

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE ING. ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA
ESCUELA PROFESIONAL DE ING. ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA



PROGRAMACIÓN NUMÉRICA

iDOCENTE:

Dr. TORRES CRUZ FRED

iALUMNOS:

- AGUILAR CCOPA LEYDI GRISELDA
- PARICAHUA PARI CLIDE NEIL
- TICONA MIRAMIRA ROBERTO ANGEL

iSECCIÓN:

"IV SEMESTRE - A"

PUNO - PERÚ

2025

Introducción

La programación numérica es una rama fundamental dentro de las ciencias computacionales y aplicadas, cuyo objetivo es proporcionar métodos y herramientas para resolver problemas matemáticos mediante el uso de algoritmos y programas informáticos. A través de ella, es posible aproximar soluciones a ecuaciones que no pueden resolverse de forma analítica, optimizar funciones complejas, y analizar sistemas dinámicos en diversas áreas del conocimiento.

El propósito de este libro es introducir al lector en los principios y aplicaciones prácticas de la programación numérica, utilizando lenguajes de programación de propósito científico como Python y R. A lo largo de los capítulos, se desarrollan los fundamentos teóricos y computacionales necesarios para comprender los métodos numéricos más empleados en ingeniería, física, economía y nutrición, entre otros campos.

En la primera unidad, se abordarán los conceptos básicos de la programación numérica, la definición de funciones matemáticas y sus restricciones, así como los métodos clásicos para el encontrar raíces de ecuaciones no lineales, tales como el método de bisección, el método de Newton-Raphson y el método de la secante. Estos métodos serán implementados paso a paso en código, permitiendo observar su comportamiento, eficiencia y convergencia.

En la segunda unidad, se explorarán métodos más avanzados, entre ellos el gradiente descendente y sus aplicaciones en optimización, la interpolación polinómica como técnica para aproximar funciones a partir de datos discretos, y la diferenciación numérica, que permite estimar derivadas de funciones cuando no se dispone de una expresión analítica. Cada tema será acompañado de ejemplos prácticos y ejercicios que ayudarán a reforzar la comprensión teórica mediante la experimentación computacional.

Además, se presentarán recomendaciones sobre buenas prácticas en la escritura de código científico, el uso eficiente de librerías numéricas, y la validación de resultados mediante análisis de error. El enfoque de este libro combina la precisión matemática con la aplicación práctica, fomentando el desarrollo de habilidades analíticas y computacionales en el lector.

En conjunto, este material busca no solo enseñar los fundamentos de la programación numérica, sino también promover un pensamiento crítico y estructurado al enfrentar problemas reales que requieren soluciones computacionales.

Índice general

Introducción	3
Índice de Figuras	12
I Unidad I	13
1. Programación Numérica	15
1.1. Ejemplo	15
2. Funciones	21
2.1. Funciones a nuestro alrededor	21
2.2. Definición de función	21
2.3. Cuatