$ .

- Seleccione una muestra mediante un diseño Bernoulli con probabilidad de inclusión  $\pi = 0.4$ , utilizando el algoritmo de la sección 3.1.1. y teniendo en cuenta que para cada elemento en la población se obtuvo el siguiente conjunto de números aleatorios uniformes

$$\varepsilon = \{0.152, 0.158, 0.614, 0.593, 0.140, 0.851, 0.803, 0.996, 0.433, 0.790\}$$

- Otra manera de seleccionar una muestra Bernoulli es generando un sólo número aleatorio de una distribución  $\text{Binomial}(N, \pi)$ ; este valor generado es el tamaño de muestra  $n(S)$  y con ayuda del marco de muestreo se selecciona una muestra aleatoria simple de tamaño  $n(S)$ . Suponiendo que la realización de  $\text{Binomial}(10, 0.4)$  fue  $n(s) = 5$ , utilice el algoritmo coordinado negativo para la selección de una muestra, teniendo en cuenta que para cada elemento en la población se obtuvo el siguiente conjunto de números aleatorios uniformes

$$\xi = \{0.370, 0.561, 0.064, 0.412, 0.952, 0.461, 0.256, 0.275, 0.213, 0.443\}$$

3.2 Complete el cálculo léxico-gráfico del ejemplo 3.1.1.

3.3 En un estudio de calidad de vida en cárceles, se utilizó un diseño de muestreo Bernoulli con probabilidad de inclusión  $\pi = 0.15$  para seleccionar una muestra de reclusos. En la penitenciaría

Característica	$\sum_s y_k$	$\sum_s y_k^2$
CVDP	5412	95299
OTMA	82503	604926

hay 1243 reclusos y se observaron las características de interés **CVDP** y **OTMA** para los presos incluidos en la muestra. Además se obtuvieron los siguientes resultados

- Utilice el estimador de Horvitz-Thompson para calcular una estimación del total poblacional, el coeficiente de variación estimado y un intervalo de confianza al 95 % para estas características de interés.
- Utilice el estimador de Horvitz-Thompson para calcular una estimación de la media poblacional, el coeficiente de variación estimado y un intervalo de confianza al 95 % para estas características de interés.
- Si el tamaño de muestra efectivo fue 191, utilice el estimador alternativo para calcular una estimación del total poblacional y de la media poblacional.

3.4 Suponga una población de 12 elementos  $U = \{e_1, e_2, \dots, e_{12}\}$ . Seleccione una muestra aleatoria simple sin reemplazo de tamaño  $n = 4$  utilizando el algoritmo de Fan-Muller-Rezucha teniendo en cuenta que para cada elemento en la población se obtuvo el siguiente conjunto de números aleatorios uniformes

$$\xi = \{0.787, 0.946, 0.766, 0.338, 0.520, 0.849, 0.828, 0.165, 0.416, 0.105, 0.069, 0.853\}$$

3.5 Complete el cálculo léxico-gráfico del ejemplo 3.2.2.

3.6 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «En muestreo aleatorio simple, para la estimación de un total poblacional, el estimador de Horvitz-Thompson coincide con el estimador alternativo».

3.7 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «En muestreo aleatorio simple, para la estimación de un total en dominios de interés, se cumple siempre que  $\sum_{d=1}^D \hat{t}_{yd,\pi} > \hat{t}_{y,\pi}$ ».

3.8 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «En muestreo aleatorio simple, el coeficiente de variación estimado del estimador de Horvitz-Thompson para el total poblacional es menor que el coeficiente de variación estimado del estimador de Horvitz-Thompson para la media poblacional».

3.9 En un estudio de satisfacción empresarial en una entidad prestadora de salud que sirve a 748 asociados, se quiere averiguar el promedio del número de horas al mes (**NHM**) que los asociados permanecen en consulta médica. Para esto se planea un muestreo aleatorio simple pues se conoce que, para este caso particular, una aproximación para la varianza de esta característica de interés es de 3.4839 y para el coeficiente de variación es de 0.5324.

- Con una confianza del 95 %, determine el tamaño de muestra mínimo para estimar el parámetro de interés con un error absoluto no mayor 15 minutos.
- Con una confianza del 95 %, determine el tamaño de muestra mínimo para estimar el parámetro de interés con un error relativo no mayor a 2 %.

3.10 Demuestre las siguientes igualdades

$$(n-1)S_{yS}^2 = \sum_{k \in S} (y_k - \bar{y}_S)^2 = \sum_{k \in S} y_k^2 - \frac{(\sum_{k \in S} y_k)^2}{n}$$

$$(N-1)S_{yU}^2 = \sum_{k \in U} (y_k - \bar{y}_U)^2 = \sum_{k \in U} y_k^2 - \frac{(\sum_{k \in U} y_k)^2}{N}$$

3.11 Demuestre rigurosamente los resultados 3.2.7 y 3.2.8.

3.12 Para el ejercicio 3.9, suponga que se deciden realizar  $n = 50$  entrevistas y que se obtuvo que  $\sum_s y_k = 178$  y  $\sum_s y_k^2 = 826$ . A continuación se presenta una tabla de frecuencias de las observaciones

NHM	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Frecuencia	1	5	13	9	7	4	6	4	1

- Obtenga una estimación de Horvitz-Thompson para el total de horas mensuales que los asociados permanecen en consulta médica, reporte el coeficiente de variación estimado y un intervalo de confianza al 95 %.
- Obtenga una estimación de Horvitz-Thompson para el promedio de horas mensuales que los asociados permanecen en consulta médica, reporte el coeficiente de variación estimado y un intervalo de confianza al 95 %.
- Obtenga una estimación de Horvitz-Thompson para el total de asociados que permanecen en consulta médica menos (estrictamente) de cuatro horas, reporte el coeficiente de variación estimado y un intervalo de confianza al 95 %.
- Obtenga una estimación de Horvitz-Thompson para la proporción de asociados que permanecen en consulta médica, más (estrictamente) de seis horas, reporte el coeficiente de variación estimado y un intervalo de confianza al 95 %.

3.13 Complete el cálculo léxico-gráfico del ejemplo 3.3.3.

3.14 Para una población de  $N = 10$  elementos se planeó diseño aleatorio simple con reemplazo de tamaño de muestra  $m = 6$ . Complete la siguiente salida del algoritmo secuencial utilizado para la extracción de la muestra

k	nbin	pbin	nk
[1,]			0
[2,]	6	0.1111111	3
[3,]			1
[4,]	2	0.1428571	0
[5,]		0.1666667	1
[6,]	1		
[7,]	1	0.2500000	0
[8,]			0
[9,]	1		0
[10,]	1		1

3.15 Suponga que se realizó un muestreo aleatorio simple con reemplazo para la población del ejercicio 3.3.

- Utilice el estimador de Hansen-Hurwitz para obtener una estimación del total poblacional para características de interés **CVDP** y **OTMA**, reporte el coeficiente de variación estimado y un intervalo de confianza del 95 %.
- Bajo el supuesto de muestreo aleatorio simple con reemplazo, construya las probabilidades de inclusión de primer y segundo orden y utilice el estimador de Horvitz-Thompson para calcular una nueva estimación del total poblacional para las características de interés.

- 3.16 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «Para tamaños de muestra iguales, la estrategia de muestreo aleatorio simple con reemplazo junto con el estimador de Hansen-Hurwitz es siempre de menor varianza que la estrategia de muestreo aleatorio simple sin reemplazo junto con el estimador de Horvitz-Thompson».
- 3.17 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «El diseño de muestreo sistemático es de tamaño de muestra fijo».
- 3.18 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «Aunque no existe la estimación de la varianza del estimador de Horvitz-Thompson en muestreo sistemático, es siempre conveniente reemplazarla por la expresión de la varianza estimada en un diseño aleatorio simple».
- 3.19 Para estimar el total de horas diarias que los estudiantes permanecen en la biblioteca de una universidad, se utilizó un diseño de muestreo sistemático con dos arranques aleatorios. La población fue dividida en siete grupos latentes y se seleccionó una muestra simple de dos enteros entre el uno y el siete. Los enteros seleccionados son el 3, y 7. Lo anterior implica que la muestra de estudiantes, que serán entrevistados a la salida de la biblioteca, está conformada por dos grupos. A saber el grupo  $s_3$  conformado por los estudiantes 3, 10, 17, ... y el grupo  $s_7$  conformado por los estudiantes 7, 14, 21, ... Los resultados del sondeo para los dos grupos se dan a continuación

$$t_{s_3} = \sum_{s_3} y_k = 3574 \quad t_{s_7} = \sum_{s_7} y_k = 5024$$

Calcule una estimación insesgada para el número total de horas de permanencia en la biblioteca, reporte el coeficiente de variación estimado y un intervalo de confianza al 95 %.

- 3.20 Suponga una población de 9 elementos cuyos valores para la característica de interés se dan a continuación

$$\mathbf{y} = \{23, 20, 24, 31, 24, 29, 25, 33, 21\}$$

- Utilice el análisis de varianza (ANOVA) para calcular la varianza del estimador de Horvitz-Thompson en un diseño de muestreo sistemático simple con  $a = 2$  grupos.
  - Calcule el coeficiente de variación intra-clase y el efecto de diseño. Decida si, para este caso particular, el diseño sistemático es más eficiente que el diseño de muestreo aleatorio simple.
- 3.21 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «En un diseño de muestreo sistemático, si hay homogeneidad dentro de los grupos y heterogeneidad entre sus medias, entonces este diseño es menos eficiente que el diseño de muestreo aleatorio simple».



## Capítulo 4

# Muestras con probabilidades proporcionales

Es bien sabido que la estrategia de muestreo que utiliza un diseño de muestreo aleatorio simple con el estimador de Horvitz-Thompson, es una estrategia de muestreo óptima, bajo ciertas formulaciones, si se tiene un conocimiento a priori de que el comportamiento de la población es simétrico con respecto a los rótulos. En tales casos, la incorporación de información auxiliar no mejora la anterior estrategia.

Cassel, Särndal & Wretman (1976*b*)

Las estrategias de muestreo implementadas en el capítulo anterior, utilizaban métodos de selección tales que la probabilidad de inclusión o probabilidad de selección es idéntica para todos los elementos de la población y se estimaban los parámetros de interés utilizando el estimador de Hansen-Hurwitz, para diseños de muestreo con reemplazo y el estimador de Horvitz-Thompson, para diseños de muestreo sin reemplazo. Las anteriores estrategias no tienen en cuenta la variación innata de las características de interés a través de las unidades poblacionales. Por lo tanto, los anteriores estimadores, dada su construcción genérica y el principio de representatividad, tenderán a poseer una gran variación.

Raj (1968) afirma que, en cuestión de precisión, se puede tener una mayor ganancia cuando se utilizan diseños de muestreo con probabilidades desiguales. En la mayoría de los casos prácticos, la característica de interés no presenta un comportamiento uniforme con respecto a los rótulos de la población. Sin embargo, cuando el marco de muestreo disponible para la selección de la muestra contiene además de la identificación y la ubicación de los elementos en la población, una característica auxiliar continua disponible para todos los elementos de la población  $x_k \quad \forall k \in U$ , es posible utilizar diseños de muestreo que implementen métodos de selección cuyas probabilidades de selección o inclusión, dependiendo del caso, sean proporcionales al total de la característica auxiliar,  $t_x$ .

### 4.1 Diseño de muestreo de Poisson

Este diseño de muestreo es una generalización del diseño de muestreo Bernoulli, en donde las probabilidades de inclusión están dadas a priori de manera independiente para cada individuo. Brewer (2002) indica que este diseño de muestreo no tuvo originalmente ninguna implicación práctica, porque el tamaño de muestra no es fijo, sino que fue utilizado de manera teórica para describir las propiedades de otros estimadores. El primer caso práctico se dio en la selección de muestras de árboles en unidades forestales; más adelante se aplicó en el censo anual manufacturero en Estados Unidos. Aunque este

diseño de muestreo no utiliza información auxiliar para la selección de la muestra, sirve como punto de partida para examinar diseños de muestreo más complejos que sí lo utilizan.

**Definición 4.1.1.** Siendo  $\pi_k$  un número positivo, tal que  $0 < \pi_k \leq 1$ , que representa la probabilidad de inclusión del  $k$ -ésimo elemento, el diseño de muestreo Poisson se define de la siguiente manera

$$p(s) = \prod_{k \in s} \pi_k \prod_{k \notin s} (1 - \pi_k) \quad \text{para todo } s \in Q \quad (4.1.1)$$

con  $Q$ , el soporte que contiene a todas las posibles muestras sin reemplazo.

**Resultado 4.1.1.** Para este diseño de muestreo, el soporte  $Q$  tiene cardinalidad igual a

$$\#(Q) = 2^N$$

**Ejemplo 4.1.1.** En nuestra población ejemplo

$$U = \{\text{Yves, Ken, Erik, Sharon, Leslie}\}$$

Las probabilidades de inclusión  $\pi_k$  son 0.2, 0.5, 0.7, 0.5 y 0.9, respectivamente. Las posibles muestra pueden ser de tamaño 0, 1, 2, 3, 4 ó 5. La probabilidad de la muestra de tamaño 0 es

$$(1 - 0.2) \times (1 - 0.5) \times (1 - 0.7) \times (1 - 0.5) \times (1 - 0.9) = 0.006$$

Siguiendo esta misma analogía, a continuación se presenta el cálculo léxico-gráfico para las probabilidades de selección de todas las posible muestras en el soporte de este diseño de muestreo. Para las posibles muestras de tamaño 1, 4 se tiene que sus respectivas probabilidades son:

s	p(s)		s	p(s)
Yves	0.0015		Yves, Ken, Erik, Sharon	0.0035
Ken	0.006		Yves, Erik, Sharon, Leslie	0.0315
Erik	0.014		Yves, Ken, Erik, Leslie	0.0315
Sharon	0.006		Yves, Ken, Sharon, Leslie	0.0135
Leslie	0.054		Ken, Erik, Sharon, Leslie	0.126
Total	0.0815		Total	0.206

Las posibles muestras de tamaño 2, 3 y sus respectivas probabilidades son:

s	p(s)		s	p(s)
Yves, Ken	0.0015		Yves, Ken, Erik	0.0035
Yves, Erik	0.0035		Yves, Ken, Sharon	0.0015
Yves, Sharon	0.0015		Yves, Ken, Leslie	0.0135
Yves, Leslie	0.0135		Yves, Erik, Sharon	0.0035
Ken, Erik	0.014		Yves, Erik, Leslie	0.0315
Ken, Sharon	0.006		Yves, Sharon, Leslie	0.0135
Ken, Leslie	0.054		Ken, Erik, Sharon	0.014
Erik, Sharon	0.014		Ken, Erik, Leslie	0.126
Erik, Leslie	0.126		Ken, Sharon, Leslie	0.054
Sharon, Leslie	0.054		Erik, Sharon, Leslie	0.126
Total	0.288		Total	0.387

Finalmente, la muestra de tamaño 5, {Yves, Ken, Erik, Sharon, Leslie}, tiene probabilidad 0.0315. Nótese que la suma de todas las posibles muestras es  $\sum p(s) = 1$ .



### 4.1.1 Algoritmo de selección

Bautista (1998) afirma que el conocimiento a priori de las probabilidades de inclusión de los elementos es tal que, en algunas ocasiones, existen elementos de la población que deben ser observados obligatoriamente en la muestra, en estos casos el valor de la probabilidad de inclusión de estos elementos es igual a uno ( $\pi_k = 1$ ). Al subgrupo poblacional cuyos elementos tienen probabilidad de inclusión igual a uno, se le conoce como subgrupo de **inclusión forzosa**. Nótese que el algoritmo de selección de muestra utilizado debe contemplar la inclusión en todas las posibles muestras realizadas de todos los elementos del subgrupo de inclusión forzosa.

La selección de una muestra con diseño de muestreo Poisson se realiza mediante un algoritmo secuencial definido de manera similar que el algoritmo utilizado en la selección de muestras con diseño de muestreo Bernoulli.

1. Fijar para cada  $k \in U$  el valor de la probabilidad de inclusión  $\pi_k$  tal que  $0 < \pi_k \leq 1$ .
2. Obtener  $\varepsilon_k$  para  $k \in U$  como  $N$  realizaciones independientes de una variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo  $[0, 1]$ .
3. El elemento  $k$ -ésimo pertenece a la muestra con probabilidad  $\pi_k$ . Es decir, si  $\varepsilon_k < \pi_k$  el individuo  $k$ -ésimo es seleccionado.

Dado que  $\varepsilon_k \sim Unif[0, 1]$ , se tiene que  $Pr(\varepsilon_k < \pi_k) = \pi_k$  para  $k \in U$ . Por tanto, la inclusión de los individuos  $k$ -ésimo y  $l$ -ésimo, para  $k \neq l$ , es independiente; sin embargo, la distribución de  $I_k(S)$  no es de tipo Binomial puesto que las variables aleatorias  $I_k(S)$  no son idénticamente distribuidas.

**Resultado 4.1.2.** *Bajo muestreo Poisson, el tamaño de muestra  $n(S)$  es una variable aleatoria, tal que*

$$E(n(S)) = \sum_U \pi_k \quad Var(n(S)) = \sum_U \pi_k(1 - \pi_k) \quad (4.1.2)$$

**Prueba.** Utilizando el resultado 2.1.4 y las propiedades de una suma de cuadrados es suficiente probar que  $\pi_{kl} = Pr(k \in S, l \in S) = \pi_k \pi_l$  para  $k \neq l$ , lo cual se tiene de inmediato dado que las variables aleatorias  $I_k(S)$  e  $I_l(S)$  son independientes. ■

**Resultado 4.1.3.** *Para el diseño de muestreo Poisson, las probabilidades de inclusión de primer y segundo orden están dadas por:*

$$\pi_k = \pi_k \quad (4.1.3)$$

$$\pi_{kl} = \begin{cases} \pi_k & \text{para } k = l \\ \pi_k \pi_l & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4.1.4)$$

respectivamente.

### 4.1.2 El estimador de Horvitz-Thompson

**Resultado 4.1.4.** *Para el diseño de muestreo Poisson, el estimador de Horvitz-Thompson, su varianza y su varianza estimada están dados por:*

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_S \frac{y_k}{\pi_k} \quad (4.1.5)$$

$$Var_{PO}(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_U \left( \frac{1}{\pi_k} - 1 \right) y_k^2 \quad (4.1.6)$$

$$\widehat{Var}_{PO}(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_S (1 - \pi_k) \left( \frac{y_k}{\pi_k} \right)^2 \quad (4.1.7)$$

respectivamente.

**Prueba.** Utilizando el resultado 2.2.2, se sigue que la demostración es inmediata puesto que

$$\Delta_{kl} = \begin{cases} \pi_{kl} - \pi_k \pi_l = \pi_k \pi_l - \pi_k \pi_l = 0 & \text{para } k \neq l \\ \pi_{kk} - \pi_k^2 = \pi_k(1 - \pi_k) & \text{para } k = l \end{cases} \quad (4.1.8)$$

luego la doble suma en la varianza del estimador de Horvitz-Thompson pasa a ser una sola suma. La demostración para el estimador de la varianza se lleva a cabo de manera análoga. ■

**Ejemplo 4.1.2.** Para nuestra población de ejemplo  $U$ , suponga que el individuo **Erik** debe estar en la muestra seleccionada; es decir,  $\pi_{Erik} = 1$ . Por tanto, existen  $\binom{1}{1} 2^4 = 16$  posibles muestras. Si el vector de probabilidades de inclusión para cada elemento de la población está dado por  $(0.5, 0.2, 1, 0.9, 0.5)$ . Realice el cálculo léxico-gráfico del estimador de Horvitz-Thompson y compruebe el insesgamiento, la varianza y las propiedades del diseño de muestreo.

### 4.1.3 Optimalidad en la estrategia de muestreo Poisson

Como se mencionó en capítulos anteriores, una estrategia de muestreo que utilice el estimador de Horvitz-Thompson, es óptima cuando las probabilidades de inclusión inducidas por el diseño de muestreo utilizado están correlacionadas positivamente con la característica de interés; en otras palabras, cuando  $\pi_k \propto y_k$ . En este caso utópico, y si se supone que el diseño de muestreo es de tamaño de muestra fijo ( $n(S) = n$ ), el estimador de Horvitz-Thompson reproduciría el parámetro de interés  $t_y$  con varianza nula cuando las probabilidades de inclusión toman la siguiente forma  $\pi_k = n \frac{y_k}{t_y}$ . De esta forma, la estrategia utilizada sería una estrategia representativa con respecto a la variable de interés, puesto que para cualquier muestra seleccionada, el estimador de Horvitz-Thompson sería igual a  $t_y$ .

**Resultado 4.1.5.** Suponiendo un tamaño de muestra fijo, bajo un diseño de muestreo Poisson, la varianza del estimador de Horvitz-Thompson se minimiza cuando

$$\pi_k = \frac{ny_k}{\sum_U y_k} \quad (4.1.9)$$

**Prueba.** El objetivo es encontrar valores de  $\pi_k$ , tales que  $0 < \pi_k \leq 1$  que minimicen la varianza del estimador de Horvitz-Thompson bajo diseño de muestreo Poisson, lo anterior se tiene cuando se realiza un censo, es decir cuando  $\pi_k = 1$  para todo  $k \in U$ . Sin embargo, en la práctica se desea seleccionar una muestra de tamaño menor a  $N$ . Por tanto, minimizar  $Var_{PO}(\hat{t}_{y,\pi})$  es equivalente a minimizar  $\sum_U \frac{y_k^2}{\pi_k}$  sujeto a la restricción de un tamaño de muestra fijo, tal que  $\sum_U \pi_k = n$ . Luego la cantidad a minimizar está dada por el siguiente producto

$$\left( \sum_U \frac{y_k^2}{\pi_k} \right) \left( \sum_U \pi_k \right)$$

Una solución al anterior problema es utilizar la desigualdad de Cauchy-Schwartz, por tanto

$$\left( \sum_U \frac{y_k^2}{\pi_k} \right) \left( \sum_U \pi_k \right) \geq \left( \sum_U y_k \right)^2$$

Con igualdad cuando  $\frac{y_k}{\pi_k} = c$ , con  $c$  una constante. Ahora, se tiene que

$$n = \sum_U \pi_k = \sum_U \frac{y_k}{c}$$

Luego,

$$c = \sum_U \frac{y_k}{n}$$

Por tanto,

$$\pi_k = \frac{ny_k}{\sum_U y_k}$$

■

El anterior resultado es una ambigüedad puesto que con esa escogencia de las probabilidades de inclusión se asume que la característica de interés es conocida para toda la población. Si lo anterior sucede, no existiría la necesidad de estimar  $t_y$ . Sin embargo, Särndal, Swensson & Wretman (1992) aseguran que como el diseño de muestreo Poisson es de tamaño de muestra variable es ineficiente y utilizar el anterior razonamiento implicaría que el estimador de Horvitz-Thompson tome la siguiente forma

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_S \frac{y_k}{\pi_k} = \frac{t_y}{n} \sum_S 1 = t_y \frac{n(S)}{n} \quad (4.1.10)$$

Por tanto, la variación del estimador calculado en cada muestra estaría dada por la variación del tamaño de muestra esperado  $n(S)$ . El anterior razonamiento nos lleva a pensar que el estimador de Horvitz-Thompson tendría un excelente desempeño bajo diseños de muestreo tales que  $\pi_k \propto y_k$  y que induzcan muestras de tamaño fijo. Por otro lado, si el marco de muestreo tiene la virtud de adjuntar información auxiliar continua, por medio de una característica de interés  $x_k$  (en otras palabras, conocer el vector de características auxiliares  $x_1, x_2, \dots, x_N$  antes de realizar el muestreo) que esté muy bien correlacionada con la variable de interés, entonces la varianza de la estrategia de muestreo sería mínima cuando

$$\pi_k = n \frac{x_k}{\sum_U x_k} \quad (4.1.11)$$

Por otro lado, y siguiendo el mismo razonamiento que en el diseño de muestreo Bernoulli, como se tiene un marco de muestreo de elementos, entonces se conoce el tamaño poblacional  $N$ . De esta manera, un estimador para el total poblacional de la característica de interés con menor varianza es el llamado estimador alternativo dado por la expresión (2.2.18), que para el caso particular de muestreo Poisson toma la siguiente forma

$$\hat{t}_{y,alt} = \hat{t}_{y,\pi} \frac{N}{\hat{N}_\pi} \quad (4.1.12)$$

Para estimar la media poblacional, es posible utilizar este mismo razonamiento y junto con la expresión (2.2.15) resulta un estimador menos disperso

$$\tilde{y}_S = \frac{\hat{t}_{y,\pi}}{\hat{N}_\pi} \quad (4.1.13)$$

La forma estructural de los anteriores estimadores es una razón, cociente de dos cantidades aleatorias, y así se reduce parte de la variabilidad del estimador de Horvitz-Thompson que viene del hecho de que el tamaño muestral no es fijo para este diseño.

#### 4.1.4 Marco y Lucy

Aunque esta estrategia de muestreo no fue utilizada en el sentido práctico y tiene una varianza alta dado que el tamaño de muestra es variable, es posible obtener buenos resultados que incentivar el uso de las estrategias de muestreo con probabilidad proporcional al tamaño. En primer lugar, se debe suponer que el marco de muestreo contiene una característica auxiliar continua que será usada en la etapa de diseño y selección de la muestra.

Raj (1968) señala que en el caso concreto de una población agrícola, una característica auxiliar puede ser el área cultivada, para el caso de hogares, una característica auxiliar puede ser el número de personas que habitan en el hogar. Lehtonen & Pahkinen (2003) dan ejemplos claros acerca de las características auxiliares en encuestas de empresas y afirman que para este caso particular una característica auxiliar comúnmente usada es el número de empleados en la empresa; para el caso de encuestas a escuelas, una característica auxiliar es el número de alumnos. En encuestas a hospitales Bautista (1998) afirma que una característica auxiliar es el número de camas por hospital, no así el número de pacientes, pues esta última característica tiene una variación alta y está ligada a la temporada de realización de la encuesta.

Recuérdese que se quieren estimar tres totales de las características de interés Ingreso, Empleados e Impuestos del último periodo fiscal en las empresas del sector industrial. Para efectos prácticos, suponga que el marco de muestreo contiene todos los registros de cada una de las empresas del sector industrial de la característica Ingreso; de esta manera se podrá estimar el total poblacional para las características Empleados e Impuestos. Para efectos académicos, se estimará el total poblacional de la característica Ingreso, resaltando que hacerlo es una ambigüedad porque si se conocen todos los valores poblacionales de la característica de interés no hay necesidad de estimar lo que ya es conocido; sin embargo, como ejercicio académico es completamente admisible.

Con los supuestos anteriores, el marco de muestreo se carga en el ambiente de programación de R, nótese que el marco de muestreo ahora contiene cinco columnas, cuatro que se refieren a la identificación y/o ubicación geográfica y una columna que contiene los registros para la característica Ingreso.

```
data(BigLucy)
dim(BigLucy)

## [1] 85296    11
```

Las probabilidades de inclusión deben ser creadas y están dadas por (4.1.9). Nótese que se debe fijar un tamaño esperado de muestra. Para que los resultados sean comparables, se utilizará un tamaño esperado de muestra de  $n(S) = 400$ . Una vez que las probabilidades de inclusión para todas las empresas del sector industrial han sido creadas, se debe verificar que cada una de ellas sea menor a la unidad; para esto, se utiliza la función `which` que R trae implementada en su ambiente básico y cuya salida es un conjunto de índices para los cuales la instrucción dentro del paréntesis es verdadera; cuando no existe ningún índice que cumpla (`pik>1`), la función arroja la siguiente salida `integer(0)`. Sin embargo, si hubiese existido algún registro para el cual la instrucción (`pik>1`) sea cierta, se deben convertir las respectivas probabilidades de inclusión en la unidad.

```
attach(BigLucy)
N <- dim(BigLucy)[1]
n <- 2000
pik <- n * Income / sum(Income)
which(pik>1)

## integer(0)
```

```
sum(pik)

## [1] 2000
```

Nótese que la suma de las probabilidades de inclusión es igual al tamaño de muestra esperado. La correlación entre las probabilidades de inclusión inducidas mediante este diseño de muestreo Poisson es buena. Por supuesto, la correlación entre las  $\pi_k$  y la variable ingreso es uno pues las primeras son función lineal de Ingreso. Ahora, la cantidad de impuestos que las empresas del sector industrial declaran en un año fiscal, es proporcional al ingreso de las mismas; de hecho, si una empresa tiene ganancias nulas, entonces declarará impuestos nulos. Por otro lado, aunque una empresa tenga ganancias nulas, no necesariamente tendrá cero empleados; de hecho, en el sector industrial existen casos en donde una empresa con pocos empleados, tiene ingresos más altos que una empresa con muchos empleados; sin embargo, esta particularidad no se presenta de manera general, si esto fuera así, la correlación sería negativa y la característica de auxiliar Ingreso no debería ser utilizada en la estimación del total de la característica de interés Empleados.

```
cor(pik, cbind(Income, Employees, Taxes))

##      Income Employees Taxes
## [1,]      1      0.64  0.92
```

La figura 4.1 muestra el diagrama de dispersión de las tres variables de interés contra el vector de probabilidades de inclusión.

```
Datos <- data.frame(Income, Employees, Taxes, pik)
```

Para seleccionar la muestra bajo un diseño de muestreo Poisson, se utiliza la función `S.PO` del paquete `TeachingSampling`. Esta función consta de dos argumentos, `N`, el tamaño poblacional y `pik`, el vector de probabilidades de inclusión para cada elemento de la población. En nuestro caso, `pik` es el vector de probabilidades creado anteriormente; pero, en general, puede ser utilizado cualquier vector de números entre cero y uno. La función `S.PO` devuelve un conjunto de índices que aplicados a la población resulta en los valores de las características de interés para cada miembro de la muestra seleccionada.

```
sam <- S.PO(N, pik)
muestra <- BigLucy[sam,]
attach(muestra)

sam <- S.PO(N, pik)
muestra <- BigLucy[sam,]
attach(muestra)
head(muestra)

##      ID      Ubication Level   Zone Income Employees Taxes
## 41  AB0000000041 C0128042K0173855 Small County1    340      20     5
## 49  AB0000000049 C0003404K0298493 Small County1    334      16     5
## 51  AB0000000051 C0126365K0175532 Small County1    400      15     7
## 70  AB0000000070 C0091875K0210022 Small County1    330      67     4
## 191 AB00000000191 C0171744K0130153 Small County1    339      48     5
## 205 AB00000000205 C0114943K0186954 Small County1    263      56     3
##      SPAM ISO Years  Segments
```

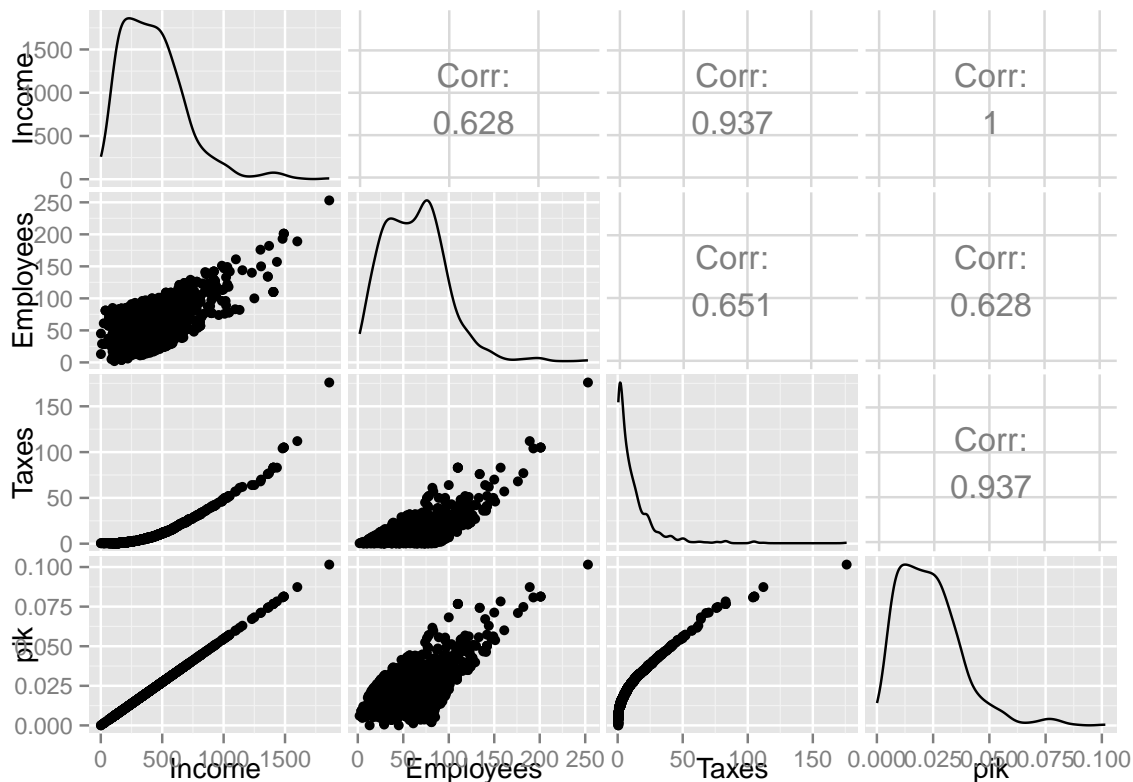


Figura 4.1: Correlación de las probabilidades de inclusión con las características de interés.

```
## 41  yes  no    24  County1 5
## 49   no  no    34  County1 5
## 51  yes  no    22  County1 6
## 70   no  no    11  County1 7
## 191 no  no    43  County1 20
## 205 yes  no    10  County1 21

n.s <- dim(muestra)[1]
n.s

## [1] 2037
```

En este caso particular, la primera empresa seleccionada es la identificada con el número AB0000000041. Nótese que el marco de muestreo incluye la característica auxiliar Ingreso y que el tamaño efectivo de muestra es 2037. Una vez que el trabajo de campo ha concluido, comienza la etapa de estimación, en donde se utilizará la función `E.PO` del paquete `TeachingSampling` que consta de dos argumentos, la matriz o vector de valores de la o las características de interés y `pik.s` los valores del vector de probabilidad de inclusión de cada uno de los elementos seleccionados en la muestra. En este caso particular se crea un conjunto de datos con la información muestral de las características de interés llamado `estima`. Nótese que la longitud del vector `pik.s` es de 2037. La función `E.PO` devuelve las estimaciones del total poblacional, la varianza estimada y el respectivo coeficiente de variación de la(s)

característica(s) de interés.

```
pik.s <- pik[sam]
estima <- data.frame(Income, Employees, Taxes)
E.PO(estima, pik.s)
```

La tabla 4.1 muestra los resultados particulares para esta estrategia de muestreo. Nótese que la característica Impuestos, tiene un menor coeficiente de variación porque está mucho mejor correlacionada con el vector de probabilidades de inclusión, mientras que la característica Empleados presenta un mayor coeficiente de variación. Desde un punto de vista completamente académico, está bien afirmar que la estrategia de muestreo utilizada puede ser optimizada si se utiliza un diseño de muestreo con probabilidades de inclusión proporcionales al tamaño de alguna característica auxiliar, pero que induzca muestras de tamaño fijo. Nótese que, aunque el vector de probabilidades de inclusión tiene una correlación de uno con respecto a la característica Income, el coeficiente de variación estimado para esta es de un 2.18 %, cifra que no es alta, pero que no paga el precio de utilizar esta información auxiliar en la etapa de diseño. Véase que los coeficientes de variación son un poco más bajos que al utilizar un diseño de muestreo Bernoulli, pero no más bajos que los obtenidos al usar un diseño de muestreo aleatorio simple.

	N	Income	Employees	Taxes
Estimation	86424.02	37312475.56	5368285.56	1027390.22
Standard Error	2318.88	813207.35	136911.96	25886.78
CVE	2.68	2.18	2.55	2.52
DEFF	Inf	1.73	3.27	0.23

Tabla 4.1: *Estimaciones para el diseño de muestreo Poisson*

## 4.2 Diseño de muestreo PPT

Siguiendo con el razonamiento que se introdujo en la sección anterior, Bautista (1998) afirma que en un diseño de muestreo con reemplazo, los valores óptimos de las probabilidades de selección para cada elemento de la población tendrían que estar dados por

$$p_k = \frac{y_k}{t_y}.$$

Por supuesto, con esta escogencia, el estimador de Hansen-Hurwitz estimaría al total poblacional de la característica de interés con varianza nula. De otra forma, el tamaño de muestra necesario para obtener una estimación con sesgo nulo sería de  $m = 1$ . Nótese que por (2.2.34), el estimador de Hansen-Hurwitz, es un promedio de  $m$  estimaciones. Con la escogencia de probabilidades de selección anterior, y con un tamaño de muestra de  $m = 1$ , se tiene que

$$\begin{aligned}\hat{t}_{y,p} &= \frac{1}{1} \sum_{i=1}^1 \frac{y_{k_i}}{p_{k_i}} \\ &= \frac{y_{k_i}}{p_{k_i}} \\ &= t_y \frac{y_{k_i}}{y_{k_i}} = t_y\end{aligned}$$

Por supuesto, desde el punto de vista práctico sería una vez más, una ambigüedad la escogencia de las anteriores probabilidades de selección. Sin embargo, si el marco de muestreo es tal que contiene el valor de una característica continua auxiliar  $x_k$  bien relacionada con la característica de interés  $y_k$  para cada elemento de la población, es posible mediante el estimador de Hansen-Hurwitz, estimar el parámetro de interés con una varianza pequeña. De hecho, entre mejor correlación exista entre  $y_k$  y  $x_k$  menor varianza tendrá el estimador de Hansen-Hurwitz.

**Definición 4.2.1.** Sea  $x_k$ , el valor de una característica auxiliar continua para el elemento  $k$ -ésimo tal que:

1.  $x_k > 0$  para todo  $k \in U$  y
2.  $x_k$  está disponible y es conocida para todos los elementos de la población.

Entonces, se define un diseño de muestreo con probabilidad de selección proporcional al tamaño de la característica auxiliar, de la siguiente manera

$$p(s) = \begin{cases} \frac{m!}{n_1(s)! \dots n_N(s)!} \prod_U \left( \frac{1}{p_k} \right)^{n_k(s)} & \text{si } \sum_U n_k(s) = m \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4.2.1)$$

Donde  $n_k(s)$  es el número de veces que el elemento  $k$ -ésimo es seleccionado en la muestra realizada  $s$  y  $p_k$  es la probabilidad de selección del elemento  $k$ -ésimo dada por

$$p_k = \frac{x_k}{t_x}. \quad (4.2.2)$$

con  $t_x$  el total poblacional de la característica auxiliar  $x$ .

**Resultado 4.2.1.** Para este diseño de muestreo, el soporte  $Q$  tiene cardinalidad igual a

$$\#(Q) = \binom{N + m - 1}{m}$$

**Resultado 4.2.2.** Dado el soporte  $Q$ , de todas las posibles muestras con reemplazo de tamaño  $m$ , se verifica que el diseño de muestreo con probabilidad de selección proporcional al tamaño de la característica auxiliar es tal que

$$\sum_{s \in Q} p(s) = 1$$

**Prueba.** Dado que

$$\sum_U p_k = \sum_U \frac{x_k}{t_x} = 1$$

entonces la demostración del resultado es inmediata haciendo uso del teorema multinomial. ■

**Resultado 4.2.3.** Para un diseño de muestreo con reemplazo y con probabilidades de selección proporcionales al tamaño de una característica de información auxiliar, las probabilidades de inclusión de primer y segundo orden están dadas por

$$\pi_k = 1 - (1 - p_k)^m \quad (4.2.3)$$

$$\pi_{kl} = 1 - (1 - p_k)^m - (1 - p_l)^m + (1 - p_k - p_l)^m \quad (4.2.4)$$

respectivamente. En donde  $p_k = \frac{x_k}{t_x}$



**Prueba.** Utilizando el resultado 2.2.9 se llega a la demostración inmediata. ■

Cuando se tienen las cantidades del resultado 3.3.3, se pueden implementar los principios del estimador de Horvitz-Thompson para estimar el total poblacional  $t_y$ ; sin embargo, el cálculo y estimación de la varianza de esta estrategia de muestreo resulta ser muy compleja computacionalmente.

### 4.2.1 Algoritmo de selección

#### Método acumulativo total

Hansen, Hurwitz & Madow (1953) plantearon este método de selección para ser utilizado junto con el estimador que lleva su nombre. Este método es conocido con el nombre de **algoritmo acumulativo total** y consiste en  $m$  selecciones independientes de tamaño 1, tal que:

- Sea

$$p_k = \frac{x_k}{t_x} \quad (4.2.5)$$

- Sea

$$T_k = \sum_{l=1}^k x_l \quad (4.2.6)$$

con  $T_0 = 0$

- Obtener  $\varepsilon$  como una realización de una variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo  $(0,1)$ .
- Seleccionar el  $k$ -ésimo elemento si  $T_{k-1} < \varepsilon T_N \leq T_k$ .

Al repetir  $m$  veces el anterior procedimiento, se ha seleccionado una muestra de un diseño con reemplazo con probabilidades de selección son proporcionales al tamaño de la característica de interés. Como este diseño de muestreo es con reemplazo, cuando existan elementos en la población cuyo valor de la característica auxiliar es muy grande, éstos elementos podrán ser seleccionados muchas veces porque sus probabilidades de selección son grandes con respecto a los demás elementos.

#### Método de Lahiri

En algunas ocasiones, cuando el tamaño poblacional  $N$  es muy grande, el anterior método resulta ineficiente. Lahiri (1951) plantea el siguiente algoritmo de selección: Siendo  $M \geq \max(x_1, \dots, x_N)$ , los siguientes dos pasos se ejecutan para seleccionar un elemento.

1. Seleccione un número  $l$  de manera aleatoria de una distribución de probabilidad uniforme discreta en el intervalo  $[1, N]$ .
2. Seleccione un número  $\eta$  de manera aleatoria de una distribución de probabilidad uniforme discreta en el intervalo  $[1, M]$ .

Si  $\eta \leq x_l$ , entonces el elemento  $l$ -ésimo es seleccionado. Si, por el contrario,  $\eta > x_l$  se repite el procedimiento hasta seleccionar una unidad. Si el tamaño de la muestra a seleccionar es  $m$ , entonces el anterior esquema se realiza  $m$  veces.

**Ejemplo 4.2.1.** Suponga que para la población de ejemplo  $U$  se tiene conocimiento de cada valor de la siguiente característica de información auxiliar correlacionada con la característica de interés.

```
U <- c("Yves", "Ken", "Erik", "Sharon", "Leslie")
x <- c(52, 60, 75, 100, 50)
x
## [1] 52 60 75 100 50
```

Para seleccionar una muestra con probabilidad proporcional a  $\mathbf{x}$ , se crean las probabilidades de selección dadas por

```
pk <- x / sum(x)
pk
## [1] 0.15 0.18 0.22 0.30 0.15
```

Para seleccionar una muestra con reemplazo de la población  $U$  mediante el método acumulativo total, el paquete **TeachingSampling** implementa la función **S.PPS** que consta de dos argumentos,  $m$  el tamaño de muestra y  $\mathbf{x}$  la característica de interés que contiene todos y cada uno de los valores correspondientes a los elementos de la población para la característica auxiliar.

```
sam <- S.PPS(3, x)
U[sam]
## [1] "Sharon" "Ken" "Yves"
```

La salida de la función **S.PPS** es un conjunto de índices (no necesariamente distintos) que aplicados a los rótulos poblacionales proporcionan la muestra seleccionada.

### 4.2.2 El estimador de Hansen-Hurwitz

Hansen & Hurwitz (1943) propusieron el siguiente estimador insesgado para el parámetro de interés  $t_y$  con ayuda de información auxiliar continua en la etapa de diseño.

**Resultado 4.2.4.** Sea  $x_k$ , el valor de una característica auxiliar continua, para un diseño de muestreo aleatorio proporcional al tamaño con reemplazo, el estimador de Hansen-Hurwitz del total poblacional  $t_y$ , su varianza y su varianza estimada están dados por:

$$\hat{t}_{y,p} = \frac{t_x}{m} \sum_{i=1}^m \frac{y_{ki}}{x_{ki}} \quad (4.2.7)$$

$$Var_{PPT}(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^N p_k \left( \frac{y_k}{p_k} - t_y \right)^2 \quad (4.2.8)$$

$$\widehat{Var}_{PPT}(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m \left( \frac{y_i}{p_i} - \hat{t}_{y,p} \right)^2 \quad (4.2.9)$$

respectivamente, con  $p_k$  dados por (4.2.2). Nótese que  $\hat{t}_{y,p}$  es insesgado para el total poblacional  $t_y$  de la característica de interés  $y$ , y que  $\widehat{Var}_{MRAS}(\hat{t}_{y,p})$  es insesgado para  $Var_{MRAS}(\hat{t}_{y,p})$ .

**Prueba.**

$$\begin{aligned}
 E\left(\frac{t_x}{m} \sum_{i=1}^m \frac{y_{ki}}{x_{ki}}\right) &= E\left(\frac{t_x}{m} \sum_U n_k(S) \frac{y_k}{x_k}\right) \\
 &= \frac{t_x}{m} \sum_U E(n_k(S)) \frac{y_k}{x_k} \\
 &= \frac{t_x}{m} \sum_U m \frac{x_k}{t_x} \frac{y_k}{x_k} = t_y
 \end{aligned}$$

dado que  $E(n(S)) = mp_k$ . Utilizando el resultado 2.2.13 y 2.2.14, se llega a la demostración de las varianzas. ■

**Resultado 4.2.5.** Para el diseño de muestreo PPT, el estimador de Hansen-Hurwitz del total de la característica de información auxiliar reproduce ese total con varianza nula

**Prueba.** De la definición del estimador Hansen-Hurwitz, y de la expresión (4.2.2), se tiene que

$$\hat{t}_{x,p} = \frac{1}{m} \sum_{k \in S} \frac{x_k}{p_k} = \frac{1}{m} \sum_{k \in S} t_x = t_x$$

Por otro lado,

$$Var_{PPT}(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^N p_k \left( \frac{x_k}{p_k} - t_x \right)^2 \quad (4.2.10)$$

$$= \frac{1}{m} \sum_{k=1}^N p_k (t_x - t_x)^2 = 0 \quad (4.2.11)$$

con lo cual se concluye la demostración ■

**Resultado 4.2.6.** La varianza del estimador de Hansen-Hurwitz también puede ser escrita como

$$Var_{PPT}(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m} \sum_U \sum_{k < l} p_k p_l \left( \frac{y_k}{p_k} - \frac{y_l}{p_l} \right)^2 \quad (4.2.12)$$

**Prueba.** Desarrollando términos, se tiene que

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{m} \sum_U \sum_{k < l} p_k p_l \left( \frac{y_k}{p_k} - \frac{y_l}{p_l} \right)^2 &= \frac{1}{2m} \sum_{k,l} p_k p_l \left( \frac{y_k}{p_k} - \frac{y_l}{p_l} \right)^2 \\
 &= \frac{1}{2m} \sum_{k \in U} p_k \sum_{l \in U} p_l \left( \frac{y_k}{p_k} - \frac{y_l}{p_l} \right)^2 \\
 &= \frac{1}{2m} \sum_{k \in U} p_k \sum_{l \in U} \left( p_l \frac{y_k^2}{p_k^2} - 2 \frac{y_k y_l}{p_k} + \frac{y_l^2}{p_l} \right) \\
 &= \frac{1}{2m} \sum_{k \in U} p_k \left( \frac{y_k^2}{p_k^2} - 2 \frac{y_k}{p_k} t_y + \sum_{l \in U} \frac{y_l^2}{p_l} \right) \\
 &= \frac{1}{2m} \left( \sum_{k \in U} \frac{y_k^2}{p_k} - 2 t_y^2 + \sum_{l \in U} \frac{y_l^2}{p_l} \right) \\
 &= \frac{1}{m} \left( \sum_{k \in U} \frac{y_k^2}{p_k} - t_y^2 \right) \\
 &= \frac{1}{m} \sum_{k \in U} \left( \frac{y_k^2}{p_k} - p_k t_y^2 \right) \\
 &= \frac{1}{m} \sum_{k \in U} p_k \left( \frac{y_k^2}{p_k^2} - 2 \frac{y_k}{p_k} t_y + t_y^2 \right) \\
 &= \frac{1}{m} \sum_{k \in U} p_k \left( \frac{y_k}{p_k} - t_y \right)^2
 \end{aligned}$$

y esta última expresión coincide con la varianza del estimador de Hansen-Hurwitz en muestreo PPT. ■

Särndal, Swensson & Wretman (1992) afirman que la primera forma que toma la varianza y su estimación insesgada para el estimador de Hansen-Hurwitz es fácil de calcular computacionalmente. Sin embargo, la expresión alternativa de la varianza se utilizará para desarrollos teóricos posteriores.

Esta estrategia de muestreo es con reemplazo, y comparada con una estrategia de muestreo que utilice información auxiliar en la etapa de diseño con el estimador de Horvitz-Thompson es un poco menos eficiente. Sin embargo, en la práctica es más utilizada porque los cálculos computacionales son fáciles de realizar y es preferida porque con un número grande de elementos incluidos en la muestra, el cálculo de la varianza estimada del estimador de Horvitz-Thompson se hace inapropiado por la gran cantidad de productos cruzados.

Esta estrategia de muestreo es utilizada principalmente en la estimación de totales, como se verá más adelante surgen complicaciones, con respecto a la información auxiliar al usar un diseño de muestreo con reemplazo proporcional al tamaño en la estimación de razones. En encuestas de hogares, no resulta adecuado utilizar este diseño de muestreo, puesto que en una población, existe un número de hogares homogéneos por vivienda. Por otro lado, en encuestas de negocios y empresas es útil utilizar diseños proporcionales porque sí existen diferencias marcadas en los tamaños de las mismas; por ejemplo, en el número de empleados, el número de metros cuadrados en las instalaciones, el ingreso, etc. La función de varianza para esta estrategia de muestreo no es monótona decreciente; por la configuración de la información auxiliar, la varianza puede aumentar cuando aumenta el tamaño de muestra.

**Ejemplo 4.2.2.** Para nuestra población de ejemplo  $U$ , existen  $\binom{N+m-1}{m} = 20$  posibles muestras con reemplazo de tamaño  $m = 2$ . Utilizando la característica auxiliar  $x$ , realice el cálculo léxico-gráfico del

estimador de Hansen-Hurwitz, compruebe el insesgamiento, calcule la varianza y el insesgamiento del estimador de la varianza.

### 4.2.3 Eficiencia de la estrategia

La regla de oro de una buena muestra reza que para que la inferencia basada en el diseño de muestreo arroje estimaciones que sean (abusando del lenguaje) de varianza mínima e insesgadas, las probabilidades de inclusión (o selección, según sea el caso) que arroje el diseño de muestreo utilizado deben ser directamente proporcionales a los valores que toma la característica de interés en la población. Raj (1954) demuestra el siguiente resultado que conduce condiciona el comportamiento estructural de la información auxiliar que debe cumplir dos condiciones para que la eficiencia de la estrategia PPT sea mayor que la del diseño aleatorio simple con reemplazo.

**Resultado 4.2.7.** *La resta de la varianza de la estrategia aleatoria simple con reemplazo con la varianza de la estrategia PPT da como resultado la siguiente expresión:*

$$Var_{MRAS}(\hat{t}_{y,p}) - Var_{PPT}(\hat{t}_{y,p}) = \frac{N^2}{m} Cov\left(x, \frac{y^2}{x}\right) \quad (4.2.13)$$

**Prueba.** Utilizando la expresión general de la varianza (2.2.36) bajo cualquier diseño de muestreo con reemplazo se tiene que

$$\begin{aligned} Var_{MRAS}(\hat{t}_{y,p}) - Var_{PPT}(\hat{t}_{y,p}) &= \frac{1}{m} \left[ N \sum_{k=1}^N y_k^2 - t_y^2 - t_x \sum_{k=1}^N \frac{y_k^2}{x_k} + t_y^2 \right] \\ &= \frac{1}{m} \left[ \sum_{k=1}^N \frac{y_k^2}{x_k} (Nx_k - t_x) \right] \\ &= \frac{N}{m} \left[ \sum_{k=1}^N \frac{y_k^2}{x_k} (x_k - \bar{x}) \right] \\ &= \frac{N^2}{m} Cov\left(x, \frac{y^2}{x}\right) \end{aligned}$$

La última igualdad se tiene puesto que

$$\begin{aligned} NCov(x, w) &= \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})(w_k - \bar{w}) \\ &= \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})w_k - \bar{w} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x}) = \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})w_k \end{aligned}$$

■

El anterior resultado indica que para que la estrategia de muestreo PPT sea más eficiente en términos de varianza que la estrategia de muestreo MRAS, además de que  $p_k \propto x_k$ , es necesario que la correlación entre  $\left(x, \frac{y^2}{x}\right)$  sea positiva. Nótese que si la razón entre  $y$  y  $x$  es contante e igual a  $C$ , se tiene que

$$\begin{aligned}
Cor\left(x, \frac{y^2}{x}\right) &= Cor\left(x, y \frac{y}{x}\right) \\
&= Cor(x, yC) \\
&= Cor(x, y)
\end{aligned}$$

Por tanto, una condición necesaria para que el diseño de muestreo PPT sea más eficiente que el diseño de muestreo MRAS es que exista una correlación positiva entre la característica de interés y la información auxiliar; pero, una condición suficiente para la optimalidad del diseño PPT, es que la razón  $\frac{y_k}{x_k}$  permanezca constante para todo  $k \in U$ .

Además de la razón constante, Lehtonen & Pahkinen (2003) muestran que la eficiencia del diseño de muestreo PPT está directamente relacionada con el siguiente modelo de regresión

$$y_k = \beta_0 + \beta_1 x_k + E_k \quad (4.2.14)$$

que relaciona la característica de interés con la información auxiliar. Concluye que para que el diseño de muestreo PPT sea más eficiente que el diseño de muestreo MRAS, la cantidad  $\beta_0$  debe ser pequeña. Es decir, que la línea de regresión ajuste cerca del origen. Es más, incluso si la correlación entre la característica de interés y la información auxiliar fuera perfecta e igual a uno, entonces no habría ningún término de error, pero aun así si  $\beta_0$  es grande, entonces la estrategia de muestreo PPT podría arrojar una eficiencia menor a la del diseño de muestreo aleatorio simple con reemplazo.

La eficiencia de la estrategia de muestreo, depende de dos aspectos. Primero, el tipo de parámetro que se quiere estimar. Lehtonen & Pahkinen (2003) afirman que para la estimación de totales, la estrategia de muestreo PPT, funciona mejor, en términos de eficiencia, que para la estimación de razones o medianas. Segundo, que la razón entre  $x_k$  y  $y_k$  sea constante para toda la población.

#### 4.2.4 Marco y Lucy

Una de las características del diseño de muestreo PPT es el uso de información auxiliar en la etapa de diseño. Obviamente, la información auxiliar debe estar presente en el marco de muestreo. En esta sección, de Marco y Lucy, seguiremos la tendencia que comenzamos en el diseño de muestreo Poisson. Suponga que, para todas las empresas del sector industrial, el valor del ingreso en el último año fiscal está disponible en el marco de muestreo.

Se quiere estimar, el total poblacional de las características de interés Empleados e Impuestos, para lo cual, se utilizará una estrategia de muestreo que utiliza un diseño de muestreo con reemplazo y probabilidades de selección de las empresas proporcionales al tamaño de la característica auxiliar Ingreso junto con el estimador de Hansen-Hurwitz. Como se vio antes, para que esta estrategia de muestreo sea óptima con respecto a una que utilice un diseño aleatorio simple con reemplazo se deben cumplir ciertas condiciones. Antes de analizarlas, veamos que, para este caso particular y con un tamaño de muestra igual a  $m = 2000$ , el diseño de muestreo PPT es menos eficiente que el muestreo simple con reemplazo para la estimación del total de empleados, aunque es más eficiente que el muestreo simple con reemplazo para la estimación del total de impuestos declarados. Lo anterior se tiene utilizando la expresión (4.2.13) escrita en código de R.

```
data(BigLucy)
attach(BigLucy)
```

```

N <- nrow(BigLucy)
m <- 2000

(N^2 / m) * cov(Income, (Employees^2 / Income))

## [1] -9477162876

(N^2 / m) * cov(Income, (Taxes^2 / Income))

## [1] 897321919

```

Primero, que la correlación entre `Income` y `y2/Income` sea positiva. Aunque la correlación entre `Income` y `Employees` e, `Income` y `Taxes` sea positiva, se debe verificar que la correlación entre `Income` y la nueva variable `Employees2/Income` sea positiva, como también la correlación entre `Income` y `Taxes2/Income`. Mediante el uso de la función `cor` que R incorpora en su ambiente de trabajo, se tiene que para la característica de interés Empleados, la correlación es negativa, aunque casi nula. Mientras que para la característica de interés Impuestos, la correlación buscada es positiva. Esto indica que para la estimación del total de empleados, el uso de la información auxiliar no conlleva a ganancias significativas en la eficiencia de la estrategia. Por otro lado, para la estimación del total de impuestos declarados, sí se tiene un ganancia significativa.

```

cor(Income, (Employees^2 / Income))

## [1] -0.078

cor(Income, (Taxes^2/Income))

## [1] 0.71

```

Otra de las condiciones para la optimalidad de la estrategia es que el cociente entre `Income` y las características de interés `Taxes` y `Employees` sea constante para todo elemento de la población. Mediante el uso de la función `plot` es posible tener un acercamiento gráfico al comportamiento de los respectivos cocientes. Nótese que la función `abline` permite trazar una línea sobre el promedio de los cocientes.

La figura 4.3 muestra que la relación existente entre el cociente `Income` y `Employees` es uniforme en casi toda la población. Por supuesto, se observan algunos datos atípicos que están muy lejos de la línea de referencia, pero en general se observa un comportamiento homogéneo. Esto no ocurre con la relación existente entre el cociente `Income` e `Taxes` donde existe un comportamiento más disperso para todos los elementos de la población. A pesar de lo anterior, se puede afirmar que el comportamiento de la razón es constante.

Un tercer argumento para el uso de la estrategia de muestreo PPT es el examen del ajuste de una línea de regresión entre `Employees` con `Income` y `Taxes` con `Income` respectivamente. Para esto, se ajustan dos modelos. El primero dado por

$$Impuestos_k = \beta_0 + \beta_1 Ingreso + E_k \quad (4.2.15)$$

Para la estimación del total de la característica Impuestos y, el segundo dado por

$$Empleados_k = \beta_0 + \beta_1 Ingreso + E_k \quad (4.2.16)$$

```
p1 <- qplot(Employees / Income, data=BigLucy, geom=c("histogram"), binwidth=0.1) +
  geom_density(colour = "blue")
p2 <- qplot(Taxes / Income, data=BigLucy, geom=c("histogram"), binwidth=0.1) +
  geom_density(colour = "blue")
grid.arrange(p1, p2, ncol = 2)
```

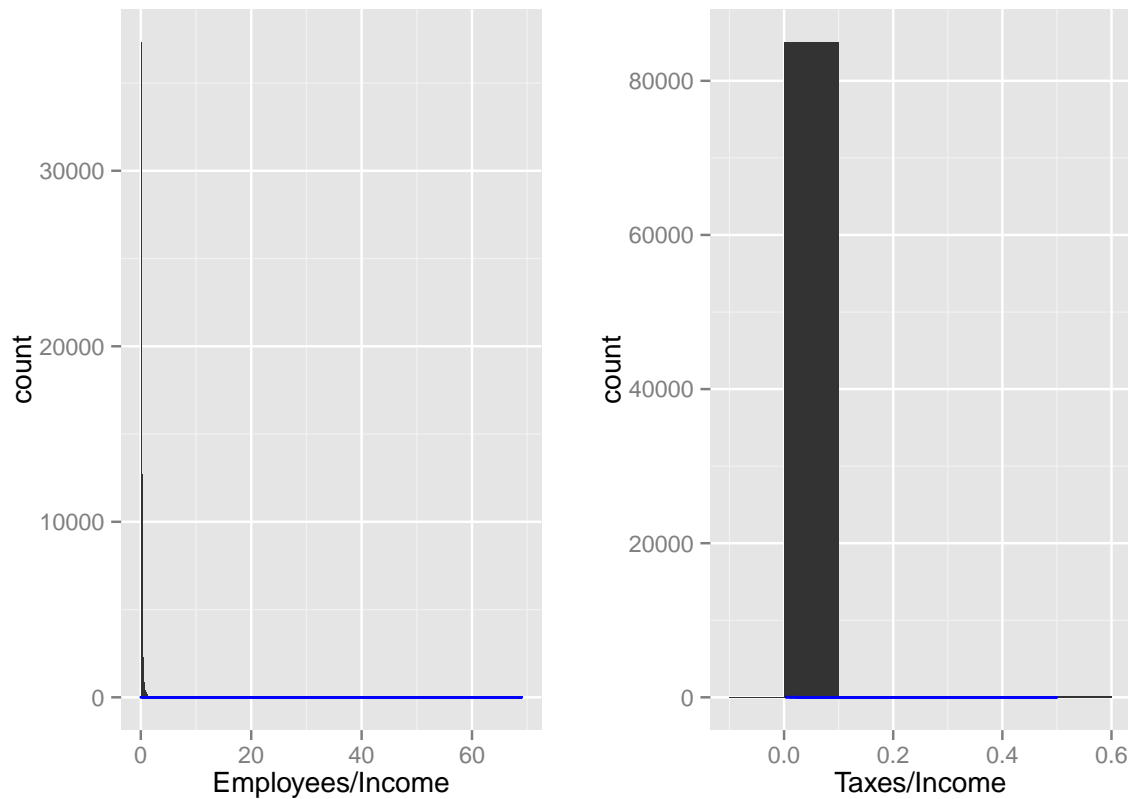


Figura 4.2: Comportamiento del cociente de la información auxiliar con las características de interés.

Para la estimación del total de la característica Empleados. Para los modelos anteriores, nos interesa conocer el valor que toma el intercepto de cada línea de regresión. Si el intercepto  $\beta_0$  es cercano a cero, entonces se ha ganado eficiencia al utilizar un diseño de muestreo PPT. R incorpora la función `lm` para el ajuste de modelos lineales. Las estimaciones de  $\beta_0$  y  $\beta_1$  se hacen por medio del método de los mínimos cuadrados. Un análisis de regresión de  $y$  contra  $x$  es especificado mediante `y ~ x`. La salida de la función `lm` está dada por las estimaciones de los coeficientes de los modelos de regresión. Con ayuda de la función `summary` es posible extraer más información respecto a la inferencia de las estimaciones.

```
M.I <- lm(Taxes ~ Income)
summary(M.I)

##
## Call:
## lm(formula = Taxes ~ Income)
##
## Residuals:
```



```
##      Min      1Q Median      3Q      Max
## -5.58 -3.99 -1.60  2.62 169.65
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value      Pr(>|t|)
## (Intercept) -13.6780825  0.0447706   -306 <0.0000000000000002 ***
## Income      0.0593729  0.0000886    670 <0.0000000000000002 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 6.9 on 85294 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.84, Adjusted R-squared:  0.84
## F-statistic: 4.49e+05 on 1 and 85294 DF,  p-value: <0.0000000000000002
```

Para el primer modelo, se nota que la estimación del intercepto está dada por  $-13.68$  y, a juzgar por las tres estrellas, es una cantidad significativa. Aunque para nuestro análisis está cerca del origen, por tanto se gana en eficiencia al utilizar esta estrategia de estimación para el total poblacional de la característica de interés Impuestos.

```
M.E <- lm(Employees ~ Income)
summary(M.E)

##
## Call:
## lm(formula = Employees ~ Income)
##
## Residuals:
##      Min      1Q Median      3Q      Max
## -46.35 -21.99   0.31  21.36  82.19
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value      Pr(>|t|)
## (Intercept) 29.124429  0.163386   178 <0.0000000000000002 ***
## Income      0.079373  0.000323    245 <0.0000000000000002 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 25 on 85294 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.414, Adjusted R-squared:  0.414
## F-statistic: 6.02e+04 on 1 and 85294 DF,  p-value: <0.0000000000000002
```

El intercepto del segundo modelo ha sido estimado como 29.12, a diferencia del modelo anterior, no se puede decir que está cerca del origen. Además, por la magnitud de la escala de medición de las características, se puede decir que es una cantidad importante y no despreciable.

La figura 4.3 muestra la línea de regresión ajustada para los dos modelos anteriores; es claro que el intercepto del modelo con impuestos declarados se puede considerar nulo, pero el intercepto del modelo con número de empleados es grande. Los tres anteriores argumentos permiten estar confiados al utilizar la estrategia de muestreo PPT para la estimación del total de impuestos declarados, pero se sabe que para la estimación del total de número de empleados, este diseño muestral no es más eficiente que el diseño simple con reemplazo.

```
p1 <- ggplot(BigLucy, aes(x=Income, y=Employees)) +
  geom_point(shape=1) + geom_smooth(method=lm)
p2 <- ggplot(BigLucy, aes(x=Income, y=Taxes)) +
  geom_point(shape=1) + geom_smooth(method=lm)
grid.arrange(p1, p2, ncol = 2)
```

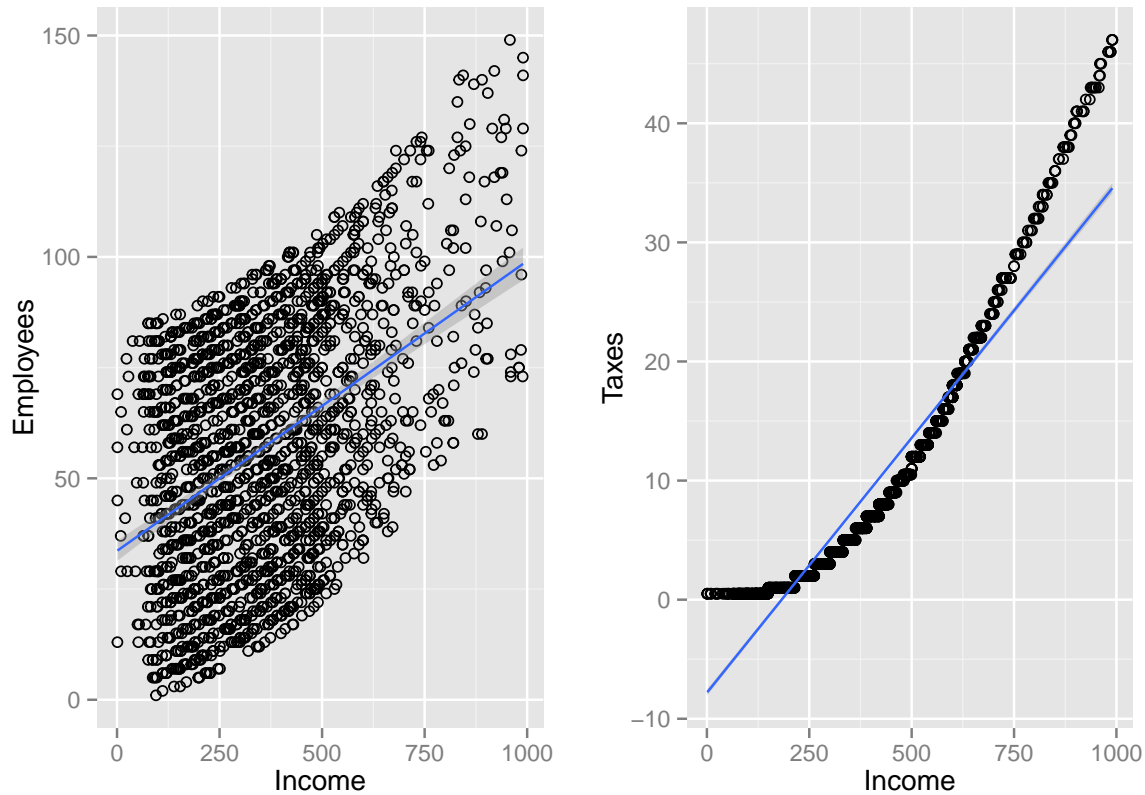


Figura 4.3: Líneas de regresión.

Una vez se ha decidido usar la estrategia de muestreo PPT, es necesario seleccionar la muestra. En este caso, se ha querido utilizar el mismo tamaño de muestra, que en las anteriores estrategias de muestreo. En primer lugar, se adjunta el marco de muestreo que no sólo contiene la ubicación e identificación sino además el valor de la información auxiliar Ingreso para cada empresa del sector industrial. La selección de la muestra se hace mediante el uso de la función S.PPS para la cual los argumentos introducidos son  $m = 2000$  junto con la información auxiliar `Income`. Esta función utiliza el algoritmo de selección acumulativo total.

```
pk <- Income / sum(Income)
sam <- S.PPS(m, Income)
muestra <- BigLucy[sam,]
attach(muestra)

head(muestra)
```

##	ID	Ubication	Level	Zone	Income	Employees	Taxes
----	----	-----------	-------	------	--------	-----------	-------

```
## 64444 AB0000064444 C0047603K0254294 Medium County14 870 123 38
## 54403 AB0000054403 C0238725K0063172 Medium County62 670 115 22
## 80226 AB0000080226 C0207698K0094199 Small County93 364 57 6
## 41844 AB0000041844 C0196791K0105106 Small County12 400 55 7
## 1676 AB0000001676 C0192933K0108964 Medium County17 986 124 46
## 78288 AB0000078288 C0221516K0080381 Medium County9 710 92 26
## SPAM ISO Years Segments
## 64444 yes yes 27.6 County14 37
## 54403 no yes 27.2 County62 75
## 80226 yes no 1.1 County93 31
## 41844 yes no 48.2 County12 34
## 1676 yes yes 45.0 County17 107
## 78288 yes yes 48.2 County9 2
```

El método acumulativo total no tiene en cuenta ningún ordenamiento. En este caso particular, la última empresa en ser seleccionada fue la empresa con número de identificación AB0000064444, aunque esta empresa ya había sido seleccionada en la muestra en dos ocasiones. Es decir, fue seleccionada en tres ocasiones.

Una vez seleccionada la muestra con reemplazo, se utiliza la función `E.PPS` del paquete `TeachingSampling` cuyos argumentos son la(s) característica(s) de interés y un vector de probabilidades de selección `pk`. Por supuesto, el vector de probabilidades de selección en la población está dado por `pk <- Income / sum(Income)`. Sin embargo, en la función `E.PPS`, el vector de probabilidades debe corresponder a las probabilidades de selección de cada uno de los elementos elegidos en la muestra. En este caso la longitud del vector `pk.s` es de `m = 2000`.

```
pk.s <- pk[sam]
estima <- data.frame(Income, Employees, Taxes)
E.PPS(estima, pk.s)
```

Los resultados de aplicar la estrategia de muestreo son muy favorables. Nótese, que a diferencia de la estrategia de muestreo Poisson, el total poblacional de la característica auxiliar ingreso, es estimada exactamente con varianza casi nula. El total poblacional de las características de interés Empleados e Impuestos tienen coeficientes de variación menores a 2 %. La tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos en este ejercicio particular.

	N	Income	Employees	Taxes
Estimation	85496.19	36634733.00	5405219.19	1000407.33
Standard Error	1398.69	0.00	81449.99	13065.21
CVE	1.64	0.00	1.51	1.31
DEFF	Inf	0.00	1.28	0.07

Tabla 4.2: *Muestreo PPT: estimación de los totales de las características de interés.*

Asimismo, una estrategia alternativa es utilizar un diseño de muestreo con reemplazo y probabilidad de selección proporcional al tamaño junto con el estimador de Horvitz-Thompson, el cual es también insesgado. Särndal, Swensson & Wretman (1992) se preguntan cuál es el mejor estimador y llegan a la conclusión que dependiendo de la configuración de los valores de las características de interés y de información auxiliar un estimador tendrá menor varianza que el otro. Por tanto, no es posible generalizar. De lo que sí se puede estar seguro, es de la simplicidad, en materia de cálculos del estimador de Horvitz-Thompson. En la práctica, este es un argumento muy fuerte que incentiva el uso del estimador de Hansen-Hurwitz.

Utilizando el resultado 4.2.3., es posible estimar los parámetros de interés mediante el uso del estimador de Horvitz-Thompson. Para esto, se calculan las probabilidades inclusión. Nótese que la suma de éstas es de 358. Se extraen las probabilidades de inclusión de los elementos en la muestra y se utiliza la forma genérica del estimador de Horvitz-Thompson.

```
pik <- 1 - (1 - pk)^2000
sum(pik)

## [1] 1968

pik.s <- pik[sam]
sum(1 / pik.s)

## [1] 86501

colSums(estima/pik.s)

##      Income Employees      Taxes
## 37227615    5480987    1021589
```

Las estimaciones resultantes no son mejores, en el sentido práctico, a las obtenidas mediante el uso del estimador de Hansen-Hurwitz. Ahora, la estimación de la varianza supondría un esfuerzo computacional demasiado grande.

### 4.3 Diseño de muestreo $\pi$ PT

Como se vio en la sección anterior, utilizar un esquema de muestreo con probabilidades proporcionales a alguna característica de información auxiliar puede resultar en ganancia de precisión. Sin embargo, utilizar una estrategia de muestreo que contemple un diseño de muestreo con reemplazo es menos eficiente que implementar una estrategia de muestreo que contemple un diseño de muestreo sin reemplazo y de tamaño muestral fijo.

En la sección anterior, se utilizó un diseño de muestreo con probabilidades proporcionales, con reemplazo y, sin embargo, arrojó muy buenos resultados en términos de eficiencia comparado con los diseños de muestreo de probabilidades simples. Esta sección se concentra en la implementación de diseños de muestreo con probabilidades de inclusión proporcionales a una característica de interés y cuya estructura general sea sin reemplazo. De esta forma, es posible aumentar dramáticamente la eficiencia de la estrategia que involucra al estimador de Horvitz-Thompson.

Lohr (2000) afirma que el muestreo de probabilidades simples, proporciona esquemas que, frecuentemente, son fáciles de explicar y diseñar. Sin embargo, estos esquemas no siempre pueden ser realizados puesto que las probabilidades simples no siempre reflejan el comportamiento de la característica de interés en la población.

Este diseño de muestreo induce probabilidades de inclusión proporcionales al tamaño de una característica de información auxiliar<sup>1</sup>. De esta manera, se supone que el marco de muestreo tiene la bondad de poseer información auxiliar de tipo continuo y positiva disponible para todo elemento perteneciente a la población finita. Asimismo, el diseño de muestreo  $\pi$ PT<sup>2</sup>, de tamaño de muestra fijo e igual a  $N$ ,

<sup>1</sup>El requisito indispensable de la información auxiliar es que sea aproximadamente proporcional a la característica de interés.

<sup>2</sup>Nótese que la sigla  $\pi$ PT se refiere a los diseños de muestreo que inducen probabilidades de inclusión proporcionales a una característica de información auxiliar.

se basa en la construcción de probabilidades de inclusión que obedezcan la siguiente relación:

$$\pi_k = \frac{nx_k}{t_x} \quad 0 < \pi_k \leq 1 \quad (4.3.1)$$

Además se busca que:

- El algoritmo de selección de muestras bajo este diseño sea de fácil implementación computacional.
- Las probabilidades de inclusión de segundo orden sean positivas,  $\pi_{kl} > 0$ . De lo contrario el estimador de la varianza podría ser sesgado.
- El cálculo de estas probabilidades de inclusión de segundo orden,  $\pi_{kl}$ , sea sencillo.
- $\Delta_{kl} < 0 \quad \forall k \neq l$  para que la estimación de la varianza no sea negativa.

Este diseño de muestreo se puede considerar como una generalización de la mayoría de diseños de muestreo sin reemplazo. Por ejemplo: si la característica de información auxiliar es constante e igual a  $C$ , entonces para un tamaño de muestra fijo, las probabilidades de inclusión de primer orden estarían dadas por:

$$\begin{aligned} \pi_k &= \frac{nx_k}{t_x} \\ &= \frac{nC}{NC} = \frac{n}{N} \end{aligned}$$

Con lo que se tiene un diseño de muestreo caracterizado por probabilidades simples. En ciertas ocasiones, cuando la población tiene un comportamiento muy variable, irregular y sesgado, algunas de las  $\pi_k$  inducidas por la expresión (4.3.1) pueden ser mayores a uno para ciertos elementos. En tal caso, estos elementos son incluidos en todas las posibles muestras y toman el nombre de **elementos de inclusión forzosa**. Sin embargo, para calcular la probabilidad de inclusión de los elementos restantes, se debe excluir estos elementos de inclusión forzosa y volver a calcular las probabilidades de inclusión mediante una reformulación de la expresión (4.3.1) dada por

$$\pi_k = \frac{(n - n^*)x_k}{\sum_{k \in U^*} x_k} \quad 0 < \pi_k \leq 1; \quad k \in U^* \quad (4.3.2)$$

donde  $n^*$  corresponde al número de elementos de inclusión forzosa y  $U^*$  la población finita excluyendo a estos elementos de inclusión forzosa. Al final del proceso, deberían existir dos grupos de elementos:

1. Un grupo de elementos de inclusión forzosa con probabilidades de inclusión iguales a uno.
2. Un grupo de elementos con probabilidades de inclusión  $0 < \pi_k < 1$  y proporcionales a  $x_k$ .

Por tanto, el problema se reduce a la selección de  $n$  unidades con probabilidades de inclusión tales que

$$\sum_{k \in U} \pi_k = n$$

El siguiente resultado da cuenta de la forma estructural que toma el estimador de Horvitz-Thompson, de su varianza y de su varianza estimada.

**Resultado 4.3.1.** Para el diseño de muestreo  $\pi PT$ , el estimador de Horvitz-Thompson, su varianza y su varianza estimada están dados por:

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_S \frac{y_k}{\pi_k} \quad (4.3.3)$$

$$Var_{\pi PT}(\hat{t}_{y,\pi}) = -\frac{1}{2} \sum_U \sum \Delta_{kl} \left( \frac{y_k}{\pi_k} - \frac{y_l}{\pi_l} \right)^2 \quad (4.3.4)$$

$$\widehat{Var}_{\pi PT}(\hat{t}_{y,\pi}) = -\frac{1}{2} \sum_S \sum \frac{\Delta_{kl}}{\pi_{kl}} \left( \frac{y_k}{\pi_k} - \frac{y_l}{\pi_l} \right)^2 \quad (4.3.5)$$

**Resultado 4.3.2.** Para el diseño de muestreo  $\pi PT$ , el estimador de Horvitz-Thompson del total de la característica de información auxiliar reproduce ese total con varianza nula

**Prueba.** De la definición del estimador de Horvitz-Thompson, y de la expresión (4.3.1), se tiene que

$$\hat{t}_{x,\pi} = \sum_{k \in S} \frac{x_k}{\pi_k} = \sum_{k \in S} t_x \frac{1}{n} = t_x$$

Por otro lado,

$$Var_{\pi PT}(\hat{t}_{x,\pi}) = -\frac{1}{2} \sum_U \sum \Delta_{kl} \left( \frac{x_k}{\pi_k} - \frac{x_l}{\pi_l} \right)^2 \quad (4.3.6)$$

$$= -\frac{1}{2} \sum_U \sum \Delta_{kl} \left( \frac{t_x}{n} - \frac{t_x}{n} \right)^2 = 0 \quad (4.3.7)$$

con lo cual se concluye la demostración ■

**Ejemplo 4.3.1.** Suponga que para la población de ejemplo  $U$  se tiene conocimiento de cada valor de la siguiente característica de información auxiliar correlacionada con la característica de interés. Por tanto, un primer paso para el cálculo de las probabilidades de inclusión es aplicar la expresión (4.3.1).

```
n <- 4
x <- c(52, 60, 75, 100, 50)
pik <- n * x / sum(x)
pik

## [1] 0.62 0.71 0.89 1.19 0.59
```

Nótese que el cuarto elemento de la población, correspondiente a **Sharon** es un elemento de inclusión forzosa; es decir que está presente en todas las posibles muestras. El siguiente paso es separar a **Sharon** de los restantes elementos y proseguir con el cálculo de las probabilidades de inclusión inducidas por la expresión (4.3.2)

```
n <- 3
x <- c(52, 60, 75, 50)
pik <- n * x / sum(x)
pik

## [1] 0.66 0.76 0.95 0.63
```

Por tanto el vector de probabilidades de inclusión para toda la población  $U$  está dado por

$$\pi = (\underbrace{0.6582278}_{\text{Yves}}, \underbrace{0.7594937}_{\text{Ken}}, \underbrace{0.9493671}_{\text{Erik}}, \underbrace{1.0000}_{\text{Sharon}}, \underbrace{0.6329114}_{\text{Leslie}})'$$

## 4.4 Selección de muestras $\pi$ PT

Existen varios métodos de selección de muestras  $\pi$ PT. Sin embargo, todos ellos están basados en una teoría fuerte y complicada y, en algunas ocasiones, son muy difíciles de implementar en la práctica. A continuación, se exponen dos métodos de selección de muestras de tamaño  $n = 1$  y  $n = 2$ . Särndal, Swensson & Wretman (1992) comentan que a simple vista parecería irreal considerar tamaños de muestra tan pequeños. Sin embargo, en muestreo estratificado y muestreo para conglomerados (ver siguientes capítulos) tiene sentido seleccionar solamente una o dos unidades primarias de muestreo.

### Tamaño de muestra $n = 1$

Para  $n = 1$  se utiliza el método acumulativo total, que consiste en:

1. Definir  $T_0 = 0$  y  $T_k = T_{k-1} + x_k$  ( $k \in U$ ).
2. Calcular un número aleatorio  $\varepsilon$  con distribución uniforme en el intervalo  $[0, 1]$ .
3. Si  $T_{k-1} < \varepsilon T_N < T_k$ , el elemento  $k$ -ésimo se selecciona.

Nótese que este algoritmo de selección garantiza que el diseño de muestreo es un autentico  $\pi$ PT puesto que

$$\pi_k = Pr(k \in S) = Pr(T_{k-1} < \varepsilon T_N < T_k) = \frac{T_k - T_{k-1}}{T_N} = \frac{x_k}{t_x}$$

Por supuesto, no es posible obtener un estimador insesgado de la varianza del estimador de Horvitz-Thompson puesto que la muestra sólo considera la inclusión de un elemento de la población finita.

### Tamaño de muestra $n = 2$

En este escenario es preciso garantizar que las probabilidades de inclusión de primer orden estén dadas por

$$\pi_k = \frac{2x_k}{t_x}$$

para todo elemento de la población finita. En este caso, los dos elementos de la muestra son seleccionados uno por uno. Para tal fin, se debe seguir el siguiente algoritmo (Brewer 1963, Brewer 1975) que utiliza el método acumulativo total en cada una de las dos selecciones, así:

1. En la primera extracción, el elemento  $k$ -ésimo es seleccionado con probabilidad

$$p_k = \frac{c_k}{\sum_{k \in U} c_k}$$

donde

$$c_k = \frac{x_k(T_N - x_k)}{T_N(T_N - 2x_k)}$$

2. En la segunda extracción, el elemento seleccionado en el paso anterior, digamos el elemento  $k^*$ , es retirado del sorteo. El segundo elemento es seleccionado con probabilidad

$$p_{l|k^*} = \frac{x_l}{T_N - x_{k^*}}$$

**Resultado 4.4.1.** Bajo el esquema de selección de Brewer las probabilidades de inclusión de primer orden satisfacen la siguiente relación

$$\pi_k = \frac{2x_k}{t_x}$$

Las probabilidades de inclusión de segundo orden están dadas por

$$\pi_{kl} = \frac{2x_k x_l}{T_N(\sum_{k \in U} c_k)} \frac{T_N - x_k - x_l}{(T_N - 2x_k)(T_N - 2x_l)}$$

**Prueba.** La probabilidad de inclusión de primer orden del  $k$ -ésimo elemento está dada por

$$\begin{aligned} \pi_k &= Pr(k \in S) \\ &= Pr(k \text{ sea seleccionado en la primera extracción}) \\ &\quad + Pr(k \text{ sea seleccionado en la segunda extracción}) \\ &= p_k + p_{k|j} \sum_{\substack{j \in U \\ j \neq k}} p_j \\ &= \frac{x_k(T_N - x_k)/T_N(T_N - 2x_k)}{D} \\ &\quad + \sum_{\substack{j \in U \\ j \neq k}} \frac{x_j(T_N - x_j)/T_N(T_N - 2x_j)}{D} \frac{x_k}{T_N - x_j} \\ &= \frac{x_k/T_N}{D} \left( \frac{T_N - x_k}{T_N - 2x_k} + \sum_{\substack{j \in U \\ j \neq k}} \frac{x_j}{T_N - 2x_j} \right) \\ &= \frac{x_k/T_N}{D} \left( \frac{T_N}{T_N - 2x_k} - \frac{2x_k}{T_N - 2x_k} + \sum_{j \in U} \frac{x_j}{T_N - 2x_j} \right) \\ &= \frac{x_k/T_N}{D} \left( 1 + \sum_{j \in U} \frac{x_j}{T_N - 2x_j} \right) = \frac{x_k/T_N}{D} (2D) = \frac{2x_k}{T_N} \end{aligned}$$



Donde

$$\begin{aligned} D &= \sum_{k \in U} \frac{x_k(T_N - x_k)}{T_N(T_N - 2x_k)} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{k \in U} \frac{x_k(2T_N - 2x_k)}{T_N(T_N - 2x_k)} \\ &= \frac{1}{2} \left( 1 + \sum_{k \in U} \frac{x_k}{T_N - 2x_k} \right) \end{aligned}$$

La última relación se tiene puesto que

$$\sum_{k \in U} \frac{x_k(T_N - x_k)}{T_N(T_N - 2x_k)} - \sum_{k \in U} \frac{x_k}{T_N - 2x_k} = 1$$

Análogamente para las probabilidades de inclusión de segundo orden. ■

**Resultado 4.4.2.** *Bajo muestreo  $\pi$ PT con el algoritmo de selección de Brewer, se tiene que.*

1.  $Var_{\pi PT}(\hat{t}_{y,\pi})$  es menor que  $Var_{PPT}(\hat{t}_{y,p})$ .
2. La estimación de la varianza es siempre positiva.

Lohr (2000) afirma que generalmente el muestreo con reemplazo es menos eficiente que el muestreo sin reemplazo. Sin embargo, el muestreo con reemplazo se utiliza con mucha más frecuencia debido a la facilidad que brinda para elegir y analizar las muestras. Se ha investigado mucho acerca del muestreo con probabilidades proporcionales sin reemplazo; hay que notar que la teoría de éstos tipos de muestreo es mucho más complicada. Existen varios algoritmos que permiten la selección de muestras de tamaño  $n > 2$  con probabilidades de inclusión desiguales; en particular, con probabilidades proporcionales a una característica de información auxiliar<sup>3</sup>. En esta sección, revisaremos algunos de estos esquemas que permiten la selección de muestras para tamaños de muestra fijos y mayores que dos.

#### 4.4.1 Método de Sunter

En Sunter (1977) y en Sunter (1986) se propone un procedimiento secuencial que, en general, no es aplicable a cualquier vector de probabilidades de inclusión de primer orden. Este algoritmo de muestreo sólo funciona cuando los elementos de la población son ordenados descendentemente y cuando los elementos con valores más pequeños comparten las mismas probabilidades de inclusión. Este método, que en realidad es una modificación del algoritmo de Fan-Muller-Rezucha para la selección de muestras simples, asume la existencia de una variable auxiliar que induce probabilidades de inclusión de primer orden dadas por la expresión (4.3.1) y consiste en:

1. Ordenar descendentemente la población de acuerdo con los valores que toma la característica de información auxiliar  $x_k$ .
2. Realizar  $\xi_k \sim U(0, 1)$ .
3. Para  $k = 1$ , el primer elemento de la lista ordenada es incluido en la muestra sí y solamente sí  $\xi_1 < \pi_1$ .

---

<sup>3</sup>El lector interesado en conocer aún más acerca de estos algoritmos de selección puede referirse a los siguientes tres libros: Brewer & Hanif (1983), Hájek (1981) y Tillé (2006)).

4. Para  $k \geq 2$ , el  $k$ -ésimo elemento de la lista ordenada es incluido en la muestra sí y solamente si

$$\xi_k \leq \frac{n - n_{k-1}}{n - \sum_{i=1}^{k-1} \pi_i} \pi_k$$

donde  $n_{k-1}$  representa el número de elementos que ya han sido seleccionados al final del paso  $k - 1$ .

**Resultado 4.4.3.** *Bajo el esquema de selección de Sunter, las probabilidades de inclusión de primer orden están dadas por*

$$\pi_k = \begin{cases} \frac{nx_k}{T_N} & \text{si } k = 1, \dots, k^* - 1 \\ \frac{n\bar{x}_{k^*}}{T_N} & \text{si } k = k^*, \dots, N \end{cases}$$

donde  $k^* = \min\{k_0, N - n + 1\}$  con  $k_0$  equivalente al menor  $k$  para el cual se cumple que  $nx_k/T_k > 1$ ,  $T_k = \sum_{j=1}^k x_j$  y

$$\bar{x}_{k^*} = \frac{T_{k^*}}{N - k^* + 1}$$

Por otra parte, se cumple que para todo  $k \neq l$ ,  $\pi_{kl} > 0$  y  $\Delta_{kl} < 0$ .

Con el anterior resultado se establece que este método de selección de muestras no induce probabilidades de inclusión estrictamente proporcionales a la característica de información auxiliar. Särndal, Swensson & Wretman (1992) afirman que relajar un poco este supuesto es un precio menor que debe pagarse para que el esquema de selección sea ejecutable en la práctica.

**Ejemplo 4.4.1.** Volviendo con la población ejemplo  $U$ . Suponga que se tiene acceso a los valores de la característica de información auxiliar  $x$  para todos los elementos de la población. Es posible seleccionar una muestra  $\pi$ PT de tamaño  $n = 3$  con el método de Sunter. Para tal fin, es necesario recurrir a la función `S.piPS` del paquete `TeachingSampling`.

Esta función consta de tres argumentos: el primero,  $\mathbf{x}$ , hace referencia al vector de información auxiliar continua para toda la población. El segundo,  $\mathbf{n}$ , determina el tamaño de la muestra. Con estos dos argumentos, la función `S.piPS` construye las probabilidades de inclusión proporcionales a la característica de información auxiliar. El tercer argumento,  $\mathbf{e}$ , que es opcional, corresponde a un vector de números aleatorios con el que se procede a ejecutar el esquema de selección de Sunter.

```
U <- c("Yves", "Ken", "Erik", "Sharon", "Leslie")
N <- length(U)
n <- 3
x <- c(52, 60, 75, 100, 50)
pik <- (n*x)/sum(x)

pik

## [1] 0.46 0.53 0.67 0.89 0.45

sum(pik)
```

```
## [1] 3

sam <- S.piPS(n, x, e=runif(N))
U[sam]

## [1] "Sharon" "Erik" "Leslie"

x[sam]

## [1] 100 75 50
```

La función `S.piPS` devuelve un conjunto de índices (distintos por definición) que aplicados a los rótulos poblacionales proporcionan la muestra realizada o seleccionada. Para el anterior ejercicio particular, la muestra realizada estuvo conformada por **Sharon**, **Erik** y **Ken**. Es importante recalcar que esta función no necesita de ningún ordenamiento previo sobre la característica de información auxiliar; en otras palabras, los resultados serán idénticos si se realiza un ordenamiento previo o si no se realiza tal ordenamiento.

#### 4.4.2 Método de escisión

Desde la publicación de Brewer & Hanif (1983) se han propuesto numerosas técnicas de muestreo con probabilidades de inclusión desiguales. Sin embargo, en el artículo de Deville & Tillé (1998), se habla de ocho nuevos métodos; entre ellos, el método de escisión. Este método es considerado como un nuevo enfoque que presenta de manera más simple los restantes métodos de selección de muestras con probabilidades desiguales. Tillé (2006) comenta que el método de escisión es un medio para integrar la presentación de los demás métodos y para hacerlos comparables.

En palabras de uno de los autores (Tillé 2006), el método de escisión propuesto por Deville & Tillé (1998) es:

...un marco de referencia de los métodos de muestreo sin reemplazo, con tamaño muestral fijo y con probabilidades desiguales, en particular con probabilidades proporcionales al tamaño de una característica de información auxiliar.

La idea básica del método consiste en dividir el vector de probabilidades de inclusión en dos o más vectores nuevos. A continuación, uno de estos vectores se selecciona aleatoriamente, de tal manera que el promedio de los vectores de como resultado el vector de probabilidades de inclusión. Este simple paso se repite hasta que se obtenga una muestra.

Con el planteamiento anterior, el método de escisión se puede considerar como un algoritmo de Martingalas que incluye todos los procedimientos de selección individual y secuencial y permite derivar un gran número de algoritmos de muestreo de probabilidades desiguales. Más aun, muchos procedimientos bien conocidos de probabilidades desiguales pueden ser formulados bajo la forma de una partición del vector de probabilidades de inclusión. Por tanto, la presentación puede ser estandarizada, lo cual permite una comparación más simple de procedimientos.

#### Escisión en dos partes

Este método consiste en seleccionar una muestra, de tamaño  $n(S) = n$ , de probabilidades desiguales mediante la partición de la probabilidad de inclusión del  $k$ -ésimo elemento en dos partes  $\pi_k^a$  y  $\pi_k^b$  tal

que

$$\pi_k = \lambda \pi_k^a + (1 - \lambda) \pi_k^b \quad (4.4.1)$$

De tal forma que  $0 \leq \pi_k^a \leq 1$  y  $0 \leq \pi_k^b \leq 1$  y que

$$\sum_{k \in U} \pi_k^a = \sum_{k \in U} \pi_k^b = n \quad (4.4.2)$$

Donde  $0 < \lambda < 1$ . La esencia del método es la selección de  $n$  elementos con probabilidades desiguales mediante la transformación iterativa del vector de probabilidades de inclusión. Si la escisión es tal que uno o varios de los  $\pi_k^a$  y de los  $\pi_k^b$  son equivalentes a cero o uno, entonces el problema de muestreo se verá reducido en el siguiente paso. De hecho, un vez que un componente del vector de probabilidades de inclusión converja a cero o uno, es deberá permanecer en este estado hasta que se seleccione una muestra<sup>4</sup>. En general, el algoritmo de muestreo de este esquema es el siguiente:

1. Definir  $\boldsymbol{\pi}(0) = \boldsymbol{\pi}$ .
2. Construir un par de vectores  $\boldsymbol{\pi}^a(t)$  y  $\boldsymbol{\pi}^b(t)$  y definir un número  $\lambda(t) \in (0, 1)$  tales que

$$\boldsymbol{\pi}(t) = \lambda(t) \boldsymbol{\pi}^a(t) + (1 - \lambda(t)) \boldsymbol{\pi}^b(t) \quad (4.4.3)$$

3. Definir para el siguiente paso al vector de probabilidades de inclusión de tal forma que

$$\boldsymbol{\pi}(t+1) = \begin{cases} \boldsymbol{\pi}^a(t) & \text{con probabilidad } \lambda(t) \\ \boldsymbol{\pi}^b(t) & \text{con probabilidad } 1 - \lambda(t) \end{cases} \quad (4.4.4)$$

4. Iterar hasta obtener convergencia; es decir, hasta que todas las entradas del vector de probabilidades de inclusión sean cero o uno en ambas particiones. De esta forma, para cada tiempo  $t$ , existe una posible muestra correspondiente a  $S = \boldsymbol{\pi}(t)$ .

### Esquema de soporte mínimo

**Definición 4.4.1.** Si para un vector fijo de probabilidades de inclusión es posible plantear un diseño de muestreo cuyo soporte contenga a lo más  $N$  muestras  $s$ , tales que  $p(s) > 0$ . En tal caso, el diseño de muestreo se dice de soporte mínimo.

A continuación se presenta el esquema de soporte mínimo que permite seleccionar una muestra en a lo más  $N$  pasos.

Paso 1 Ordenar el vector de probabilidades de inclusión en orden ascendente, denotado como  $(\pi_{(1)}, \dots, \pi_{(k)}, \dots, \pi_{(N)})$

Paso 2 (Primera iteración,  $t = 1$ ) Calcular

$$\lambda(1) = \min\{1 - \pi_{(N-n)}, \pi_{(N-n+1)}\}$$

---

<sup>4</sup>Una muestra es seleccionada cuando todas las entradas del vector de probabilidades de inclusión se conviertan en ceros o unos.

Luego, computar las siguientes particiones del vector de probabilidades de inclusión

$$\pi_{(k)}^a(1) = \begin{cases} 0 & \text{si } k \leq N - n \\ 1 & \text{si } k > N - n \end{cases} \quad (4.4.5)$$

$$\pi_{(k)}^b(1) = \begin{cases} \frac{\pi_{(k)}}{1-\lambda(1)} & \text{si } k \leq N - n \\ \frac{\pi_{(k)} - \lambda(1)}{1-\lambda(1)} & \text{si } k > N - n \end{cases} \quad (4.4.6)$$

Paso 3 ( $t$ -ésima iteración,  $t \geq 2$ ) Definir los siguientes conjuntos

$$\begin{aligned} A(t) &= \{k | 0 < \pi_{(k)}^b(t-1) < 1\} \\ B(t) &= \{k | \pi_{(k)}^b(t-1) = 1\} \end{aligned}$$

y las siguientes cantidades:

$$\begin{aligned} N^*(t) &= \#A(t) \\ n^*(t) &= \#B(t) \end{aligned}$$

Luego, para los elementos  $k \in A(t)$  calcular

$$\lambda(t) = \min\{1 - \pi_{(N^*(t)-n^*(t))}^b(t-1), \pi_{(N^*(t)-n^*(t)+1)}^b(t-1)\}$$

A continuación, para los elementos  $k \in A(t)$  computar las siguientes particiones del vector de probabilidades de inclusión

$$\pi_{(k)}^a(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } k \leq N^*(t) - n^*(t) \\ 1 & \text{si } k > N^*(t) - n^*(t) \end{cases} \quad (4.4.7)$$

$$\pi_{(k)}^b(t) = \begin{cases} \frac{\pi_{(k)}^b(t-1)}{1-\lambda(t)} & \text{si } k \leq N^*(t) - n^*(t) \\ \frac{\pi_{(k)}^b(t-1) - \lambda(t)}{1-\lambda(t)} & \text{si } k > N^*(t) - n^*(t) \end{cases} \quad (4.4.8)$$

Paso 4 Iterar hasta obtener convergencia; es decir, hasta que  $\pi_{(k)}^b(t) \in \{0, 1\}$ .

**Ejemplo 4.4.2.** En este apartado se muestra paso a paso cómo trabaja el algoritmo de mínimo soporte basado en el método de escisión. Volvemos entonces a nuestra población ejemplo

$$U = \{\mathbf{Yves}, \mathbf{Ken}, \mathbf{Erik}, \mathbf{Sharon}, \mathbf{Leslie}\}$$

El cálculo de las probabilidades de inclusión se hace con respecto a la expresión (4.3.1) donde la característica de información auxiliar corresponde a

$$\mathbf{x} = (52, 60, 75, 100, 50)$$

Por tanto, el vector de probabilidades de inclusión está dado por

$$\boldsymbol{\pi} = (0.46, 0.53, 0.67, 0.90, 0.44)$$

El método exige el ordenamiento del vector de probabilidades de inclusión en orden ascendente. Luego de esto, se tiene que el procedimiento converge en cuatro etapas. La tabla 4.3 muestra la convergencia del método y todas las posibles muestras que surgen del diseño muestral con soporte mínimo. Los cálculos en cada etapa se dan a continuación:

Tabla 4.3: *Diseño de mínimo soporte para la población U.*

		Etapa 1 $\lambda(1) = 0.53$		Etapa 2 $\lambda(2) = 0.06$		Etapa 3 $\lambda(3) = 0.02$		Etapa 4 $\lambda(4) = 0.78$	
$k$	$\pi_k$	$\pi_k^a$	$\pi_k^b$	$\pi_k^a$	$\pi_k^b$	$\pi_k^a$	$\pi_k^b$	$\pi_k^a$	$\pi_k^b$
<b>Leslie</b>	0.44	0	0.94	0	1	1	1	1	1
<b>Yves</b>	0.46	0	0.98	1	0.98	0	1	1	1
<b>Ken</b>	0.53	1	0	0	0	0	0	0	0
<b>Erik</b>	0.67	1	0.29	1	0.24	1	0.22	0	1
<b>Sharon</b>	0.90	1	0.79	1	0.78	1	0.78	1	0

Etapa 1  $N = 5$ ,  $n = 3$ ,  $\lambda = \min\{1 - \pi_{(2)}, \pi_{(3)}\} = 0.53$

Etapa 2  $N^*(2) = 4$ ,  $n^*(2) = 3$ ,  $\lambda(2) = \min\{1 - \pi_{(1)}(1), \pi_{(2)}(1)\} = 0.06$

Etapa 3  $N^*(3) = 3$ ,  $n^*(3) = 2$ ,  $\lambda(3) = \min\{1 - \pi_{(1)}(2), \pi_{(2)}(2)\} = 0.02$

Etapa 4  $N^*(4) = 2$ ,  $n^*(4) = 1$ ,  $\lambda(4) = \min\{1 - \pi_{(1)}(3), \pi_{(2)}(3)\} = 0.78$

Por tanto, el diseño muestral de mínimo soporte está dado por

$$p(s) = \begin{cases} 0.53 & \text{si } s = \{\mathbf{Ken}, \mathbf{Erik}, \mathbf{Sharon}\} \\ 0.0282 = (1 - 0.53) \times 0.06 & \text{si } s = \{\mathbf{Yves}, \mathbf{Erik}, \mathbf{Sharon}\} \\ 0.0088 = (1 - 0.53 - 0.0282) \times 0.02 & \text{si } s = \{\mathbf{Leslie}, \mathbf{Erik}, \mathbf{Sharon}\} \\ 0.3377 = (1 - 0.53 - 0.0282 - 0.008) \times 0.78 & \text{si } s = \{\mathbf{Leslie}, \mathbf{Yves}, \mathbf{Sharon}\} \\ 0.0953 = (1 - 0.53 - 0.0282 - 0.008 - 0.3377) & \text{si } s = \{\mathbf{Leslie}, \mathbf{Yves}, \mathbf{Erik}\} \end{cases}$$

#### 4.4.3 Estimación de la varianza

Existe un número muy grande de diseños y algoritmos de muestreo que trabajan bajo el supuesto de probabilidades de inclusión desiguales. En el caso particular del diseño de muestreo sin reemplazo y proporcional al tamaño de una característica de interés, las probabilidades de inclusión siguen el comportamiento dado por la expresión (4.3.1). Cada uno de estos métodos de muestreo inducen probabilidades de inclusión de primer y segundo orden. Las probabilidades de inclusión de primer orden son esenciales al momento de completar la estrategia de muestreo con el estimador de Horvitz-Thompson. Sin embargo, las probabilidades de inclusión de segundo orden, aunque servirían teóricamente para calcular y estimar la varianza del estimador de Horvitz-Thompson, son ineficientes pues cuando el tamaño de muestra crece, su cálculo se vuelve una total aventura, en muchos casos imposible de finalizar.

Al respecto Tillé (2006) comenta, en el prefacio de su libro de algoritmos de muestreo, que «tiene la convicción de que las probabilidades de inclusión de segundo orden no son usadas para nada» y añade que «en la práctica el uso de las probabilidades de inclusión de segundo orden es muchas veces

irreal porque son muy difíciles de calcular computacionalmente y  $n^2$  términos deben ser sumados para calcular la estimación».

Para evitar el cálculo y estimación de la varianza del estimador de Horvitz-Thompson con dobles sumas, Deville & Tillé (2005) proponen una aproximación de la varianza<sup>5</sup> y su respectiva estimación para un diseño exponencial<sup>6</sup> dada por el siguiente resultado

**Resultado 4.4.4.** *Para la familia de diseños exponenciales, la aproximación de la varianza del estimador de Horvitz-Thompson está dada por*

$$Var(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_{k \in U} \frac{b_k}{\pi_k^2} (y_k - y_k^*)^2 \quad (4.4.9)$$

donde

$$y_k^* = \pi_k \frac{\sum_{l \in U} b_l y_l / \pi_l}{\sum_{l \in U} b_l} \quad (4.4.10)$$

Hájek (1981) ha propuesto la siguiente escogencia de  $b_k$

$$b_k = \frac{N\pi_k(1 - \pi_k)}{(N - 1)} \quad (4.4.11)$$

Un estimador de la anterior aproximación de la varianza está dada por

$$\widehat{Var}(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_{k \in S} \frac{c_k}{\pi_k^2} (y_k - \hat{y}_k^*)^2 \quad (4.4.12)$$

donde

$$\hat{y}_k^* = \pi_k \frac{\sum_{l \in S} c_l y_l / \pi_l}{\sum_{l \in S} c_l} \quad (4.4.13)$$

Deville (1993) ha propuesto la siguiente escogencia de  $c_k$

$$c_k = (1 - \pi_k) \frac{n}{(n - 1)} \quad (4.4.14)$$

**Ejemplo 4.4.3.** Para nuestra población de ejemplo  $U$ , existen  $\binom{N}{n} = 10$  posibles muestras  $\pi$ PT de tamaño  $n = 3$ . Utilizando las probabilidades de inclusión del ejemplo 4.4.1, realice el cálculo léxico-gráfico del estimador de Horvitz-Thompson, calcule la aproximación de la varianza dada por la expresión (4.4.9) y para cada muestra estime esta varianza usando la expresión (4.4.12) y compruebe su insesgamiento.

### Acerca del muestreo $\pi$ PT

En general, la familia de diseños de muestreo  $\pi$ PT son utilizados cuando el comportamiento de la característica de interés en la población finita es bastante asimétrico. Para la estimación de totales, este diseño es más eficiente, en términos de reducción de la varianza. Sin embargo, cuando se quiere estimar otro tipo de parámetros poblacionales, como razones o medianas, los diseños de muestreo proporcionales al tamaño no son muy apetecidos, pues es difícil encontrar una característica de información auxiliar bien correlacionada con la razón entre las dos características de interés. En resumen, se tiene que:

<sup>5</sup>Existe mucha literatura escrita alrededor del tema de aproximaciones y simplificaciones de la varianza del estimador de Horvitz-Thompson. Para una mejor comprensión del tema Matei & Tillé (2005) han escrito un excelente artículo de revisión.

<sup>6</sup>Los diseños de muestreo exponenciales son una gran familia que incluyen diseños tales como muestreo aleatorio simple, muestreo multinomial, muestreo de probabilidades desiguales con reemplazo y algunos diseños de probabilidades desiguales sin reemplazo. Para más información acerca de los diseños de muestreo exponenciales el lector deberá remitirse a Tillé (2006).

- Se utiliza esencialmente para la estimación de totales poblacionales.
- Al seleccionar hogares no vale la pena utilizar este diseño pues, en general, en cada vivienda hay una misma cantidad de hogares.
- En encuestas de negocios es bueno utilizar diseños proporcionales porque sí existen diferencias en los tamaños considerados (por ejemplo en total de ventas mensuales, número de empleados contratados al año, etc.).
- Debido a que este diseño de muestreo involucra información auxiliar, entonces es más eficiente que el diseño de muestreo aleatorio simple, siempre y cuando la característica de interés esté relacionada positivamente con la información auxiliar.
- Un defecto de este diseño de muestreo es que su varianza no es una función monótona decreciente. Debido a la configuración particular de la información, la varianza puede crecer si se aumenta el tamaño de muestra.

#### 4.4.4 Marco y Lucy

En este apartado de Marco y Lucy suponga que se tienen las mismas condiciones que en el apartado de Marco y Lucy del diseño de muestreo PPT (ver la sección 4.2.4). Siendo así, el marco de muestreo permite conocer los valores poblacionales de una característica de información auxiliar. En este caso ésta es la variable **Income**. Dadas las bondades del marco de muestreo, se quiere seleccionar una muestra de tamaño  $n=2000$  mediante un diseño de muestreo sin reemplazo que induzca probabilidades de inclusión proporcionales a esta característica de información auxiliar.

La selección de la muestra se realiza haciendo uso de la función **S.piPS** del paquete **TeachingSampling** para la cual los argumentos introducidos son: el vector de valores poblacionales de la característica de información auxiliar **Income** y el tamaño de la muestra sin reemplazo  $n=2000$ . Nótese que esta función utiliza el algoritmo de selección de Sunter.

```
data(BigLucy)
attach(BigLucy)

N <- dim(BigLucy)[1]
n <- 2000
res <- S.piPS(n, Income)
sam <- res[,1]
muestra <- BigLucy[sam,]
attach(muestra)
head(muestra)
```

##		ID	Ubication	Level	Zone	Income	Employees	Taxes
##	59842	AB0000059842	C0082783K0219114	Big	County67	2510	258	305
##	57446	AB0000057446	C0188504K0113393	Big	County64	2510	258	305
##	40674	AB0000040674	C0134353K0167544	Big	County52	2510	258	305
##	11922	AB0000011922	C0182831K0119066	Big	County26	2510	258	305
##	4734	AB0000004734	C0296722K0005175	Big	County19	2510	258	305
##	55082	AB0000055082	C0264155K0037742	Big	County62	1911	263	196
##		SPAM	ISO	Years	Segments			
##	59842	yes	yes	2.6	County67	140		
##	57446	yes	yes	46.7	County64	39		
##	40674	yes	yes	7.3	County52	62		



```
## 11922 yes yes 35.1 County26 11
## 4734 yes yes 22.9 County19 28
## 55082 yes yes 34.5 County62 143
```

El resultado de la función `S.piPS` es una muestra ordenada de forma descendente por los valores de la característica de información auxiliar. El siguiente paso es recolectar la información de las características de interés `Employees` e `Taxes` para los elementos incluidos en la muestra realizada.

Después de recolectar la información, es necesario estimar los totales de las características de interés. En esta etapa se utiliza la función `E.piPS` del paquete `TeachingSampling` cuyos argumentos son: `estima`, correspondiente a la lista que contiene los valores observados en la muestra para cada una de las características de interés y `pik.s`, correspondiente al vector de probabilidades de inclusión (proporcionales a la característica de información auxiliar) de los elementos en la muestra.

```
pik.s <- res[,2]
estima <- data.frame(Income, Employees, Taxes)
E.piPS(estima, pik.s)
```

Los resultados para este ejercicio particular son excelentes. Nótese que los estimativos de la varianza no son exactos, pues están dados por el resultado 4.4.2, aunque sí aproximados. Por otra parte, el resultado 4.3.4 asegura que éstos serían menores a los arrojados por la estrategia de muestreo que utiliza un diseño PPT con reemplazo y el estimador de Hansen-Hurwitz. Por supuesto, este diseño de muestreo es más eficiente que el de Poisson, no es de extrañar que los resultados para la variable Ingreso sean tan exactos. Recuerdese que ésta fue la variable utilizada como característica de información auxiliar. La siguiente tabla muestra los resultados para un ejercicio particular. Una vez más, la característica Impuestos tiene un menor coeficiente de variación estimado puesto que está mucho mejor correlacionada con la variable Ingreso.

	N	Income	Employees	Taxes
Estimation	86522.62	36634733.00	5489077.05	1013950.58
Standard Error	1427.70	0.00	81420.11	13836.54
CVE	1.65	0.00	1.48	1.36
DEFF	Inf	0.00	1.08	0.06

Tabla 4.4: *Muestreo  $\pi$ PT: estimación de los totales de las características de interés*

Véase que para obtener estos resultados, fue necesario conocer el valor de  $N$  dado por la longitud del vector de información auxiliar. Nótese que no siempre se puede asegurar el conocimiento del total poblacional. Sin embargo, aunque no se conociera, con la función `HT` se hubiera llegado a los mismos resultados, en términos de la estimación de los totales, pero no se obtendrían los estimativos concernientes a la varianza, tal y como se ilustra a continuación.

```
HT(estima, pik.s)

##           [,1]
## Income    36634733
## Employees 5489077
## Taxes     1013951
```

## 4.5 Ejercicios

- 4.1 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «Cuando el comportamiento de la característica de interés es uniforme en la población es más conveniente utilizar diseños de muestreo proporcionales al tamaño de una característica de información auxiliar».
- 4.2 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «En muestreo Poisson, cuando las probabilidades de inclusión son tales que  $\pi_k = ny_k/t_y$  la varianza del estimador de Horvitz-Thompson es nula».
- 4.3 Complete el cálculo léxico-gráfico del ejemplo 4.1.2.
- 4.4 Suponga una población de 10 elementos  $U = \{e_1, \dots, e_{10}\}$  cuyo marco de muestreo contiene una característica de información auxiliar dada por

$$\mathbf{x} = (62, 151, 76, 77, 80, 60, 194, 78, 74, 61)$$

- Si se desea seleccionar una muestra sin reemplazo de tamaño esperado  $n(S) = 6$ , utilice la expresión (4.3.2) para construir un vector de probabilidades de inclusión proporcionales a  $\mathbf{x}$  tales que  $0 < \pi_k \leq 1$  para todo  $k \in U$  y verifique  $\sum_U \pi_k = 6$
- Utilice el algoritmo de la sección 4.1.1 para seleccionar una muestra Poisson teniendo en cuenta que se obtuvo el siguiente conjunto de números aleatorios uniformes

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \{0.858, 0.698, 0.541, 0.320, 0.965, 0.497, 0.208, 0.006, 0.340, 0.206\}$$

- Utilice el método de Sunter para seleccionar una muestra  $\pi$ PT teniendo en cuenta que se obtuvo el siguiente conjunto de números aleatorios uniformes

$$\boldsymbol{\xi} = \{0.322, 0.542, 0.032, 0.141, 0.453, 0.668, 0.174, 0.318, 0.691, 0.006\}$$

- 4.5 (Särndal, Swensson & Wretman 1992, p. 117) Para estimar el total de la característica de interés  $y$  de una población de  $N = 284$  elementos, se utilizó un diseño de muestreo Poisson de tamaño de muestra esperado  $n(S) = 10$ . Las probabilidades de inclusión fueron proporcionales a una característica de información auxiliar  $x$  cuyo total poblacional es  $t_x = 8182$ . Luego, el algoritmo de selección arrojó una muestra de tamaño efectivo de 12 elementos, para las cuales se obtuvo la siguiente información

$x_k$	$y_k$
54	5246
671	59877
28	2208
27	2546
29	2903
62	6850
42	3773
48	4055
33	4014
446	38945
12	1162
46	4852

- Calcule una estimación insesgada para el total poblacional de la característica de interés, reporte el coeficiente de variación estimado y un intervalo de confianza al 95 %.

- Calcule una estimación insesgada para la media poblacional de la característica de interés, reporte el coeficiente de variación estimado y un intervalo de confianza al 95 %.
- Utilice el estimador alternativo para calcular estimaciones tanto del total como de la media poblacional.

4.6 Complete el cálculo léxico-gráfico del ejemplo 4.4.3.

4.7 Suponiendo que los datos del ejercicio 4.5 provienen de un diseño de muestreo  $\pi$ PT, calcule una estimación para el total de la característica de interés. Utilizando la aproximación de la varianza dada en (4.4.12), reporte el coeficiente de variación estimado y un intervalo de confianza al 95 %.

4.8 Utilice el esquema de mínimo soporte para especificar un diseño de muestreo  $\pi$ PT de tamaño  $n = 3$  para una población de tamaño  $N = 6$  cuyo vector de probabilidades de inclusión de primer orden es

$$\pi = (0.07, 0.17, 0.41, 0.61, 0.83, 0.91)'$$

Demuestre que el procedimiento converge en cuatro pasos que inducen cinco muestras y calcule la probabilidad de selección de cada muestra.

4.9 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «En muestreo PPT es posible utilizar los estimadores de Horvitz-Thompson y de Hansen-Hurwitz, al comparar las dos estrategias se tiene que las dos aportan la misma precisión pero diferente confiabilidad».

4.10 Complete el cálculo léxico-gráfico del ejemplo 4.2.2.

4.11 Suponga una población de 12 elementos  $U = \{e_1, \dots, e_{12}\}$  cuyo marco de muestreo contiene una característica de información auxiliar dada por

$$\mathbf{x} = (674, 802, 829, 726, 709, 789, 742, 791, 805, 797, 771, 692)$$

- Si se desea seleccionar una muestra con reemplazo de tamaño  $m = 6$ , construya un vector de probabilidades de selección proporcionales a  $\mathbf{x}$  tales que  $0 < p_k \leq 1$  para todo  $k \in U$  y verifique  $\sum_U p_k = 6$
- Utilice el método acumulativo total para seleccionar una muestra PPT teniendo en cuenta que para cada una de las seis extracciones se generaron los siguientes números aleatorios uniformes

$$\varepsilon = \{0.075, 0.397, 0.280, 0.407, 0.982, 0.782\}$$

- Utilice el método de Lahiri para seleccionar una muestra PPT usando sus propios números aleatorios  $\eta$  y  $l$  en cada una de las extracciones.

4.12 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «Para la estimación de totales, el diseño PPT es preferido sobre el diseño  $\pi$ PT porque permiten agilizar los cálculos computacionales de varianza y coeficiente de variación».

4.13 Demuestre o refute la siguiente afirmación: «Para la estimación de totales, el diseño PPT siempre es más eficiente que el diseño de muestreo aleatorio simple con reemplazo».

4.14 Suponga una población de  $N = 12$  elementos cuyos valores observados para la característica de interés son

$$y = \{50, 53, 44, 45, 53, 31, 35, 45, 34, 44, 52, 52\}$$

y los valores observados para la característica de información auxiliar son

$$x = \{1005, 1072, 884, 907, 1068, 625, 705, 909, 692, 891, 1046, 1052\}$$

- Calcule la correlación entre  $y^2/x$  y  $x$ .
  - Realice un gráfico de dispersión para  $y/x$  y explique si se puede afirmar que la razón es constante para los elementos de la población.
  - Utilice el análisis de regresión simple para estimar el valor del intercepto y decida si este es estadísticamente diferente de cero.
  - Para un tamaño de muestra  $m = 6$ , utilice la expresión (4.2.13) y los anteriores argumentos para justificar o descalificar la escogencia del diseño de muestreo PPT para esta población.
- 4.15 Asumiendo que los datos del ejercicio 4.5 provienen de un diseño de muestreo PPT, calcule la estimación de Hansen-Hurwitz para el total de la característica de interés, reporte el coeficiente de variación estimado y un intervalo de confianza al 95 %. También calcule la estimación de Horvitz-Thompson para el total de la característica de interés.

## Capítulo 5

# Muestreo estratificado

La estratificación es una de las técnicas más difundidas y usadas en muestreo puesto que tiene funcionalidades estadísticas y administrativas que la hacen atractiva: permite tratar con subpoblaciones, aumenta la eficiencia de las estimaciones y contribuye a la administración eficiente de grandes encuestas.

Valliant, Dorfman & Royall (2000)

En algunas ocasiones, la característica de interés tiende a tomar distintos valores promedio con respecto a subgrupos poblacionales. De alguna manera, si la población tiene un comportamiento diferente en estos subgrupos, es posible mejorar la precisión de las estimaciones tomando muestras independientes en cada uno de los subgrupos poblacionales. Lo anterior es intuitivo cuando entre los subgrupos existe mucha variabilidad, pero dentro de ellos la variabilidad es constante.

En general, cuando existe en el marco de muestreo información auxiliar que permite la división de la población en  $H$  subgrupos con el objetivo de seleccionar una muestra en cada subgrupo, se dice que la estrategia de muestreo utiliza un **diseño de muestreo estratificado** y el nombre de los subgrupos, formados antes de la recolección de la información, se denomina **estratos**. Nótese la diferencia con los subgrupos poblacionales llamados **dominios**, en donde la partición de la población se realiza después de la recolección de la información.

Con frecuencia, tenemos información adicional que nos ayuda a diseñar la estrategia de muestreo. Cuando esta información se refiere a la pertenencia de cada uno de los elementos a un subgrupo, podemos aplicar una estrategia que utilice un diseño de muestreo estratificado. No es solamente la disponibilidad de esta información auxiliar la que nos lleva a utilizar un diseño de muestreo estratificado, además de esto:

1. La variable de interés asume distintos valores promedio en diferentes sub-poblaciones.
2. De una u otra forma (proceso logístico y/o de recolección de datos) es mejor estratificar y dividir la población en particiones. Lehtonen & Pahkinen (2003) afirman que algunas variables típicas de estratificación son de tipo regional (municipio, estado o provincia), demográfico (género o grupo de edad) y socioeconómico (grupo de ingresos). Existen censos, en periodos anteriores que pueden contener esta valiosa información.

La necesidad de estratificar<sup>1</sup> la población surge por una o más de las siguientes razones:

---

<sup>1</sup>Dividir la población en  $H$  estratos disjuntos.

- Por razones administrativas. Existen marcos de muestreo que ya tienen dividida la población en subgrupos formados naturalmente.
- Se desea garantizar que la muestra seleccionada sea representativa con respecto al comportamiento de la población según la información auxiliar. Al seleccionar una muestra aleatoria simple de una población de personas, podría suceder que la muestra seleccionada no incluyera a ningún hombre.
- Se requieren estimativos con alta precisión discriminados para cada sub-población. Aumentar el tamaño de muestra en los estratos menos representados.
- Menor Coste. Distintos esquemas operativos para diversos estratos. Encuestas por correo para empresas grandes. Menor tamaño de muestras en zonas de tolerancia o zonas de difícil manejo del orden público.
- Reducción de la varianza en la estimación. Personas de distintas edades con distintas presiones sanguíneas (estratificar por grupos de edad). Se reduce la varianza pues los estratos son homogéneos por dentro, pero heterogéneos entre sí.

El objetivo del diseño estratificado es dar un tratamiento particular a cada subgrupo, ya sea por razones económicas, administrativas o logísticas. Es indispensable delimitar bien los subgrupos en la etapa de diseño. Por ejemplo, en un estudio dentro de una universidad, si se quiere averiguar el número de horas que los estudiantes permanecen enfrente de un computador, no es una buena idea (defecto técnico) dividir la población en cursos porque los cursos no brindan una partición de la población, dado que en distintos cursos pueden estar los mismos estudiantes.

## 5.1 Fundamentos teóricos

Suponga que el marco de muestreo es tal que permite conocer la pertenencia de cada elemento de la población  $U$  en  $H$  sub-grupos poblacionales separados  $U_h$  ( $h = 1, 2, \dots, H$ ) también llamados estratos. Éstos se definen como grupos de elementos mutuamente excluyentes. Cada elemento puede pertenecer a uno y sólo a un estrato. De tal forma que

- $\bigcup_{h=1}^H U_h = U$
- $U_h \cap U_i = \emptyset \quad h \neq i$

Cada estrato  $U_h$  es de tamaño  $N_h$ , por tanto

$$\sum_{h=1}^H N_h = N \quad (5.1.1)$$

Con la población dividida en  $H$  estratos, el objetivo sigue siendo estimar los siguientes parámetros poblacionales

1. El total poblacional,

$$t_y = \sum_{k \in U} y_k = \sum_{h=1}^H \sum_{k \in U_h} y_k = \sum_{h=1}^H t_{yh} \quad (5.1.2)$$

donde  $t_{yh} = \sum_{k \in U_h} y_k$

2. La media poblacional,

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k \in U} y_k}{N} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^H \sum_{k \in U_h} y_k = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^H N_h \bar{y}_h \quad (5.1.3)$$

$$\text{donde } \bar{y}_h = \frac{1}{N_h} \sum_{k \in U_h} y_k$$

Sampath (2001) afirma que dependiendo de la naturaleza de los estratos, diferentes estrategias de muestreo pueden ser utilizadas en diferentes estratos. De tal forma que, en ausencia de información auxiliar, se utilice una estrategia aleatoria simple en algunos estratos, mientras que para aquellos sub-grupos tales que el marco de muestreo permita el conocimiento de información auxiliar continua, es posible aplicar una estrategia de muestreo proporcional al tamaño, e incluso para aquellos sub-grupos en los que, por obligación (logística o técnica), se deba aplicar un censo.

Es importante aclarar que la selección de las  $H$  muestras es realizada de manera independiente en cada estrato.<sup>2</sup> De tal forma que la muestra aleatoria  $S^3$  queda definida por

$$S = \bigcup_{h=1}^H S_h. \quad (5.1.4)$$

En particular, si la muestra seleccionada es  $s$ , entonces

$$s = \bigcup_{h=1}^H s_h. \quad (5.1.5)$$

Nótese que si el tamaño de muestra en cada estrato es igual a  $n_h$ , entonces el tamaño de la muestra seleccionada mediante un diseño de muestreo estratificado es

$$n = \sum_{h=1}^H n_h. \quad (5.1.6)$$

Así, para cada estrato  $h \quad h = 1, \dots, H$  existe un conjunto de todas las posibles muestras denotado como soporte del estrato  $h$ , o  $Q_h$ . Cada uno de los soportes  $Q_h$  induce la definición del soporte general de la siguiente manera

$$Q^H = \times_{h=1}^H Q_h. \quad (5.1.7)$$

En donde  $\times$  denota el operador de producto cartesiano<sup>4</sup>. La cardinalidad de cada soporte  $Q_h$  depende del diseño de muestreo utilizado en la selección de la muestra del estrato  $h$ . Así

$$\#Q^H = \prod_{h=1}^H \#Q_h. \quad (5.1.8)$$

Por supuesto, el diseño de muestreo estratificado es un autentico diseño de muestreo como lo enuncian los siguientes resultados.

<sup>2</sup>Esto se debe a la independencia entre las selecciones. Aunque se conozcan qué unidades serán incluidas en la muestra de algún estrato, este conocimiento no afecta, de ninguna manera, la inclusión de cualquier otra unidad en los restantes estratos.

<sup>3</sup>Nótese que  $S$  es una variable aleatoria y que las medidas de probabilidad utilizadas para la selección de muestras en cada estrato son distintas.

<sup>4</sup>Por ejemplo, en presencia de dos conjunto  $A = \{a, b\}$  y  $B = \{1, 2\}$ , entonces el producto cartesiano entre  $A$  y  $B$  es  $A \times B = \{(a, 1), (a, 2), (b, 1), (b, 2)\}$ .

**Resultado 5.1.1.** Siendo  $p_1(s_1), p_2(s_2), \dots, p_H(s_H)$  los diseños de muestreo utilizados en cada estrato  $h = 1, \dots, H$ , entonces el diseño de muestreo estratificado se define como

$$p(s) = \prod_{h=1}^H p_h(s_h) \quad (5.1.9)$$

**Prueba.** Se tiene que

$$\begin{aligned} p(s) &= Pr(\text{Seleccionar } s_1 \text{ de } U_1, \dots, \text{Seleccionar } s_H \text{ de } U_H) \\ &= p_1(s_1) \cdots p_H(s_H), \end{aligned}$$

puesto que el proceso de selección es independiente en cada estrato. ■

**Resultado 5.1.2.** El diseño de muestreo estratificado cumple que

1.  $p(s) \geq 0$  para todo  $s \in Q$
2.  $\sum_{s \in Q} p(s) = 1$

**Prueba.** La primera propiedad se tiene de inmediato puesto que todas las expresiones en 5.1.9 son mayores o iguales a cero. La segunda propiedad se tiene por inducción matemática sobre el número de estratos.

- Si  $H = 2$  existen dos soporte, uno para cada estrato,  $Q_1$  definido como

$$Q_1 = \{s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1H_1}\} \quad (5.1.10)$$

y  $Q_2$  definido como

$$Q_2 = \{s_{21}, s_{22}, \dots, s_{2H_2}\} \quad (5.1.11)$$

tales que

$$Q^2 = \left\{ s_{11} \cup s_{21}, s_{11} \cup s_{22}, \dots, s_{11} \cup s_{2H_2}, \dots, s_{1H_1} \cup s_{2H_2} \right\} \quad (5.1.12)$$

Ahora, como la selección de las muestras se realiza en forma independiente, en particular se tiene que

$$p\left(s_{11} \cup s_{21}\right) = p(s_{11})p(s_{21}) \quad (5.1.13)$$

de manera análoga para el elemento que pertenezca al soporte. Ahora,

$$\begin{aligned} \sum_{s \in Q} p(s) &= p(s_{11})p(s_{21}) + p(s_{11})p(s_{22}) + \dots + p(s_{11})p(s_{2H_2}) + \\ &\quad \dots + p(s_{1H_1})p(s_{21}) + p(s_{1H_1})p(s_{22}) + \dots + p(s_{1H_1})p(s_{2H_2}) \\ &= p(s_{11}) \underbrace{[p(s_{21}) + p(s_{22}) + \dots + p(s_{2H_2})]}_1 + \\ &\quad \dots + p(s_{1H_1}) \underbrace{[p(s_{21}) + p(s_{22}) + \dots + p(s_{2H_2})]}_1 \\ &= p(s_{11}) + \dots + p(s_{1H_1}) \\ &= 1 \end{aligned}$$



- Si  $H = k$ , se supone que

$$\sum_{s \in Q^k} p(s) = 1 \quad (5.1.14)$$

donde

$$Q^k = \left\{ \bigcup_{h=1}^k s_h \mid s_h \in Q_h \right\}. \quad (5.1.15)$$

- Si  $H = k + 1$ , se tienen  $k + 1$  soportes tales que

$$\begin{aligned} Q_1 &= \{s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1H_1}\} \\ &\vdots \\ Q_k &= \{s_{k1}, s_{k2}, \dots, s_{kH_k}\} \\ Q_{k+1} &= \{s_{k+1,1}, s_{k+1,2}, \dots, s_{k+1,H_{k+1}}\} \end{aligned} \quad (5.1.16)$$

Por consiguiente se tiene que

$$\begin{aligned} \sum_{s \in Q} p(s) &= p(s_{k+1,1}) \left[ \underbrace{\sum_{s \in Q^k} p(s)}_1 \right] + \dots + p(s_{k+1,H_{k+1}}) \left[ \underbrace{\sum_{s \in Q^k} p(s)}_1 \right] \\ &= p(s_{k+1,1}) + \dots + p(s_{k+1,H_{k+1}}) \\ &= 1 \end{aligned}$$

■

### 5.1.1 Estimación en el muestreo estratificado

Si uno de los propósitos de la estratificación es obtener estimaciones más precisas, cabe preguntarse qué forma toman los estimadores y cómo definirlos a través de los estratos; pero aun más ¿qué forma toma la varianza del estimador en los estratos y su varianza estimada?. Los siguientes resultados, responden a los anteriores cuestionamientos.

**Resultado 5.1.3.** Si  $\hat{t}_{yh}$  estima insesgadamente el total de la característica de interés  $t_{yh}$  del subgrupo poblacional  $h$  con varianza igual a  $Var(\hat{t}_{yh})$ , entonces un estimador insesgado para el total poblacional  $t_y$  está dado por

$$\hat{t}_y = \sum_{h=1}^H \hat{t}_{yh} \quad (5.1.17)$$

el cual tiene una varianza igual a

$$Var(\hat{t}_y) = \sum_{h=1}^H Var(\hat{t}_{yh}) \quad (5.1.18)$$

**Prueba.** Dado que  $\hat{t}_{yh}$  es insesgado, tenemos que

$$\begin{aligned} E \left( \sum_{h=1}^H \hat{t}_{yh} \right) &= \sum_{h=1}^H E(\hat{t}_{yh}) \\ &= \sum_{h=1}^H t_{yh} = t_y \end{aligned}$$

Por otro lado, acudiendo a la independencia de la selección de muestras en cada estrato

$$\begin{aligned} Var \left( \sum_{h=1}^H \hat{t}_{yh} \right) &= \sum_{h=1}^H Var(\hat{t}_{yh}) + \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^H \underbrace{Cov(\hat{t}_{yh}, \hat{t}_{yi})}_0 \\ &= \sum_{h=1}^H Var(\hat{t}_{yh}) \end{aligned}$$

■

**Resultado 5.1.4.** Si  $\widehat{Var}(\hat{t}_{yh})$  estima insesgadamente a  $Var(\hat{t}_{yh})$ , entonces un estimador insesgado para  $Var(\hat{t}_y)$  está dado por

$$\widehat{Var}(\hat{t}_y) = \sum_{h=1}^H \widehat{Var}(\hat{t}_{yh}) \quad (5.1.19)$$

**Prueba.** La demostración es inmediata por el insesgamiento en cada uno de los estratos. ■

### 5.1.2 El estimador de Horvitz-Thompson

**Resultado 5.1.5.** Para el diseño de muestreo estratificado, el estimador de Horvitz-Thompson, su varianza y su varianza estimada están dados por:

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_{h=1}^H \hat{t}_{yh,\pi} \quad (5.1.20)$$

$$Var_{EST}(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_{h=1}^H Var_{p_h}(\hat{t}_{yh,\pi}) \quad (5.1.21)$$

$$\widehat{Var}_{EST}(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_{h=1}^H \widehat{Var}_{p_h}(\hat{t}_{yh,\pi}) \quad (5.1.22)$$

donde

$$\hat{t}_{yh,\pi} = \sum_{k \in S_h} \frac{y_k}{\pi_k} \quad (5.1.23)$$

Con  $Var_{p_h}(\hat{t}_{yh,\pi})$  es la varianza de  $\hat{t}_{yh,\pi}$  en el  $h$ -ésimo estrato y  $\widehat{Var}_{p_h}(\hat{t}_{yh,\pi})$  es la estimación de  $Var_{p_h}(\hat{t}_{yh,\pi})$  en el  $h$ -ésimo estrato.

**Ejemplo 5.1.1.** Nuestra población ejemplo  $U$  dada por

$$U = \{\mathbf{Yves}, \mathbf{Ken}, \mathbf{Erik}, \mathbf{Sharon}, \mathbf{Leslie}\}$$

se divide en dos estratos de la siguiente forma

$$U_1 = \{\mathbf{Erik}, \mathbf{Sharon}\}$$

y el segundo conformado por:

$$U_2 = \{\mathbf{Yves}, \mathbf{Ken}, \mathbf{Leslie}\}$$

En el primer estrato se selecciona una muestra aleatoria de tamaño  $n_1 = 1$  de acuerdo a un diseño de muestreo aleatorio simple sin reemplazo. Por otra parte, en el segundo estrato se selecciona una muestra de tamaño  $n_2 = 2$  de acuerdo al siguiente diseño de muestreo

$$p_2(s) = \begin{cases} 1/4, & \text{si } s = \{\mathbf{Yves}, \mathbf{Ken}\}, \\ 1/4, & \text{si } s = \{\mathbf{Yves}, \mathbf{Leslie}\}, \\ 1/2, & \text{si } s = \{\mathbf{Ken}, \mathbf{Leslie}\}. \end{cases}$$

Realice el cálculo léxico-gráfico para comprobar el insesgamiento del estimador de Horvitz-Thompson para todas las posibles muestras de tamaño  $n = 3$ . Defina los soporte  $Q_1$  y  $Q_2$  así como el soporte general  $Q^2$  para cada estrato.

En las próximas secciones se estudiarán los diseños estratificados más utilizados en la práctica.

## 5.2 Diseño de muestreo aleatorio estratificado

Al igual que el muestreo aleatorio simple sin reemplazo, el diseño de muestreo aleatorio estratificado (EST-MAS) es el más sencillo de los diseños estratificados. En este caso particular se selecciona una muestra aleatoria simple en cada estrato, de tal forma que las selecciones sean independientes. Este diseño de muestreo es utilizado cuando la variabilidad de la característica de interés dentro de los estratos es similar; en otras palabras, cuando se sabe que el comportamiento de la característica de interés al interior de los estratos es homogéneo. Sin embargo, también se utiliza cuando no se dispone de ninguna información auxiliar continua que permita hacer uso de diseños de muestreo, en cada estrato, que permitan mejorar la eficiencia de una muestra aleatoria simple.

En cada estrato  $h$  una muestra aleatoria simple sin reemplazo de tamaño  $n_h$  es seleccionada, de manera independiente, de la población del estrato de tamaño  $N_h$ . Aunque el diseño de muestreo aleatorio simple es utilizado como un método final de selección de elemento, en conjunto el diseño estratificado puede resultar dramáticamente más eficiente que utilizar un diseño de muestreo aleatorio simple sin dividir la población.

**Definición 5.2.1.** Para tamaños de muestra fijos en cada estrato, denotados como  $n_1, \dots, n_H$ , un diseño de muestreo se dice *estratificado aleatorio simple sin reemplazo* si la probabilidad de seleccionar una muestra de tamaño  $n$  está dada por

$$p(s) = \begin{cases} \prod_{h=1}^H \frac{1}{\binom{N_h}{n_h}}, & \text{si } \sum_{h=1}^H n_h = n \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5.2.1)$$

Nótese que  $\sum_{s \in Q^H} p(s) = 1$  porque  $\#Q^H = \prod_{h=1}^H \binom{N_h}{n_h}$ .

### 5.2.1 Algoritmos de selección

En la selección de las muestras aleatorias simples sin reemplazo en cada estrato es posible utilizar los algoritmos de muestreo dados en el capítulo 3, de tal forma que los siguientes pasos se deben realizar.

- Separar la población en  $H$  subgrupos o estratos mediante la caracterización poblacional de información auxiliar.

- En cada estrato seleccionar una muestra aleatoria simple sin reemplazo. Los algoritmos utilizados en la selección de la muestra dentro de cada estrato pueden ser los métodos coordinado negativo o el método de selección y rechazo de Fan, Muller & Rezucha (1962).
- Cada una de las  $H$  selecciones es realizada de manera independiente

**Ejemplo 5.2.1.** Suponga que nuestra población de ejemplo  $U$  está particionada de acuerdo a la sección anterior. Es necesario definir los dos estratos en R, de manera tal que ningún elemento tenga una doble pertenencia a algún estrato.

```
U1 <- c("Erik", "Sharon")
N1 <- length(U1)
U2 <- c("Yves", "Ken", "Leslie")
N2 <- length(U2)
```

R permite realizar operaciones entre conjuntos de datos. En particular, el operador `union` es utilizado para verificar que la unión de los estratos dé como resultado la población de ejemplo  $U$ . Nótese que el tamaño poblacional es la suma de los tamaños de los dos estratos.

```
U <- union(U1,U2)
N <- N1+N2

U

## [1] "Erik" "Sharon" "Yves" "Ken" "Leslie"

N

## [1] 5
```

Se ha decidido seleccionar una muestra aleatoria simple sin reemplazo de tamaño  $n_1 = 1$  para  $U_1$  y una muestra aleatoria simple sin reemplazo de tamaño  $n_2 = 2$  para  $U_2$ . De tal forma que la muestra general será de tamaño  $n = n_1 + n_2 = 3$ .

```
sam1 <- sample(N1, 1, replace=FALSE)
U1[sam1]

## [1] "Sharon"

sam2 <- S.SI(N2,2)
U2[sam2]

## [1] "Ken" "Leslie"

sam <- union(U1[sam1],U2[sam2])
sam

## [1] "Sharon" "Ken" "Leslie"
```

Por supuesto, es posible utilizar la función `sample` que viene incorporada en el ambiente genérico de R o también es posible utilizar la función `S.SI` del paquete `TeachingSampling`. Sin importar

el algoritmo de selección de las muestras aleatorias simples sin reemplazo, es importante notar que se han seleccionado tantas muestras como estratos existen en la población.

### 5.2.2 El estimador de Horvitz-Thompson

La estrategia de muestreo queda definida con el uso del estimador de Horvitz-Thompson. Esta estrategia es la más conocida, aplicada y discutida en los libros de texto. Para esto, el siguiente resultado muestra la construcción de las probabilidades de inclusión.

**Resultado 5.2.1.** *Para un diseño de muestreo aleatorio estratificado, las probabilidades de inclusión de primer y segundo orden están dadas por:*

$$\pi_k = \frac{n_h}{N_h} \quad \text{si } k \in U_h \quad (5.2.2)$$

$$\pi_{kl} = \begin{cases} \frac{n_h}{N_h}, & \text{si } k = l, k \in U_h, \\ \frac{n_h}{N_h} \frac{n_h - 1}{N_h - 1}, & \text{si } k, l \in U_h, \\ \frac{n_h}{N_h} \frac{n_i}{N_i}, & \text{si } k \in U_h, l \in U_i, i \neq h. \end{cases} \quad (5.2.3)$$

respectivamente. La covarianza de las variables indicadoras está dada por

$$\Delta_{kl} = \begin{cases} \frac{n_h}{N_h} \frac{N_h - n_h}{N_h}, & \text{si } k = l, k \in U_h, \\ -\frac{n_h}{N_h^2} \frac{(N_h - n_h)}{(N_h - 1)}, & \text{si } k, l \in U_h, \\ 0, & \text{si } k \in U_h, l \in U_i, i \neq h. \end{cases} \quad (5.2.4)$$

**Prueba.** Sea  $k \in U_h$

$$\begin{aligned} \pi_k &= Pr(k \in S) = Pr(k \in S_h) \\ &= Pr(I_k(S_h) = 1) \\ &= \frac{\binom{1}{1} \binom{N_h - 1}{n_h - 1}}{\binom{N_h}{n_h}} = \frac{n_h}{N_h} \end{aligned}$$

por otro lado, si  $k, l \in U_h$

$$\begin{aligned} \pi_{kl} &= Pr(k \in S_h \text{ y } l \in S_h) \\ &= Pr(I_k(S_h) = 1 | I_l(S_h) = 1) Pr(I_l(S_h) = 1) \\ &= \frac{n_h - 1}{N_h - 1} \frac{n_h}{N_h} = \frac{n_h}{N_h} \frac{n_h - 1}{N_h - 1} \end{aligned}$$

Pero, si  $k \in U_h, l \in U_i, i \neq h$ , por la selección independiente en los estrato  $h$  e  $i$ , se tiene que

$$\begin{aligned} \pi_{kl} &= Pr(k \in S_h \text{ y } l \in S_i) \\ &= Pr(k \in S_h) Pr(l \in S_i) \\ &= \frac{n_h}{N_h} \frac{n_i}{N_i} \end{aligned}$$



Una de las razones por las que se utiliza el diseño de muestreo estratificado es porque se desean estimativos de gran precisión en los subgrupos. Siendo así, al aplicar un diseño EST-MAS se tiene el siguiente resultado que permite obtener estimaciones insesgadas y precisas para cada subgrupo poblacional.

**Resultado 5.2.2.** *Bajo un diseño de muestreo aleatorio simple sin reemplazo en el estrato  $h$ , un estimador insesgado del total  $t_{yh}$ , su varianza y su varianza estimada están dados por*

$$\hat{t}_{yh,\pi} = \frac{N_h}{n_h} \sum_{k \in S_h} y_k \quad (5.2.5)$$

$$Var_{MAS}(\hat{t}_{yh,\pi}) = \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{y_{U_h}}^2 \quad (5.2.6)$$

$$\widehat{Var}_{MAS}(\hat{t}_{yh,\pi}) = \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{y_{S_h}}^2 \quad (5.2.7)$$

respectivamente. En donde

$$S_{y_{U_h}}^2 = \frac{1}{N_h - 1} \sum_{k \in U_h} (y_k - \bar{y}_{U_h}), \quad h = 1, \dots, H. \quad (5.2.8)$$

la **varianza poblacional** de la característica de interés en el estrato  $U_h$  y con

$$S_{y_{S_h}}^2 = \frac{1}{n_h - 1} \sum_{k \in S_h} (y_k - \bar{y}_{S_h}), \quad h = 1, \dots, H. \quad (5.2.9)$$

la **varianza muestral** de los valores de la característica de interés en la muestra aleatoria del estrato  $S_h$ . Nótese que  $\hat{t}_{yh,\pi}$  es insesgado para el total  $t_{yh}$  de la característica de interés  $y$ , y que  $\widehat{Var}_{MAS}(\hat{t}_{yh,\pi})$  es insesgado para  $Var_{MAS}(\hat{t}_{yh,\pi})$

**Prueba.** Al notar que el subgrupo  $U_h$  puede ser tratado como una población separada, la demostración es inmediata al seguir los lineamientos de la demostración del resultado 3.2.4. ■

Una vez se tienen las estimaciones para los subgrupos poblacionales o estratos, se sigue que el total poblacional  $t_y$  puede ser estimado usando el siguiente resultado.

**Resultado 5.2.3.** *Para un diseño de muestreo aleatorio estratificado, el estimador de Horvitz-Thompson del total poblacional  $t_y$ , su varianza y su varianza estimada están dados por:*

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_{h=1}^H \hat{t}_{yh,\pi} = \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{n_h} \sum_{k \in S_h} y_k \quad (5.2.10)$$

$$Var_{MAE}(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_{h=1}^H \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{y_{U_h}}^2 \quad (5.2.11)$$

$$\widehat{Var}_{MAE}(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_{h=1}^H \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{y_{S_h}}^2 \quad (5.2.12)$$

respectivamente. Nótese que  $\hat{t}_{y,\pi}$  es insesgado para el total  $t_y$  de la característica de interés  $y$ , y que  $\widehat{Var}_{MAE}(\hat{t}_{y,\pi})$  es insesgado para  $Var_{MAE}(\hat{t}_{y,\pi})$ .

**Prueba.** Dado que  $\hat{t}_{yh,\pi}$  estima insesgadamente el total  $t_{yh}$  del subgrupo poblacional  $h$  con varianza dada por  $\frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{yU_h}^2$ , entonces al utilizar los resultados 5.1.3. y 5.1.4 se tiene de manera inmediata la demostración. ■

**Ejemplo 5.2.2.** Para nuestra población de ejemplo  $U$ , existen  $\binom{3}{2}\binom{2}{1} = 6$  posibles muestras de tamaño  $n = 3$ . Realice el cálculo léxico-gráfico del estimador de Horvitz-Thompson y compruebe el insesgamiento y la varianza.

### 5.2.3 Estimación de la media poblacional

Una de las formas de conocer si existen diferencias con respecto a los valores que toma la característica de interés en los diferentes estratos, es estimar la media  $\bar{y}_{U_h}$  en el subgrupo  $U_h$ . De hecho, el diseño estratificado adquiere más validez y ganancia en precisión cuando el comportamiento promedio de la característica de interés es diferente en cada estrato.

**Resultado 5.2.4.** Bajo un diseño de muestreo aleatorio simple sin reemplazo en el estrato  $h$ , un estimador insesgado de la media  $\bar{y}_{U_h}$ , su varianza y su varianza estimada están dados por

$$\hat{y}_{U_h,\pi} = \frac{1}{n_h} \sum_{k \in S_h} y_k \quad (5.2.13)$$

$$Var_{MAS}(\hat{y}_{U_h,\pi}) = \frac{1}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{yU_h}^2 \quad (5.2.14)$$

$$\widehat{Var}_{MAS}(\hat{y}_{U_h,\pi}) = \frac{1}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{y_{s_h}}^2 \quad (5.2.15)$$

respectivamente. Nótese que  $\hat{y}_{U_h,\pi}$  es insesgado para la media del estrato  $\bar{y}_{U_h}$  de la característica de interés  $y$ , y que  $\widehat{Var}_{MAS}(\hat{y}_{U_h,\pi})$  es insesgado para  $Var_{MAS}(\hat{y}_{U_h,\pi})$ .

Por el contrario del razonamiento que se tuvo en la estimación del total poblacional, **es equivocado pensar de la siguiente manera:**

Si un estimador insesgado del total poblacional  $t_y$  es la suma de cada una de las estimaciones en los  $H$  estratos, entonces un estimador del promedio poblacional  $\bar{y}_U$  será un promedio de los promedios estimados en los  $H$  estratos.

El anterior razonamiento es intuitivo pero es errado la siguiente razón:

$$\bar{y}_U \neq \frac{\bar{y}_{U_1} + \bar{y}_{U_2} + \dots + \bar{y}_{U_H}}{H}$$

Es fácil verlo con nuestra población de ejemplo  $U$  en donde el primer estrato  $U_1$  tiene una media igual a  $\bar{y}_{U_1} = 67.5$ , el segundo estrato  $U_2$  tiene una media igual a  $\bar{y}_{U_2} = 33.67$ . Por tanto  $(\bar{y}_{U_1} + \bar{y}_{U_2})/2 = 50.58$  mientras que la verdadera media poblacional es  $\bar{y}_U = 47.2$ .

**Resultado 5.2.5.** Bajo un diseño de muestreo aleatorio simple sin reemplazo en el estrato  $h$ , un estimador insesgado de la media  $\bar{y}_U$ , su varianza y su varianza estimada están dados por

$$\hat{y}_{U,\pi} = \frac{1}{N} \hat{t}_{y,\pi} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^H N_h \hat{y}_{U_h,\pi} \quad (5.2.16)$$

$$Var_{MAE}(\hat{y}_{U,\pi}) = \frac{Var_{MAE}(\hat{t}_{y,\pi})}{N^2} = \frac{1}{N^2} \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{yU_h}^2 \quad (5.2.17)$$

$$\widehat{Var}_{MAE}(\hat{y}_{U,\pi}) = \frac{\widehat{Var}_{MAE}(\hat{t}_{y,\pi})}{N^2} = \frac{1}{N^2} \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{ys_h}^2 \quad (5.2.18)$$

respectivamente. Nótese que  $\hat{y}_{U,\pi}$  es insesgado para la media poblacional  $\bar{y}_{U_h}$  de la característica de interés  $y$ , y que  $\widehat{Var}_{MAS}(\hat{y}_{U,\pi})$  es insesgado para  $Var_{MAE}(\hat{y}_{U,\pi})$ .

### Intervalos de confianza

Al respecto Lohr (2000) afirma que un intervalo de  $100(1 - \alpha)\%$  de confianza para la media de una población está dado por

$$\hat{y}_{U,\pi} \pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{Var_{MAE}(\hat{y}_{U,\pi})} \quad (5.2.19)$$

si se cumple algunas de las siguientes condiciones

- El tamaño de muestra  $n_h$  en cada estrato  $h$  es grande.
- Existe una gran número de estratos.

Si las anteriores condiciones no pueden ser satisfechas, se prefiere utilizar el percentil de una distribución t-student con  $N - H$  grados de libertad. Así, un intervalo de confianza para la media poblacional está dado por

$$\hat{y}_{U,\pi} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}, N-H} \sqrt{Var_{MAE}(\hat{y}_{U,\pi})} \quad (5.2.20)$$

### 5.2.4 Asignación del tamaño de muestra

Tal vez, la parte más importante en el diseño de una encuesta es la determinación del tamaño de muestra. En muestreo estratificado, bajo la restricción de que el tamaño de la muestra general es  $n$  y de la existencia de  $H$  estratos fijos, se quiere determinar los tamaños de muestra  $n_h$  para cada estrato  $h$  de tal manera que se garantice la ganancia de precisión del estimador. Lehtonen & Pahkinen (2003) señalan que en investigaciones por muestreo reales, las cuales incluyen varias características de interés, es imposible lograr que la asignación de la muestra arroje ganancias en la eficiencia de manera global (para cada una de las características de interés).

#### Asignación proporcional

Se decide utilizar este tipo de asignación cuando la muestra debe ser representativa de la población de acuerdo al comportamiento de la información auxiliar. Lohr (2000) lo expresa de la siguiente manera

Al utilizar la asignación proporcional, la muestra se puede ver como una versión miniatura de la población.



Si se define la **fracción de muestreo** como  $f_h = n_h/N_h$  en el estrato  $h$ , entonces al utilizar la asignación proporcional la fracción de muestreo será la misma para todos los estratos, tal que  $f_h = f$ . Nótese que la probabilidad de inclusión de cualquier elemento en la población  $\pi_k = f_h = f$  es constante y fija. De esta manera, cada unidad en la muestra representará el mismo número de elementos en la población, independientemente del estrato al que pertenezca.

**Definición 5.2.2.** *Un diseño de muestreo aleatorio estratificado tiene asignación proporcional si*

$$\frac{n_h}{N_h} = \frac{n}{N} \quad h = 1, \dots, H \quad (5.2.21)$$

**Resultado 5.2.6.** *Para un diseño de muestreo aleatorio estratificado con asignación proporcional, el estimador de Horvitz-Thompson del total poblacional  $t_y$ , su varianza y su varianza estimada están dados por:*

$$\hat{t}_{y,\pi} = \frac{N}{n} \sum_{k \in S} y_k \quad (5.2.22)$$

$$Var_{MAE}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \sum_{h=1}^H \frac{n_h}{n} S_{yU_h}^2 \quad (5.2.23)$$

$$\widehat{Var}_{MAE}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \sum_{h=1}^H \frac{n_h}{n} S_{y_{s_h}}^2 \quad (5.2.24)$$

**Prueba.** Observando la relación de la definición anterior se tiene que

$$\begin{aligned} \hat{t}_{y,\pi} &= \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{n_h} \sum_{k \in S_h} y_k \\ &= \frac{N}{n} \sum_{h=1}^H \sum_{k \in S_h} y_k \\ &= \frac{N}{n} \sum_{k \in S} y_k \end{aligned}$$

Para las varianzas se tiene que

$$\begin{aligned} \sum_{h=1}^H \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{yU_h}^2 &= \sum_{h=1}^H \frac{N_h^2}{n_h^2} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) n_h S_{yU_h}^2 \\ &= \frac{N^2}{n^2} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \sum_{h=1}^H n_h S_{yU_h}^2 = \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \sum_{h=1}^H \frac{n_h}{n} S_{yU_h}^2 \end{aligned}$$

■

### Asignación de Neyman

Jerzy Neyman en su artículo de 1934, discutía el problema de la selección de una muestra mediante métodos probabilísticos versus la selección de una muestra a conveniencia. En ese artículo, él observa las grandes bondades de los dos métodos. Sin embargo, mostró que separando la población en subgrupos poblacionales que llamó estratos y tomando muestras aleatorias simples sin reemplazo, los límites del intervalo de confianza podían ser minimizados para un tamaño de muestra fijo. Este artículo fue fundamental en el uso del muestreo estratificado alrededor del mundo.

Neyman trató con el problema de minimizar la varianza  $Var_{MAE}(\hat{t}_{y,\pi})$  del estimador de Horvitz-Thompson fijando el tamaño de muestra general  $n$ . Como lo mencionan Groves, Fowler, Couper, Lepkowski, Singer & R. (2004), bajo este método se producen las menores varianzas para la media muestral comparado con otras técnicas de asignación de tamaño de muestra. Para realizar esta asignación es necesario conocer los tamaños de muestra en cada estrato  $n_h$  tal que  $\sum_{h=1}^H n_h = n$ .

**Resultado 5.2.7.** *Bajo la asignación de Neyman, el tamaño de muestra que minimiza (5.2.11) está dado por*

$$n_h = n \frac{N_h S_{yU_h}}{\sum_{h=1}^H N_h S_{yU_h}} \quad (5.2.25)$$

donde  $S_{yU_h} = \sqrt{S_{yU_h}^2}$

**Prueba.** La cantidad a minimizar es

$$\sum_{h=1}^H \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{yU_h}^2$$

sujeta a

$$\sum_{h=1}^H n_h = n$$

La ecuación de Lagrange se escribe como

$$\mathcal{L}(n_1, \dots, n_h, \lambda) = \sum_{h=1}^H \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{yU_h}^2 - \lambda \left(n - \sum_{h=1}^H n_h\right) \quad (5.2.26)$$

al anular las derivadas parciales se tiene

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = n - \sum_{h=1}^H n_h = 0 \quad (5.2.27)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial n_h} = -\frac{N_h^2}{n_h^2} S_{yU_h}^2 + \lambda = 0 \quad (5.2.28)$$

De (5.2.28) se tiene que

$$n_h = \frac{N_h}{\sqrt{\lambda}} S_{yU_h} \quad (5.2.29)$$

Reemplazando en (5.2.27)

$$\sum_{h=1}^H n_h = n = \frac{\sum_{h=1}^H N_h S_{yU_h}}{\sqrt{\lambda}}$$

Por tanto,

$$\sqrt{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^H N_h S_{yU_h} \quad (5.2.30)$$

Por último, reemplazando en (5.2.29) se tiene que

$$n_h = n \frac{N_h S_{yU_h}}{\sum_{h=1}^H N_h S_{yU_h}}$$

Es posible mostrar que la matriz de segundas derivadas parciales es definida positiva para los valores que satisfacen las restricciones. Así se concluye que los valores de  $n_h$  dados por este resultado minimizan la varianza del estimador de Horvitz-Thompson bajo un tamaño de muestra fijo. ■

Por supuesto, es necesario conocer las varianzas de la característica de interés en cada estrato para poder utilizar este método. Con respecto a la asignación de Neyman se tienen problemas de redondeo, en este caso es recomendable redondear al entero más próximo. Sin embargo, la expresión (5.2.25) puede llevar a la situación en donde  $n_h > N_h$ . En este caso, se realiza un censo en el estrato en donde la anterior relación se presente y luego se restablece el cálculo de  $n_h$  para los demás estratos. Cuando se realiza un censo en un estrato, debido a la asignación de Neyman, o al diseño logístico de la encuesta, ese estrato es llamado **estrato de inclusión forzosa**.

Aunque utilizar este método puede guiar a ganancias en la eficiencia de la estrategia de muestreo, Groves, Fowler, Couper, Lepkowski, Singer & R. (2004) señalan las siguientes debilidades de la asignación de Neyman:

- Al estimar proporciones no se tienen buenos resultados. Dado a que se requiere que las proporciones tengan grandes diferencia entre los estratos. En la vida práctica esta situación no se tiene en la mayoría de ocasiones.
- Por construcción, este método funciona bien bajo el supuesto de que sólo existe una característica de interés. Cuando se tiene trabaja en encuesta multi-propósito no se tiene una reducción de varianza para todas las características de interés incluidas en la investigación.

### Asignación óptima

Este es un método más general que la asignación de Neyman. Si al interior de algún estrato, existe una gran variabilidad, el anterior método de asignación induce un mayor tamaño de muestra en el estrato. Como lo expresa Lohr (2000) en el sector empresarial, por ejemplo, las ventas de las compañías grandes tienen un mucho mayor dispersión que las ventas de las micro-empresas.

Sin embargo si, como en la mayoría de situaciones prácticas, se cuenta con recursos económicos limitados para la realización del estudio. Y dado un capital, se quiere minimizar la varianza de la estrategia de muestreo, se debe realizar otro tipo de asignación. Por lo tanto definiendo la siguiente función de costos

$$C = \sum_{h=1}^H n_h C_h \quad (5.2.31)$$

En donde  $C_h$  es el costo de obtener la información para las características de interés de un elemento seleccionado y perteneciente al estrato  $h$  y  $C$  es el costo total de la realización del estudio. Luego, si se quiere distribuir la selección de elemento entre los estratos dado un costo fijo  $C$ , de manera que se minimice la varianza del estimador de Horvitz-Thompson, se debe utilizar la asignación óptima.

**Resultado 5.2.8.** *Bajo la asignación óptima, el tamaño de muestra que minimiza la función de coste está dado por*

$$n_h = \frac{C}{\sqrt{c_h}} \frac{N_h S_y U_h}{\sum_{i=1}^H N_i \sqrt{c_i} S_y U_i} \quad (5.2.32)$$

**Prueba.** Resulta inmediata al utilizar un razonamiento similar a la demostración del resultado de la asignación de Neyman. Es posible mostrar que la matriz de segundas derivadas parciales es definida positiva para los valores que satisfacen las restricciones. Así se concluye que los valores de  $n_h$  dados por este resultado minimizan la varianza del estimador de Horvitz-Thompson bajo un coste fijo. ■

La expresión de la asignación óptima lleva a las siguientes conclusiones. En un determinado estrato, se debe seleccionar una muestra de tamaño grande sí:

- El tamaño del estrato  $N_h$  es grande y la recolección de la información en el estrato es más barata.
- El estrato tiene una gran dispersión con respecto a la característica de estudio. En este caso, se extrae una muestra más grande para compensar la heterogeneidad dentro del estrato.

### 5.2.5 Estimación en dominios

La estimación por dominios se caracteriza por el desconocimiento de la pertenencia de las unidades poblacionales al dominio. Es decir, para conocer cuáles unidades de la población pertenecen al dominio, es necesario realizar el proceso de medición. Sin embargo, existe un símil entre los estratos y los dominios y es que los dos dividen la población en subgrupos poblacionales. Por un lado, mientras que el conocimiento a priori de la pertenencia de los elementos poblacionales a los estratos ayuda a mejorar la eficiencia de la estimación en la etapa de diseño de la encuesta. Por otro lado, el precio que se debe pagar por el desconocimiento de la pertenencia de los elementos poblacionales a los dominios resulta alto.

Uno de los propósitos del diseño de muestreo estratificado es reducir la varianza de las estimaciones para la característica de interés. Esto se cumple en el caso en donde el comportamiento de la característica de interés (como se verá en las próximas secciones) toma valores promedio distintos en cada estrato. Sin embargo, en la estimación de proporciones para dominios no se garantiza que la anterior regla se cumpla.

Ahora, al multiplicar la variable de pertenencia al dominio  $z_{dk}$  dada por (3.2.22) por el valor de la característica de interés  $y_k$ , se crea una nueva variable  $y_{dk}$  dada por  $y_{dk} = z_{dk}y_k$ , y una vez construida se utilizan los principios del estimador de Horvitz-Thompson para hallar un estimador insesgado del total de la característica de interés en el dominio  $U_d$ , el tamaño absoluto del dominio y la media de la característica en el dominio. Por supuesto, antes de obtener las estimaciones a nivel poblacional, es necesario aunque no suficiente, obtener las estimaciones de los dominios en los estratos.

#### Estimación del total en un dominio

**Resultado 5.2.9.** *Bajo muestreo aleatorio estratificado, el estimador de Horvitz-Thompson para el total del dominio  $t_{yhd}$  en el estrato  $h$ , su varianza y su varianza estimada están dados por*

$$\hat{t}_{yhd,\pi} = \frac{N_h}{n_h} \sum_{S_h} y_{hdk} \quad (5.2.33)$$

$$Var(\hat{t}_{yhd,\pi}) = \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{y_d U_h}^2 \quad (5.2.34)$$

$$\widehat{Var}(\hat{t}_{yhd,\pi}) = \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{y_d s_h}^2 \quad (5.2.35)$$

respectivamente.  $y_{hdk}$  es el valor de la nueva característica  $y_{dk}$  en el  $h$ -ésimo estrato.  $S_{y_d U_h}^2$  y  $S_{y_d s_h}^2$  denotan el estimador de la varianza de los valores de la característica de interés  $y_{dk}$  en el estrato  $U_h$  y en la muestra  $s_h$  seleccionada de dicho estrato, respectivamente.

**Resultado 5.2.10.** *Bajo muestreo aleatorio estratificado, el estimador de Horvitz-Thompson para el total del dominio  $t_{yd}$  en la población, su varianza y su varianza estimada están dados por*

$$\hat{t}_{yd,\pi} = \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{n_h} \sum_{S_h} y_{hdk} \quad (5.2.36)$$

$$Var(\hat{t}_{yd,\pi}) = \sum_{h=1}^H \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{y_{dU_h}}^2 \quad (5.2.37)$$

$$\widehat{Var}(\hat{t}_{yd,\pi}) = \sum_{h=1}^H \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{y_{ds_h}}^2 \quad (5.2.38)$$

Nótese que en la expresión  $S_{y_{dU_h}}^2$  los valores que intervienen son: los de la característica de interés, si el elemento pertenece al dominio, y ceros si el elemento no pertenece al dominio, lo mismo sucede con  $S_{y_{ds_h}}^2$ . Por tanto, las anteriores expresiones de varianza van a tomar valores grandes por la inclusión de los ceros; éste es el precio que se debe pagar por el desconocimiento de la pertenencia de los elementos a los dominios.

### Estimación de la media de un dominio

**Resultado 5.2.11.** *Bajo muestreo aleatorio estratificado, el estimador de Horvitz-Thompson para la media de la característica de interés en un dominio  $\bar{y}_{dU_h}$  en el estrato  $h$ , su varianza y su varianza estimada están dados por*

$$\hat{\bar{y}}_{dU_h,\pi} = \frac{\hat{t}_{yhd,\pi}}{N_{hd}} \quad (5.2.39)$$

$$Var(\hat{\bar{y}}_{dU_h,\pi}) = \frac{1}{N_{hd}^2} Var(\hat{t}_{yhd,\pi}) \quad (5.2.40)$$

$$\widehat{Var}(\hat{\bar{y}}_{dU_h,\pi}) = \frac{1}{N_{hd}^2} \widehat{Var}(\hat{t}_{yhd,\pi}) \quad (5.2.41)$$

**Resultado 5.2.12.** *Bajo muestreo aleatorio estratificado, el estimador de Horvitz-Thompson para la media de la característica de interés en un dominio  $\bar{y}_d$  en la población, su varianza y su varianza estimada están dados por*

$$\hat{\bar{y}}_{d,\pi} = \frac{\hat{t}_{yd,\pi}}{N_d} \quad (5.2.42)$$

$$Var(\hat{\bar{y}}_{d,\pi}) = \frac{1}{N_d^2} Var(\hat{t}_{yd,\pi}) \quad (5.2.43)$$

$$\widehat{Var}(\hat{\bar{y}}_{d,\pi}) = \frac{1}{N_d^2} \widehat{Var}(\hat{t}_{yd,\pi}) \quad (5.2.44)$$

Para poder utilizar los anteriores resultados, es necesario conocer de antemano el valor del tamaño absoluto del dominio en cada estrato  $N_{hd}$  y el valor del tamaño absoluto del dominio en la población  $N_d$ .

### Estimación del tamaño absoluto de un dominio

**Resultado 5.2.13.** *Bajo muestreo aleatorio estratificado, el estimador de Horvitz-Thompson para el tamaño absoluto de un dominio  $N_{hd}$  en el estrato  $h$ , su varianza y su varianza estimada están dados por*

$$\hat{N}_{hd,\pi} = \frac{N_h}{n_h} \sum_{S_h} z_{dk} \quad (5.2.45)$$

$$Var(\hat{N}_{hd,\pi}) = \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{z_{dU_h}}^2 \quad (5.2.46)$$

$$\widehat{Var}(\hat{N}_{hd,\pi}) = \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{z_{ds_h}}^2 \quad (5.2.47)$$

respectivamente, con  $S_{z_{dU_h}}^2$  y  $S_{z_{ds_h}}^2$  el estimador de la varianza de los valores de la característica de interés  $z_{dk}$  en el estrato  $U_h$  y en la muestra  $s_h$  seleccionada de dicho estrato.

**Resultado 5.2.14.** Bajo muestreo aleatorio estratificado, el estimador de Horvitz-Thompson para el tamaño absoluto de un dominio  $N_d$  en la población, su varianza y su varianza estimada están dados por

$$\hat{N}_{d,\pi} = \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{n_h} \sum_{S_h} z_{dk} \quad (5.2.48)$$

$$Var(\hat{N}_{d,\pi}) = \sum_{h=1}^H \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{z_{dU_h}}^2 \quad (5.2.49)$$

$$\widehat{Var}(\hat{N}_{d,\pi}) = \sum_{h=1}^H \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{z_{ds_h}}^2 \quad (5.2.50)$$

respectivamente.

Nótese que en la expresión  $S_{z_{dU_h}}^2$  los valores que intervienen son unos, si el elemento pertenece al dominio  $U_d$ , y ceros si el elemento no pertenece al dominio, lo mismo sucede con  $S_{y_{ds}}^2$ .

#### Estimación del tamaño relativo de un dominio

**Resultado 5.2.15.** Bajo muestreo aleatorio estratificado, el estimador de Horvitz-Thompson para el tamaño relativo de un dominio  $P_{hd}$  en el estrato  $h$ , su varianza y su varianza estimada están dados por

$$\hat{P}_{hd,\pi} = \frac{1}{N_h} \hat{N}_{hd,\pi} = \frac{1}{n_h} \sum_{S_h} z_{dk} = \frac{n_{hd}}{n_h} \quad (5.2.51)$$

$$Var(\hat{P}_{hd,\pi}) = \frac{1}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{z_{dU_h}}^2 \quad (5.2.52)$$

$$\widehat{Var}(\hat{P}_{hd,\pi}) = \frac{1}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{z_{ds_h}}^2 \quad (5.2.53)$$

**Resultado 5.2.16.** Bajo muestreo aleatorio estratificado, el estimador de Horvitz-Thompson para el tamaño relativo de un dominio  $P_d$  en la población, su varianza y su varianza estimada están dados por

$$\hat{P}_{d,\pi} = \frac{\hat{N}_{d,\pi}}{N} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{n_h} \sum_{S_h} z_{dk} \quad (5.2.54)$$

$$Var(\hat{P}_{d,\pi}) = \frac{1}{N^2} \sum_{h=1}^H \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{z_{dU_h}}^2 \quad (5.2.55)$$

$$\widehat{Var}(\hat{P}_{d,\pi}) = \frac{1}{N^2} \sum_{h=1}^H \frac{N_h^2}{n_h} \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) S_{z_{ds_h}}^2 \quad (5.2.56)$$

### 5.2.6 El efecto de diseño

Lehtonen & Pahkinen (2003) plantean que la eficiencia del diseño de muestreo estratificado depende fuertemente de la proporción de variación total en cada estrato. Es decir, utilizando los resultados del análisis de varianza, tenemos el siguiente resultado:

**Resultado 5.2.17.** *Suponga que la población se divide en  $h$  grupos, de tal forma que existen  $N_h$  elementos por grupo y el tamaño poblacional toma la forma  $N = \sum_{h=1}^H$ , entonces*

$$(N-1)S_{yU}^2 = \underbrace{\sum_U (y_k - \bar{y}_U)^2}_{SCT} = \underbrace{\sum_{h=1}^H \sum_{U_h} (y_{hk} - \bar{y}_{U_h})^2}_{SCD} + \underbrace{\sum_{h=1}^H N_h (\bar{y}_{U_h} - \bar{y}_U)^2}_{SCE} \quad (5.2.57)$$

Empíricamente observando la construcción de la varianza del estimador de Horvitz-Thompson en la ecuación (5.2.11) se puede inferir que para tener una varianza pequeña, la variación al interior de los estratos debe ser pequeña. Es decir, los estratos deben ser homogéneos por dentro. Cada esquema de asignación de muestras arroja resultados diferentes en cuanto a la eficiencia se refiere. En esta sección se considera el esquema de asignación de muestra proporcional dado por la definición 5.2.2. en donde la varianza del estimador de Horvitz-Thompson está dada por la siguiente expresión:

$$Var_{MAE}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \sum_{h=1}^H W_h S_{yU_h}^2 \quad (5.2.58)$$

donde  $S_{yU_h}^2$  es la varianza de la característica de interés en el estrato  $h$  y  $W_h = \frac{n_h}{n} \frac{N_h}{N}$ . Con un poco de álgebra se llega al siguiente resultado.

**Resultado 5.2.18.** *Bajo un diseño de muestreo aleatorio simple sin reemplazo con asignación proporcional, la varianza del estimador de Horvitz-Thompson toma la siguiente forma*

$$Var_{MAS}(\hat{t}_{y,\pi}) \cong \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \sum_{h=1}^H W_h [S_{yU_h}^2 + (\bar{y}_{U_h} - \bar{y}_U)^2] \quad (5.2.59)$$

**Prueba.**

$$(N-1)S_{yU_h}^2 = \sum_U (y_k - \bar{y}_U)^2 \quad (5.2.60)$$

$$= \sum_{h=1}^H \sum_U (y_{hk} - \bar{y}_U)^2 \quad (5.2.61)$$

$$= \sum_{h=1}^H \sum_{U_h} (y_{hk} - \bar{y}_{U_h})^2 + \sum_{h=1}^H N_h (\bar{y}_{U_h} - \bar{y}_U)^2 \quad (5.2.62)$$

$$= \sum_{h=1}^H (N_h - 1)S_{yU_h}^2 + \sum_{h=1}^H N_h (\bar{y}_{U_h} - \bar{y}_U)^2 \quad (5.2.63)$$

Por tanto

$$S_{yU_h}^2 \cong \sum_{h=1}^H \frac{N_h}{N} [S_{yU_h}^2 + (\bar{y}_{U_h} - \bar{y}_U)^2] \quad (5.2.64)$$

$$= \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \sum_{h=1}^H W_h [S_{yU_h}^2 + (\bar{y}_{U_h} - \bar{y}_U)^2] \quad (5.2.65)$$



**Resultado 5.2.19.** *El efecto de diseño en el muestreo aleatorio simple sin reemplazo con asignación proporcional está dado por*

$$Def f \cong \frac{\sum_{h=1}^H W_h S_{yU_h}^2}{\sum_{h=1}^H W_h [S_{yU_h}^2 + (\bar{y}_{U_h} - \bar{y}_U)^2]} \quad (5.2.66)$$

$$(5.2.67)$$

$$\cong \frac{\text{Varianza dentro de los estratos}}{\text{Varianza Total}} \quad (5.2.68)$$

Ahora, intuitivamente tenemos que

$$\text{Varianza Total} = \text{Varianza dentro} + \text{Varianza entre}$$

Por tanto se concluye que, casi siempre, esta estrategia de muestreo arrojará mejores resultados que una estrategia aleatoria simple.

### 5.2.7 Marco y Lucy

En investigaciones anteriores (que no ha utilizado información auxiliar), el gobierno ha establecido que la característica SPAM no es un motor de desarrollo, en cuanto a ingreso neto se refiere, en las empresas del sector industrial. Lo anterior puede obedecer a razones de tipo gerencial o a la cultura organizacional de las empresas en el sector. Por supuesto, el *modus operandi* del gerente de marca y las estrategias de posicionamiento de marca en el mercado varían de acuerdo a la productividad y tamaño de la empresa. De hecho, no es posible, por cuestiones financieras y logísticas, que una empresa de muy baja productividad utilice los medios publicitarios que una empresa de alto nivel pueda utilizar. Las empresas de alto nivel han dispuesto una parte de sus ganancias en la reinversión publicitaria en medios masivos de comunicación. Las empresas de bajo nivel no pueden hacer esto porque sus márgenes de ganancia no se prestan para pautar en esta clase de medios.

Por lo anterior, cada estrategia de mercadeo es diferente, entre otras, porque cada cliente de cada empresa es diferente de acuerdo al nivel de productividad en el sector industrial. Es decir, los clientes de las empresas grandes son clientes que se caracterizan porque realizan pedidos de varios millones de dólares, y los clientes de las empresas pequeñas se caracterizan por ser empresas emergentes y, en algunos casos, personas naturales independientes, por tanto el margen de ganancias en cada nivel del sector empresarial es muy distinto.

Sin embargo, independientemente del tipo de cliente e incluso del nivel de la empresa en el sector industrial, existe una herramienta que todas las empresas en el sector industrial pueden utilizar: el envío de publicidad directa mediante el uso del correo electrónico. Por supuesto, en países no desarrollados, en las empresas pequeñas, una vez más ya sea por el tipo de gerencia o cultura organizacional o incluso por cuestiones financieras, no existe la infraestructura ni la capacitación para establecer este tipo de publicidad no convencional.

Bajo estos antecedentes, el gobierno está dispuesto a brindar planes de financiamiento a todas las empresas del sector industrial, por lo que ha planeado una nueva investigación acerca de los hábitos y usos del SPAM en las empresas del sector industrial para observar el desarrollo que el sector ha tenido gracias a este medio. La figura 5.1. muestra el comportamiento de las tres características de interés para el gobierno. Se nota que existe una mayor variabilidad en las empresas que pertenecen al nivel **Grande**, mientras que la variabilidad en los niveles **Mediano** y **Pequeño** es menor. Más aún, el comportamiento promedio de las variables de interés es distinto en cada estrato. Esto implica que



```
data(BigLucy)
attach(BigLucy)

p1 <- qplot(Level, Income, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
p2 <- qplot(Level, Employees, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
p3 <- qplot(Level, Taxes, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
p4 <- qplot(Level, Years, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
grid.arrange(p1, p2, p3, p4, ncol = 2)
```

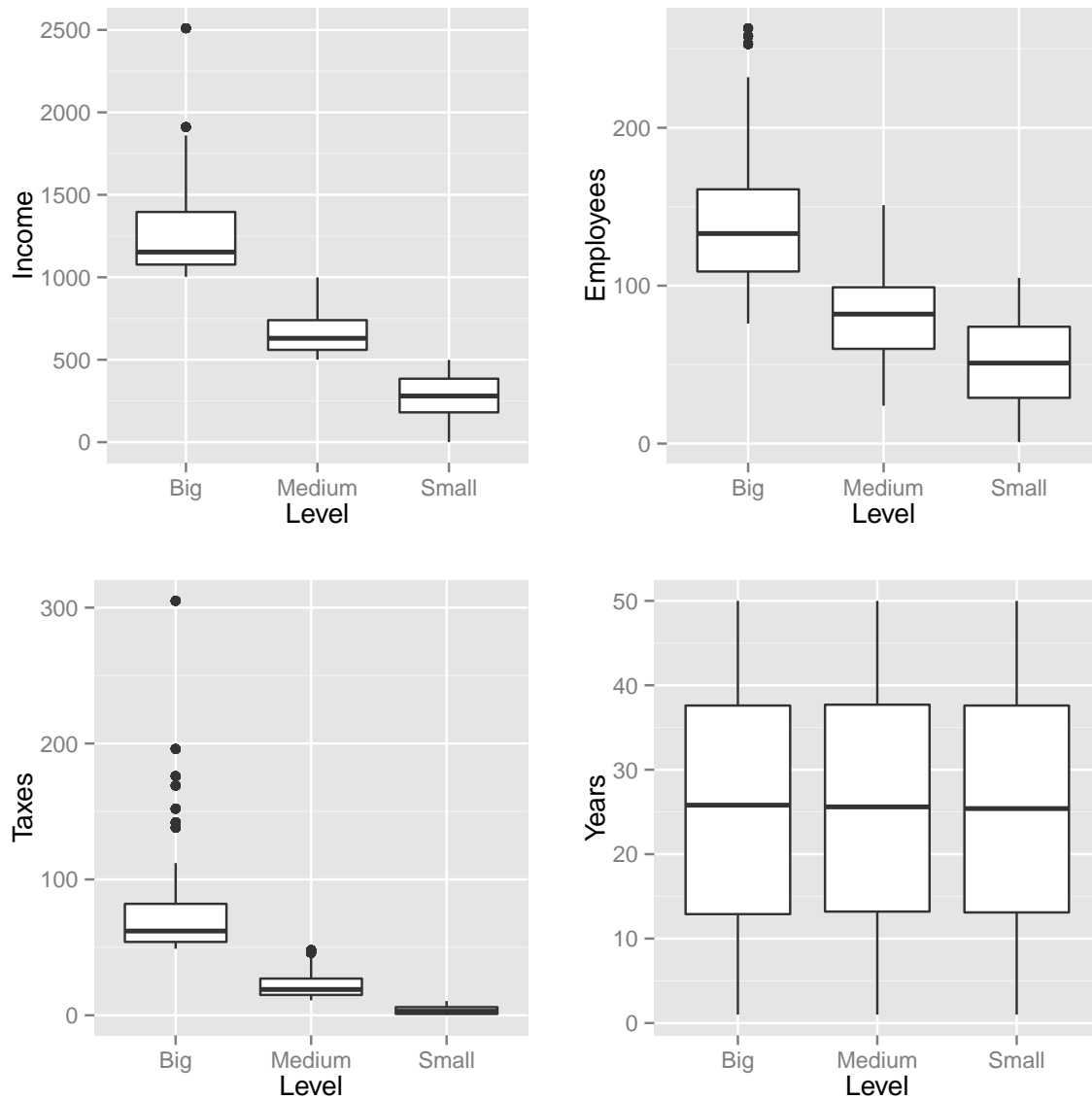


Figura 5.1: *Boxplot de las características de interés en cada nivel industrial.*

utilizar un diseño de muestreo aleatorio estratificado sería una buena decisión si se quiere ganar en precisión.

Por supuesto, el gobierno ha creado un plan de políticas con la promesa de beneficiar al electorado. Si el gobierno corrobora la hipótesis, por medio del presente estudio, de la influencia del SPAM en el crecimiento del algún nivel del sector industrial, entonces buscará planes de capacitación y financiamiento para que las empresas de los niveles **Mediano** y **Pequeño** crezcan, se estabilicen y fomenten la creación de nuevos empleos y el tributo a las entidades gubernamentales pertinentes y, que las empresas del nivel **Grande** no descendan de nivel sino que se expandan no sólo nacionalmente sino que también en el ámbito internacional a donde también puede llegar la publicidad SPAM en cuestión de micro segundos.

Para esta nueva investigación, el gobierno ha proveído un marco de muestreo que además de contener la ubicación y la identificación de todas las empresas de todos los niveles industriales, también adjunta el tipo de empresa, a saber: **Grande, Media, Pequeña**. El tipo de empresa será tomada como variable de estratificación para el diseño del plan muestral.

### Estimación del tamaño de muestra

El gobierno está decidido en implementar un plan de capacitación a las empresas del sector industrial y ha pedido que el diseño de muestreo sea representativo de la población en cuanto a la característica de estratificación: Nivel. Para la selección de la muestra, se debe cargar el marco de muestreo en el ambiente de R. Con la variable de estratificación Nivel se determinan los tamaños de cada uno de las estratos que se debe convertir en un vector de tamaño  $H = 3$ , así `N <- c(N1,N2,N3)`, lo mismo se debe hacer con los tamaños de muestra en cada estrato, se deben convertir en vector así `n <- c(n1,n2,n3)`.

```
data(BigLucy)
attach(BigLucy)

N1 <- summary(Level)[[1]]
N2 <- summary(Level)[[2]]
N3 <- summary(Level)[[3]]
N <- c(N1,N2,N3)
N

## [1] 2905 25795 56596

n1 <- round(2000 * N1/sum(N))
n2 <- round(2000 * N2/sum(N))
n3 <- round(2000 * N3/sum(N))
n <- c(n1,n2,n3)
n

## [1] 68 605 1327
```

Teniendo en cuenta que se planea utilizar la asignación proporcional para la estimación del tamaño de muestra y que se requieren  $n = 2000$  encuestas, se tiene que  $f = \frac{2000}{85296} = 0.02345$ . Esto implica la realización de  $n_1 = 68$  encuestas de empresas grandes,  $n_2 = 605$  encuestas en empresas medianas y  $n_3 = 1327$  encuestas en empresas pequeñas.

Utilizando la función `S.STSI` del paquete `TeachingSampling` es posible seleccionar una muestra aleatoria simple en cada uno de los tres estratos. Esta función consta de tres argumentos. El primero: **Estrato**, es la variable de estratificación que indica la pertenencia de todos y cada uno de los  $\sum_{h=1}^H N_h = N$  individuos de la población. El segundo argumento: **N**, un vector de tamaño  $H$  que indica los tamaños de cada estrato en la población. El último argumento: **n**, un vector de tamaño  $H$  que indica los tamaños

de muestra en cada estrato. El resultado de la función es un conjunto de índices que, aplicados a la población, permite la obtención de la muestra estratificada.

```
sam <- S.STSI(Level, N, n)
muestra <- BigLucy[sam,]
attach(muestra)
head(muestra)
```

##	ID	Ubication	Level	Zone	Income	Employees	Taxes
## 38335	AB0000038335	C0232017K0069880	Big	County48	1640	225	169
## 14362	AB0000014362	C0202621K0099276	Big	County28	1405	110	83
## 28700	AB0000028700	C0106523K0195374	Big	County40	1150	88	62
## 43112	AB0000043112	C0225210K0076687	Big	County53	1551	168	107
## 62250	AB0000062250	C0078782K0223115	Big	County69	1480	193	104
## 83826	AB0000083826	C0019329K0282568	Big	County98	1450	162	94
##	SPAM	ISO	Years	Segments			
## 38335	yes	yes	34.3	County48	195		
## 14362	no	yes	18.1	County28	48		
## 28700	yes	yes	45.6	County40	12		
## 43112	no	yes	24.2	County53	15		
## 62250	no	yes	17.5	County69	40		
## 83826	yes	yes	7.4	County98	48		

La muestra realizada (seleccionada) es de tamaño 400 y está dividida en cada uno de los tres estratos. Una vez que la selección de los elementos es efectuada, se necesita obtener la información mediante una encuesta a cada una de las empresas del sector industrial. Nótese que en este punto, la realización de un muestreo estratificado tiene ventajas logísticas. Lo anterior es evidente cuando se decide que el cuestionario será enviado vía correo electrónico a cada una de las 14 empresas del nivel **Grande**. Por tanto, la realización de esta entrevista arroja ventajas financieras enormes pues el envío de un correo electrónico no supone mayor gasto. Para la realización de la encuesta en el nivel **Mediano** se ha decidido contratar a una agencia de correos postales y, de esa forma, hacer llegar mediante correo certificado un cuestionario con la respectiva encuesta. No se aplica el mismo medio logístico que en las empresas grandes pues se sabe que no todas las empresas medianas tienen una dirección de correo electrónico actualizada, lo que no sucede en el estrato grande. Para obtener la información del sector industrial se ha decidido enviar encuestadores entrenados para el trabajo. Lo anterior se hace dado que los propietarios de las empresas pequeñas son reacios a responder las cartas certificadas y mucho menos responden el correo electrónico dado que tienen compromisos operativos que atender.

Una vez conseguida la información de cada una de las 400 empresas seleccionadas, se procede a estimar las cantidades de interés. Para esto se utiliza la función **E.STSI** del paquete **TeachingSampling**. Esta función consta de cuatro parámetros muestrales, a saber: **Estrato**, es la variable de estratificación que indica la pertenencia de todos y cada uno de los  $\sum_{h=1}^H n_h = n$  individuos seleccionados en la muestra, **N** y **n**, los vectores del tamaño de la población y muestra estratificada respectivamente y **estima** conteniendo el valor de la(s) característica(s) de interés en cada uno de los elementos seleccionados.

```
estima <- data.frame(Income, Employees, Taxes)
E.STSI(Level, N, n, estima)
```

La función **E.STSI** arroja la estimación de cada una de las características de interés discriminada por cada estrato y el gran total así como también la varianza estimada y el coeficiente de variación estimado. Nótese que en cuestión de ingreso, se estima que el estrato grande produce un 10 %, el estrato mediano un 47 % y el estrato pequeño un 43 % del ingreso neto del sector industrial. Un resultado similar se

observa con las restantes características de interés. Nótese que los coeficientes de variación estimados en cada estrato son, en algunos casos elevados<sup>5</sup>; sin embargo, el coeficiente de variación para el total es bajo.

En la siguiente tabla se muestran los resultados particulares para este ejercicio. Se puede notar que la estratificación arroja buenos resultados con coeficientes de variación menores a los que arrojaría una muestra aleatoria simple. Esto se debe a que las variables de interés presentan, en promedio, un comportamiento diferente en cada estrato.

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	2905.00	25795.00	56596.00	85296.00
Standard Error	0.00	0.00	0.00	0.00
CVE	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFF				

Tabla 5.1: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación del tamaño de los estratos y de la población.*

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	3573876.25	17055270.27	16004683.47	36633829.99
Standard Error	68271.56	128573.34	186932.88	236930.40
CVE	1.91	0.75	1.17	0.65
DEFF	1.00	1.00	1.00	0.23

Tabla 5.2: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica **Income** para cada uno de los estratos y para la población.*

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	384997.94	2120562.18	2912966.69	5418526.81
Standard Error	12657.18	27571.91	38586.93	49085.29
CVE	3.29	1.30	1.32	0.91
DEFF	1.00	1.00	1.00	0.65

Tabla 5.3: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica **Employees** para cada uno de los estratos y para la población.*

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	204588.90	569195.45	219261.52	993045.87
Standard Error	9020.96	9386.33	4847.86	13891.82
CVE	4.41	1.65	2.21	1.40
DEFF	1.00	1.00	1.00	0.22

Tabla 5.4: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica **Taxes** para cada uno de los estratos y para la población.*

La función **Domains** contenida en el paquete **TeachingSampling** se utiliza para obtener las variables indicadoras  $z_{dk}$  para cada dominio, el único argumento de la función es un vector de pertenencia de cada individuo. En este caso, el vector de pertenencia es SPAM, la salida de esta función es una matriz de unos y ceros, en donde cada columna está dicotomizada. Existen tantas columnas como subgrupos poblacionales, y en cada columna el número uno implica la pertenencia del elemento al dominio y cero la no pertenencia del elemento al dominio.

<sup>5</sup>El coeficiente de variación es más alto a medida que las estimaciones estén más discriminadas en grupos.

```

Dominios <- Domains(SPAM)
SPAM.si <- Dominios[,2]*estima
SPAM.no <- Dominios[,1]*estima

E.STSI(Level, N, n, Dominios)

```

Para estimar el tamaño absoluto de cada dominio, lo único que se debe hacer es multiplicar la matriz de características de interés (en este caso, la matriz llamada `estima`) por cada columna de la matriz resultante de la dicotomización. Utilizando la función `E.STSI` en la matriz resultante de la dicotomización obtenemos la estimación de los tamaños absolutos de cada dominio. En este caso, se estima que 1390 empresas ya están utilizando otras técnicas de publicidad como el SPAM, mientras que las restantes 1006 no lo están haciendo. Además en cada uno de los tres estratos existen más empresas que están utilizando el SPAM que las que no lo están haciendo y es interesante que en el estrato de las empresas pequeñas por cada 2 empresas que no utilizan el SPAM existen 3 que sí lo hacen. Nótese que la varianza de cada estimación sigue siendo la misma, puesto que los valores de esta característica de interés son ceros y uno y, por tanto, la estructura de varianza resulta idéntica en cada caso.

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	2905.00	25795.00	56596.00	85296.00
Standard Error	0.00	0.00	0.00	0.00
CVE	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFF				

Tabla 5.5: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación de los tamaños para cada uno de los estratos y para la toda población.*

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	1068.01	10914.91	21538.04	33520.96
Standard Error	169.11	512.44	745.71	920.48
CVE	15.83	4.69	3.46	2.75
DEFF	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 5.6: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación de los tamaños del dominio `SPAM.no` para cada uno de los estratos y para la toda población.*

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	1836.99	14880.09	35057.96	51775.04
Standard Error	169.11	512.44	745.71	920.48
CVE	9.21	3.44	2.13	1.78
DEFF	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 5.7: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación de los tamaños del dominio `SPAM.si` para cada uno de los estratos y para la toda población.*

Esta claro que existe una tendencia en el sector industrial de publicidad virtual mediante el envío de SPAM por correo electrónico. Las siguientes cifras son las verdaderamente importantes pues muestran que las empresas en cada uno de los tres estratos que utilizan SPAM tienen mayores ingresos, emplean a más gente y contribuyen con una mayor cantidad de dinero en cuanto a impuestos se refiere, esto se da porque hay más empresas que utilizan el SPAM de las que no lo hacen. Se debe tener en cuenta que al interior de los subgrupos (estratos y dominios) el coeficiente de variación es alto en parte por la discriminación y en parte porque la varianza de las nuevas variables.

A través del siguiente código computacional se obtienen las estimaciones apropiadas para la estimación de los totales de las características de interés en el dominio **SPAM.no**. En las tablas 5.8 - 5.10 se aprecian las estimaciones puntuales para la muestra seleccionada.

**E.STSI**(Level, N, n, SPAM.no)

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	1293963.90	7202816.73	6215793.24	14712573.87
Standard Error	208007.01	348534.56	244401.29	473788.19
CVE	16.08	4.84	3.93	3.22
DEFF	1.00	1.00	1.00	0.88

Tabla 5.8: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica **Income** para el dominio **SPAM.no** en cada uno de los estratos y para toda la población.*

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	138628.31	900394.73	1157168.55	2196191.59
Standard Error	22966.06	46484.68	46132.30	69400.68
CVE	16.57	5.16	3.99	3.16
DEFF	1.00	1.00	1.00	0.96

Tabla 5.9: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica **Employees** para el dominio **SPAM.no** en cada uno de los estratos y para toda la población.*

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	71813.31	239872.18	87047.80	398733.29
Standard Error	11949.44	12824.34	4277.02	18042.89
CVE	16.64	5.35	4.91	4.53
DEFF	1.00	1.00	1.00	0.78

Tabla 5.10: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica **Taxes** para el dominio **SPAM.no** en cada uno de los estratos y para toda la población.*

Por otro lado, utilizando la siguiente instrucción se obtienen las estimaciones apropiadas para la estimación de los totales de las características de interés en el dominio **SPAM.si**. En las tablas 5.11 - 5.13 se aprecian las estimaciones puntuales para la muestra seleccionada.

**E.STSI**(Level, N, n, SPAM.si)

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	2279912.35	9852453.55	9788890.22	21921256.12
Standard Error	217706.49	352885.56	254624.12	486577.62
CVE	9.55	3.58	2.60	2.22
DEFF	1.00	1.00	1.00	0.78

Tabla 5.11: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica **Income** para el dominio **SPAM.si** en cada uno de los estratos y para toda la población.*

Nótese que el valor de los coeficientes de variación es alto puesto que se trata de estimación en subgrupos poblacionales en donde el tamaño de muestra es aleatorio. En reusmen, los resultados muestran que la

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	246369.63	1220167.45	1755798.14	3222335.22
Standard Error	25068.23	46388.76	48511.82	71650.05
CVE	10.18	3.80	2.76	2.22
DEFF	1.00	1.00	1.00	0.92

Tabla 5.12: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica **Employees** para el dominio **SPAM.si** en cada uno de los estratos y para toda la población.*

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	132775.59	329323.27	132213.72	594312.58
Standard Error	14715.79	13382.04	4707.52	20440.01
CVE	11.08	4.06	3.56	3.44
DEFF	1.00	1.00	1.00	0.61

Tabla 5.13: *Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica **Taxes** para el dominio **SPAM.si** en cada uno de los estratos y para toda la población.*

utilización del SPAM puede ser una estrategia de crecimiento en el sector industrial. Ahora, pensando un poco en la eficiencia de la estrategia de muestreo, consideremos la siguiente tabla de análisis de varianza para calcular el efecto de diseño usando el resultado 5.2.19.

```
anovaIL <- anova(lm(Income ~ Level, data = BigLucy))
anovaIL

## Analysis of Variance Table
##
## Response: Income
##           Df      Sum Sq   Mean Sq F value    Pr(>F)
## Level      2 4573694092 2286847046  133937 <0.0000000000000002 ***
## Residuals 85293 1456301886    17074
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

El efecto de diseño estaría dado por la división entre la varianza de los residuales sobre la varianza de la variable; es decir  $\frac{17074.11}{68119.1} = 0.25$ . Por ello la eficiencia de la estrategia es cuatro veces mayor que una estrategia simple. Es interesante que un diseño tan sencillo como el simple en cada estrato con un tamaño de muestre pequeño arroje estos buenos resultados.

Nótese que como  $N_d$  es desconocido, para obtener otro tipo de estimación (aunque no la varianza ni el c.v.e) de la media de la característica de interés en cada dominio, podemos utilizar un estimador alternativo dado por

$$\hat{y}_{S_d} = \frac{\hat{t}_{y_d, \pi}}{\hat{N}_{d, \pi}} = \frac{\sum_S y_{dk}}{z_{dk}} = \frac{\sum_{S_d} y_k}{n_d}$$

Para ello, simplemente tomamos las estimaciones  $t_{y_d}$  y las dividimos por la estimación de  $N_d$ .

### Otro tipo de asignación

Suponga que el gobierno quiera hacer una encuesta con las características y magnitudes de la anterior, pero con un limitante importante: el dinero, el gobierno tiene un presupuesto de 7000 dólares para la realización del estudio. Además de esto, el gobierno quiere que el método usado para la recolección de

la información sea clásico. Es decir, un encuestador debe ir a cada empresa y realizar el cuestionario. Este caso es muy frecuente en encuestas de mercadeo, en donde se quiere lograr buenas estimaciones pero no se dispone de muchos recursos financieros ni logísticos.

En este caso se ha averiguado que las varianzas de la variable ingreso son las siguientes 64398, 16081, 15142 en los estratos **Grande, Mediano y Pequeño** respectivamente. Además realizar una sola encuesta en el estrato de las empresas grandes cuesta alrededor de 40 dólares, una encuesta en el estrato de las empresas medianas cuesta 20 dólares y una entrevista en el estrato de las empresas pequeñas cuesta 15 dólares. Nótese la diferencia de precios en cada estrato, esto se debe a que es necesaria la contratación de encuestadores de alto perfil para las entrevistas en el estrato de las empresas grandes.

Tabla 5.14: *Estimación del tamaño de muestra.*

Estrato	Coste	Nh	S <sub>2yuh</sub>	nh
Grande	40	83	64398	18
Mediano	20	737	16081	112
Pequeño	15	1576	15142	269

Utilizando la asignación óptima y el resultado 5.2.8. se tienen los tamaños de muestra en cada estrato, dados por la tabla anterior, que minimizan la varianza del estimador de Horvitz-Thompson con la restricción del costo total del estudio, 7000 dólares. Nótese que  $\sum_{h=1}^3 n_h C_h = 7000$ .

### 5.3 Diseño de muestreo estratificado PPT

Como se vio en la sección anterior, la ganancia de precisión al utilizar un diseño de muestreo estratificado es importante. Sin embargo, los resultados pueden mejorarse al utilizar una característica continua auxiliar  $x_k$  bien relacionada con la característica de interés  $y_k$  en cada estrato. Así, es posible estimar el parámetro de interés mediante el estimador de Hansen-Hurwitz con una varianza pequeña. De hecho, entre mejor correlación exista entre  $y$  y  $x$ , asumiendo que el comportamiento promedio de la variable de interés es diferente en cada estrato, menor varianza tendrá el estimador de Hansen-Hurwitz.

En este caso, el marco de muestreo debe tener dos características auxiliares: una variable de estratificación y la información auxiliar continua, ambas disponibles para cada elemento en todos los estratos. Se supone que el diseño de muestreo dentro de cada estrato es con reemplazo y, de esta manera, se selecciona una muestra de tamaño  $m_h$  en cada estrato  $h$  ( $h = 1, \dots, H$ ). Cada elemento de  $k \in U_h$  tiene probabilidad de selección igual a

$$p_k = \frac{x_k}{t_{xh}} \quad \text{si } k \in U_h \quad (5.3.1)$$

con  $t_{xh}$  el total poblacional de la característica auxiliar  $x$  en el estrato  $U_h$ . Es importante verificar que en cada estrato se cumpla

$$\sum_{U_h} p_k = 1 \quad \text{para cada } h = 1, \dots, H, \quad (5.3.2)$$

por tanto

$$\sum_{h=1}^H \sum_{U_h} p_k = H \quad (5.3.3)$$

Ahora, en cada estrato  $U_h$  de tamaño  $N_h$  se selecciona una muestra  $s_h$  con reemplazo de tamaño  $m_h$ , por tanto la cardinalidad del soporte en el estrato  $U_h$  está dada por

$$\#Q_h = \binom{N_h + m_h - 1}{m_h} \quad (5.3.4)$$



El soporte general estratificado, se define como la unión de los soportes en cada uno de los estratos  $U_h$ .

$$Q^H = \left\{ \bigcup_{h=1}^H s_h \mid s_h \in Q_h \right\}. \quad (5.3.5)$$

### 5.3.1 Algoritmos de selección

En la selección de las muestras PPT con reemplazo en cada estrato es posible utilizar los algoritmos de muestreo dados en el capítulo 3, de tal forma que los siguientes pasos se deben realizar:

- Separar la población en  $H$  estratos mediante la variable de estratificación.
- En cada estrato  $U_h$ , seleccionar una muestra PPT con reemplazo. Los algoritmos utilizados en la selección de la muestra dentro de cada estrato pueden ser los métodos acumulativo total o el método de Lahiri.
- Cada una de las  $H$  selecciones es realizada de manera independiente.

### 5.3.2 El estimador de Hansen-Hurwitz

Con los anteriores condicionamiento, se utiliza el estimador de Hansen-Hurwitz para estimar de manera insesgada al parámetro de interés  $t_y$  con ayuda de información auxiliar continua en cada estrato  $U_h$ .

**Resultado 5.3.1.** Si los elementos dentro del estrato  $U_h$  son seleccionados con reemplazo, de acuerdo a probabilidades de selección tales que  $\sum_{U_h} p_k = 1$ , basados en  $x_k$ , el valor de una característica auxiliar continua, entonces el estimador de Hansen-Hurwitz del total poblacional  $t_{yh}$ , su varianza y su varianza estimada están dados por:

$$\hat{t}_{yh,p} = \frac{t_{xh}}{m_h} \sum_{\substack{i=1 \\ k \in S_h}}^{m_h} \frac{y_{ki}}{x_{ki}} \quad (5.3.6)$$

$$Var_{PPT}(\hat{t}_{yh,p}) = \frac{1}{m_h} \sum_{U_h} p_k \left( \frac{y_k}{p_k} - t_{yh} \right)^2 \quad (5.3.7)$$

$$\widehat{Var}_{PPT}(\hat{t}_{yh,p}) = \frac{1}{m_h(m_h - 1)} \sum_{\substack{i=1 \\ k \in S_h}}^{m_h} \left( \frac{y_{ki}}{p_{ki}} - \hat{t}_{yh,p} \right)^2 \quad (5.3.8)$$

respectivamente, con  $p_k$  dados por (5.3.1). Nótese que  $\hat{t}_{yh,p}$  es insesgado para el total  $t_{yh}$  de la característica de interés  $y$ , y que  $\widehat{Var}_{PPT}(\hat{t}_{yh,p})$  es insesgado para  $Var_{PPT}(\hat{t}_{yh,p})$ .

**Resultado 5.3.2.** Para un diseño de muestreo estratificado con selección de unidades PPT en cada estrato, el estimador de Hansen-Hurwitz del total poblacional  $t_y$ , su varianza y su varianza estimada están dados por:

$$\hat{t}_{yh,p} = \sum_{h=1}^H \frac{t_{xh}}{m_h} \sum_{\substack{i=1 \\ k \in S_h}}^{m_h} \frac{y_{ki}}{x_{ki}} \quad (5.3.9)$$

$$Var_{EPPT}(\hat{t}_{yh,p}) = \sum_{h=1}^H \frac{1}{m_h} \sum_{U_h} p_k \left( \frac{y_k}{p_k} - t_{yh} \right)^2 \quad (5.3.10)$$

$$\widehat{Var}_{EPPT}(\hat{t}_{yh,p}) = \sum_{h=1}^H \frac{1}{m_h(m_h - 1)} \sum_{\substack{i=1 \\ k \in S_h}}^{m_h} \left( \frac{y_{ki}}{p_{ki}} - \hat{t}_{yh,p} \right)^2 \quad (5.3.11)$$

respectivamente. Nótese que  $\hat{t}_{y,p}$  es insesgado para el total  $t_y$  de la característica de interés  $y$ , y que  $\widehat{Var}_{EPPT}(\hat{t}_{y,p})$  es insesgado para  $Var_{EPPT}(\hat{t}_{y,p})$ .

**Ejemplo 5.3.1.** Para nuestra población de ejemplo  $U$  particionada en 2 estratos como en el capítulo anterior, existen por un lado  $\binom{N_1+m_1-1}{m_1} = 6$  posibles muestras con reemplazo de tamaño  $m_1 = 2$  en el primer estrato y por el otro lado  $\binom{N_2+m_2-1}{m_2} = 2$  posibles muestras con reemplazo de tamaño  $m_2 = 1$  en el segundo estrato. Utilizando la característica auxiliar  $x$ , realice el cálculo léxico-gráfico del estimador de Hansen-Hurwitz y compruebe el insesgamiento y la varianza.

### 5.3.3 Marco y Lucy

En la pasada sección, supusimos que el marco de muestreo contenía, además de la ubicación e identificación de todas las empresas del sector industrial, una variable de estratificación llamada Nivel que agrupa a las empresas de acuerdo a su capacidad de producción industrial. Es lógico pensar que el comportamiento promedio de las características de interés es diferente en cada estrato. Siendo así los resultados obtenidos son más precisos que al realizar un plan de muestreo simple, además de obtener las estimaciones de las características de interés anidadas en los estratos.

En esta ocasión, la construcción del marco de muestreo ha logrado incluir además de la variable de estratificación Nivel una información auxiliar continua, particularmente se supone que se tiene conocimiento del valor de ingreso declarado en el último año fiscal para cada empresa del sector industrial.

```
qplot(Income, Taxes, data = BigLucy, color = Level)
```

Con este generoso marco de muestreo es claro que las estimaciones serán más precisas. Aunque vale la pena preguntarse si la eficiencia de las estimaciones mejorará notablemente con estas dos variables auxiliares. Se utilizará la asignación proporcional, como en la sección pasada, para hacer los resultados comparables. No olvide que en cada estrato la selección de las muestras se hace con reemplazo.

```
data(BigLucy)
attach(BigLucy)

N1 <- summary(Level)[[1]]
N2 <- summary(Level)[[2]]
N3 <- summary(Level)[[3]]
N <- c(N1,N2,N3)
N

## [1] 2905 25795 56596

m1 <- round(2000 * N1/sum(N))
m2 <- round(2000 * N2/sum(N))
m3 <- round(2000 * N3/sum(N))
m <- c(m1,m2,m3)
m

## [1] 68 605 1327
```

```
qplot(Income, Taxes, data = Lucy, color = Level)
```

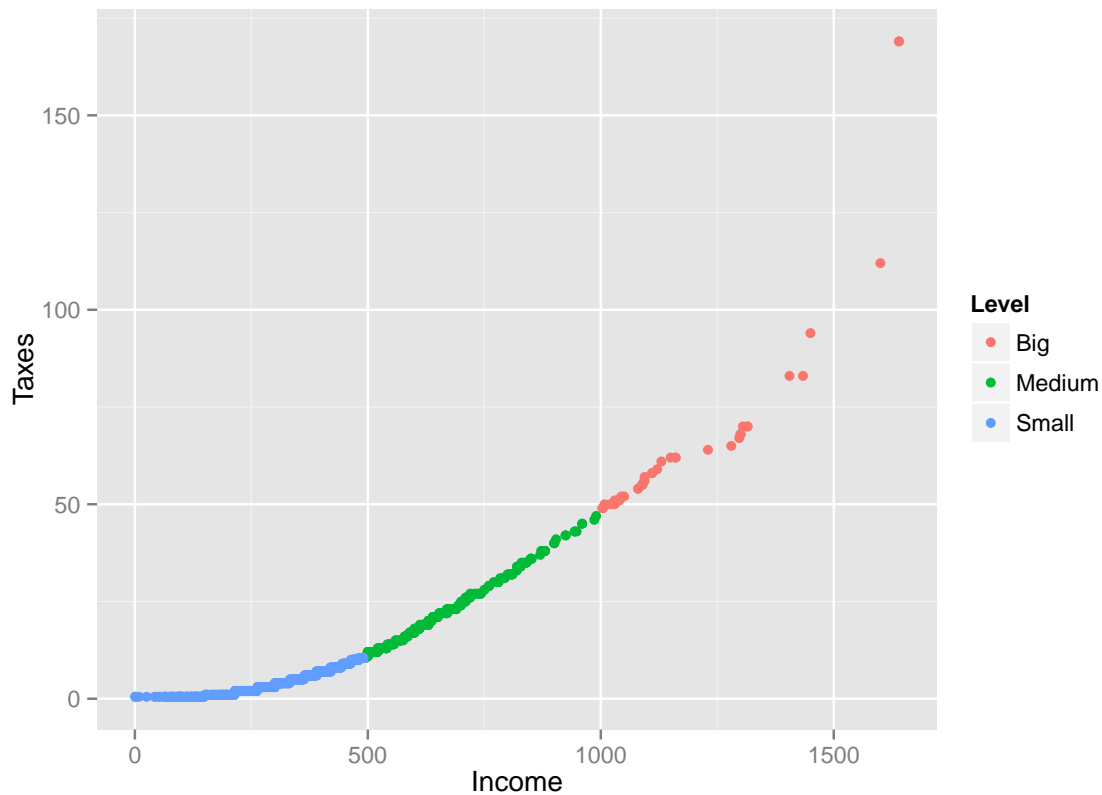


Figura 5.2: *Relación entre Income y Taxes.*

La función `S.STPPS(E,x,m)` se utiliza para la extracción de las  $H$  muestras con reemplazo en cada estrato. Los argumentos de la función son los siguientes:  $E$ , la variable de estratificación en la población entera, en este caso particular es `Nivel`.  $x$ , un vector de información auxiliar continua conteniendo cada uno de los valores en la población, en este caso particular es `Income`.  $m$ , un vector conteniendo  $H$  tamaños de muestra para cada estrato.

La función `S.STPPS(E,x,m)` divide el marco de muestreo en  $H$  estratos y en cada uno de ellos selecciona una muestra con reemplazo de acuerdo a probabilidades de selección dadas por (5.3.1)<sup>6</sup>. El resultado de la función es en dos vías: por una parte, la función devuelve los índices de los elementos seleccionados con reemplazo en cada estrato y, por otra, devuelve el vector de probabilidades de selección de los elementos en la muestra. Cada una de las anteriores salidas es de tamaño  $m = \sum_{h=1}^H m_h$ . Para este ejercicio el resultado de la función se ha guardado en el objeto `res`, la muestra en el objeto `sam` y el vector de probabilidades de selección en la muestra se ha guardado en el objeto `pk`.

```
res <- S.STPPS(Level, Income, m)
sam <- res[,1]
pk <- res[,2]
muestra <- BigLucy[sam,]
```

<sup>6</sup>Esta función trata cada estrato como una población separada de modo que la suma de las probabilidades de selección en cada estrato suman uno y en toda la población suman  $H$ .

```
attach(muestra)
head(muestra)
```

```
##           ID           Ubication Level      Zone Income Employees Taxes
## 59842 AB0000059842 C0082783K0219114   Big County67  2510         258   305
## 62279 AB0000062279 C0252023K0049874   Big County69  1084          92    54
## 76614 AB0000076614 C0203961K0097936   Big County88  2510         258   305
## 9545  AB0000009545 C0088531K0213366   Big County23  1360         134    76
## 9560  AB0000009560 C0256225K0045672   Big County23  1300         176    68
## 69413 AB0000069413 C0006169K0295728   Big County78  1434         157    83
##           SPAM ISO Years      Segments
## 59842   yes yes    2.6 County67 140
## 62279   yes yes   38.4 County69  43
## 76614   yes yes   49.2 County88  16
## 9545    yes yes   22.6 County23  79
## 9560    yes yes   22.3 County23  80
## 69413   yes yes    3.4 County78   3
```

Aplicando los índices obtenido en `sam` al marco de muestreo, obtenemos la información para realizar el proceso de recolección de datos. Cuando la información es recolectada se creará un archivo de datos conteniendo cada uno de los valores de la(s) característica(s) de interés en la muestra seleccionada. Esta archivo es adjuntado a R mediante la función `attach`.

La etapa de estimación se realiza con la función `E.STPPS(y,pk,m,E)` del paquete `TeachingSampling` cuyos argumentos son cuatro y cada uno de ellos contiene información a nivel de la muestra y nada más que de la muestra: `y`, el archivo de datos conteniendo cada uno de los valores de la(s) característica(s) de interés en la muestra seleccionada, en este caso particular será el `data frame estima`. `pk` el vector de probabilidades de selección resultante de aplicar la función `S.STPPS` en la etapa de selección de muestra, en esta caso particular guardado como `pk <- res[,2]`. `m`, un vector conteniendo  $H$  tamaños de muestra para cada estrato, en este caso dado por `m <- c(m1,m2,m3)`. `E`, la variable de estratificación en la muestra, en este caso particular es `Level` en la muestra no en la población.

La función `E.STPPS` arroja la estimación de cada una de las características de interés discriminada por cada estrato y el gran total así como también la varianza estimada y el coeficiente de variación estimado. También arroja las estimaciones de los tamaños de los estratos  $\hat{N}_h$  y del tamaño de la población total dado por  $\hat{N} = \sum_{h=1}^H \hat{N}_h$ .

```
estima <- data.frame(Income, Employees, Taxes)
E.STPPS(estima, pk, m, Level)
```

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	2872.75	25903.72	57941.46	86717.93
Standard Error	74.82	191.58	988.16	35.42
CVE	2.60	0.74	1.71	0.01
DEFF	Inf	Inf	Inf	Inf

Tabla 5.15: *Muestreo estratificado PPT: estimación del tamaño de los estratos y de la población.*

Nótese que las estimaciones dentro de los estratos tienen un coeficiente de variación muy pequeño al igual que la estimación para la población total. La siguiente tabla muestra los resultados para este ejercicio particular.

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	3629710.00	17057285.00	15947738.00	36634733.00
Standard Error	0.00	0.00	0.00	0.00
CVE	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFF	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 5.16: *Muestreo estratificado PPT: estimación del total de la característica **Income** para cada uno de los estratos y para la población.*

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	395580.58	2061433.90	2949499.35	5406513.83
Standard Error	9322.72	26111.93	63976.16	315.29
CVE	2.36	1.27	2.17	0.00
DEFF	0.28	0.80	2.61	0.00

Tabla 5.17: *Muestreo estratificado PPT: estimación del total de la característica **Employees** para cada uno de los estratos y para la población.*

	Big	Medium	Small	Population
Estimation	225070.78	566761.30	218606.65	1010438.73
Standard Error	9206.90	4940.16	2445.63	128.81
CVE	4.09	0.87	1.12	0.00
DEFF	0.15	0.23	0.23	0.00

Tabla 5.18: *Muestreo estratificado PPT: estimación del total de la característica **Taxes** para cada uno de los estratos y para la población.*

Es notable la ganancia en eficiencia de esta estrategia de muestreo, no hay mucho que decir al respecto. Simplemente se deben agotar hasta los últimos recursos para poder estratificar la población y aplicar un diseño de muestreo PPT en cada estrato, siempre y cuando la característica de interés esté bien correlacionada en cada estrato con la información auxiliar.

## 5.4 Ejercicios

5.1 Demuestre teóricamente o refute mediante un contraejemplo las siguientes afirmaciones:

- Para aplicar un diseño de muestreo estratificado se pide que los estratos no se traslapen. La anterior condición es necesaria para estimar la varianza del estimador.
- La necesidad de estratificar surge siempre de razones administrativas.
- Siempre un diseño de muestreo estratificado es de menor varianza que un diseño de muestreo que no incluya estratos.
- En un diseño de muestreo estratificado, la estimación del promedio poblacional es el promedio de las estimaciones de los totales en cada estrato.

Tabla 5.19: *Muestreo estratificado PPT: estimación de los totales de las características de interés.*

Variable	Total poblacional	Total estimado	cve %	Desv. %
Ingreso	1035217	1035217	0.00	0.00
Empleados	151950	151570	0.07	-0.25
Impuestos	28654	28582	0.20	-0.25

- (e) Explique una ventaja técnica para estratificar
- (f) Explique una ventaja logística para estratificar
- (g) Exponga detalladamente un ejemplo en donde para diferentes estratos se proponen diferentes diseños de muestreo.
- 5.2 Escriba las fórmulas del estimador del total y del estimador de la varianza para los siguientes diseños de muestreo. Defina cada término y notación que utilice en las fórmulas.
- (a) Diseño estratificado con tres estratos: uno de inclusión forzosa, otro con diseño PPT y otro con diseño MAS.
- (b) Diseño estratificado con dos estratos: uno de inclusión forzosa, otro con diseño sistemático.
- (c) Diseño estratificado con cuatro estratos: uno de inclusión forzosa, otro con diseño bernoulli, con diseño MAS con reemplazo y otro con diseño Poisson proporcional a una característica de información auxiliar.
- (d) Diseño estratificado con tres estratos: todos con diseño  $\pi$ PT
- 5.3 Realice el ejercicio lexicográfico del Ejemplo 5.1.1.
- 5.4 Realice el ejercicio lexicográfico del Ejemplo 5.2.2.
- 5.5 Realice el ejercicio lexicográfico del Ejemplo 5.3.1.
- 5.6 Suponga una población de cuatro elementos  $U = \{1, 2, 3, 4\}$  cuyos valores para la característica de interés son  $y_1 = y_2 = 0$ ,  $y_3 = 1$ ,  $y_4 = -1$ . En primer lugar, calcule la varianza del estimador de la media poblacional para un diseño de muestreo aleatorio simple con tamaño de muestra  $n = 2$ . Luego, calcule la varianza del estimador de la media poblacional para un diseño de muestreo con dos estratos  $U_1 = \{1, 2\}$  y  $U_2 = \{3, 4\}$  si dentro de cada estrato se planea un diseño aleatorio simple de tamaño uno. ¿Cuál varianza resultó ser más grande?. Explique
- 5.7 Suponga que una población de municipios se divide en dos estratos, uno urbano y el otro rural. De todas los municipios en la población, siete ( $N_1 = 7$ ) son ciudades y los restantes veinticinco ( $N_2 = 25$ ) son distritos rurales. Se decide que se usará un diseño de muestreo estratificado de tamaño total  $n = 8$ . Teniendo en cuenta la siguiente tabla, determine tamaños de muestra en cada estrato de acuerdo a la afijación proporcional, afijación de Neyman y afijación óptima.

	Estrato rural	Estrato urbano	Población Total
Media	283	1146	472
Desv. Est.	331	1318	743
Tamaño	25	7	32
Costo por encuesta	5 pesos	2 pesos	3 pesos

- 5.8 Calcule el estimador del total poblacional, el estimador de la media poblacional, sus respectivos c.v.e. e intervalos de confianza para una estrategia de muestreo que utiliza el estimador de Horvitz - Thompson y un diseño de muestreo aleatorio estratificado ( $H = 2$ ). El tamaño del primer estrato es de  $N_1 = 105$  y el del segundo estrato es de  $N_2 = 19$ . Para el estrato uno, se seleccionó una muestra de  $n_1 = 11$  elementos y para el estrato dos, se seleccionó una muestra de  $n_2 = 4$  elementos. Use la siguiente información:

Estrato $h$	$\sum_{s_h} y_k$	$\sum_{s_h} y_k^2$
1	1099	21855
2	3446	1822736

## Capítulo 6

# Muestreo de conglomerados

En encuestas complejas, los grupos poblacionales de elementos que se forman naturalmente como barrios, municipios o escuelas pueden ser tratados como unidades de muestreo. Este tipo de esquemas de muestreo ayudan a aumentar el tamaño de muestra manteniendo el costo de la encuesta.

Lehtonen & Pahkinen (2003)

Las estrategias de muestreo para elementos tienen un común denominador: el marco de muestreo y su prolija identificación y ubicación de los elementos poblacionales, de todos y cada uno de ellos. Cabe resaltar que en la práctica no es muy común el uso de diseños de muestreo que seleccionen muestras de elementos directamente. Lo anterior se debe más a cuestiones financieras y logísticas que a problemas de eficiencia estadística. Piense en lo siguiente: cada investigación requiere un marco de muestreo. Son miles de millares las investigaciones realizadas al año y deberían existir tantos marcos de muestreo como investigaciones realizadas. Por cuestiones de tipo logístico la consecución de un marco de muestreo de elementos es muy costosa porque implicaría realizar un censo, enumerando, identificando y ubicando a cada elemento de la población y esto es, por supuesto, algo utópico.

Pensando en el más sencillo de los diseños de muestreo, el costo financiero de realizar un estudio mediante un diseño de muestreo aleatorio simple es muy elevado. Por ejemplo suponga que se desea realizar un estudio para evaluar la calidad de vida de las personas en un determinado país. Si llegara a existir un marco de muestreo de elementos, realizar (o seleccionar) una muestra aleatoria simple demandaría la contratación de un encuestador por cada persona encuestada, puesto que la dispersión geográfica natural de los elementos seleccionados en la muestra aleatoria simple sería demasiado alta.

En el caso anterior, aunque se tuviera un marco de muestreo de elementos, el costo financiero de realizar una muestra aleatoria sería demasiado alto. Una forma de realizar muestras probabilísticas a falta de un marco de muestreo de elementos es seleccionar conglomerados<sup>1</sup> de elementos y realizar el proceso de medición en cada conglomerado. Cochran (1977) plantea que, por cuestiones logísticas, es más eficiente seleccionar una muestra de 20 bloques de hogares, cada bloque con 30 hogares, que seleccionar una muestra aleatoria de 600 hogares. En el primer caso sólo se necesitaría la presencia de un encuestador por bloque, mientras que en el segundo, posiblemente, se necesite la presencia de muchos más encuestadores.

Siempre que se desee seleccionar una muestra probabilística se debe tener un marco de muestreo de manera obligatoria, en los casos en donde se carece de marco muestral es necesario construir uno. Sin embargo, el costo financiero y logístico de levantar un marco de muestreo para elementos es muy alto, en la mayoría de ocasiones. Una forma de construir marcos de muestreo de bajo costo es

---

<sup>1</sup>Agrupación natural de objetos

mediante la aplicación de un diseño de muestreo por conglomerados. Estos conglomerados tienen la ventaja de ser agrupaciones de elementos que se forman de manera natural y además existen entidades gubernamentales que se ocupan de registrar y actualizar la lista de conglomerados existentes en cada sector. Por ejemplo, existe una entidad encargada de la actualización de los sectores cartográficos de una ciudad, existe una entidad encargada de la actualización de los negocios en un sector, existe una entidad que recopila la información concerniente a la ubicación de las escuelas, etc. Para cada entidad existe también un registro de estas aglomeraciones y este será el marco de muestreo que se utilizará en la etapa de diseño.

Por lo tanto, el marco de muestreo contendrá la ubicación e identificación de cada uno de los conglomerados de elementos existentes en la población. Con este marco de conglomerados, se aplica un diseño de muestreo y una muestra es seleccionada. Cada conglomerado seleccionado en la muestra es visitado y el proceso de medición se realiza para todos los elementos pertenecientes al mismo. Entonces, si el conglomerado seleccionado es una sección cartográfica de la ciudad, se aplicará la encuesta a todos y cada uno de los elementos que conforman la sección. Si el conglomerado seleccionado es una escuela, se aplicará el instrumento de medición a todos y cada uno de los alumnos de la escuela. En otras palabras, se realiza un censo en cada conglomerado que haya sido seleccionado en la muestra.

Por supuesto, existe una ganancia significativa en términos operativos, logísticos y financieros. Sin embargo, esta ganancia tiene un precio... el precio a pagar está dado en términos de eficiencia estadística de la estrategia de muestreo. Revisando un poco el proceso de aglomeración, hay que tener en cuenta que los conglomerados de elementos tienden, en la mayoría de los casos, a ser homogéneos con respecto a los valores de la característica de interés  $y$ . Lo anterior se da porque la agrupación se realiza de forma natural, es decir lo hogares, las secciones cartográficas, las villas, las escuelas, las prisiones, etc. tienden a formarse de manera natural y homogénea. Así que la pérdida de eficiencia estadística es causada por el efecto de conglomerado que conlleva la selección de unidades homogéneas que no contienen información nueva sino, de alguna manera, repetida. ¿Qué nueva información se obtiene, acerca de la población, al añadir un nuevo elemento del mismo conglomerado en la muestra?

Entre más grande sea el tamaño de la sub-muestra en los conglomerados, entonces más grande será el efecto de diseño. Si dentro de cada conglomerado, el comportamiento de la característica de interés  $y$  reflejará el comportamiento estructural de la misma en la población, entonces la eficiencia de una estrategia de muestreo por conglomerados sería similar a la de una muestra aleatoria simple. Pero, en la práctica, la homogeneidad interna de los conglomerados aumenta el error de muestreo. Un error, por desgracia demasiado frecuente, entre los investigadores neófitos es analizar una muestra por conglomerados como una muestra aleatoria simple<sup>2</sup>.

En general se tienen los siguientes comentarios acerca del muestreo por conglomerados:

- Utilizamos muestreo por conglomerados sí:
  1. La construcción de un marco de muestreo de elementos es muy difícil, muy costosa o imposible de conseguir. Enumerar abejas, enumerar clientes, enlistar árboles en un sector, enlistar hogares en los barrios conglomerados (dispersión geográfica, reducción de costos).
  2. La población objetivo se encuentra muy dispersa (geográficamente) o aparece en agrupaciones naturales: familias, escuelas, etc.
- Los elementos individuales de una población sólo participan en la muestra si pertenecen a un conglomerado incluido en la muestra.
- El muestreo estratificado aumenta la precisión de las estimaciones, mientras que el muestreo por conglomerados tiende a disminuirla. Es un precio que se paga al no poseer un marco de muestreo definido para los elementos de la población objetivo.

<sup>2</sup>No es prudente, ni correcto analizar una muestra por conglomerados como si fuera una muestra aleatoria simple porque los errores estándar serán mayores y la interpretación de los resultados será errónea.



- Al obtener una muestra de elementos que pertenecen a un conglomerado repetimos la información del conglomerado (dada la agrupación natural). Lo ideal es conseguir información nueva en cada individuo, por lo anterior se pierde precisión en las estimaciones.

## 6.1 Fundamentos teóricos y notación

Suponga que la población de elementos

$$U = \{1, \dots, k, \dots, N\}.$$

se divide en  $N_I$  sub-grupos poblacionales, llamados **conglomerados** y denotados como  $U_I = \{U_1, \dots, U_{N_I}\}$ .

La población de conglomerados estará dada, sin pérdida de generalidad, por

$$U_I = \{1, \dots, N_I\}.$$

Estos definen una partición de la población en tal forma que

1.  $U = \bigcup_{i=1}^{N_I} U_i$
2.  $U_i \cap U_j = \emptyset$  para todo  $i \neq j$

El número de unidades  $N_i$  en el conglomerado  $i$ -ésimo se llama **tamaño del conglomerado** tal que

$$N = \sum_{i=1}^{N_I} N_i,$$

donde  $N$  es el tamaño de la población  $U$ . Con la población dividida en  $N_I$  conglomerados, los parámetros poblacionales de interés pueden escribirse como:

1. El total poblacional,

$$t_y = \sum_{k \in U} y_k = \sum_{i=1}^{N_I} \sum_{k \in U_i} y_k = \sum_{i=1}^{N_I} t_{yi} \quad (6.1.1)$$

donde  $t_{yi} = \sum_{k \in U_i} y_k$  es el total del  $i$ -ésimo conglomerado.

2. La media poblacional,

$$\bar{y}_U = \frac{\sum_{k \in U} y_k}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_I} \sum_{k \in U_i} y_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_I} N_i \bar{y}_i \quad (6.1.2)$$

donde  $\bar{y}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{k \in U_i} y_k$  es la media del  $i$ -ésimo conglomerado.

El esquema general del diseño de muestreo por conglomerados está definido de la siguiente forma

1. Seleccionar una muestra probabilística  $s_I^3$  de conglomerados de la población  $U_I$  mediante un diseño de muestreo tal que

$$Pr(S_I = s_I) = p_I(s_I) \quad \text{para todo } s_I \in Q_I. \quad (6.1.3)$$

donde  $Q_I$  es el soporte conteniendo todas las posibles muestras de conglomerados.

---

<sup>3</sup>Nótese que si  $s_I$  representa la muestra realizada de conglomerados, entonces  $S_I$  representa la muestra aleatoria la cual es una variable aleatoria.

2. Todos y cada uno de los elementos pertenecientes a los conglomerados seleccionados son observados y medidos.

El tamaño de la muestra aleatoria de conglomerados está dado por

1.  $n(S_I) = n_I$  si la muestra es de tamaño fijo,  $n(S_I)$  si la muestra es de tamaño variable
2.  $n(S_I) = m_I$  si la muestra es seleccionada con reemplazo

La muestra aleatoria de elementos viene caracterizada por

$$S = \bigcup_{i \in S_I} U_i \quad (6.1.4)$$

y el tamaño de la muestra<sup>4</sup> de elementos por

$$n(S) = \sum_{i \in S_I} N_i \quad (6.1.5)$$

Si es posible construir o definir un soporte  $Q_I$ , también será posible definir (al menos teóricamente) un soporte general  $Q$  de elementos conteniendo las posibles muestras de elementos pertenecientes a los conglomerados seleccionados.

**Ejemplo 6.1.1.** Nuestra población ejemplo  $U$  dada por

$$U = \{\mathbf{Yves}, \mathbf{Ken}, \mathbf{Erik}, \mathbf{Sharon}, \mathbf{Leslie}\}$$

se divide en tres conglomerados de la siguiente forma

$$U_1 = \{\mathbf{Yves}, \mathbf{Ken}\}$$

el segundo conformado por

$$U_2 = \{\mathbf{Erik}, \mathbf{Sharon}\}$$

y el último conglomerado dado por

$$U_3 = \{\mathbf{Leslie}\}$$

Es claro que, en este caso particular, se tienen  $N_I = 3$  conglomerados de tamaño diferentes. De esta manera, la población de conglomerados queda definida por

$$U_I = \{U_1, U_2, U_3\}$$

Suponga que se selecciona una muestra  $s_I$  de conglomerados de tamaño  $n_I = 2$ . La definición del soporte  $Q_I$  en R se hace mediante el uso de la función `Support` del paquete `TeachingSampling` aplicada a la información a nivel de los conglomerados de la siguiente manera.

---

<sup>4</sup>Dado que, por lo general, el tamaño de los conglomerados varía, se tiene que  $n(S)$  es generalmente aleatorio incluso si  $n(S_I)$  es de tamaño fijo.

```

U <- c("Yves", "Ken", "Erik", "Sharon", "Leslie")
U1 <- c("Yves", "Ken")
U2 <- c("Erik", "Sharon")
U3 <- c("Leslie")
UI <- c("U1", "U2", "U3")

N1 <- length(U1)
N2 <- length(U2)
N3 <- length(U3)

ty1 <- sum(32, 34)
ty2 <- sum(46, 89)
ty3 <- sum(35)

tyI <- c(ty1, ty2, ty3)
ty <- sum(ty1, ty2, ty3)

NI <- 3
nI <- 2

QI <- Support(NI, nI, UI)
QI

##      [,1] [,2]
## [1,] "U1" "U2"
## [2,] "U1" "U3"
## [3,] "U2" "U3"

```

### 6.1.1 El estimador de Horvitz-Thompson

Nótese que en el esquema general del muestreo por conglomerados, se utiliza un diseño de muestreo para la selección de los conglomerados en la muestra. Este diseño de muestreo  $p_I(s_I)$  puede ser cualquiera de los diseños vistos en los capítulos anteriores, aplicados a la selección, esta vez no de elementos, sino de conglomerados. En general, dado el soporte  $Q_I$ ,  $p_I(s_I)$  puede ser:

- **Sin reemplazo:** si todas las posibles muestras en  $Q_I$  son sin reemplazo. Muestreo aleatorio simple, Bernoulli, Sistemático, Poisson,  $\pi$ PT o estratificado simple.
- **Con reemplazo:** si todas las posibles muestras en  $Q_I$  son con reemplazo. Muestreo aleatorio simple con reemplazo o muestreo PPT.
- **De tamaño fijo:** si todas las posibles muestras en  $Q$  tienen el mismo tamaño de muestra  $n(s_I) = n_I$ .

Nótese que el diseño de muestreo  $p_I(s_I)$  induce probabilidades de inclusión sobre los conglomerados las cuales están definidas como sigue a continuación.

**Definición 6.1.1.** La probabilidad de inclusión del conglomerado  $i$ -ésimo está dada por

$$\pi_{Ii} = Pr(i \in S_I) = \sum_{s_I \ni i} p_I(s_I). \quad (6.1.6)$$

mientras que la probabilidad de inclusión de los conglomerados  $i$ -ésimo y  $j$ -ésimo están dadas por

$$\pi_{Iij} = Pr(i \in S_I \text{ y } j \in S_I) = \sum_{s_I \ni i \text{ y } j} p_I(s_I). \quad (6.1.7)$$

respectivamente. Por supuesto,  $\pi_{Iii} = \pi_{Ii}$ .

Asimismo, debido a la naturaleza jerárquica de la agrupación de elementos en los conglomerados, el siguiente resultado muestra las probabilidades de inclusión al nivel de los elementos de la población.

**Resultado 6.1.1.** *La probabilidad de que el  $k$ -ésimo elemento, sea incluido en la muestra  $S$  está dada por*

$$\pi_k = \pi_{Ii} \quad \text{si } k \in U_i \quad (6.1.8)$$

Por otro lado, la probabilidad de inclusión de los elementos  $k$ -ésimo y  $l$ -ésimo está dada por

$$\pi_{kl} = \begin{cases} \pi_{Ii}, & \text{si } k, l \in U_i, \\ \pi_{Iij}, & \text{si } k \in U_i, l \in U_j, i \neq j. \end{cases} \quad (6.1.9)$$

Una vez definidas las probabilidades de inclusión se define la estrategia de muestreo con el uso del estimador de Horvitz-Thompson, dado por el siguiente resultado

**Resultado 6.1.2.** *Bajo un diseño de muestreo por conglomerados, el estimador de Horvitz-Thompson para el total  $t_y$ , su varianza y su varianza estimada están dados por*

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_{i \in S_I} \frac{t_{yi}}{\pi_{Ii}} \quad (6.1.10)$$

$$Var_1(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_{U_I} \sum_{U_I} \Delta_{Iij} \frac{t_{yi}}{\pi_{Ii}} \frac{t_{yj}}{\pi_{Ij}}. \quad (6.1.11)$$

$$\widehat{Var}_1(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_{S_I} \sum_{S_I} \frac{\Delta_{Iij}}{\pi_{Iij}} \frac{t_{yi}}{\pi_{Ii}} \frac{t_{yj}}{\pi_{Ij}} \quad (6.1.12)$$

respectivamente, con  $\Delta_{Iij} = \pi_{Iij} - \pi_{Ii}\pi_{Ij}$  y  $t_{yi}$  el total del  $i$ -ésimo conglomerado seleccionado. Nótese que  $\hat{t}_{y,\pi}$  es insesgado para  $t_y$  y que  $\widehat{Var}_1(\hat{t}_{y,\pi})$  es insesgado para  $Var_1(\hat{t}_{y,\pi})$ .

**Prueba.** Para el estimador, se tiene que

$$\begin{aligned} \hat{t}_{y,\pi} &= \sum_{k \in S} \frac{y_k}{\pi_k} \\ &= \sum_{i \in S_I} \sum_{k \in U_i} \frac{y_k}{\pi_k} \\ &= \sum_{i \in S_I} \frac{1}{\pi_{Ii}} \sum_{k \in U_i} y_k \\ &= \sum_{i \in S_I} \frac{t_{yi}}{\pi_{Ii}}. \end{aligned}$$

Para el cálculo de la varianza es necesario verificar que

$$\Delta_{kl} = \Delta_{Iij} = \begin{cases} \pi_{Ii} - \pi_{Ii}^2, & \text{si } k, l \in U_i; \\ \pi_{Iij} - \pi_{Ii}\pi_{Ij}, & \text{si } k \in U_i, l \in U_j \text{ y } i \neq j \end{cases} \quad (6.1.13)$$

Entonces se tiene que

$$\begin{aligned}
 Var_1(\hat{t}_{y,\pi}) &= \sum_{k \in U} \sum_{l \in U} \Delta_{kl} \frac{y_k}{\pi_k} \frac{y_l}{\pi_l} \\
 &= \sum_{i \in U_I} \sum_{k \in U_i} \sum_{j \in U_I} \sum_{l \in U_j} \Delta_{kl} \frac{y_k}{\pi_{Ii}} \frac{y_l}{\pi_{Ij}} \\
 &= \sum_{i \in U_I} \sum_{j \in U_I} \Delta_{Iij} \frac{1}{\pi_{Ii}} \frac{1}{\pi_{Ij}} \sum_{k \in U_i} y_k \sum_{l \in U_j} y_l \\
 &= \sum_{U_I} \sum_{U_I} \Delta_{Iij} \frac{t_{yi}}{\pi_{Ii}} \frac{t_{yj}}{\pi_{Ij}}
 \end{aligned}$$

Se procede análogamente para la estimación de la varianza. ■

**Resultado 6.1.3.** Si el diseño de muestreo  $p_I(s_I)$  es de tamaño fijo, la varianza del estimador de Horvitz-Thompson y su varianza estimada toman la siguiente forma

$$Var_2(\hat{t}_{y,\pi}) = -\frac{1}{2} \sum_{U_I} \sum_{U_I} \Delta_{Iij} \left( \frac{t_{yi}}{\pi_{Ii}} - \frac{t_{yj}}{\pi_{Ij}} \right)^2 \quad (6.1.14)$$

$$\widehat{Var}_2(\hat{t}_{y,\pi}) = -\frac{1}{2} \sum_{S_I} \sum_{S_I} \frac{\Delta_{Iij}}{\pi_{Iij}} \left( \frac{t_{yi}}{\pi_{Ii}} - \frac{t_{yj}}{\pi_{Ij}} \right)^2 \quad (6.1.15)$$

Nótese que  $\widehat{Var}_2(\hat{t}_{y,\pi})$  es insesgado para  $Var_2(\hat{t}_{y,\pi})$ .

**Prueba.** La demostración de los anteriores resultados es inmediata siguiendo los lineamientos de la sección del estimador de Horvitz-Thompson del segundo capítulo y notando que  $t_y = \sum_{U_I} t_{yi}$ . ■

Al respecto de la construcción del estimador de Horvitz-Thompson bajo muestreo en conglomerados, Bautista (1998) deduce que

1. La eficiencia de la estrategia de muestreo toma su máximo valor cuando los valores  $\frac{t_{yi}}{\pi_{Ii}}$  son constantes para todo  $i = 1, \dots, N_I$ .
2. Cuando el diseño por conglomerados es tal que asigna probabilidades de inclusión idénticas a cada conglomerado, la estrategia pierde eficiencia, a menos que el comportamiento de los totales de cada conglomerado sea similar.

Los anteriores comentarios nos llevan a preferir diseños de muestreo que asignen probabilidades de inclusión proporcionales al tamaño del conglomerado. Para esto se debería disponer de información auxiliar continua disponible para toda la población  $U_I$  que estuviera bien correlacionada con los totales de la característica de interés en cada conglomerado  $t_{yi}$ . En otras palabras, nuestro marco de muestreo es de conglomerados; por tanto, si  $x$  representa la información auxiliar continua y  $t_{xi}$  el total de la información auxiliar en el  $i$ -ésimo conglomerado, la correlación entre  $t_{xi}$  y  $t_{yi}$  debería ser bastante fuerte y las probabilidades de inclusión de los conglomerados deberían corresponder a

$$\pi_{Ii} = n_I \frac{t_{xi}}{t_x} \quad (6.1.16)$$

**Ejemplo 6.1.2.** Nuestra población ejemplo  $U_I$  dada por

$$U_I = \{U_1, U_2, U_3\}$$

Suponga que se selecciona una muestra  $s_I$  de conglomerados de tamaño  $n_I = 2$  mediante un diseño de muestreo sin reemplazo tal que

$$p_I(s_I) = \begin{cases} 0.5, & \text{si } s_I = \{U_1, U_2\}, \\ 0.4, & \text{si } s_I = \{U_1, U_3\}, \\ 0.1, & \text{si } s_I = \{U_2, U_3\} \end{cases}$$

Mediante el siguiente ejercicio léxico-gráfico se comprueba el insesgamiento del estimador de Horvitz-Thompson en R. Para esto utilizamos las funciones `Ik` y `Pik` del paquete **TeachingSampling** a nivel de los conglomerados.

```
p <- c(0.5, 0.4, 0.1)
Ind <- Ik(NI, nI)
data.frame(QI, p, Ind)

##   X1 X2   p X1.1 X2.1 X3
## 1 U1 U2 0.5    1    1  0
## 2 U1 U3 0.4    1    0  1
## 3 U2 U3 0.1    0    1  1

pikI <- Pik(p, Ind)
pikI

##      [,1] [,2] [,3]
## [1,]  0.9  0.6  0.5
```

De esta manera, la probabilidad de inclusión más alta la tiene el conglomerado  $U_1$  y la más baja corresponde al conglomerado  $U_3$ . Con esto podemos calcular la estimación mediante el uso de la función `HT` del paquete **TeachingSampling**.

```
all.pikI <- Support(NI, nI, pikI)
all.tyI <- Support(NI, nI, tyI)
all.HT <- rep(NA, 3)

for(k in 1:3){
  all.HT[k] <- HT(all.tyI[k,], all.pikI[k,])
}

all.HT

## [1] 298 143 295

sum(p * all.HT)

## [1] 236

All.samples <- data.frame(QI, p, all.pikI, all.tyI, all.HT)
```

	X1	X2	p	X1.1	X2.1	X1.2	X2.2	all.HT
1	U1	U2	0.50	0.90	0.60	66.00	135.00	298.33
2	U1	U3	0.40	0.90	0.50	66.00	35.00	143.33
3	U2	U3	0.10	0.60	0.50	135.00	35.00	295.00

Tabla 6.1: *Estimaciones para todas las posibles muestras del ejemplo.*

Una vez más, nótese que en la estimación intervienen las cantidades de los conglomerados seleccionados en la muestra realizada.

### Estimación de otros parámetros

Si el tamaño poblacional  $N$  es conocido, la media poblacional definida en (2.1.14) puede ser estimada con el estimador de Horvitz-Thompson.

**Resultado 6.1.4.** *En muestreo por conglomerado la media poblacional es estimada insesgadamente mediante el uso del estimador de Horvitz-Thompson*

$$\hat{Y}_\pi = \frac{1}{N} (\hat{t}_{y,\pi}) \quad (6.1.17)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i \in S_I} \frac{t_{yi}}{\pi_{Ii}} \quad (6.1.18)$$

Una de las razones por las que se utiliza el muestreo por conglomerados es la falta de un marco de muestreo para elementos. En este caso el desconocimiento del tamaño poblacional es muy típico. Sin embargo, utilizando los principios del estimador de Horvitz-Thompson, es posible estimar el tamaño de la población escribiéndolo como

$$N = \sum_{i \in U_I} N_i, \quad (6.1.19)$$

Luego, tenemos el siguiente resultado.

**Resultado 6.1.5.** *En muestreo por conglomerados el tamaño poblacional es estimado insesgadamente mediante el uso de la siguiente expresión*

$$\hat{N}_\pi = \sum_{i \in S_I} \frac{N_i}{\pi_{Ii}} \quad (6.1.20)$$

Una vez el tamaño de la población es estimado, es posible utilizar la razón de Hájek (Hájek 1971) para estimar la media poblacional de la siguiente manera.

$$\tilde{y}_S = \frac{\hat{t}_{y,\pi}}{\hat{N}_\pi} \quad (6.1.21)$$

$$= \frac{\sum_{i \in S_I} \frac{t_{yi}}{\pi_{Ii}}}{\sum_{i \in S_I} \frac{N_i}{\pi_{Ii}}} \quad (6.1.22)$$

De hecho, en algunas ocasiones, cuando el diseño de muestreo utilizado induce probabilidades de inclusión desiguales, es mejor utilizar este estimador aun conociendo el tamaño poblacional.

### 6.1.2 El estimador de Hansen-Hurwitz

Si la selección de los conglomerados se hace con reemplazo, ya sea utilizando un diseño de muestreo aleatorio simple con reemplazo o, en el caso de tener información auxiliar continua a nivel de los conglomerados, haciendo uso de un diseño de muestreo PPT, es posible utilizar los principios del estimador de Hansen-Hurwitz para completar la estrategia de muestreo.

En caso de tener acceso a información auxiliar continua, las probabilidad de selección del  $i$ -ésimo conglomerado estaría dada por

$$p_{Ii} = \frac{t_{xi}}{t_x} \quad (6.1.23)$$

Sampath (2001) afirma que en caso de conocerse los tamaños  $N_i$  de cada cluster  $i = 1, \dots, N_I$ , estos mismos pueden ser utilizados como medidas de tamaño para desarrollar un plan de muestreo con probabilidades proporcionales. El esquema general del muestreo con reemplazo toma la siguiente forma:

- Para cada conglomerado de la población  $U_I$ , existen números positivos  $p_{I1}, \dots, p_{IN_I}$  tales que

$$\sum_{U_I} p_{Ii} = 1.$$

Estas probabilidades no son necesariamente iguales.

- Para seleccionar el primer elemento que pertenecerá a la muestra de tamaño  $m_I$ , se lleva a cabo un sorteo aleatorio de tal forma que

$$Pr(\text{Seleccionar el conglomerado } i) = p_{Ii}, \quad i \in U_I.$$

- El conglomerado seleccionado es reemplazado en la población y vuelve a ser parte del próximo sorteo aleatorio con la misma probabilidad de selección. En total se realizan  $m_I$  sorteos aleatorios independientes.

Nótese que el sorteo aleatorio se realiza entre los conglomerados, y no entre los elementos; por lo tanto, bajo muestreo en conglomerados no tiene sentido hablar de la probabilidad de selección de un elemento. Una vez que las probabilidades de selección de los conglomerados están definidas, utilizamos el estimador de Hansen-Hurwitz para estimar los parámetros de interés.

**Resultado 6.1.6.** *Bajo un diseño de muestreo por conglomerados, el estimador de Hansen-Hurwitz para el total  $t_y$ , su varianza y su varianza estimada están dados por*

$$\hat{t}_{y,p} = \frac{1}{m_I} \sum_{v=1}^{m_I} \frac{t_{yi_v}}{p_{Ii_v}} \quad (6.1.24)$$

$$Var(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m_I} \sum_{i=1}^{N_I} p_{Ii} \left( \frac{t_{yi}}{p_{Ii}} - t_y \right)^2 \quad (6.1.25)$$

$$\widehat{Var}(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m_I(m_I - 1)} \sum_{v=1}^{m_I} \left( \frac{t_{yi_v}}{p_{Ii_v}} - \hat{t}_{y,p} \right)^2 \quad (6.1.26)$$

respectivamente. Nótese que  $\hat{t}_{y,p}$  es insesgado para  $t_y$  y que  $\widehat{Var}(\hat{t}_{y,p})$  es insesgado para  $Var(\hat{t}_{y,p})$ .



**Prueba.** La demostración del resultado sigue los mismos argumentos de la sección del estimador de Hansen-Hurwitz del segundo capítulo y del resultado 2.2.11, definiendo la variable aleatoria  $Z_v$  como

$$Z_v = t_{yi}/p_{Ii} \quad i \in U_I \quad v = 1, \dots, m_I \quad (6.1.27)$$

y notando que

$$Pr(Z_v = t_{yi}/p_{Ii}) = p_{Ii} \quad (6.1.28)$$

■

Cochran (1977) afirma que el método de selección de muestras con reemplazo es equivalente al problema estándar de probabilidad en el cual  $m_I$  bolas son depositadas en  $N_I$  cajas, la probabilidad de que una bola sea depositada en la  $i$ -ésima caja está dada por  $Z_v$  en cada oportunidad. De esta manera, la distribución conjunta de  $n_{Ii}(s_I)$ <sup>5</sup> está dada por una expresión multinomial.

**Definición 6.1.2.** De manera general, un diseño de muestreo con reemplazo de conglomerados se define como

$$p_I(s_I) = \begin{cases} \frac{m_I!}{n_{I1}(s_I)! \dots n_{IN_I}(s_I)!} \prod_{U_I} (p_{Ii})^{n_{Ii}(s_I)}, & \text{si } \sum_{U_I} n_{Ii}(s_I) = m_I \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (6.1.29)$$

**Ejemplo 6.1.3.** Nuestra población ejemplo  $U_I$  dada por

$$U_I = \{U_1, U_2, U_3\}$$

Suponga que se selecciona una muestra  $s_I$  con reemplazo de conglomerados de tamaño  $m_I = 2$  mediante un diseño de muestreo que asigna las siguientes probabilidades de selección a cada conglomerado.

$$p_{Ii} = \begin{cases} 0.80, & \text{si } i = 1, \\ 0.15, & \text{si } i = 2, \\ 0.05, & \text{si } i = 3. \end{cases}$$

Para seleccionar una muestra con reemplazo de la población  $U_I$  de tamaño  $m_I = 2$  conglomerados se utiliza la función `sample` cuyo argumento `replace` debe aparecer igual a `TRUE`. Para esto definimos las probabilidades de selección de cada conglomerado.

```
UI <- c("U1", "U2", "U3")
NI <- 3
mI <- 2

pIi <- c(0.8, 0.15, 0.05)
samI <- sample(NI, mI, replace=TRUE, prob=pIi)
mI <- UI[samI]
mI

## [1] "U1" "U2"
```

En este caso particular la muestra con reemplazo está compuesta por  $U_3$  y, como era de esperarse, por tener la más alta probabilidad de selección, por  $U_1$ . Para estimar el total poblacional, utilizamos la función `HH` del paquete `TeachingSampling` con los totales de los conglomerados seleccionados y sus respectivas probabilidades de selección.

<sup>5</sup> $n_{Ii}(s_I)$  se define como el número de veces que el conglomerado  $i$ -ésimo es seleccionado en una muestra probabilística de tamaño  $m_I$ . Note que  $n_{Ii}(s_I)$  toma valores  $0, 1, 2, \dots, m_I$ .

```

tyIm <- tyI[samI]
tyIm

## [1] 66 135

pIim <- pIi[samI]
data.frame(mI, pIim, tyIm)

##   mI pIim tyIm
## 1 U1 0.80  66
## 2 U2 0.15 135

HH(tyIm, pIim)[1]

## [1] 491

```

## 6.2 Muestreo aleatorio simple de conglomerados

En esta sección se introducen los principios del diseño de muestreo por conglomerados bajo el plan de muestreo más sencillo. La muestra  $s_I$  de  $n_I$  conglomerados es seleccionada mediante un diseño de muestreo aleatorio simple sin reemplazo. Como se verá a lo largo de la sección, no hay nuevos principios (ni en el diseño de muestreo ni en el desarrollo del estimador) involucrados en la construcción de la estrategia de muestreo, la demostración de los resultados se hace siguiendo las pautas expuestas en el capítulo 2.

Este diseño de muestreo asume que el comportamiento del total de la característica de interés es constante en cada uno de los conglomerados. En la práctica esta situación se presenta en muy pocas ocasiones, es por esto que este diseño pierde precisión, en la mayoría de ocasiones, ante el muestreo aleatorio simple. Para que este diseño de muestreo sea más eficiente el valor promedio de la característica de interés en cada cluster  $\bar{y}_{U_i}$  debería ser proporcional a  $\frac{c}{N_i}$ . Se asume que la población  $U_I$  está dividida en  $N_I$  conglomerados (no necesariamente del mismo tamaño). La muestra sin reemplazo es seleccionada de acuerdo al diseño de muestreo dada en la siguiente definición.

**Definición 6.2.1.** *Un diseño de muestreo se dice aleatorio simple para conglomerados si todas las posibles muestras de tamaño  $n_I$  tienen la misma probabilidad de ser seleccionadas. Así,*

$$p_I(s_I) = \begin{cases} \frac{1}{\binom{N_I}{n_I}} & \text{si } \#s_I = n_I \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (6.2.1)$$

Una vez que la muestra de conglomerados  $s_I$  es seleccionada se dispone a realizar una enumeración completa y la respectiva medición y observación de todos y cada uno de los elementos pertenecientes a cada conglomerado seleccionado.

### 6.2.1 Algoritmos de selección

En la selección de las muestras de conglomerados sin reemplazo es posible utilizar los algoritmos de muestreo dados en el capítulo 2, de tal forma que los siguientes pasos se deben realizar:

- Separar la población en  $N_I$  conglomerados mediante el marco de muestreo de conglomerados.

- Realizar una selección de  $n_I$  conglomerados mediante cualquiera de los métodos expuestos en la sección 3.2.1; es decir, por el método coordinado negativo o por el método de Fan-Muller-Rezucha.

### 6.2.2 El estimador de Horvitz-Thompson

Siguiendo el resultado 6.1.1. las probabilidades de inclusión están dadas por el siguiente resultado.

**Resultado 6.2.1.** Para un diseño de muestreo aleatorio de conglomerados, las probabilidades de inclusión de primer y segundo orden de los conglomerados están dadas por

$$\pi_{Ii} = \frac{n_I}{N_I} \quad (6.2.2)$$

$$\pi_{Iij} = \frac{n_I(n_I - 1)}{N_I(N_I - 1)} \quad (6.2.3)$$

respectivamente.

**Resultado 6.2.2.** El tamaño de la muestra de elemento  $s$  es aleatorio y su esperanza está dada por

$$E(n(S)) = N \frac{n_I}{N_I} \quad (6.2.4)$$

**Prueba.** De la definición de tamaño de muestra esperado, se tiene que

$$E(n(S)) = E\left(\sum_{i \in S_I} N_i\right) = \sum_{i \in U_I} N_i \frac{n_I}{N_I} = N \frac{n_I}{N_I} \quad (6.2.5)$$

■

Se sigue del resultado 6.1.2 que la estrategia de muestreo se construye mediante el uso del estimador de Horvitz-Thompson que bajo este diseño de muestreo particular toma la forma del siguiente resultado.

**Resultado 6.2.3.** Para un diseño de muestreo aleatorio de conglomerados, el estimador de Horvitz-Thompson del total poblacional  $t_y$ , su varianza y su varianza estimada están dados por

$$\hat{t}_{y,\pi} = \frac{N_I}{n_I} \sum_{S_I} t_{yi} \quad (6.2.6)$$

$$Var_{MAC}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) S_{t_{yU_I}}^2 \quad (6.2.7)$$

$$\widehat{Var}_{MAC}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) S_{t_{yS_I}}^2 \quad (6.2.8)$$

respectivamente, con  $S_{t_{yU_I}}^2$  y  $S_{t_{yS_I}}^2$  el estimador de la varianza de los totales de los conglomerados para la característica de interés en el universo  $U_I$  y en la muestra  $s_I$ . Esto es

$$S_{t_{yU_I}}^2 = \frac{1}{N_I - 1} \sum_{i \in U_I} (t_{yi} - \bar{t}_{U_I})^2,$$

donde  $\bar{t}_{U_I} = \sum_{i=1}^{N_I} t_{yi} / N_I$ , y  $S_{t_{yS_I}}^2$  se define de manera análoga. Nótese que  $\hat{t}_{y,\pi}$  es insesgado para el total poblacional  $t_y$  de la característica de interés  $y$ , y que  $\widehat{Var}_{MAC}(\hat{t}_{y,\pi})$  es insesgado para  $Var_{MAC}(\hat{t}_{y,\pi})$ .

Nótese que el diseño de muestreo sistemático en un caso especial del muestreo aleatorio de conglomerados cuando se selecciona una muestra  $s_I$  de tamaño igual a  $n_I = 1$ . Al igual que en muestreo sistemático no se tiene un estimador de la varianza cuando se selecciona sólo un conglomerado.

**Ejemplo 6.2.1.** Siguiendo con nuestra población ejemplo  $U_I$ , existen  $\binom{N_I}{m_I} = \binom{3}{2} = 3$  posibles muestras de tamaño  $m_I = 2$ . Realice el cálculo léxico-gráfico del estimador de Horvitz-Thompson y compruebe el insesgamiento y la varianza mediante este diseño de muestreo.

### Tamaño de muestra

Bajo muestreo aleatorio de conglomerados se utilizan los mismos principios de la estimación del tamaño de muestra en muestreo aleatorio simple reemplazando las cantidades correspondientes de la población de elementos por la población de conglomerados  $U_I$ . De tal forma que si requiere estimar el tamaño de muestra dada una precisión absoluta  $c$  se tiene:

$$n_I \geq \frac{n_{I0}}{1 + \frac{n_{I0}}{N_I}} \quad (6.2.9)$$

con  $n_{I0} = \frac{t_{1-\alpha/2, N_I-1}^2 S_{t_{yU_I}}^2}{c^2}$ . En algunas ocasiones se quiere lograr una precisión relativa  $k$ , por tanto:

$$n_I \geq \frac{n_{I0}}{1 + \frac{n_{I0}}{N_I}} \quad (6.2.10)$$

con  $n_{I0} = \frac{t_{1-\alpha/2, N_I-1}^2 CV^2}{k^2}$ . Nótese que dado que la población de conglomerados es pequeña, en la mayoría de los casos, es preferible suponer que el estimador sigue una distribución t-student con  $N_I - 1$  grados de libertad.

### 6.2.3 Eficiencia de la estrategia

A lo largo del capítulo se ha mencionado que la eficiencia de esta estrategia de muestreo es menor que la del muestreo aleatorio simple sin reemplazo. Intuitivamente se sospecha que, dado que la formación de grupos se presenta en forma natural en la mayoría de los casos, la información de los conglomerados, con respecto al comportamiento estructural de la característica de interés, es homogénea dentro de cada uno de ellos.

Para corroborar las anteriores afirmaciones vamos a medir la eficiencia de la estrategia utilizando el efecto de diseño. Sin embargo, para unificar el tamaño de la muestra en esta estrategia se supondrá que:

1. La población  $U_I$  está conformada por  $N_I$  conglomerados.
2. Cada conglomerado es de tamaño  $M$ . Luego  $\#U_i = M \quad i = 1, \dots, N_I$ , además la población de elementos  $U$  es de tamaño  $N = M \times N_I$ .
3. Se selecciona una muestra  $s_I$  de tamaño igual a  $n_I$  conglomerados. De esta forma se han seleccionado en la muestra  $M \times n_I$  elementos.

Los resultados podrán ser comparables si se supone que una muestra de  $n_I$  conglomerados es seleccionada de acuerdo a un diseño aleatorio simple de conglomerados. Por otro lado, se supone que se selecciona una muestra de  $M \times n_I$  elementos directamente de la población  $U$ . Cada vez que la población es dividida en sub-grupos poblacionales es muy útil recurrir a la tabla de análisis de varianza que esta vez toma la forma dada en la tabla 6.1.

Tabla 6.2: *Tabla de ANOVA inducida por el muestreo aleatorio de conglomerados.*

Fuente	gl	Suma de cuadrados	Cuadrado medio
Entre	$N_I - 1$	$SCE = \sum_{i=1}^{N_I} M (\bar{y}_{U_i} - \bar{y}_U)^2$	$\frac{SCE}{N_I - 1}$
Dentro	$N_I M - N_I$	$SCD = \sum_{i=1}^{N_I} \sum_{j=1}^M (y_{ij} - \bar{y}_{U_i})^2$	$\frac{SCD}{N_I M - N_I}$
Total	$N_I M - 1$	$SCT = \sum_{i=1}^{N_I} \sum_{j=1}^M (y_{ij} - \bar{y}_U)^2$	$s_{y_U}^2$

**Resultado 6.2.4.** Utilizando los resultados de la descomposición de las sumas de cuadrados, la varianza de la estrategia por conglomerados toma la siguiente forma

$$Var_{MAC}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) M \frac{SCE}{N_I - 1} \quad (6.2.11)$$

mientras que la varianza de la estrategia aleatoria simple, con un tamaño poblacional igual a  $N = M \times N_I$  elementos y un tamaño de muestra igual a  $n = M \times n_I$  elementos, se puede escribir como

$$Var_{MAS}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) M \frac{SCT}{MN_I - 1} \quad (6.2.12)$$

**Prueba.** Para la varianza de la estrategia por conglomerados se tiene

$$\begin{aligned} M \frac{SCE}{N_I - 1} &= \frac{\sum_{i=1}^{N_I} M^2 (\bar{y}_{U_i} - \bar{y}_U)^2}{N_I - 1} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^{N_I} (t_{yi} - \bar{t}_{yU_I})^2}{N_I - 1} \\ &= S_{t_{yU_I}}^2 \end{aligned}$$

donde  $\bar{y}_{U_i}$  y  $t_{yi}$  es el promedio y el total del  $i$ -ésimo conglomerado, respectivamente y  $\bar{t}_{yU_I} = \frac{\sum_{i=1}^{N_I} t_{yi}}{N_I}$  es el promedio de los totales de los conglomerados.

Para la varianza de la estrategia aleatoria simple sólo hay que notar que

$$\begin{aligned} \frac{N^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) &= \frac{(MN_I)^2}{Mn_I} \left(1 - \frac{Mn_I}{MN_I}\right) \\ &= \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) M \end{aligned}$$

■

Note que si  $SCE$  es alta, entonces la estrategia será menos eficiente. En la práctica es esto lo que ocurre exactamente pues dada la agrupación natural de elementos, el comportamiento de la característica de interés será similar dentro de cada conglomerado. Por tanto,  $SCE$  será elevada pues en forma general los conglomerados presentarán un comportamiento heterogéneo. Para verlo con más claridad, se define el coeficiente de correlación intra-clase como

$$\rho = 1 - \frac{M}{M-1} \frac{SCD}{SCT} \quad (6.2.13)$$

Esta medida toma valores positivos si los elementos dentro de los conglomerados tienen un comportamiento similar y negativo cuando el comportamiento de los elementos dentro de los conglomerados

es muy disperso. Además, el coeficiente informa qué tan similares son los elementos dentro de los conglomerados y proporciona una medida de homogeneidad dentro de los conglomerados y nos da una realidad más detallada en cuanto al efecto de diseño y pérdida de eficiencia en el muestreo aleatorio de conglomerados como lo afirma el siguiente resultado.

**Resultado 6.2.5.** *El efecto de diseño en muestreo aleatorio de conglomerados está dado por*

$$Def f = \frac{Var_{MAC}\hat{t}_\pi}{Var_{MAS}\hat{t}_\pi} \cong 1 + (M - 1)\rho \quad (6.2.14)$$

**Prueba.** La aproximación se tiene si se supone que  $N_I$ , el número total de conglomerados, es grande tal que

$$M(N_I - 1) \cong MN_I - 1 \quad (6.2.15)$$

La demostración se completa notando que al realizar el cociente de varianzas, al igual que en la sección del muestreo sistemático, se tiene que

$$\frac{SCE}{SCT} = \frac{1 + (M - 1)\rho}{M} \quad (6.2.16)$$

■

Dado que  $\rho$  es generalmente positivo<sup>6</sup> podemos inferir de (6.2.14) que el muestreo por conglomerados tendrá una mayor varianza que el muestreo aleatorio simple de elementos directamente de la población  $U$ . Sin embargo, es plausible sacrificar la eficiencia estadística por el ahorro financiero y logístico característico de las estrategias por conglomerados. Ahora, si  $\rho$  es negativo, esta estrategia gana en eficiencia y también en costos operativos.

Lohr (2000) afirma que en el caso, muy común en la práctica, en que los conglomerados no sean del mismo tamaño, una medida alternativa a  $\rho$  es el coeficiente de determinación  $R^2$  definido como

$$R^2 = 1 - \frac{CMD}{s_{yU}^2} \quad (6.2.17)$$

donde  $CMD = \frac{SCD}{N - N_I}$ ; con  $N$  el número total de elementos en la población  $U$ . Ésta es una medida muy conocida y utilizada en el análisis de regresión lineal, y es interpretada como la cantidad de variabilidad explicada por los promedios de cada conglomerado. Si el comportamiento de la característica de interés es homogéneo dentro de los conglomerados, entonces los promedios entre los conglomerados tendrán una muy alta dispersión con respecto a la variación dentro de los conglomerados y  $R^2$  tomará valores grandes.

#### 6.2.4 Marco I y Lucy

El común denominador de las aplicaciones prácticas con Marco y Lucy en los capítulos anteriores ha sido la identificación y ubicación, a priori, de cada una de las empresas en el sector industrial. Esto ha sido posible gracias a que un marco de muestreo de elementos estuvo disponible. En algunas ocasiones, el marco de muestreo disponible mostró bondades que permitieron la incorporación de información auxiliar, ya sea de tipo continuo o categórico, para mejorar la eficiencia de la estrategia de muestreo utilizada en cada caso.

En cualquier caso, el gobierno desea obtener estimaciones precisas que le permitan fortalecer sus políticas de apoyo y financiamiento de las empresas en el sector industrial. Sin embargo, el gobierno no

<sup>6</sup>Esto se da porque los conglomerados se forman física y geográficamente como agrupaciones contiguas de elementos que comparten un ambiente natural, entonces el comportamiento de los elementos internamente será similar.

está en disposición de entregar una lista de todas las empresas del sector industrial con su respectiva identificación y ubicación debido a políticas de confidencialidad que no le permiten brindar este tipo de información. Por tanto, en esta ocasión no hay tal marco generoso de elementos en la población y el estudio se deberá llevar a cabo con esta restricción de tipo logístico.

En cualquier estudio por muestreo, siempre debe existir, si no físicamente al menos de forma implícita, un marco de muestreo de la población que permita llegar a la medición de la unidad objetivo de muestreo. Dado que el gobierno no permite la utilización de un marco de muestreo de empresas en el sector industrial, se debe realizar el levantamiento de un marco de muestreo de conglomerados que agrupen estas empresas. Una solución, que es muy utilizada en la práctica, es realizar un muestreo de áreas geográficas. Las empresas, las viviendas, los domicilios, los negocios, etc. están ubicadas en algún lugar del mapa y es poco factible que se muevan de donde han estado instaladas. Por tanto, un marco de muestreo por áreas es una buena solución de tipo logístico para enfrentar la etapa de diseño de este estudio.

Un inconveniente que se presenta a la hora de realizar un muestreo de conglomerados con un marco discriminado en áreas geográficas es la imposibilidad de conocer cuántas empresas estarán ubicadas en cada zona geográfica. Sin embargo, sí es posible asignar subdivisiones de cada zona geográfica seleccionada a un grupo de encuestadores para que recorran la zona y apliquen el cuestionario a cada una de las empresas del sector. De esta forma, es posible tener una estimación del presupuesto que se requiere. La población  $U_I$  de conglomerados, es decir la ciudad, se divide en cinco zonas geográficas, a saber: **Zona A**, ubicada en el sur, **Zona B**, ubicada en el norte, **Zona C**, ubicada en el oriente, **Zona D**, ubicada en el occidente y **Zona E**, ubicada en el centro.

Recordando los objetivos del estudio, el gobierno quiere medir el crecimiento del sector industrial en la ciudad, mediante tres características importantes: el ingreso y los impuestos declarados en el último año fiscal y la generación de empleos mediante la cantidad de trabajadores que laboran en cada empresa. Seguramente, ni el ingreso, ni los impuestos, ni la cantidad de empleados están correlacionados con la zona geográfica. Podemos afirmar esto porque la ubicación de las empresas es realizada por el gobierno siguiendo diversos criterios.

Es así como en una misma zona geográfica, es posible encontrar una empresa grande rodeada de empresas pequeñas o medianas. Este es un muy buen indicio en la etapa del diseño de muestreo pues quiere decir que el comportamiento de las características de interés dentro de cada área geográfica es muy disperso. La figura 6.1 presenta el comportamiento de las características de interés en cada una de las cinco zonas geográficas de la ciudad. Nótese que no es posible identificar un comportamiento estructural significativamente diferente en cada zona, sino que por el contrario, el comportamiento es heterogéneo dentro de cada zona y homogéneo entre las zonas.

Aunque no se conoce el número de empresas en el sector industrial, el gobierno ha estimado según datos de años anteriores la existencia de 85000 empresas para el último año fiscal. Con esta información se ha decidido seleccionar una muestra aleatoria simple de conglomerados de tamaño  $n_I = 10$ . Por tanto, el tamaño muestral de empresas esperado corresponde a  $85000 \frac{10}{100} = 8500$ . De la población de  $N_I = 100$  conglomerados de áreas se selecciona una muestra aleatoria simple de  $n_I = 10$  utilizando la función **S.SI** del paquete **TeachingSampling**. En este caso particular, los conglomerados incluidos en la muestra sin reemplazo corresponde a la **Zona A** y a la **Zona E**.

```
data(BigLucy)
attach(BigLucy)

UI <- levels(BigLucy$Zone)
NI <- length(UI)
nI <- 10
```

```
qplot(Zone, Employees, data=BigLucy, geom=c("boxplot"))
```

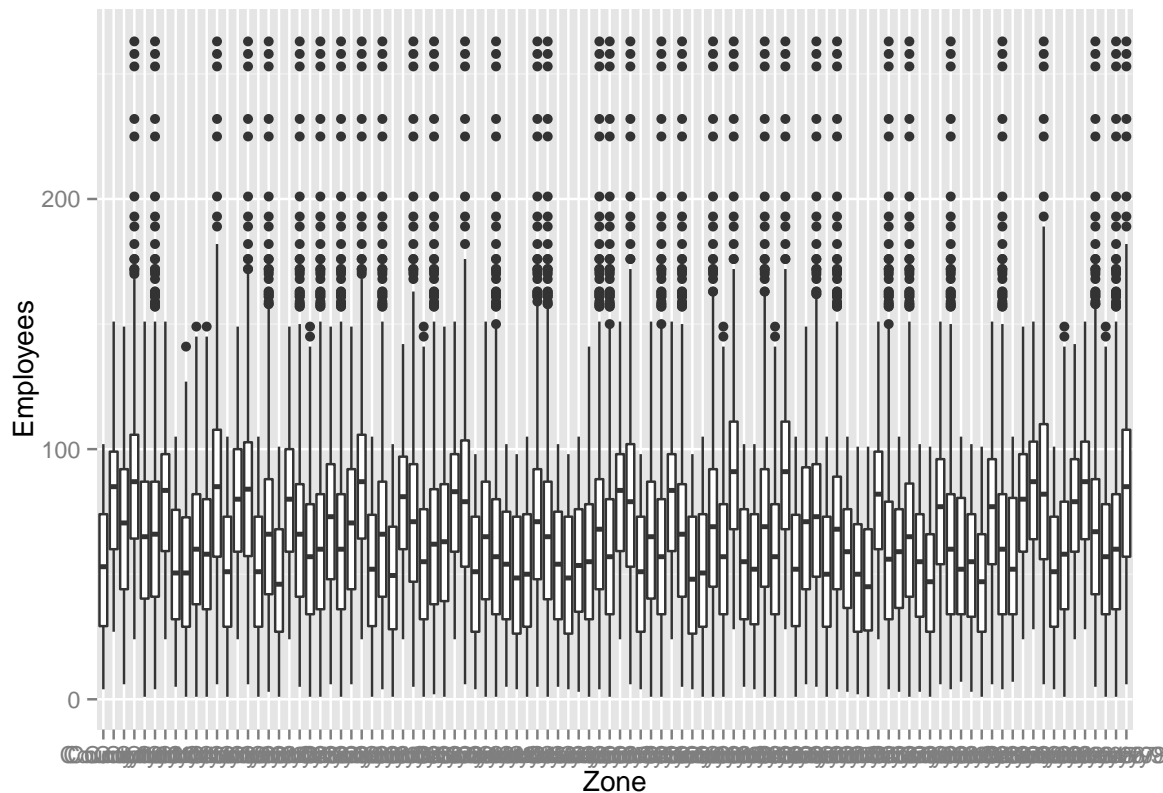


Figura 6.1: *Boxplot de la característica de interés **Employees** para cada una de las zonas.*

```
samI <- S.SI(NI, nI)
muestra <- UI[samI]
muestra

## [1] "County16" "County19" "County35" "County49" "County5" "County50"
## [7] "County59" "County74" "County81" "County82"
```

Un equipo de encuestadores se dispone a recolectar la información de cada una de las empresas pertenecientes a los conglomerados seleccionados, el plan operativo es más eficiente entre más entrevistadores sean contratados por cada conglomerado seleccionado. Cuando el proceso de medición termina se tienen dos conjuntos de datos, cada uno conteniendo el valor de las características de interés para cada una de las empresas del área, correspondientes a **Zona A** y **Zona E**.

Con la función `rbind` es posible unir la información de las zonas geográficas seleccionadas en la muestra. Con ayuda de la función `T.SIC(y,C)`, del paquete `TeachingSampling`, es posible obtener los totales de las características de interés en cada conglomerado. Los argumentos de esta función son `y`, el conjunto de datos (una sola variable o un conjunto de variables) del censo en cada conglomerado y `C`, una variable que indica la pertenencia del elemento, en este caso de las empresas, al conglomerado. El resultado de la función es el total de elementos en cada conglomerado, así como el total de las características de interés en cada uno de los conglomerados. En este caso particular, el tamaño de la muestra de empresas



es  $307 + 165 = 472$ . Nótese que, como en los casos de estimación de los capítulos anteriores, se crea un conjunto de datos de las características de interés definido por `estima <- data.frame(Income, Employees, Taxes)`.

```
Lucy1 <- BigLucy[which(Zone == muestra[1]),]
Lucy2 <- BigLucy[which(Zone == muestra[2]),]
Lucy3 <- BigLucy[which(Zone == muestra[3]),]
Lucy4 <- BigLucy[which(Zone == muestra[4]),]
Lucy5 <- BigLucy[which(Zone == muestra[5]),]
Lucy6 <- BigLucy[which(Zone == muestra[6]),]
Lucy7 <- BigLucy[which(Zone == muestra[7]),]
Lucy8 <- BigLucy[which(Zone == muestra[8]),]
Lucy9 <- BigLucy[which(Zone == muestra[9]),]
Lucy10 <- BigLucy[which(Zone == muestra[10]),]

LucyI <- rbind(Lucy1, Lucy2, Lucy3, Lucy4, Lucy5, Lucy6, Lucy7, Lucy8, Lucy9, Lucy10)
attach(LucyI)

Area <- as.factor(as.integer(Zone))
estima <- data.frame(Income, Employees, Taxes)
estimaI <- as.data.frame(T.SIC(estima, Area))
estimaI

##      Ni Income Employees Taxes
## 9  614 179729      31412  2836
## 12 446 316398      38558 12866
## 30  330 205699      26029  6403
## 45 446 130158      23798  1666
## 46  330  68737      16085   708
## 47  330 127003      18267  2226
## 56 446 285476      35750  9177
## 73  223  85340      12572  1496
## 81  307  64317      14396   694
## 82  727 434395      55014 13620
```

El tamaño de muestra efectivo fue 4199. Una vez que se tienen los totales de cada zona geográfica, se utiliza la función `E.SI(NI, nI, y)` del paquete `TeachingSampling`, definida en el capítulo dos, para obtener las estimaciones de los parámetros de interés.

```
E.SI(NI, nI, estimaI)
```

Los resultados de la estimación se muestran en la siguiente tabla. Es de considerar que la eficiencia de esta estrategia de muestreo es mucho menor que la de una estrategia que utilice un diseño de muestreo aleatorio simple. Nótese que la desviación relativa es mucho mayor.

Es claro que los resultados de esta estrategia de muestreo no son satisfactorios, por lo menos para la estimación de los parámetros de interés de Ingreso e Impuestos. La explicación de la deficiencia de esta estrategia es inmediata al analizar el siguiente gráfico que muestra el comportamiento estructural de los totales en los conglomerados.

Es notable como el comportamiento de los totales es tan diferente en cada conglomerado en las características Ingreso y Empleados. Sin embargo, el comportamiento es similar en cuanto a la característica

	N	Ni	Income	Employees	Taxes
Estimation	100.00	41990.00	18972520.00	2718810.00	516920.00
Standard Error	0.00	4580.29	3663011.99	398456.04	151013.44
CVE	0.00	10.91	19.31	14.66	29.21
DEFF		1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 6.3: *Estimaciones para el diseño de muestreo aleatorio simple de conglomerados.*

```
par(mfrow = c(2,2))
barplot(estimal$Income, main = "Totales de Income")
barplot(estimal$Employees, main = "Totales de Employees")
barplot(estimal$Taxes, main = "Totales de Taxes")
barplot(estimal$Ni, main = "Tamaños de los conglomerados")
```

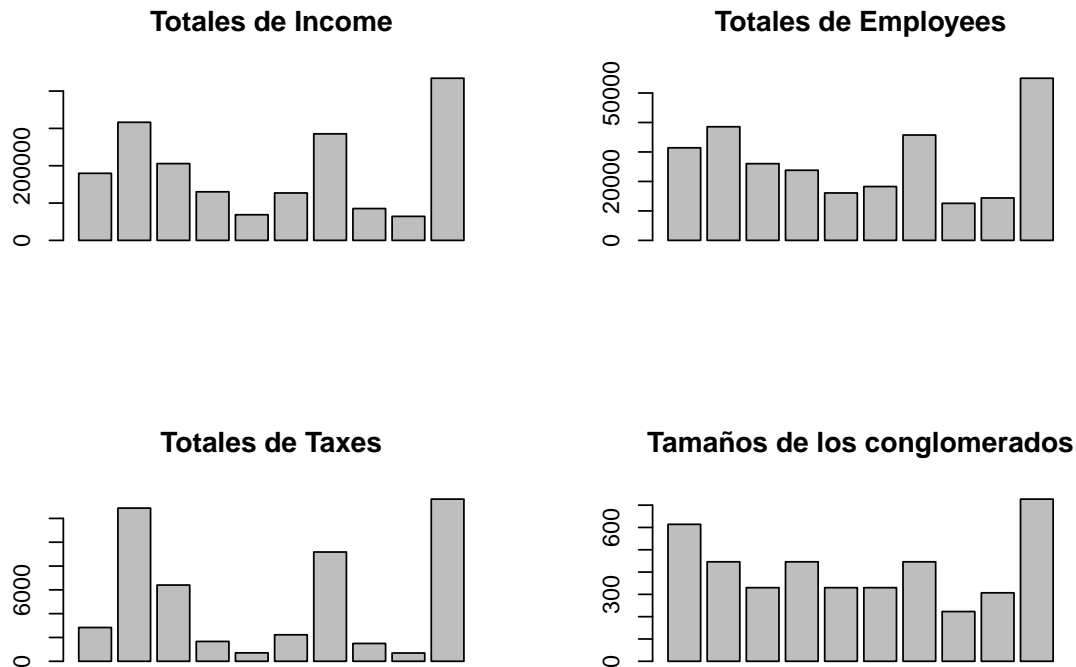


Figura 6.2: *Boxplot de las características de interés en cada nivel industrial.*

Impuestos. Es interesante observar que entre más disimilitud existe entre los totales de los conglomerados, más desviación relativa existe en la estimación. Como se dijo en la introducción de este capítulo, esta estrategia de muestreo es ineficiente en aquellos casos en que los totales de cada conglomerado no están correlacionados con las probabilidades de inclusión a nivel de conglomerados. Observando el gráfico, se establece que Impuestos es la única característica que presenta un comportamiento estable en relación a los conglomerados.

La regla de oro se mantiene, una estrategia de muestreo es eficiente si las probabilidades de inclusión

están correlacionadas con los valores de la característica de interés, en este caso con los totales de cada conglomerados.

## 6.3 Ejercicios

6.1 Argumente si las siguientes afirmaciones son falsas o verdaderas. Sustente su respuesta detalladamente.

- (a) En un diseño de muestreo de conglomerados, siempre se tiene un marco de muestreo de elementos de la población.
- (b) En un diseño de muestreo de conglomerados, para la estimación de un total, se obtiene mayor precisión si las probabilidades de selección o inclusión son proporcionales a los totales de la característica de interés en los conglomerados.
- (c) En un diseño de muestreo de conglomerados, para la estimación de un total, se obtiene mayor precisión si las probabilidades de selección o inclusión son proporcionales a la característica de interés de los elementos en los conglomerados.
- (d) En la estimación de totales poblacionales, se nota que, casi siempre,  $Var_{MAS}(t_{y,\pi})$  es mayor a  $Var_{ASC}(t_{y,\pi})$ .
- (e) En un diseño de muestreo aleatorio simple de conglomerados de tamaño desigual, hay un aumento significativo de la varianza, respecto a un diseño de muestreo aleatorio simple de conglomerados de igual tamaño.
- (f) En un diseño de muestreo PPT de conglomerados de tamaño desigual (con probabilidad proporcional al tamaño del conglomerado), hay una disminución significativa de la varianza, respecto a un diseño de muestreo aleatorio simple de conglomerados de tamaño desigual.

6.2 Suponga que el objetivo de una encuesta es estimar el ingreso medio en un barrio de la ciudad. Asuma que en ese barrio existen  $N_I = 60$  manzanas. Se realiza un diseño de muestreo aleatorio simple de conglomerados y se seleccionan  $n_I = 5$  manzanas, en las cuales se entrevistan a todos los hogares. Los resultados de la encuesta se dan en la tabla 6.4

Tabla 6.4: Tabla de las cinco manzanas seleccionadas: ejercicio 6.2

ID Manzana	Hogares en la manzana	Ingreso total en la manzana
AW45	120	25000
AW02	100	24000
AW31	80	19000
AW28	95	20100
AW44	80	18000

- (a) Estime el ingreso total de los hogares en el barrio. Reporte el coeficiente de variación estimado.
- (b) Estime el número de hogares en el barrio. Reporte el coeficiente de variación estimado.
- (c) Asumiendo que en el barrio hay  $N = 2000$  hogares, estime el ingreso medio de los hogares en el barrio. Reporte el coeficiente de variación estimado.
- (d) Estime el ingreso medio utilizando el estimador de Hájek. Explique la diferencia con respecto a la estimación del punto anterior.



## Capítulo 7

# Muestreo en varias etapas

En muchas situaciones, los elementos de un conglomerado pueden ser demasiado similares, de modo que el análisis de todos los elementos que conforman el conglomerado será un desperdicio de recursos. En estos casos podría ser más barato seleccionar más conglomerados y tomar una submuestra dentro de cada uno de ellos.

Lohr (2000)

En el capítulo anterior se utilizó la agrupación natural de los elementos en la población para ahorrar costes financieros y logísticos al planear una estrategia de muestreo por conglomerados. Sin embargo, el ahorro en términos operativos se ve reflejado en un alto precio por pagar con respecto a la eficiencia estadística de la estrategia. Una posible solución para disminuir la varianza es aumentar el tamaño de muestra de conglomerados, solución que aumentaría los costos operativos.

Para mantener un equilibrio entre los costos financieros y las bondades de la estrategia de muestreo es posible aprovechar la homogeneidad dentro de los conglomerados y, de esta manera, no realizar un censo dentro de cada conglomerado seleccionado sino proceder a seleccionar una sub-muestra dentro del conglomerado seleccionado. Como el comportamiento estructural de la característica de interés al interior de los conglomerados es homogéneo, entonces una estimación del total del conglomerado tendría una varianza pequeña. Por supuesto, como no se tienen acceso a un marco de muestreo de elementos, se debe realizar un empadronamiento para levantar un marco de muestreo de elementos en cada uno y sólo en los conglomerados seleccionados. Una vez se disponga del marco de muestreo de elementos dentro de los conglomerados, se dispone la selección de las sub-muestras de elementos. Bautista (1998) plantea que el principio básico del muestreo en varias etapas se puede definir como el proceso jerárquico que realiza  $l$  veces los siguientes pasos:

1. Construcción de  $l$  marcos de muestreo de unidades (conglomerados en las primeras  $l - 1$  etapas del diseño muestral y de elementos en la última etapa).
2. Aplicación de un diseño muestral y selección de la muestras (o sub-muestras) de cada marco de muestreo.

Nótese que se ha introducido el concepto de **unidad de muestreo** refiriéndose a conglomerados de elementos o a los elementos. Si el diseño de muestreo tiene tres etapas, por ejemplo: si se quieren obtener estimaciones acerca del comportamiento de los alumnos en determinada ciudad, y no se dispone de un marco de muestreo de los alumnos, es posible en una **primera etapa** levantar un marco de muestreo de todas y cada una de las escuelas en la ciudad y realizar una selección de una muestra de escuelas mediante cierto diseño de muestreo. Una vez que las escuelas son seleccionadas, en una

**segunda etapa**, se levanta un marco de muestreo de niveles académicos dentro de las escuelas (cursos o clases) y se procede a seleccionar una muestra de niveles. De tal forma que en la **tercera y última etapa** se levanta un marco de muestreo de elementos; es decir, de alumnos pertenecientes a cada nivel seleccionado, y se realiza una muestra de elementos que serán observados y medidos.

Es interesante observar cómo la población, en el estado de la naturaleza, se subdivide gracias al comportamiento «jerárquico», que en este caso particular toma la siguiente forma:

$$\underbrace{\text{Ciudad}}_{\text{Población } U} \Rightarrow \underbrace{\text{Escuelas}}_{\text{UPM}} \Rightarrow \underbrace{\text{Niveles}}_{\text{USM}} \Rightarrow \underbrace{\text{Alumnos}}_{\text{UTM}}$$

Como notación, se llama **Unidad Primaria de Muestreo** o **UPM** a la primera subdivisión en conglomerados de la población original, **Unidad Secundaria de Muestreo** o **USM** a la sub-subdivisión de la población, es decir la subdivisión de las UPM. La **Unidad Terciaria de Muestreo** o **UTM** corresponde a los elementos de la población objetivo, que en este caso particular son los alumnos de la ciudad.

No siempre las unidades finales de muestreo son elementos, es así como es posible planear un diseño en dos etapas de conglomerados, refiriéndose a que la unidad secundaria de muestreo son conglomerados, o también es posible aplicar un diseño en cuatro etapas de elementos, en donde las unidades finales de muestreo sean elementos; por ejemplo, en Bautista (1998) se presenta el siguiente caso:

$$\underbrace{\text{Ciudad}}_{\text{Población } U} \Rightarrow \underbrace{\text{Sección}}_{\text{UPM}} \Rightarrow \underbrace{\text{Manzana}}_{\text{USM}} \Rightarrow \underbrace{\text{Vivienda}}_{\text{UTM}} \Rightarrow \underbrace{\text{Persona}}_{\text{UCM}}$$

El principio básico de una estrategia de muestreo en varias etapas es construir estimaciones desde abajo hasta arriba. Pero para que los resultados de la estimación basada en el diseño de muestreo sean aplicables, se deben satisfacer los siguientes dos supuestos:

1. **Invariancia:** sugiere que la probabilidad de selección de una muestra de unidades de muestreo (conglomerados o elementos) no depende del diseño de muestreo de la anterior etapa.
2. **Independencia:** interpretado como que el sub-muestreo de cualquier unidad de muestreo se lleva a cabo de manera independiente con las otras unidades de muestreo, en la misma etapa o en etapas superiores o inferiores.

Para el resto del capítulo se asume implícitamente que estas propiedades se satisfacen en cada etapa de muestreo de la estrategia. Si los supuestos no se satisfacen, entonces el lector puede consultar la sección de muestreo en varias fases del capítulo de Tópicos avanzados. Para asentar aún más la filosofía interna del muestreo en varias etapas, es necesario estudiar el más simple de todos los diseños de muestreo de esta clase: el muestreo en dos etapas.

## 7.1 Muestreo en dos etapas

También llamado muestreo «bietápico» por Mahalanobis (1946), este diseño de muestreo estima el total de cada cluster  $t_i$  mediante una sub-muestra dentro de los conglomerados seleccionados de la población. En la estimación de los parámetros de interés se encuentran dos fuentes de variabilidad cada una en cada etapa. Es decir, existe variabilidad debido a la selección de las unidades primarias de muestreo o conglomerados y, por supuesto, también existe variabilidad debido a la selección de una muestra de elementos, unidades secundarias de muestreo en los conglomerados seleccionados.

Suponga que la población de elementos  $U$  se divide en  $N_I$  **unidades primarias de muestreo**, que definen una partición de la población, llamados también **conglomerados** y denotados como  $U_I =$

$\{U_1, \dots, U_{N_I}\}$ . El  $i$ -ésimo conglomerado  $U_i$   $i = 1, \dots, N_I$  es de tamaño  $N_i$ . Särndal, Swensson & Wretman (1992) dan un marco general para el muestreo en dos etapas, de tal manera que

1. Una muestra  $s_I$  de unidades primarias de muestreo es seleccionada de  $U_I$  de acuerdo a un diseño de muestreo  $p_I(s_I)$ . Nótese que  $S_I$  representa la muestra aleatoria de conglomerados tal que  $Pr(S_I = s_I) = p_I(s_I)$ .
2. Para cada conglomerado  $U_i$   $i = 1, \dots, N_I$  seleccionado en la muestra  $s_I$ , se selecciona una muestra  $s_i$  de elementos seleccionada de acuerdo a un diseño de muestreo  $p_i(s_i)$ . Nótese que  $S_i$  representa la muestra aleatoria de elementos tal que  $Pr(S_i = s_i) = p_i(s_i)$ .

Este diseño de muestreo bietápico debe cumplir las dos propiedades de invarianza y de independencia. La invarianza significa que los diseños de muestreo  $p_i(s_i)$  de la segunda etapa **no dependen** del resultado en la primera etapa, es decir, que el diseño de muestreo siempre debe ser el mismo dentro de cada una de las unidades primarias de muestreo.

$$Pr(S_i = s_i | S_I = s_I) = Pr(S_i = s_i). \quad (7.1.1)$$

Nótese que lo anterior implica que  $p_i(\cdot | s_I) = p_i(\cdot)$

La independencia significa que el proceso de selección de muestras en la segunda etapa dentro de cada unidad primaria de muestreo no depende de los procesos de selección utilizados en los restantes unidades primarias de muestreo. Es decir, el submuestreo en una unidad primaria de muestreo particular es independiente del submuestreo en otras unidades primarias de muestreo <sup>1</sup>, por tanto, para cada muestra aleatoria  $S_I$  en la primera etapa se cumple que

$$Pr\left(\bigcup_{i \in s_I} s_i | s_I\right) = \prod_{i \in s_I} Pr(s_i | s_I) \quad (7.1.2)$$

Si el diseño de muestreo en la primera etapa es con reemplazo, entonces un conglomerado puede aparecer más de una vez, y se debe proceder a realizar el sub-muestreo tantas veces como aparezca dicha unidad primaria en la muestra realizada  $s_I$ , con esto se garantiza que se cumplan las propiedades de independencia e invarianza. En términos de soporte, es posible hablar de también del tres clases de soporte. A saber:

- En la primera etapa existe un soporte  $Q_I$  conteniendo todas las posibles muestras realizadas de las unidades primarias de muestreo.
- En la segunda etapa existe un soporte  $Q^i$  para cada  $i \in U_I$ , es decir, para cada unidad primaria en la etapa anterior.
- En general, el soporte  $Q$  conteniendo todas las posibles muestras de elementos mediante un diseño bietápico está dado por

$$\begin{aligned} Q &= \bigcup_{r=1}^{\#Q_I} \bigcup_{i \in s_I^{(r)}} s_i, \quad \text{con } s_i \in Q^i \\ &= \left\{ \bigcup_{i \in s_I^{(r)}} s_i, \quad \text{con } s_i \in Q^i, r = 1, \dots, \#Q_I \right\} \end{aligned} \quad (7.1.3)$$

<sup>1</sup>Nótese el símil con el proceso de estratificación.

Donde  $s_I^{(r)}$  denota la  $r$ -ésima posible muestra en la primera etapa y la cardinalidad de  $Q$  está dada por

$$\#Q = \prod_{i \in U_I} \#Q^i$$

Y la muestra de elementos - o unidades secundarias de muestreo - viene dada por

$$S = \bigcup_{i \in S_I} S_i, \text{ con } S_i \in Q^i \quad (7.1.4)$$

con tamaño de la muestra aleatorio dado por

$$n(S) = \sum_{i \in S_I} n_i \quad (7.1.5)$$

La definición de los soportes en cada etapa y, en general, nos permiten proclamar que el diseño de muestreo bietápico es un auténtico diseño de muestreo.

**Resultado 7.1.1.** *El diseño de muestreo bietápico cumple que*

1.  $p(s) \geq 0$  para todo  $s \in Q$
2.  $\sum_{s \in Q} p(s) = 1$

**Prueba.** En primer lugar, se tiene que

$$\begin{aligned} p(s) &= Pr(\text{Seleccionar } s_I \text{ en la etapa uno y seleccionar } \bigcup_{i \in s_I} s_i \text{ en etapa dos}) \\ &= p_I(s_I) \underbrace{Pr\left(\bigcup_{i \in s_I} s_i | s_I\right)}_{\text{Independencia}} \\ &= p_I(s_I) \prod_{i \in s_I} \underbrace{Pr(s_i | s_I)}_{\text{Invarianza}} \\ &= p_I(s_I) \prod_{i \in s_I} p_i(s_i) \end{aligned}$$

y es claro que  $p(s) \geq 0$ . Ahora, para demostrar la segunda propiedad, se tiene que

$$\begin{aligned} \sum_{s \in Q} p(s) &= \sum_{r=1}^{\#Q_I} \sum_{s_I^{(r)}} p(s) \\ &= \sum_{r=1}^{\#Q_I} \sum_{s_I^{(r)}} p_I(s_I^{(r)}) \prod_{i \in s_I^{(r)}} p_i(s_i) \\ &= \sum_{r=1}^{\#Q_I} p_I(s_I^{(r)}) \underbrace{\sum_{s_I^{(r)}} \prod_{i \in s_I^{(r)}} p_i(s_i)}_{=1} \\ &= \sum_{r=1}^{\#Q_I} p_I(s_I^{(r)}) = 1 \end{aligned}$$



En donde la equivalencia a uno del segundo sumando en la tercera igualdad se obtiene haciendo el símil con la demostración del resultado 5.1.1., en donde el diseño estratificado se definió como una productoria. ■

Para ilustrar el anterior resultado, junto con la compenetración de los conceptos de soportes en cada una de las etapas, se diseñó el siguiente ejemplo que utiliza un diseño de muestreo sin reemplazo en dos etapas.

**Ejemplo 7.1.1.** Nuestra población ejemplo  $U_I$  dada por

$$U_I = \{U_1, U_2, U_3\}$$

Suponga que se selecciona una muestra  $s_I$  de unidades primarias de muestreo de tamaño  $n_I = 2$  mediante un diseño de muestreo sin reemplazo tal que

$$p_I(s_I) = \begin{cases} 0.5, & \text{si } s_I = \{U_1, U_2\}, \\ 0.4, & \text{si } s_I = \{U_1, U_3\}, \\ 0.1, & \text{si } s_I = \{U_2, U_3\} \end{cases}$$

Ahora, suponga que dentro de cada unidad primaria seleccionada se selecciona un solo elemento de acuerdo a los siguientes diseños de muestreo

$$p_1(S_1 | S_I) = \begin{cases} 0.5, & \text{si } s_1 = \{Yves\}, \\ 0.5, & \text{si } s_1 = \{Ken\} \end{cases}$$

$$p_2(S_2 | S_I) = \begin{cases} 0.9, & \text{si } s_2 = \{Erik\}, \\ 0.1, & \text{si } s_2 = \{Sharon\} \end{cases}$$

$$p_3(S_3 | S_I) = \begin{cases} 1.0, & \text{si } s_3 = \{Leslie\} \end{cases}$$

Es decir, el tamaño de la muestra final es  $n = 2$ . Y el soporte de la primera etapa está dado por

$$Q_I = \{\{U_1, U_2\}, \{U_1, U_3\}, \{U_2, U_3\}\},$$

y los soportes de la segunda etapa están dados por  $Q^1 = \{\{Yves\}, \{Ken\}\}$ ,  $Q^2 = \{\{Erick\}, \{Sharon\}\}$  y  $Q^3 = \{\{Leslie\}\}$ . Dado lo anterior, el soporte  $Q$  está dada por

$$Q = \left\{ \bigcup_{i \in s_I^{(1)}} s_i, \bigcup_{i \in s_I^{(2)}} s_i, \bigcup_{i \in s_I^{(3)}} s_i \right\},$$

donde

$$\bigcup_{i \in s_I^{(1)}} s_i = \{\{Yves, Erick\}, \{Yves, Sharon\}, \{Ken, Erick\}, \{Ken, Sharon\}\},$$

$$\bigcup_{i \in s_I^{(2)}} s_i = \{\{Erick, Leslie\}, \{Sharon, Leslie\}\},$$

y

$$\bigcup_{i \in s_I^{(3)}} s_i = \{\{\text{Yves, Leslie}\}, \{\text{Ken, Leslie}\}\}.$$

Las probabilidades  $\prod_{i \in s_I} p_i(s_i)$  y  $p_I(s_I)$  para todas las posibles muestras son como sigue a continuación:

		p(s_1)	X	p(s_2)		p(s_I)		p(s)
Yves	Erick	0.5	X	0.9		0.5		0.225
Yves	Sharon	0.5	X	0.1		0.5		0.025
Ken	Erick	0.5	X	0.9		0.5		0.225
Ken	Sharon	0.5	X	0.1		0.5		0.025
Erick	Leslie	0.9	X	1.0		0.1		0.090
Sharon	Leslie	0.1	X	1.0		0.1		0.010
Yves	Leslie	0.5	X	1.0		0.4		0.200
Ken	Leslie	0.5	X	1.0		0.4		0.200
Total								1.000

Se observa que  $p(s)$  es un auténtico diseño de muestreo. Nótese que dentro de cada posible muestra de la primera etapa, la suma de probabilidades es igual a uno. Por ejemplo, para  $S_I = \{U_1, U_2\}$ , las posibles muestras en la segunda etapa corresponden a  $\{\text{Yves, Erick}\}$ ,  $\{\text{Yves, Sharon}\}$ ,  $\{\text{Ken, Erick}\}$  y  $\{\text{Ken, Sharon}\}$  con probabilidades 0.45, 0.05, 0.45 y 0.05, respectivamente, y la suma de estas probabilidades es igual a uno.

Los parámetros poblacionales de interés pueden escribirse como:

1. El total poblacional,

$$t_y = \sum_{k \in U} y_k = \sum_{i=1}^{N_I} \sum_{k \in U_i} y_k = \sum_{i=1}^{N_I} t_{yi} \quad (7.1.6)$$

donde  $t_{yi} = \sum_{k \in U_i} y_k$  es el total de la  $i$ -ésima unidad primaria de muestreo  $i = 1, \dots, N_I$ .

2. La media poblacional,

$$\bar{y}_U = \frac{\sum_{k \in U} y_k}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_I} \sum_{k \in U_i} y_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_I} N_i \bar{y}_i \quad (7.1.7)$$

donde  $\bar{y}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{k \in U_i} y_k$  es la media de la  $i$ -ésima unidad primaria de muestreo  $i = 1, \dots, N_I$ .

**Ejemplo 7.1.2.** Nuestra población ejemplo  $U_I$  dada por

$$U_I = \{U_1, U_2, U_3\}$$

Suponga que se selecciona una muestra  $s_I$  de unidades primarias de muestreos de tamaño  $n_I = 2$ . El sub-muestreo en la segunda etapa es tal que en cada unidad primaria de muestreo seleccionada en la primera etapa se selecciona un sólo elemento, de tal forma que el tamaño de la muestra de elementos es de dos. Defina el soporte  $Q$  de elementos si la selección de la muestra es con reemplazo.

### 7.1.1 El estimador de Horvitz-Thompson

En la primera etapa las probabilidades de inclusión de primer y segundo orden, de las unidades primarias de muestreo, inducidas por el diseño de muestreo  $p_I(s_I)$  están dadas por  $\pi_{Ii}$  y  $\pi_{Iij}$  respectivamente con  $i, j \in U_I$ . Por tanto se tiene que

$$\Delta_{Iij} = \begin{cases} \pi_{Iij} - \pi_{Ii}\pi_{Ij}, & \text{si } i, j \in U_I, \\ \pi_{Ii}(1 - \pi_{Ii}), & \text{si } i = j \in U_I. \end{cases} \quad (7.1.8)$$

En la segunda etapa las probabilidades de inclusión de primer y segundo orden, de los elementos en la  $i$ -ésima  $i \in S_I$  unidad primaria de muestreo, inducidas por el diseño de muestreo  $p_i(s_i)$  y condicionadas a que  $U_i$  fue seleccionada en la muestra de la primera etapa están dadas por  $\pi_{k|i}$  y  $\pi_{kl|i}$  respectivamente para  $k, l \in U_i$  con  $\pi_{k|i} = Pr(k \in S_i | U_i \in S_I)$  y  $\pi_{kl|i} = Pr(k \in S_i, l \in S_i | U_i \in S_I)$ . Por tanto se tiene que

$$\Delta_{kl|i} = \begin{cases} \pi_{kl|i} - \pi_{k|i}\pi_{l|i}, & \text{si } k \neq l, \\ \pi_{k|i}(1 - \pi_{k|i}), & \text{si } k = l. \end{cases} \quad (7.1.9)$$

En general, de la definición de probabilidad de inclusión se tiene el siguiente resultado.

**Resultado 7.1.2.** *La probabilidad de inclusión de primer orden del  $k$ -ésimo elemento de  $U$  está dada por*

$$\begin{aligned} \pi_k &= Pr(k \in S) = Pr(k \in S_i \text{ y } i \in S_I) \\ &= Pr(k \in S_i | i \in S_I) Pr(i \in S_I) = \pi_{k|i} \pi_{Ii} \end{aligned} \quad (7.1.10)$$

*La probabilidad de inclusión de segundo orden está dada por*

$$\pi_{kl} = \begin{cases} \pi_{Ii} \pi_{k|i}, & \text{si } k = l \in U_i, \\ \pi_{Ii} \pi_{k|i}, & \text{si } k \neq l \in U_i, \\ \pi_{Iij} \pi_{k|i} \pi_{l|j}, & \text{si } k \in U, l \in U_j (i \neq j). \end{cases} \quad (7.1.11)$$

Con el anterior resultado podemos utilizar la forma general del estimador de Horvitz-Thompson para hallar su expresión particular y su varianza bajo un diseño de muestreo bietápico (Särndal, Swensson & Wretman 1992). Sin embargo, para hallar una forma más rápida de calcular la varianza del estimador necesitamos recurrir a algunos resultados muy conocidos de la teoría de probabilidad. Éstos han sido utilizados ampliamente en el campo del muestreo, pero no fue sino hasta que Hansen, Hurwitz & Madow (1953) publicaron dichos resultados aplicados al muestreo. En general, se trata de expresar:

- La esperanza de una variable aleatoria como el valor esperado de esperanzas condicionales.
- La varianza de una variable aleatoria como la suma de la varianza de esperanzas condicionales y la esperanza de varianzas condicionales.

**Resultado 7.1.3.** *Sean  $U$  y  $H$  variables aleatorias, entonces:*

$$E_1(U) = E_2(E_1(U|H)) \quad (7.1.12)$$

y, a su vez,

$$Var_1(U) = E_2(Var_1(U|H)) + Var_2(E_1(U|H)) \quad (7.1.13)$$

En donde el subíndice 1, denota la esperanza o varianza inducida por la función de distribución de la variable aleatoria  $U$ , y el subíndice 2 denota la esperanza o varianza inducida por la función de distribución de la variable aleatoria  $H$ .

**Prueba.** Es necesario recordar que  $Pr(U = U_i|H_j) = Pr(U = U_i, H = H_j)/Pr(H_j)$  y además que  $Pr(U = U_i) = \sum_j Pr(U = U_i, H = H_j)$ , por consiguiente.

1. Esperanza:

$$\begin{aligned}
 E_1(U) &= \sum_i U_i Pr(U = U_i) \\
 &= \sum_i U_i \sum_j Pr(U = U_i, H = H_j) \\
 &= \sum_i U_i \sum_j Pr(U = U_i|H = H_j) Pr(H = H_j) \\
 &= \sum_j Pr(H = H_j) \sum_i U_i Pr(U = U_i|H = H_j) \\
 &= \sum_j Pr(H = H_j) E_2(U|H = H_j) \\
 &= E_2(E_1(U|H))
 \end{aligned}$$

2. Covarianza: sea  $W$ , una variable aleatoria y tomemos a  $x = E_2(U)$  y  $y = E_2(W)$

$$\begin{aligned}
 Cov(U, W) &= E(UW) - E(U)E(W) \\
 &= E_1(E_2(UW)) - E_1(E_2(U))E_1(E_2(W)) \\
 &= E_1(E_2(UW)) - E_1(x)E_1(y) \\
 &= E_1[E_2(UW) - xy] + E(xy) - E_1(x)E_1(y) \\
 &= E_1[Cov_2(U, W)] + Cov_1(x, y) \\
 &= E_1[Cov_2(U, W)] + Cov_1[E_2(U), E_2(W)]
 \end{aligned}$$

3. Varianza: dado que la varianza es un caso particular de la covarianza, entonces:

$$\begin{aligned}
 Var(U) &= Cov(U, U) = E_1[Cov_2(U, U)] + Cov_1[E_2(U), E_2(U)] \\
 &= E_1[Var_2(U)] + Var_1[E_2(U)]
 \end{aligned}$$

■

Con ayuda del anterior resultado es posible obtener expresiones para el estimador de Horvitz-Thompson que muestren la variación en cada una de las dos etapas de este diseño de muestreo. Es interesante la forma que toma tanto el estimador genérico como su respectiva varianza porque, dado que existen dos etapas de muestreo, en la primera se estiman los totales de los conglomerados y, en la segunda etapa se estima el gran total utilizando esas estimaciones en las unidades primarias seleccionadas. Como el proceso de estimación se lleva a cabo en dos etapas, es de esperarse que existan dos fuentes de variación: la primera debido a la estimación de los totales de las unidades primarias de muestreo y la segunda debido a la estimación del gran total. Suponiendo que fueron seleccionadas cuatro unidades primarias de muestreo, existirán entonces cuatro estimaciones cuya varianza estará sintetizada en una sola expresión, mientras que, por otro lado, existirá otra fuente de variación cuando se quiera estimar el gran total.

**Resultado 7.1.4.** *Bajo muestreo en dos etapas el estimador de Horvitz-Thompson es insesgado para el total poblacional y toma la forma*

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_{i \in S_I} \sum_{k \in S_i} \frac{y_k}{\pi_{Ii} \pi_{k|i}} = \sum_{i \in S_I} \frac{\hat{t}_{yi,\pi}}{\pi_{Ii}} \quad (7.1.14)$$

con varianza dada por

$$Var_{BI}(\hat{t}_{y,\pi}) = \underbrace{\sum_{U_I} \sum_{Ij} \Delta_{Iij} \frac{t_i}{\pi_{Ii}} \frac{t_j}{\pi_{Ij}}}_{Var(UPM)} + \underbrace{\sum_{i \in U_I} \frac{Var_{p_i}(\hat{t}_i)}{\pi_{Ii}}}_{Var(USM)} \quad (7.1.15)$$

cuya estimación insesgada es

$$\widehat{Var}_{BI}(\hat{t}_{y,\pi}) = \underbrace{\sum_{S_I} \sum_{Ij} \frac{\Delta_{Iij}}{\pi_{Iij}} \frac{\hat{t}_{yi,\pi}}{\pi_{Ii}} \frac{\hat{t}_{yj,\pi}}{\pi_{Ij}}}_{\widehat{Var}(UPM)} + \underbrace{\sum_{i \in S_I} \frac{\widehat{Var}(\hat{t}_{yi,\pi})}{\pi_{Ii}}}_{\widehat{Var}(USM)} \quad (7.1.16)$$

donde

$$Var(\hat{t}_i) = \sum_{U_i} \sum_{kl|i} \Delta_{kl|i} \frac{y_k}{\pi_{k|i}} \frac{y_l}{\pi_{l|i}} \quad (7.1.17)$$

$$\hat{t}_{yi,\pi} = \sum_{k \in S_i} \frac{y_k}{\pi_{k|i}}$$

representando la estimación del total de la característica de interés en la  $i$ -ésima unidad primaria de muestreo y

$$\widehat{Var}(\hat{t}_i) = \sum_{S_i} \sum_{kl|i} \frac{\Delta_{kl|i}}{\pi_{kl|i}} \frac{y_k}{\pi_{k|i}} \frac{y_l}{\pi_{l|i}} \quad (7.1.18)$$

Nótese que la variación del estimador se descompone en las dos etapas propias de este diseño. Además es importante tener en cuenta que  $\widehat{Var}(UPM)$  y  $\widehat{Var}(USM)$  no son estimadores insesgados para  $Var(UPM)$  y  $Var(USM)$  respectivamente. Sin embargo, toda la expresión  $\widehat{Var}_{BI}(\hat{t}_{y,\pi})$  sí lo es para  $Var_{BI}(\hat{t}_{y,\pi})$ .

**Prueba.** Para desarrollar el anterior resultado es necesario manejar los dos conceptos inherentes al muestreo en dos o más etapas. **a) La invarianza:** para seleccionar las unidades primarias de muestreo se debe utilizar un mismo diseño y **b) La independencia:** cualquiera que fuere el diseño escogido para seleccionar los elementos dentro de una unidad primaria de muestreo, éste no debe afectar el sub-muestreo en cualquier otra unidad primaria de muestreo; por tanto, cualquier covarianza existente en esta etapa será nula.

En primer lugar, se tiene la siguiente forma para el estimador de Horvitz-Thompson:

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_{k \in S} \frac{y_k}{\pi_k} \quad (7.1.19)$$

$$= \sum_{i \in S_I} \sum_{k \in S_i} \frac{y_k}{\pi_{Ii} \pi_{k|i}} \quad (7.1.20)$$

$$= \sum_{i \in S_I} \frac{1}{\pi_{Ii}} \sum_{k \in S_i} \frac{y_k}{\pi_{k|i}} \quad (7.1.21)$$

$$= \sum_{i \in S_I} \frac{\hat{t}_{yi,\pi}}{\pi_{Ii}} \quad (7.1.22)$$

1. Insesgamiento del estimador:

$$\begin{aligned}
 E_p(\hat{t}_{y,\pi}) &= E_{p_I} \left( E_p \left[ \sum_{i \in S_I} \frac{\hat{t}_{yi,\pi}}{\pi_{Ii}} \mid S_I \right] \right) \\
 &= E_{p_I} \left( \sum_{i \in S_I} \underbrace{E_p \left[ \frac{\hat{t}_{yi,\pi}}{\pi_{Ii}} \mid S_I \right]}_{\text{invarianza}} \right) \\
 &= E_{p_I} \left( \sum_{i \in S_I} \frac{E_{p_i}(\hat{t}_{yi,\pi})}{\pi_{Ii}} \right) \\
 &= E_{p_I} \left( \sum_{i \in S_I} \frac{t_{yi,\pi}}{\pi_{Ii}} \right) \\
 &= \sum_{i \in U_I} \frac{t_{yi,\pi}}{\pi_{Ii}} E_{p_I}(I_{Ii}(S_I)) = t_y
 \end{aligned}$$

2. Varianza:

$$\text{Var}_p(\hat{t}_{y,\pi}) = \underbrace{\text{Var}_{p_I} (E_p [\hat{t}_{y,\pi} \mid S_I])}_{\text{Var}(UPM)} + \underbrace{E_{p_I} (\text{Var}_p [\hat{t}_{y,\pi} \mid S_I])}_{\text{Var}(USM)} \quad (7.1.23)$$

El primer sumando es equivalente a

$$\begin{aligned}
 \text{Var}_{p_I} (E_p [\hat{t}_{y,\pi} \mid S_I]) &= \text{Var}_{p_I} \left( E_p \left[ \sum_{i \in S_I} \frac{\hat{t}_{yi,\pi}}{\pi_{Ii}} \mid S_I \right] \right) \\
 &= \text{Var}_{p_I} \left( \sum_{i \in S_I} \underbrace{\frac{E_p(\hat{t}_{yi,\pi} \mid S_I)}{\pi_{Ii}}}_{\text{Invarianza}} \right) \\
 &= \text{Var}_{p_I} \left( \sum_{i \in S_I} \frac{E_p(\hat{t}_{yi,\pi})}{\pi_{Ii}} \right) \\
 &= \text{Var}_{p_I} \left( \sum_{i \in S_I} \frac{t_{yi,\pi}}{\pi_{Ii}} \right) \\
 &= \sum_{i \in U_I} \sum_{j \in U_I} \Delta_{Iij} \frac{t_{yi,\pi}}{\pi_{Ii}} \frac{t_{yj,\pi}}{\pi_{Ij}}
 \end{aligned}$$

El segundo sumando toma la siguiente forma

$$\begin{aligned}
 E_{p_I} (Var_p [\hat{t}_{y,\pi} | S_I]) &= E_{p_I} \left( Var_p \left[ \sum_{i \in S_I} \frac{\hat{t}_{yi,\pi}}{\pi_{Ii}} \mid S_I \right] \right) \\
 &= E_{p_I} \left( \sum_{i \in S_I} \frac{Var_p(\hat{t}_{yi,\pi} | S_I)}{\pi_{Ii}^2} \right) \\
 &= E \left( \sum_{i \in S_I} \left[ \frac{Var(\hat{t}_{yi,\pi})}{\pi_{Ii}^2} \right] \right) \\
 &= E_{p_I} \sum_{i \in U_I} \frac{I_{Ii}(S_I)}{\pi_{Ii}^2} Var_{p_i}(\hat{t}_{yi,\pi}) \\
 &= \sum_{i \in U_I} \left[ \frac{Var(\hat{t}_{yi,\pi})}{\pi_{Ii}} \right]
 \end{aligned}$$

Luego, la varianza del estimador está dada por la expresión (7.1.15).

3. Varianza Estimada: para verificar que  $\widehat{Var}_{BI}(\hat{t}_{y,\pi})$  es un estimador insesgado de la varianza del estimador de Horvitz-Thompson, se debe tener en cuenta que

$$\begin{aligned}
 E(\hat{t}_{yi,\pi} \hat{t}_{yj,\pi} | S_I) &= \begin{cases} Var_{p_i}(\hat{y}_{yi,\pi}) + (E_{p_i}(\hat{y}_{yi,\pi}))^2, & \text{si } i = j, \\ E_{p_i}(\hat{y}_{yi,\pi}) E_{p_j}(\hat{y}_{yj,\pi}), & \text{si } i \neq j \end{cases} \\
 &= \begin{cases} Var(\hat{t}_{yi,\pi}) + t_{yi,\pi}^2, & \text{si } i = j, \\ (t_{yi,\pi})(t_{yj,\pi}), & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (7.1.24)
 \end{aligned}$$

Para la primera parte de la varianza estimada se tiene que

$$\begin{aligned}
 &E_{p_I} \left( E_p \left[ \sum_{i \in S_I} \sum_{j \in S_I} \frac{\Delta_{Iij}}{\pi_{Iij}} \frac{\hat{t}_{yi,\pi}}{\pi_{Ii}} \frac{\hat{t}_{yj,\pi}}{\pi_{Ij}} \mid S_I \right] \right) \\
 &= E_{p_I} \sum_{i \in S_I} \sum_{j \in S_I} \frac{\Delta_{Iij}}{\pi_{Iij}} \frac{E_p(\hat{t}_{yi,\pi} \hat{t}_{yj,\pi} | S_I)}{\pi_{Ii} \pi_{Ij}} \\
 &= E \left( \sum_{i \in S_I} \sum_{j \in S_I} \frac{\Delta_{Iij}}{\pi_{Iij}} \frac{(t_{yi,\pi})(t_{yj,\pi})}{\pi_{Ii} \pi_{Ij}} + \sum_{i \in S_I} \frac{\Delta_{Iii}}{\pi_{Iii}} \frac{Var(\hat{t}_{yi,\pi}) + t_{yi,\pi}^2}{\pi_{Ii}^2} \right) \\
 &= E \left( \sum_{i \in S_I} \sum_{j \in S_I} \frac{\Delta_{Iij}}{\pi_{Iij}} \frac{(t_{yi,\pi})(t_{yj,\pi})}{\pi_{Ii} \pi_{Ij}} + \sum_{i \in S_I} \frac{Var(\hat{t}_{yi,\pi})}{\pi_{Ii}^2} (1 - \pi_{Ii}) \right) \\
 &= \sum_{i \in U_I} \sum_{j \in U_I} \Delta_{Iij} \frac{(t_{yi,\pi})(t_{yj,\pi})}{\pi_{Ii} \pi_{Ij}} - \sum_{i \in U_I} Var(\hat{t}_{yi,\pi}) \left( 1 - \frac{1}{\pi_{Ii}} \right)
 \end{aligned}$$

Para la segunda parte de la varianza estimada se tiene que

$$\begin{aligned}
& E \left( E \left[ \sum_{i \in S_I} \frac{\widehat{Var}(\hat{t}_{yi,\pi})}{\pi_{Ii}} \mid S_I \right] \right) \\
&= E \left( \sum_{i \in S_I} \frac{Var(\hat{t}_{yi,\pi})}{\pi_{Ii}} \right) \\
&= \sum_{i \in U_I} Var(\hat{t}_{yi,\pi}) \\
&= \sum_{U_I} \frac{Var(\hat{t}_{yi,\pi})}{\pi_{Ii}} + \sum_{U_I} Var(\hat{t}_{yi,\pi}) \left( 1 - \frac{1}{\pi_{Ii}} \right)
\end{aligned}$$

Sumando estas dos cantidades se llega al resultado. Nótese que por sí solas, estas cantidades no son insesgadas para sus contrapartes poblacionales, sin embargo se tiene que:

$$E \left[ \widehat{Var}(UPM) \right] + E \left[ \widehat{Var}(USM) \right] = Var(\hat{t}_{y,\pi}) \quad (7.1.25)$$

■

Al respecto de la forma que toma la varianza del estimador de Horvitz-Thompson, Särndal, Swensson & Wretman (1992) afirman que:

- Es conveniente estimar los dos componentes de varianza  $Var(UPM)$  y  $Var(USM)$  separadamente para tener una idea del aporte de variabilidad en cada una de las etapas.
- Si  $\pi_{k|i} = \pi_{kl|i} = 1$  para todo  $k, l \in U_i$  y para todo  $U_i \in S_I$ , entonces  $Var(USM) = 0$  entonces este diseño toma la forma de un diseño de conglomerados.
- Si  $\pi_{Ii} = \pi_{Iij} = 1$  para todo  $i, j = 1, \dots, N_I$ , entonces este diseño se torna en un diseño estratificado.

**Ejemplo 7.1.3.** Utilizando la información del ejemplo 7.1.1, compruebe, mediante un ejercicio léxico-gráfico, el insesgamiento del estimador de Horvitz-Thompson.

## 7.2 Diseño de muestreo MAS-MAS

En el muestreo aleatorio simple de conglomerados se median todos y cada una de los elementos pertenecientes a los conglomerados seleccionados en la muestra  $s_I$ . Sin embargo, dado que, en la mayoría de situaciones, los conglomerados tienden a ser muy similares en el comportamiento estructural de la característica de interés se consideraría un desperdicio de recursos económicos y logísticos la incorporación de elementos que no traen consigo nueva información. Para esto es más económico tomar una muestra más amplia de unidades primarias de muestreo y realizar un sub-muestreo dentro de cada una de ellas.

Este diseño de muestreo supone que la población está dividida en  $N_I$  unidades primarias de muestreo, de las cuales se selecciona una muestra  $s_I$  de  $n_I$  unidades mediante un diseño de muestreo aleatorio simple. El sub-muestreo dentro de cada unidad primaria seleccionada es también aleatorio simple. Es decir, para cada unidad primaria de muestreo seleccionada  $i \in s_{Ih}$  de tamaño  $N_i$  se selecciona una muestra  $s_i$  de elementos de tamaño  $n_i$ .



### 7.2.1 Algoritmos de selección

En la selección de las muestras de unidades primarias y secundarias sin reemplazo se utilizan los algoritmos de muestreo dados en el capítulo 2, de tal forma que los siguientes pasos se deben realizar:

- Separar la población en  $N_I$  unidades primarias de muestreo mediante el marco de muestreo de conglomerados.
- Realizar una selección de  $n_I$  conglomerados mediante cualquiera de los métodos expuestos en la sección 3.2.1; es decir, por el método coordinado negativo o por el método de Fan-Muller-Rezucha.
- Para cada unidad primaria seleccionada en la muestra de la primera etapa  $s_I$ , realizar una selección de  $n_i$   $i \in S_I$  elementos mediante cualquiera de los métodos expuestos en la sección 3.2.1.

**Resultado 7.2.1.** *Cuando el diseño de muestreo es aleatorio simple en las dos etapas, se tienen las siguientes probabilidades de inclusión de primer y segundo orden*

$$\pi_{Ii} = \frac{n_I}{N_I} \quad (7.2.1)$$

$$\pi_{Iij} = \frac{n_I(n_I - 1)}{N_I(N_I - 1)} \quad (7.2.2)$$

respectivamente. Por otro lado, la probabilidad de inclusión de un elemento o unidad secundaria de muestreo perteneciente a la  $i$ -ésima unidad primaria de muestreo  $i \in U_I$  está dado por

$$\pi_k = \frac{n_I}{N_I} \frac{n_i}{N_i} \quad (7.2.3)$$

Una vez que la muestra de unidades primarias  $s_I$  es seleccionada se dispone a realizar una enumeración completa de los elementos pertenecientes a ésta para levantar un marco de muestreo que permita la selección de una sub-muestra para realizar la respectiva medición de todos y cada uno de los elementos pertenecientes a la sub-muestra seleccionada. En el diseño de muestreo aleatorio por conglomerados el estimador del total poblacional  $t_y$  estaba dado por  $\hat{t}_{y,\pi} = \frac{N_i}{n_i} \sum_{i \in S_I} t_{yi}$  porque se conocían los totales exactos de cada conglomerado seleccionado mediante la realización de un censo en los mismos. Por otra parte, en el muestreo en dos etapas MAS-MAS, debido a que no se miden todos los elementos de las unidades primarias seleccionadas, se deben estimar estos totales  $t_{yi}$  mediante la siguiente expresión

$$\hat{t}_{yi,\pi} = \frac{N_i}{n_i} \sum_{k \in S_i} y_k = N_i \bar{y}_{U_i} \quad (7.2.4)$$

Con el siguiente resultado se llega a una estimación del parámetro de interés

**Resultado 7.2.2.** *Bajo muestreo en dos etapas MAS-MAS, el estimador de Horvitz-Thompson es insesgado para el total poblacional y toma la forma*

$$\hat{t}_{y,\pi} = \frac{N_I}{n_I} \sum_{i \in S_I} \frac{N_i}{n_i} \sum_{k \in S_i} y_k \quad (7.2.5)$$

con varianza dada por

$$Var_{MM}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) S_{t_y U_I}^2 + \frac{N_I}{n_I} \sum_{i \in U_I} \frac{N_i^2}{n_i} \left(1 - \frac{n_i}{N_i}\right) S_{y_{U_i}}^2 \quad (7.2.6)$$

cuya estimación insesgada es

$$\widehat{Var}_{MM}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) S_{t_{yS_I}}^2 + \frac{N_I}{n_I} \sum_{i \in S_I} \frac{N_i^2}{n_i} \left(1 - \frac{n_i}{N_i}\right) S_{y_{s_i}}^2 \quad (7.2.7)$$

donde  $S_{t_{yU_I}}^2$  es la varianza poblacional de los totales  $t_{yi}$   $i \in U_I$  de todas y cada una de las unidades primarias de muestreo y  $S_{y_{U_i}}^2$  es la varianza poblacional entre los elementos dentro de cada unidad primaria de muestreo. Similarmente,  $S_{t_{yS_I}}^2$  y  $S_{y_{s_i}}^2$ .

El primer término de (7.2.6) se refiere a la variabilidad debida a la primera etapa del diseño muestral mientras que el segundo sumando se refiere a la varianza adicional debida al sub-muestreo en las unidades primarias de muestreo. Lohr (2000) afirma que, de igual manera como en el caso del diseño de muestreo por conglomerados, si las unidades primarias de muestreo presentan distintos tamaños entonces la variabilidad del estimador puede ser muy grande. Si los tamaños  $N_i$  de los conglomerados  $i \in U_I$  son muy diferentes entre sí, el componente de varianza será grande incluso si el comportamiento estructural de la característica de interés es constante en cada unidad primaria.

### 7.2.2 Tamaño de muestra

Cada vez que avanzamos en el desarrollo programático de este texto nos encontramos, si bien los principios de estimación son los mismos, con que el diseño de la encuesta y la estimación de los parámetros de interés se tornan más complejos. Lohr (2000) afirma que la mejor manera de diseñar una encuesta es revisarla después de que esta haya concluido pues, al finalizar la encuesta, es posible evaluar el efecto de las unidades primarias de muestreo sobre la estimación final y, de esta manera, es posible saber en dónde se deberían asignar más recursos logísticos para obtener una mejor información. Pero a pesar de que el conocimiento de la población sea aceptable, siempre surge la pregunta del tamaño de muestra. En particular, ¿cuántas unidades primarias de muestreo se deberían seleccionar en la muestra? y ¿cuántos elementos o unidades secundarias de muestreo deberían ser seleccionados en el sub-muestreo dentro de las unidades primarias de muestreo?

Por ejemplo, en particular en las encuestas de áreas mientras mayor sea el tamaño de la unidad primaria de muestreo, se puede esperar que exista más variabilidad de dentro de la misma. Sin embargo, si el tamaño de unidad primaria es muy grande, se podrían perder los beneficios del ahorro financiero y logístico.

El objetivo de una buena muestra es recopilar la mayor cantidad de información al menor precio económico y operativo. Suponga que la población está dividida en  $N_I$  unidades primarias de muestreo, de las cuales se selecciona una muestra  $s_I$  de  $n_I$  unidades. Cada unidad primaria de muestreo contiene exactamente  $N_i = M$  elementos o unidades secundarias de muestreo. El sub-muestreo es tal que se selecciona una muestra de exactamente  $n_i = m$  unidades secundarias de muestreo. Por tanto, el tamaño poblacional y muestral estará dado por

$$N = N_I M \quad \text{y} \quad n = n_I m \quad (7.2.8)$$

respectivamente. De tal forma que el estimador de  $t_y$  se puede escribir como

$$\hat{t}_{y,\pi} = \frac{N_I}{n_I} \frac{M}{m} \sum_{i \in S_I} \sum_{k \in s_i} y_k \quad (7.2.9)$$

y su varianza como

$$Var_{MM}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) S_{t_y U_I}^2 + \frac{N_I^2 M^2}{n_I m} \left(1 - \frac{m}{M}\right) \bar{S}_{y_{U_i}}^2 \quad (7.2.10)$$

donde  $\bar{S}_{y_{U_i}}^2 = (1/N_I) \sum_{i \in U_I} S_{y_{U_i}}^2$ .

**Resultado 7.2.3.** Utilizando los resultados de la descomposición de las sumas de cuadrados, la varianza de la estrategia en dos etapas (2MAS) toma la siguiente forma

$$Var_{2MAS}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N_I^2 M}{n_I} \left[ \frac{1}{N_I - 1} (SCT - SCD) + \left( \frac{M}{m} - 1 \right) \frac{SCD}{N_I(M - 1)} \right] \quad (7.2.11)$$

mientras que la varianza de la estrategia aleatoria simple, con un tamaño poblacional igual a  $N = M \times N_I$  elementos y un tamaño de muestra igual a  $n = m \times n_I$  elementos, se puede escribir como

$$Var_{MAS}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) M \frac{SCT}{MN_I - 1} \quad (7.2.12)$$

Para encontrar los valores óptimos de  $n_I$  y  $m$  que serán utilizados en la primera y segunda etapa de muestro de tal forma que dada una función de costo se minimice<sup>2</sup> la varianza del estimador. Por tanto, se tiene el siguiente resultado.

**Resultado 7.2.4.** Al considerar la siguiente función de costo

$$C = c_1 n_I + c_2 n_I m \quad (7.2.13)$$

donde  $c_1$  es el costo de del levantamiento del marco de muestreo en cada unidad primaria seleccionada en la muestra  $s_I$  y  $c_2$  es el costo de recolectar la información de la característica de interés para los elementos o unidades secundarias seleccionadas por el sub-muestreo. Los valores óptimos de  $n_I$  y  $m$  que minimizan la varianza del estimador dada por la expresión (7.2.6) restringido al costo total de la encuesta dado por (7.2.11) son

$$n_I = \frac{C}{c_1 + c_2 m} \quad (7.2.14)$$

y

$$m = M \bar{S}_{y_{U_i}}^2 \sqrt{\frac{c_1/c_2}{S_{t_y U_I}^2 - M \bar{S}_{y_{U_i}}^2}} \quad (7.2.15)$$

**Prueba.** La cantidad a minimizar está dada en la expresión (7.2.10) que está sujeta a la restricción de la función de costo (7.2.11). Utilizando el método de los multiplicadores de Lagrange, se tiene que

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(n_I, m, \lambda) &= \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) S_{t_y U_I}^2 + \frac{N_I^2 M^2}{n_I m} \left(1 - \frac{m}{M}\right) \bar{S}_{y_{U_i}}^2 \\ &\quad + \lambda(c_1 n_I + c_2 n_I m - C) \end{aligned} \quad (7.2.16)$$

Anulando las derivadas parciales se tiene que

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial n_I} = -\frac{N_I^2 M^2}{n_I^2} \left( \frac{1}{m} - \frac{1}{M} \right) \bar{S}_{y_{U_i}}^2 - \frac{N_I^2}{n_I^2} S_{t_y U_I}^2 + c_1 \lambda + c_2 m \lambda = 0 \quad (7.2.17)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial m} = -\frac{N_I^2 M^2}{n_I^2 m^2} \bar{S}_{y_{U_i}}^2 + c_2 n_I \lambda = 0 \quad (7.2.18)$$

<sup>2</sup>Naturalmente estos valores dependerán de la función de costo utilizada.

De (7.2.15) se tiene que

$$n_I^2 = - \frac{N_I^2 M^2 \left( \frac{1}{m} - \frac{1}{M} \right) \bar{S}_{y_{U_i}}^2 + N_I^2 S_{t_y U_I}^2}{c_1 \lambda + c_2 m \lambda} \quad (7.2.19)$$

De (7.2.16) se tiene que

$$n_I^2 = - \frac{N_I^2 M^2 \bar{S}_{y_{U_i}}^2}{c_2 m^2 \lambda} \quad (7.2.20)$$

Igualando las anteriores ecuaciones y despejando  $m$  se tiene la demostración del resultado. ■

Si  $\bar{S}_{y_{U_i}}^2$ , la variabilidad de la característica de interés dentro de las unidades primarias es grande, entonces  $m$  será grande. Se debe resaltar que los resultados son válidos si la función de costo es la correcta.

### 7.2.3 Estimación de la varianza en muestreo de dos etapas

Cuando la estrategia de muestreo hace uso del estimador de Horvitz-Thompson podemos utilizar su forma general para hallar su varianza bajo cualquier diseño de muestreo. La expresión de la varianza del estimador de Horvitz-Thompson bajo muestreo bietápico está dada por

$$Var(\hat{t}_\pi) = \sum_{UI} \sum_{IJ} \Delta_{Iij} \frac{t_j}{\pi_{Ij}} \frac{t_i}{\pi_{Ii}} + \sum_{UI} V_i / \pi_{Ii} \quad (7.2.21)$$

cuya estimación insesgada es

$$\widehat{Var}_1(\hat{t}_\pi) = \sum_{sI} \sum_{IJ} \frac{\Delta_{Iij}}{\pi_{Ii}} \frac{\hat{t}_i}{\pi_{Ii}} \frac{\hat{t}_j}{\pi_{Ij}} + \sum_{sI} \hat{V}_i / \pi_{Ii} \quad (7.2.22)$$

La expresión anterior involucra el cálculo de las varianzas de las variables dentro de cada conglomerado. Lo anterior en una encuesta a gran escala puede llegar a ser muy tedioso, costoso y además muy demorado. Särndal, Swensson & Wretman (1992, p. 139) dan una posible solución al problema, ésta es mantener la primera parte del estimador de la varianza como estimador general de la misma. Así, un estimador sencillo, pero sesgado, es

$$\widehat{Var}_2(\hat{t}_\pi) = \sum_{sI} \sum_{IJ} \frac{\Delta_{Iij}}{\pi_{Ii}} \frac{\hat{t}_i}{\pi_{Ii}} \frac{\hat{t}_j}{\pi_{Ij}} \quad (7.2.23)$$

El anterior estimador sobre-estima la varianza para las unidades primarias de muestreo, pero a su vez también lo hace con (7.2.19). Otra posible solución para estimar la varianza del estimador de Horvitz-Thompson, es asumir que el muestreo en la primera etapa se llevó a cabo con reemplazo. Así, la estimación (sesgada) de la varianza estaría dada por

$$\widehat{Var}_3(\hat{t}_\pi) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\hat{t}_i}{p_{Ii}} - \hat{t}_\pi \right)^2 \quad (7.2.24)$$

Un caso especial del anterior término, se tiene suponiendo que  $\pi_k = np_k$ , y si el muestreo en la primera etapa fue aleatorio simple, entonces  $p_k = \frac{1}{N}$ . El estimador de la varianza, bajo la anterior condición es

$$\widehat{Var}(\hat{t}_\pi) = \frac{N^2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left( \hat{t}_i - \frac{\sum_{i=1}^n \hat{t}_i}{n} \right)^2 = \frac{N^2}{n} S_{\hat{t}_i}^2$$

Srinath & Hidirolou (1980) proponen un método *rápido* para la estimación de la varianza del estimador de Horvitz-Thompson. Éste supone que el método de selección en la segunda etapa es MAS y es invariante en la primera etapa (se puede seleccionar la muestra en la primera etapa mediante cualquier diseño); lo que conlleva a que este estimador de la varianza sea insesgado y está dado por

$$\widehat{Var}_4(\hat{t}_\pi) = -\frac{1}{2} \sum_{sI} \sum_{Ii} \frac{\Delta_{Iij}}{\pi_{Ii}} (\check{t}'_i \check{t}'_j) \quad (7.2.25)$$

donde  $\check{t}'_j = \frac{\hat{t}'_j}{\pi_{Ij}}$  y  $\hat{t}'_j = \frac{N_j}{n'_j} \sum_{s'_j} y_k$  donde  $s'_j$  denota una muestra de  $n'_j$  elementos. La regla para determinar el  $n'_j$  y obtener el estimador  $\widehat{Var}_4$  es

$$n'_j = \frac{n_i(1 - \pi_{Ii})}{1 - \pi_{Ii}(n_i/N_i)} \quad (7.2.26)$$

**Simulación:** se utilizaron los datos de la encuesta familiar de gastos FAMEX (Canada Family Expenditure, por sus siglas en inglés) del año 1996, que cuenta con un total de 691 individuos y está dividida en cinco conglomerados, se utilizó la variable gasto para estimar el total en una muestra bietápica y los datos de FAMEX 1996, aunque son los datos de una encuesta, se tomaron como los datos de un universo.

El estudio quiere verificar los resultados obtenidos anteriormente. Para el diseño de la muestra se quiso que en la primera etapa se seleccionaran tres conglomerados; para cada conglomerado seleccionado, se extrajo una muestra cuyo tamaño fuera el 40 % del mismo. El muestreo y el sub-muestreo fueron aleatorios simples MAS-MAS. El total poblacional para la variable de interés es USD 711623 y la varianza del  $\pi$  estimador, bajo las anteriores condiciones, es 6595944566.

Así, se calcularon los siguientes estimadores para la varianza del total estimado  $\hat{t}_\pi$

- $\widehat{Var}_1(\hat{t}_\pi)$ : el estimador clásico al utilizar muestreo bietápico.
- $\widehat{Var}_2(\hat{t}_\pi)$ : correspondiente al primer sumando del anterior estimador.
- $\widehat{Var}_3(\hat{t}_\pi)$ : el estimador suponiendo muestreo con reemplazo.
- $\widehat{Var}_4(\hat{t}_\pi)$ : el estimador propuesto por (Srinath & Hidirolou 1980) (1.5).

El proceso se repitió  $B = 5000$  veces. La simulación fue programada en el paquete estadístico R. En la simulación. El desempeño de un estimador  $\hat{V}$  fue evaluado usando su sesgo relativo,  $SR$  y su eficiencia relativa,  $ER$ , definidas como:

$$SR = B^{-1} \sum_{b=1}^B \frac{\hat{V}_b - V}{V} \quad (7.2.27)$$

$$ER = \frac{ECM(\hat{V}_\pi)}{ECM(\hat{V})} \quad , \quad (7.2.28)$$

donde

$$ECM(\hat{V}) = B^{-1} \sum_{b=1}^B (\hat{V}_b - V)^2 \quad (7.2.29)$$

y  $\hat{V}_b$  se calculó en la  $b$ -ésima muestra simulada. Como se puede notar el estimador clásico al utilizar muestreo bietápico,  $\hat{V}_\pi$ , fue utilizado como línea base de comparación. Grandes valores para  $ER(> 1)$  representan alta eficiencia del estimador  $\hat{V}$  en comparación al estimador clásico.

$\widehat{Var}_1(\hat{t}_\pi)$	$\widehat{Var}_2(\hat{t}_\pi)$	$\widehat{Var}_3(\hat{t}_\pi)$	$\widehat{Var}_4(\hat{t}_\pi)$
0.0008138860	0.2458789480	-1.5021980054	-0.0008792021

*Sesgo relativo para cada estimador*

Los resultados empíricos indican que el estimador de la varianza para el estimador de Horvitz-Thompson es insesgado, así como el estimador propuesto por (Srinath & Hidiroglou 1980). Pero, los estimadores 2 y 3 tiene un sesgo relativo importante, sobre todo aquel que supone muestreo con reemplazo; también se puede observar que el estimador de la primera parte de (7.2.20), aunque es sesgado, esta magnitud es pequeña. En particular se recomienda seguir trabajando con el estimador clásico pues los avances computacionales así lo permiten. La eficiencia relativa de todos los estimadores resultó despreciable.

#### 7.2.4 Marco II y Lucy

En el capítulo pasado se ejecutó un diseño de muestreo por conglomerados cuya principal característica es que las unidades dentro de cada conglomerado tienen un comportamiento relativamente similar. Esto llevó a que las estimaciones estuvieran muy lejos de la realidad dado que se utilizó un diseño de muestreo que inducía probabilidades de inclusión constante, siendo que el comportamiento de los totales de los conglomerados no era constante para las características de interés.

En esta oportunidad, volvemos a enfrentarnos a la dificultad de obtener una muestra de empresas del sector industrial careciendo de un marco de muestreo que nos permita la inclusión directa de las empresas en la muestra. Sin embargo, es posible utilizar como base el muestreo por áreas que se propuso en el capítulo anterior pero la gran diferencia es que, en lugar de un censo en las áreas geográficas seleccionadas, realizaremos un sub-muestreo. Recordemos que la ciudad está dividida en cinco zonas geográficas rotuladas como **Zona A**, ubicada en el sur, **Zona B**, ubicada en el norte, **Zona C**, ubicada en el oriente, **Zona D**, ubicada en el occidente y **Zona E**, ubicada en el centro.

Suponga que no se tiene información acerca de cuántas empresas pertenecen a cada zona geográfica, por lo que no es posible realizar un diseño auto-ponderado. Para garantizar una buena precisión se ha decidido seleccionar una muestra aleatoria simple de cuatro zonas geográficas, o unidades primarias de muestreo. Lo anterior se realiza mediante el uso de la función `sample`, aunque también es admisible realizarlo con la función `S.SI` del paquete `TeachingSampling`.

```
data(BigLucy)
attach(BigLucy)

UI <- levels(BigLucy$Zone)
NI <- length(UI)
nI <- 20

samI <- S.SI(NI, nI)
muestraI <- UI[samI]
muestraI
```

```
## [1] "County13" "County18" "County19" "County20" "County25" "County37"
## [7] "County38" "County44" "County50" "County51" "County52" "County60"
## [13] "County68" "County7" "County76" "County80" "County83" "County84"
## [19] "County9" "County92"
```

Una vez se realiza el sorteo aleatorio, las zonas geográficas seleccionadas son: **Zona B**, **Zona C**, **Zona D** y **Zona E**. El paso a seguir es el empadronamiento de cada una de las empresas del sector industrial pertenecientes a cada zona incluida en la muestra. Es decir, se debe planear un operativo de campo con el fin de levantar un marco de muestreo para cada unidad primaria. En total se deben conseguir cuatro marcos de muestreo de empresas.

```
Lucy1 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[1]),]
Lucy2 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[2]),]
Lucy3 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[3]),]
Lucy4 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[4]),]
Lucy5 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[5]),]
Lucy6 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[6]),]
Lucy7 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[7]),]
Lucy8 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[8]),]
Lucy9 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[9]),]
Lucy10 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[10]),]
Lucy11 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[11]),]
Lucy12 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[12]),]
Lucy13 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[13]),]
Lucy14 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[14]),]
Lucy15 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[15]),]
Lucy16 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[16]),]
Lucy17 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[17]),]
Lucy18 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[18]),]
Lucy19 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[19]),]
Lucy20 <- BigLucy[which(Zone == muestraI[20]),]

LucyI <- rbind(Lucy1, Lucy2, Lucy3, Lucy4, Lucy5, Lucy6, Lucy7, Lucy8, Lucy9,
               Lucy10, Lucy11, Lucy12, Lucy13, Lucy14, Lucy15, Lucy16, Lucy17,
               Lucy18, Lucy19, Lucy20)

N1 <- dim(Lucy1)[1];      N2 <- dim(Lucy2)[1]
N3 <- dim(Lucy3)[1];      N4 <- dim(Lucy4)[1]
N5 <- dim(Lucy5)[1];      N6 <- dim(Lucy6)[1]
N7 <- dim(Lucy7)[1];      N8 <- dim(Lucy8)[1]
N9 <- dim(Lucy9)[1];      N10 <- dim(Lucy10)[1]
N11 <- dim(Lucy11)[1];     N12 <- dim(Lucy12)[1]
N13 <- dim(Lucy13)[1];     N14 <- dim(Lucy14)[1]
N15 <- dim(Lucy15)[1];     N16 <- dim(Lucy16)[1]
N17 <- dim(Lucy17)[1];     N18 <- dim(Lucy18)[1]
N19 <- dim(Lucy19)[1];     N20 <- dim(Lucy20)[1]

Ni <- c(N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9, N10, N11, N12, N13, N14, N15,
        N16, N17, N18, N19, N20)

ni <- round(Ni * 0.12)
```

```

ni

## [1] 234 234 54 40 40 174 234 54 40 74 174 40 234 174 37 20 117
## [18] 27 54 87

sum(ni)

## [1] 2142

```

Cuando la primera etapa de muestreo concluye, se tiene conocimiento de cuántas empresas del sector industrial pertenecen a cada zona geográfica incluida en la muestra. La **Zona B** con 727 empresas, la **Zona C** con 974 empresas, la **Zona D** con 223 empresas y, por último, la **Zona E** tiene un total de 165 empresas. Se ha decidido que los tamaños de muestra correspondan a un porcentaje del tamaño de cada unidad primaria de muestreo. El tamaño de la muestra es de 410 empresas.

Con ayuda de cada uno de los cuatro marcos de muestreo se realiza una muestra aleatoria simple de empresas de acuerdo a los tamaños establecidos anteriormente. Cuando las muestras hayan sido seleccionadas se unifican mediante el uso de la función `rbind` que lo único que hace es mezclar las bases de datos de las empresas incluidas en la muestra.

```

sam1 <- sample(N1, ni[1]);      sam2 <- sample(N2, ni[2])
sam3 <- sample(N3, ni[3]);      sam4 <- sample(N4, ni[4])
sam5 <- sample(N5, ni[5]);      sam6 <- sample(N6, ni[6])
sam7 <- sample(N7, ni[7]);      sam8 <- sample(N8, ni[8])
sam9 <- sample(N9, ni[9]);      sam10 <- sample(N10, ni[10])
sam11 <- sample(N11, ni[11]);   sam12 <- sample(N12, ni[12])
sam13 <- sample(N13, ni[13]);   sam14 <- sample(N14, ni[14])
sam15 <- sample(N15, ni[15]);   sam16 <- sample(N16, ni[16])
sam17 <- sample(N17, ni[17]);   sam18 <- sample(N18, ni[18])
sam19 <- sample(N19, ni[19]);   sam20 <- sample(N20, ni[20])

muestra1 <- Lucy1[sam1, ];      muestra2 <- Lucy2[sam2, ]
muestra3 <- Lucy3[sam3, ];      muestra4 <- Lucy4[sam4, ]
muestra5 <- Lucy5[sam5, ];      muestra6 <- Lucy6[sam6, ]
muestra7 <- Lucy7[sam7, ];      muestra8 <- Lucy8[sam8, ]
muestra9 <- Lucy9[sam9, ];      muestra10 <- Lucy10[sam10, ]
muestra11 <- Lucy11[sam11, ];   muestra12 <- Lucy12[sam12, ]
muestra13 <- Lucy13[sam13, ];   muestra14 <- Lucy14[sam14, ]
muestra15 <- Lucy15[sam15, ];   muestra16 <- Lucy16[sam16, ]
muestra17 <- Lucy17[sam17, ];   muestra18 <- Lucy18[sam18, ]
muestra19 <- Lucy19[sam19, ];   muestra20 <- Lucy20[sam20, ]

muestra <- rbind(muestra1, muestra2, muestra3, muestra4, muestra5, muestra6,
                muestra7, muestra8, muestra9, muestra10, muestra11, muestra12,
                muestra13, muestra14, muestra15, muestra16, muestra17, muestra18,
                muestra19, muestra20)

attach(muestra)
head(muestra)

##           ID           Ubication Level      Zone Income Employees Taxes
## 52282 AB0000052282 C0157237K0144660 Medium County13      630         60      20

```



##	52910	AB0000052910	C0062184K0239713	Small County13	201	81	1
##	53604	AB0000053604	C0139833K0162064	Small County13	425	37	8
##	52911	AB0000052911	C0019026K0282871	Small County13	280	61	3
##	52722	AB0000052722	C0175008K0126889	Small County13	361	25	5
##	53462	AB0000053462	C0185989K0115908	Small County13	420	32	8
##		SPAM	ISO Years	Segments			
##	52282	yes	yes	42.8	County13	58	
##	52910	yes	no	13.0	County13	121	
##	53604	no	no	16.8	County13	190	
##	52911	yes	no	1.6	County13	121	
##	52722	no	no	31.5	County13	102	
##	53462	no	no	3.2	County13	176	

Cuando el levantamiento de la información ha concluido, se carga el archivo de datos en el ambiente de R y se construye un **data frame** que contiene los valores de las características de interés en la muestra general. En este caso particular lleva el nombre de **estima**. Es necesario que cada empresa incluida en la muestra lleve consigo el registro que indique a qué zona geográfica pertenece. Para este ejercicio, el vector **Area** contiene esta información. La estimación en este diseño de muestreo en dos etapas se hace utilizando la función **E.2SI(NI,nI,Ni,ni,y,C)** cuyos argumentos son **NI**, el número de unidades primarias de muestreo que conforman la población. **nI**, el número de unidades primarias incluidas en la muestra  $s_I$ . **Ni**, un vector de los tamaños de las unidades primarias de muestreo. **ni**, un vector conteniendo los tamaños de muestra en cada unidad primaria de muestreo. **y**, el archivo de datos que contiene la información de las características de interés y, por último, **C**, un vector que contiene la pertenencia de cada unidad secundaria de muestreo a su respectiva unidad primaria.

```
estima <- data.frame(Income, Employees, Taxes)
area <- as.factor(as.integer(Zone))
E.2SI(NI, nI, Ni, ni, estima, area)
```

Los resultados de la estimación se muestran en la siguiente tabla. Nótese que con un tamaño de muestra similar, la eficiencia de esta estrategia de muestreo es mucho mayor que la de una estrategia que utiliza un diseño de muestreo por conglomerados y es equivalente a la de una estrategia que utilice un diseño de muestreo aleatorio simple.

	N	Income	Employees	Taxes
Estimation	89110.00	35203287.69	5361559.27	900924.59
Standard Error	13531.82	5401337.02	803619.48	161088.99
CVE	15.19	15.34	14.99	17.88
DEFF	Inf	126.23	180.22	31.68

Tabla 7.1: Estimaciones para el diseño de muestreo aleatorio simple en dos etapas.

La ganancia en eficiencia se debe a la propiedad del diseño en dos etapas en donde dado un  $n$ , es posible incluir más unidades primarias en la primera etapa de muestreo. En este caso, el número de conglomerados incluidos en la muestra  $s_I$  es el doble, lo que decrece el componente de la varianza en la primera etapa. El componente de variabilidad que domina la varianza en esta estimación es la dispersión dentro de las unidades primarias y se debe a la heterogeneidad de los conglomerados.

### 7.3 Muestreo en dos etapas estratificado

La teoría discutida hasta ahora en las secciones anteriores es aplicable cuando las unidades primarias de muestreo son seleccionadas de un estrato. Como se verá más adelante no hay nuevos principios de estimación o diseño involucrado en el desarrollo de esta estrategia de muestreo cuando lo que se quiere es estimar el total de la característica de interés  $t_y$  de una población dividida en  $H$  estratos.

Se supone que el muestreo en cada estrato respeta el principio de la independencia. Las estimaciones del total, así como el cálculo y estimación de la varianza son simplemente resultado de añadir o sumar para cada estrato la respectiva cantidad.

Por ejemplo, suponga que dentro de cada estrato  $U_h$   $h = 1, \dots, H$  existen  $N_{Ih}$  unidades primarias de muestreo, de las cuales se selecciona una muestra  $s_{Ih}$  de  $n_{Ih}$  unidades mediante un diseño de muestreo aleatorio simple. Suponga, además que el sub-muestreo dentro de cada unidad primaria seleccionada es también aleatorio simple. Es decir, para cada unidad primaria de muestreo seleccionada  $i \in s_{Ih}$  de tamaño  $N_i$  se selecciona una muestra  $s_i$  de elementos de tamaño  $n_i$ . Cuando las unidades secundarias de muestreo o elementos son seleccionadas, se realiza el proceso de medición y el proceso de estimación para lo cual se tiene que el estimador del total está dado por el siguiente resultado.

**Resultado 7.3.1.** *Bajo muestreo en dos etapas estratificado MAS-MAS, el estimador de Horvitz-Thompson es insesgado para el total poblacional y toma la forma*

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_{h=1}^H \hat{t}_{yh,\pi} = \sum_{h=1}^H \left[ \frac{N_{Ih}}{n_{Ih}} \sum_{i \in s_{Ih}} \frac{N_i}{n_i} \sum_{k \in s_i} y_k \right] \quad (7.3.1)$$

con varianza dada por

$$Var_{EMM}(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_{h=1}^H Var(\hat{t}_{yh,\pi}) \quad (7.3.2)$$

$$= \sum_{h=1}^H \left[ \frac{N_{Ih}^2}{n_{Ih}} \left( 1 - \frac{n_{Ih}}{N_{Ih}} \right) S_{t_{yh}U_I}^2 + \frac{N_{Ih}}{n_{Ih}} \sum_{i \in s_{Ih}} \frac{N_i^2}{n_i} \left( 1 - \frac{n_i}{N_i} \right) S_{y_{U_i}}^2 \right] \quad (7.3.3)$$

cuya estimación insesgada es

$$\widehat{Var}_{EMM}(\hat{t}_{y,\pi}) = \sum_{h=1}^H \widehat{Var}(\hat{t}_{yh,\pi}) \quad (7.3.4)$$

$$= \sum_{h=1}^H \left[ \frac{N_{Ih}^2}{n_{Ih}} \left( 1 - \frac{n_{Ih}}{N_{Ih}} \right) S_{t_{yh}s_I}^2 + \frac{N_{Ih}}{n_{Ih}} \sum_{i \in s_{Ih}} \frac{N_i^2}{n_i} \left( 1 - \frac{n_i}{N_i} \right) S_{y_{s_i}}^2 \right] \quad (7.3.5)$$

donde  $S_{t_{yh}U_I}^2$  es la varianza poblacional de los totales  $t_{yi}$   $i \in U_I$  de todas y cada una de las unidades primarias de muestreo dentro del estrato  $h$  y  $S_{y_{U_i}}^2$  es la varianza poblacional entre los elementos dentro de cada unidad primaria de muestreo en el estrato  $h$ . Similarmente,  $S_{t_{yh}s_I}^2$  y  $S_{y_{s_i}}^2$ .

Este diseño de muestreo es usado para mejorar la eficiencia de la estrategia MAS-MAS. Särndal, Swensson & Wretman (1992) plantean que es posible estratificar la población de acuerdo a una medida de tamaño, de tal forma que se agrupen las unidades de muestreo con un comportamiento similar en un mismo estrato. Es de gran interés notar que una escogencia particular dentro del sub-muestreo de las unidades primarias haría al estimador de Horvitz-Thompson muy conveniente de calcular. De hecho, si para cada unidad primaria  $i \in s_{Ih}$  seleccionada en la muestra de cada estrato  $h$ ,  $h = 1, \dots, H$  se tiene que

$$c = \frac{n_i}{N_i} \frac{n_{Ih}}{N_{Ih}} \quad (7.3.6)$$

Entonces, el estimador toma la siguiente forma

$$\hat{t}_{y,\pi} = \frac{1}{c} \sum_{h=1}^H \sum_{i \in S_{Ih}} \sum_{k \in S_i} y_{hik} \quad (7.3.7)$$

Lo que significa que, en el cálculo computacional de la estimación, los valores de la característica de interés simplemente se suman sin importar la unidad primaria o el estrato al que pertenezcan. Esta clase de estimadores se conocen con el nombre de **estimadores auto-ponderados**. La cantidad  $c$  admite una interpretación muy simple y es la fracción de muestreo esperada para los elementos. De esta forma, si se desea seleccionar una muestra con un promedio de 1% de unidades secundarias de muestreo o elementos seleccionados en cada estrato, entonces  $k = \frac{1}{100}$ .

### 7.3.1 Diseños auto-ponderados

En muchas encuestas de dos etapas es común encontrar **diseños auto-ponderados**. Esta clase de diseños asume que en la primera etapa de muestreo se selecciona una muestra  $S_I$  de unidades primarias de muestreo cuyas probabilidades de inclusión son proporcionales al tamaño de las mimas, de tal forma que si  $N$  es el tamaño de la población  $U$  de unidades secundarias de muestreo o elementos y  $n$  el tamaño de la muestra resultante, entonces

$$\pi_{Ii} = \frac{N_i}{N} n_I \quad i \in U_I \quad (7.3.8)$$

Más adelante, en la segunda etapa de muestreo, se seleccionan muestras  $s_i$   $i \in S_I$  de unidades secundarias o elementos de tamaño constante  $n_i = n_0$  para cada unidad primaria incluida en la muestra. Por lo tanto, la probabilidad de inclusión de las unidades secundarias será

$$\pi_{k|i} = \frac{n_0}{N_i} \quad i \in S_I \quad (7.3.9)$$

De tal forma que la probabilidad de inclusión general del  $k$ -ésimo elemento es constante y está dada por

$$\pi_k = \pi_{Ii} \pi_{k|i} = n_I \frac{N_i}{N} \frac{n_0}{N_i} = n_I \frac{n_0}{N} = \frac{n}{N} = c \quad k \in U_i \quad (7.3.10)$$

y el estimador de Horvitz-Thompson toma la siguiente forma

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_{k \in S} \frac{y_k}{\pi_k} = \frac{1}{c} \sum_{i \in S_I} \sum_{k \in S_i} y_k = \frac{N}{n} \sum_{k \in S} y_k \quad (7.3.11)$$

Nótese la facilidad de cálculo del estimador. Esta clase de diseños auto-ponderados se utilizan cuando se desea controlar el trabajo de campo, por lo que el número de entrevistas en cada unidad primaria incluida en la muestra será constante.

## 7.4 Diseños en $r$ etapas

Särndal, Swensson & Wretman (1992) afirman que a pesar de su complejidad, los diseños con tres o más etapas son ampliamente usados en las grandes encuestas. El muestreo en dos etapas puede ser generalizado mediante el siguiente resultado en donde se supone que existen  $r$  etapas de muestreo. De

esta manera, la población se divide en  $N_I$  unidades primarias de muestreo, de las cuales se selecciona una muestra  $s_I$  de  $n_I$  unidades mediante un diseño de muestreo  $p_I(S_I)$ . Se asume que es posible construir un estimador<sup>3</sup>  $\hat{t}_{yi}$  para cada total  $t_{yi}$   $i \in S_I$  de las unidades primarias seleccionadas y que este estimador es insesgado para las restantes  $r - 1$  etapas del diseño muestral. Por tanto

$$E(\hat{t}_{yi} | S_I) = t_{yi} \quad (7.4.1)$$

Nótese que las últimas unidades de muestreo no deben ser necesariamente elementos, pueden ser también conglomerados. Los principios de independencia e invarianza se siguen manteniendo en todas las etapas del diseño muestral. De tal manera que el fundamento de este diseño de muestreo es la acumulación de las estimaciones desde la última etapa hasta la primera. Esto se sintetiza en los siguientes resultado de la próxima sección.

#### 7.4.1 El estimador de Horvitz-Thompson

**Resultado 7.4.1.** *Bajo muestreo en  $r$  etapas el estimador de Horvitz-Thompson es insesgado para el total poblacional y toma la forma*

$$\hat{t}_{y,\pi} = \sum_{i \in S_I} \frac{\hat{t}_{yi}}{\pi_{Ii}} \quad (7.4.2)$$

con varianza dada por

$$Var_{BI}(\hat{t}_{y,\pi}) = \underbrace{\sum_{U_I} \sum_{I_{ij}} \Delta_{Iij} \frac{t_i}{\pi_{Ii}} \frac{t_j}{\pi_{Ij}}}_{Var(UPM)} + \underbrace{\sum_{i \in U_I} \frac{V_i}{\pi_{Ii}}}_{Var(Resto)} \quad (7.4.3)$$

cuya estimación insesgada es

$$\widehat{Var}_{BI}(\hat{t}_{y,\pi}) = \underbrace{\sum_{S_I} \sum_{I_{ij}} \frac{\Delta_{Iij}}{\pi_{Iij}} \frac{\hat{t}_{yi}}{\pi_{Ii}} \frac{\hat{t}_{yj}}{\pi_{Ij}}}_{\widehat{Var}(UPM)} + \underbrace{\sum_{i \in S_I} \frac{\hat{V}_i}{\pi_{Ii}}}_{\widehat{Var}(Resto)} \quad (7.4.4)$$

donde  $V_i = Var(\hat{t}_{yi} | S_I)$  y  $\hat{V}_i$  es un estimador insesgado de  $V_i$  tal que  $E(\hat{V}_i | S_I) = V_i$  para todo  $i \in U_I$ .

**Prueba.** Esta demostración se realiza de manera recursiva escribiendo el estimador y la varianza como una función de los estimadores insesgados de las etapas subsecuentes en los niveles inferiores. Se debe tener en cuenta que el resultado 7.2.2. se extiende naturalmente. Por ejemplo para el diseño de tres etapas, se tiene que

$$Var(U) = V_1[E_2(E_3(U))] + E_1[V_2(E_3(U))] + E_1[E_2(V_3(U))] \quad (7.4.5)$$

■

#### 7.4.2 El estimador de Hansen-Hurwitz

Un esquema utilizado en la práctica por la sencillez en el proceso de estimación consiste en seleccionar una muestra de  $m_I$  unidades primarias de muestreo mediante un diseño de muestreo con reemplazo que induce probabilidades de selección  $p_{Ii}$  con  $i \in U_I$  tales que  $\sum_{i=1}^{N_i} p_{Ii} = 1$ . Dentro de cada unidad primaria de muestreo seleccionada en el sorteo aleatorio con reemplazo se toma una sub-muestra (con

<sup>3</sup>Este estimador no necesariamente debe ser el estimador de Horvitz-Thompson pero sí debe ser insesgado.

o sin reemplazo). Aunque existe una pérdida de eficiencia cuando el muestreo es con reemplazo, ésta se compensa con una ganancia logística en el proceso de estimación de las varianzas requeridas para cada característica de interés. El proceso general de muestreo con reemplazo según Särndal, Swensson & Wretman (1992) es el siguiente:

- En la primera etapa se selecciona una muestra aleatoria de acuerdo a un diseño de muestreo con reemplazo tal que  $p_{Ii}$  con  $i \in U_I$  es la probabilidad de selección de la  $i$ -ésima unidad primaria de muestreo.
- En las siguientes etapas<sup>4</sup>, se mantienen las propiedades de independencia e invarianza sin importar si el diseño dentro de las unidades primarias seleccionadas sea con o sin reemplazo.
- Si una unidad de muestreo es seleccionada en más de una ocasión, se debe realizar tantos sub-muestreos como veces haya sido seleccionada en la primera etapa.

**Resultado 7.4.2.** *Bajo un diseño de muestreo en varias etapas, el estimador de Hansen-Hurwitz para el total  $t_y$ , su varianza y su varianza estimada están dados por*

$$\hat{t}_{y,p} = \frac{1}{m_I} \sum_{v=1}^{m_I} \frac{\hat{t}_{yi_v}}{p_{Ii_v}} \quad (7.4.6)$$

$$Var(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m_I} \sum_{i=1}^{N_I} p_{Ii} \left( \frac{t_{yi}}{p_{Ii}} - t_y \right)^2 + \frac{1}{m_I} \sum_{i=1}^{N_I} \frac{V_i}{p_{Ii}} \quad (7.4.7)$$

$$\widehat{Var}(\hat{t}_{y,p}) = \frac{1}{m_I(m_I - 1)} \sum_{v=1}^{m_I} \left( \frac{\hat{t}_{yi_v}}{p_{Ii_v}} - \hat{t}_{y,p} \right)^2 \quad (7.4.8)$$

respectivamente. Donde  $\hat{t}_{yi}$  es un estimador insesgado del total de la característica de interés  $y$  en la unidad primaria  $U_i$   $i \in S_I$ ,  $V_i = Var(\hat{t}_{yi} | S_I)$  la varianza de  $\hat{t}_{yi}$  en la segunda etapa. Nótese que  $\hat{t}_{y,p}$  es insesgado para  $t_y$  y que  $\widehat{Var}(\hat{t}_{y,p})$  es insesgado para  $Var(\hat{t}_{y,p})$ .

**Prueba.** La demostración empieza definiendo las variables aleatorias

$$Z_v = t_{yi}/p_{Ii} \quad i \in U_I \quad v = 1, \dots, m_I \quad (7.4.9)$$

y

$$\hat{Z}_v = \hat{t}_{yi}/p_{Ii} \quad i \in U_I \quad v = 1, \dots, m_I \quad (7.4.10)$$

Tanto  $Z_v$  como  $\hat{Z}_v$  son sucesiones de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. Sin embargo, respetando los principios de independencia e invarianza, se tiene que la esperanza está dada por

$$E(\hat{Z}_v) = E(E(\hat{Z}_v | S_I)) = E(Z_v) = t_y$$

y la varianza es

$$\begin{aligned} Var(\hat{Z}_v) &= Var(E(\hat{Z}_v | S_I)) + E(Var(\hat{Z}_v | S_I)) \\ &= Var(Z_v) + E(Var(\hat{t}_{yi}/p_{Ii} | S_I)) \\ &= Var(Z_v) + E(V_i/p_{Ii}^2) \\ &= \sum_{i=1}^{N_I} p_{Ii} \left( \frac{t_{yi}}{p_{Ii}} - t_y \right)^2 + \sum_{i=1}^{N_I} \frac{V_i}{p_{Ii}} \end{aligned}$$

<sup>4</sup>Este proceso es válido para diseños de muestreo con más de dos etapas.

Ahora, dado que  $\hat{t}_{y,p} = \bar{\hat{Z}}$  y utilizando el resultado 2.2.11, se tiene que el estimador insesgado de la varianza corresponde a la expresión dada en (7.4.8). ■

Dada la simplificación en el cálculo de la varianza, Bautista (1998) propone utilizarla incluso cuando el diseño de muestreo sea sin reemplazo. Sin embargo, advierte que este estimador generalmente sobre-estima la varianza, lo que conduce a intervalos de confianza más conservadores y coeficientes de variación un poco más altos.

## 7.5 Ejercicios

7.1 Argumente si las siguientes afirmaciones son falsas o verdaderas. Sustente su respuesta detalladamente.

- (a) En la estimación de totales poblacionales, se nota que, casi siempre,  $Var_{MAS^2}(t_{y,\pi})$  es mayor a  $Var_{MAS}(t_{y,\pi})$ .
- (b) En la estimación de la varianza para totales en diseños bietápicos,  $\hat{Var}(UPM)$  es insesgada para  $\hat{Var}(UPM)$ .
- (c) En la estimación de la varianza para totales en diseños bietápicos,  $\hat{Var}(USM)$  es insesgada para  $\hat{Var}(USM)$ .
- (d) Al planear un diseño de muestreo en varias etapas, se debe tener en cuenta que entre más etapas tenga el diseño, la varianza del estimador será probablemente más baja.
- (e) En diseños bietápicos, la varianza total del estimador es dominada por la varianza de la última etapa. Es decir, la varianza en la última etapa es mucho mayor que la varianza de la primera etapa.
- (f) En un estudio de consumo de licores se proponen dos diseños de muestreo en dos etapas: uno con la selección de 300 manzanas y diez personas por manzana; el otro con la selección de 100 manzanas y 30 personas por manzana. En este caso, el primer diseño de muestreo arroja una varianza menor al del segundo diseño.

7.2 Para un diseño de muestreo en dos etapas, en donde la primera etapa se lleva a cabo un diseño PPT con reemplazo y en la segunda etapa se realiza un diseño MAS en cada UPM seleccionada, proponga un estimador insesgado para el total poblacional (Ayuda: utilice el estimador de Horvitz-Thompson en la segunda etapa y el estimador de Hansen-Hurwitz en la primera etapa). Demuestre que este estimador es insesgado para el total poblacional  $t_y$  (Ayuda: utilice las propiedades de la esperanza condicional) y defina la varianza para este estimador (Ayuda: utilice las propiedades de la varianza condicional).

7.3 Escriba las fórmulas del estimador del total y del estimador de la varianza del total para los siguientes diseños de muestreo. Defina estrictamente cada término y notación que utilice en las fórmulas.

- (a) Diseño en tres etapas: MAS en cada una de las etapas.
- (b) Diseño estratificado con tres estratos: uno de inclusión forzosa, otro con diseño PPT y otro con diseño MAS.

7.4 (Tillé, 2006. Ej 5.5) Suponga que un estadístico desea estimar el ingreso total de las personas en un país. Para esto, él lleva a cabo un diseño de muestreo en dos etapas, en donde la primera etapa se seleccionan municipios con un diseño PPT con probabilidad de selección proporcional al número de habitantes del municipio y en la segunda etapa se realiza un diseño MAS en cada municipio. En la primera etapa, se seleccionaron  $m_I = 4$  municipios entre los  $N_I = 30$  municipios en el país y en la segunda etapa, se incluyeron  $n_i$  personas de los  $N_i$  habitantes del municipio  $i$ -ésimo

Tabla 7.2: Ingreso de cada persona para el ejercicio 7.3

Municipio	Ni	ni	yk
1	20	4	105
			118
			102
			110
2	23	5	108
			117
			134
			108
			119
1	18	4	201
			201
			210
			206
2	28	6	157
			141
			129
			170
			104
			110

( $i = 1, 2, 3, 4$ ). Suponga que por fuentes oficiales, se conoce que el número total de personas en el país es de  $N = 10000$ . Los datos obtenidos se muestran en la tabla 7.2.

- (a) Estime el ingreso total en el país. Reporte el coeficiente de variación estimado.
- (b) Estime el ingreso medio en el país y reporte el coeficiente de variación estimado.

7.5 Suponga que por alguna circunstancia, un extraterrestre desea estimar el número promedio de patas que tiene un perro en una ciudad. La ciudad está dividida en dos áreas geográficas, la zona norte y la zona sur. Para llevar a cabo la estimación, él planea un diseño de muestreo en dos etapas así: De las  $N_I = 2$  zonas geográficas de la ciudad, va a seleccionar una muestra aleatoria simple de  $n_I = 1$  unidades primarias de muestreo. Se sabe que en el norte hay  $N_1 = 30$  perros y en el sur hay  $N_2 = 10$  perros. Sea cual sea la unidad primaria seleccionada, se seleccionará una sub-muestra aleatoria simple de  $n_i = 2$  perros ( $i = 1, 2$ ) y se realizará la medición del total de patas en cada perro incluido en la muestra.

- (a) Si se seleccionó la zona norte, reporte la estimación del total de patas en la ciudad  $t_{y,\pi}$  y la estimación del promedio de patas en la ciudad  $\bar{y}_S = t_{y,\pi}/N$ .
- (b) Si se seleccionó la zona sur, reporte la estimación del total de patas en la ciudad  $t_{y,\pi}$  y la estimación del promedio de patas en la ciudad  $\bar{y}_S = t_{y,\pi}/N$ .
- (c) Para este diseño de muestreo, reporte la varianza teórica del estimador  $\bar{y}_S$ .
- (d) ¿Es una buena estrategia escoger al estimador  $\bar{y}_S$  para inferir acerca del promedio de patas de los perros en la ciudad?



# Bibliografía

- Bautista, J. (1998), *Diseños de muestreo estadístico*, Universidad Nacional de Colombia.
- Bebbington, A. (1975), ‘A simple method of drawing a sample without replacement’, *Applied Statistics* **24**, 136.
- Brewer, K. (1963), ‘A model of systematic sampling with unequal probabilities’, *Australina Journal of Statistics* **5**, 93–105.
- Brewer, K. (1975), ‘A simple procedure for  $\pi$ pswor’, *Australian Journal of Statistics* **17**, 166–172.
- Brewer, K. (2002), *Combined sampling inference, weighting Basu’s elephants*, London: Arnorld.
- Brewer, K. & Hanif, M. (1983), *Sampling with unequal probabilities*, New York: Springer-Verlag.
- Cassel, C., Särndal, C. & Wretman, J. (1976a), *Foundations of Inference in Survey Sampling*, Wiley.
- Cassel, C., Särndal, C. & Wretman, J. (1976b), ‘Some results on generalized difference estimation and generalized regression estimation for finite populations’, *Biometrika* **63**, 615–620.
- Chambers, R. L. & Skinner, C. J., eds (2003), *Analysis of Survey Data*, Wiley.
- Cochran, W. (1977), *Sampling Techniques*, Wiley.
- Cornfield, J. (1951), ‘The determination of sampling size’, *American journal of public health* **41**, 654–661.
- Dalgaard, P. (2008), *Introductory Statistics with R*, 2 edn, Springer.
- Deville, J. (1993), ‘Estimation de la variance pour les enquetes en deux phases’, *Note Interne Manuscrite. France: INSEE*.
- Deville, J.-C. & Tillé, Y. (1998), ‘Unequal probability sampling without replacement through a splitting method’, *Biometrika* **85**, 89–101.
- Deville, J.-C. & Tillé, Y. (2005), ‘Variance approximation under balanced sampling’, *Journal of Statistical Planning and Inference* **128**, 411–425.
- Durbin, J. (1967), ‘Design of multi-stage surveys for the estimation of sampling errors’, *Applied statistics* **16**, 152–164.
- Fan, C., Muller, M. & Rezucha, I. (1962), ‘Development of sampling plans by using sequential (item by item) selection techniques and digital computer’, *Journal of the American Statistical Association* **57**, 387–402.
- Frankel, M. & King, B. (1996), ‘A conversation with leslie kish’, *Statistical Science* **11**, 65–87.

- Groves, R., Fowler, F., Couper, M., Lepkowski, J., Singer, E. & R., T. (2004), *Survey Methodology*, Wiley.
- Hájek, J. (1960), 'Limiting distributions in simple random sampling from a finite population', *Publication of Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Science* **5**, 361–374.
- Hájek, J. (1971), 'Comment on an essay on the logical foundations of survey sampling, part one', *The Foundations of Survey Sampling* pp. Godambe, V.P. and Sprott, D.A. eds., 236, Holt, Rinehart, and Winston.
- Hájek, J. (1981), *Sampling from a finite population*, New York: Marcel Dekker.
- Hansen, H. M. & Hurwitz, W. N. (1943), 'On the theory of sampling from finite populations', *Annals of Mathematical Statistics* **14**, 333–362.
- Hansen, M., Hurwitz, W. & Madow, W. G. (1953), *Sample survey methods and theory. Vols. I and II*, John Wiley and Sons.
- Hartley (1959), 'Analytic studies of survey data', *Instituto di Statistica Volume in honor of Corrado Gini*.
- Horvitz, D. & Thompson, D. (1952), 'A generalization of sampling without replacement from a finite universe', *Journal of the American Statistical Association* **47**, 663–685.
- Kish, L. (1965), *Survey Sampling*, Wiley.
- Lahiri, D. (1951), 'A method for sample selection providing unbiased ration estimates', *Bulletin of the International Statistical Institute*. **33,2**, 133–140.
- Lehtonen, R. & Pahkinen, E. (2003), *Practical methods for design and analysis of complex surveys*, 2 edn, New York: Wiley.
- Lohr, S. (2000), *Sampling: Design and Analysis*, Thompson.
- Mahalanobis, P. (1946), 'Recent experiment in statistical sampling in the Indian statistical institute', *Journal of the Royal Statistical Society* **109**, 325–370.
- Matei, A. & Tille, Y. (2005), 'Evaluation of variance approximations and estimators in maximum entropy sampling with unequal probability and fixed sample size', *Journal of Official Statistics*. **4**, 543–570.
- Mood, A. M., Graybill, F. A. & Boes, D. C. (1974), *Introduction to the Theory of Statistics*, 3 edn, McGraw Hill.
- Narain, R. (1951), 'On sampling without replacement with varying probabilities', *Journal of Indian Society of Agricultural Statistics* **3**, 169–175.
- Ospina, D. (2001), *Introducción al muestreo.*, Universidad Nacional de Colombia.
- Raj, D. (1954), 'On sampling with probabilities proportional to size', *Ganita* **5**, 175–182.
- Raj, D. (1968), *Sampling theory*, McGraw Hill.
- Sampath, S. (2001), *Sampling Theory and Methods*, Narosa Publishing House.
- Särndal, C., Swensson, B. & Wretman, J. (1992), *Model Assisted Survey Sampling*, Springer, New York.
- Sen, A. (1953), 'On the estimate of the variance in sampling with varying probabilities', *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics* **5**, 119–127.

- Srinath, K. P. & Hidirolou, M. A. (1980), 'Estimation of variance in multi-stage sampling', *Metrika* **27**, 121–125.
- Sunter, A. (1977), 'List sequential sampling with equal or unequal probabilities without replacement', *Applied Statistics* **26**, 261–268.
- Sunter, A. (1986), 'Solutions to the problem of unequal probabilities sampling without replacement', *International Statistical Review* **54**, 33–50.
- Tillé, Y. (2006), *Sampling Algorithms*, Springer.
- Valliant, R., Dorfman, A. H. & Royall, R. M. (2000), *Finite Population Sampling and Inference*, Wiley.
- Wu, C. (2003), 'Optimal calibration estimators in survey sampling', *Biometrika* **90**, 937–951.
- Yates, F. & Grundy, P. (1953), 'Selecting without replacement from within strata with probability proportional to size', *Journal of the Royal Statistical Society* **B15**, 235–261.



# Índice de figuras

1.1	<i>Boxplot de las características de interés en cada nivel industrial.</i>	11
1.2	<i>Boxplot de las características de interés en cada nivel industrial.</i>	12
1.3	<i>Histograma de las características de interés.</i>	13
1.4	<i>Relación entre las características de interés.</i>	14
3.1	<i>Distribución de la característica <b>Income</b> y su posible modelamiento bajo la distribución gamma.</i>	73
3.2	<i>Distribución de la característica <b>Income</b> y su posible modelamiento bajo la distribución gamma (izquierda) y norma (derecha).</i>	84
3.3	<i>Distribución empírica del estimador de Hansen-Hurwartz para el diseño de muestreo aleatorio simple con reemplazo.</i>	92
3.4	<i>Casos de ordenamiento en muestreo sistemático.</i>	98
3.5	<i>Distribución de la característica <b>Income</b> con respecto a los grupos creados en el muestreo sistemático.</i>	105
3.6	<i>Casos seleccionados en muestreo sistemático.</i>	106
4.1	<i>Correlación de las probabilidades de inclusión con las características de interés.</i>	118
4.2	<i>Comportamiento del cociente de la información auxiliar con las características de interés.</i>	128
4.3	<i>Líneas de regresión.</i>	130
5.1	<i>Boxplot de las características de interés en cada nivel industrial.</i>	169
5.2	<i>Relación entre <b>Income</b> y <b>Taxes</b>.</i>	179
6.1	<i>Boxplot de la característica de interés <b>Employees</b> para cada una de las zonas.</i>	200
6.2	<i>Boxplot de las características de interés en cada nivel industrial.</i>	202



# Índice de Tablas

1.1	Parámetros de la población . . . . .	14
1.2	Parámetros de la población discriminados . . . . .	15
1.3	Parámetros de la población discriminados . . . . .	15
1.4	Parámetros de la población discriminados a dos vías . . . . .	15
2.1	Estimación para todas las posibles muestras del ejemplo . . . . .	41
2.2	Todas las posibles muestras con reemplazo para el ejercicio . . . . .	47
2.3	<i>Estimaciones de Hansen-Hurwitz para todas las posibles muestras del ejemplo</i> . . . . .	53
3.1	<i>Estimaciones para el diseño de muestreo aleatorio simple sin reemplazo</i> . . . . .	75
3.2	<i>Estimaciones para el diseño de muestreo aleatorio simple en el dominio que no envía SPAM</i> . . . . .	76
3.3	<i>Estimaciones para el diseño de muestreo aleatorio simple en el dominio que sí envía SPAM</i> . . . . .	76
3.4	<i>Estimaciones para el diseño de muestreo Bernoulli</i> . . . . .	83
3.5	<i>Estimaciones para el diseño de muestreo aleatorio simple con reemplazo</i> . . . . .	91
3.6	Posible configuración del muestreo sistemático . . . . .	93
3.7	Configuración de totales por grupo . . . . .	96
3.8	Tabla de ANOVA inducida por el muestreo sistemático . . . . .	99
3.9	<i>Estimaciones para el diseño de muestreo sistemático</i> . . . . .	103
4.1	<i>Estimaciones para el diseño de muestreo Poisson</i> . . . . .	119
4.2	<i>Muestreo PPT: estimación de los totales de las características de interés.</i> . . . . .	131
4.3	Diseño de mínimo soporte para la población $U$ . . . . .	142
4.4	<i>Muestreo piPT: estimación de los totales de las características de interés</i> . . . . .	145
5.1	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación del tamaño de los estratos y de la población.</i> . . . . .	172
5.2	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica <b>Income</b> para cada uno de los estratos y para la población.</i> . . . . .	172
5.3	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica <b>Employees</b> para cada uno de los estratos y para la población.</i> . . . . .	172

5.4	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica <b>Taxes</b> para cada uno de los estratos y para la población.</i>	172
5.5	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación de los tamaños para cada uno de los estratos y para la toda población.</i>	173
5.6	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación de los tamaños del dominio <b>SPAM.no</b> para cada uno de los estratos y para la toda población.</i>	173
5.7	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación de los tamaños del dominio <b>SPAM.si</b> para cada uno de los estratos y para la toda población.</i>	173
5.8	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica <b>Income</b> para el dominio <b>SPAM.no</b> en cada uno de los estratos y para toda la población.</i>	174
5.9	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica <b>Employees</b> para el dominio <b>SPAM.no</b> en cada uno de los estratos y para toda la población.</i>	174
5.10	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica <b>Taxes</b> para el dominio <b>SPAM.no</b> en cada uno de los estratos y para toda la población.</i>	174
5.11	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica <b>Income</b> para el dominio <b>SPAM.si</b> en cada uno de los estratos y para toda la población.</i>	174
5.12	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica <b>Employees</b> para el dominio <b>SPAM.si</b> en cada uno de los estratos y para toda la población.</i>	175
5.13	<i>Muestreo aleatorio estratificado: estimación del total de la característica <b>Taxes</b> para el dominio <b>SPAM.si</b> en cada uno de los estratos y para toda la población.</i>	175
5.14	<i>Estimación del tamaño de muestra</i>	176
5.15	<i>Muestreo estratificado PPT: estimación del tamaño de los estratos y de la población.</i>	180
5.16	<i>Muestreo estratificado PPT: estimación del total de la característica <b>Income</b> para cada uno de los estratos y para la población.</i>	181
5.17	<i>Muestreo estratificado PPT: estimación del total de la característica <b>Employees</b> para cada uno de los estratos y para la población.</i>	181
5.18	<i>Muestreo estratificado PPT: estimación del total de la característica <b>Taxes</b> para cada uno de los estratos y para la población.</i>	181
5.19	<i>Muestreo estratificado PPT: estimación de totales</i>	181
6.1	<i>Estimaciones para todas las posibles muestras del ejemplo.</i>	191
6.2	<i>Tabla de ANOVA por conglomerados</i>	197
6.3	<i>Estimaciones para el diseño de muestreo aleatorio simple de conglomerados.</i>	202
6.4	<i>Tabla de las cinco manzanas seleccionadas: ejercicio 6.2</i>	203
7.1	<i>Estimaciones para el diseño de muestreo aleatorio simple en dos etapas.</i>	225
7.2	<i>Ingreso de cada persona para el ejercicio 7.3</i>	231



# Índice alfabético

- Algoritmo acumulativo total, 121
- Algoritmo de escisión, 139
- Algoritmo de Lahiri, 121
- Algoritmo de selección de  $\pi$ PT, 135
- Algoritmo de selección de Brewer, 136, 137
- Algoritmo de selección enumerativo, 24
- Algoritmo de selección y rechazo, 61
- Algoritmo de Sunter, 137
- Algoritmo secuencial, 86
- Algoritmos de selección, 23, 60, 78, 86, 93, 113, 121, 155, 177, 194, 217
- Asignación óptima, 163
- Asignación de Neyman, 161
- Asignación proporcional, 160, 161
  
- Característica de interés, 27
- Coficiente de correlación intra-clase, 99
- Conglomerado, 3, 101
- Covarianza, 29
- Cuantil, 37
  
- Descomposición de la varianza, 97
- Diseño de muestreo, 22, 23
- Diseño de muestreo  $\pi$ PT, 132, 143
- Diseño de muestreo aleatorio con reemplazo, 83
- Diseño de muestreo aleatorio de conglomerados, 194
- Diseño de muestreo aleatorio estratificado, 155
- Diseño de muestreo aleatorio simple, 60, 84
- Diseño de muestreo aleatorio sin reemplazo, 60
- Diseño de muestreo Bernoulli, 77, 78
- Diseño de muestreo con probabilidad proporcional, 120
- Diseño de muestreo con reemplazo, 42, 193
- Diseño de muestreo de conglomerados, 185
- Diseño de muestreo de Poisson, 111, 112, 114
- Diseño de muestreo en dos etapas, 206
- Diseño de muestreo en dos etapas estratificado, 226
- Diseño de muestreo estratificado, 152, 153
- Diseño de muestreo estratificado PPT, 176
- Diseño de muestreo MAS-MAS, 216
- Diseño de muestreo PPT, 119
  
- Diseño de muestreo sistemático, 91, 93
- Diseño de muestreo sistemático con  $q$  réplicas, 100
- Diseño en  $r$  etapas, 227
- Diseños auto-ponderados, 227
- Dominio, 65, 68
  
- Efecto de diseño, 81, 91, 167
- Eficiencia de la estrategia, 125, 196
- Elemento, 3
- Elemento repetido, 19
- Encuesta, 2
- Esperanza de una muestra, 24
- Estadística, 28
- Estimación de la media poblacional, 159
- Estimación de la varianza, 36, 51, 142, 220
- Estimación en dominios, 67, 69, 70, 164–166
- Estimador, 28, 33
- Estimador de Hansen-Hurwitz, 41
- Estimador de Horvitz-Thompson, 34
- Estimador de la media poblacional, 65
- Estimador de Narain-Horvitz-Thompson, 34
- Estimador del total poblacional, 34, 47
- Estrategia de muestreo, 33, 96
  
- Función indicatriz del dominio, 68
  
- Información auxiliar, 4
- Intervalo de confianza, 37, 160
  
- Marco de muestreo, 3
- Marco y Lucy, 7, 71, 82, 89, 102, 116, 126, 144, 168, 178, 198, 222
- Muestra aleatoria, 17, 18
- Muestra con reemplazo, 18
- Muestra probabilística, 21
- Muestra sin reemplazo, 18
- Muestras representativas, 55
- Muestreo con reemplazo, 41
- Muestreo estratificado, 150
  
- Parámetro de interés, 27
- Parámetros diferentes al total, 38, 191
- Población, 17

- Población finita, 17
- Población objetivo, 4
- Probabilidad de inclusión, 24, 77, 187
- Probabilidad de inclusión de segundo orden, 25
- Probabilidad de selección, 2, 23
  
- R, 8
- Rótulo, 22
  
- Selección de muestras, 137
- Soporte, 19
- Soporte mínimo, 140
- Soporte simétrico, 19
- Soportes de muestreo, 19
- Submuestra, 205
  
- Tamaño de muestra, 29, 65, 71, 135, 160, 170, 196,  
218
  
- Unidad primaria de muestreo, 206
  
- Variable aleatoria  $I_k(S)$ , 28
- Variable aleatoria  $n_k(S)$ , 42
- Variable aleatoria  $Z_i$ , 48
- Variable auxiliar, 137
- Varianza del estimador de Hansen-Hurwitz, 50
- Varianza del estimador de Horvitz-Thompson, 35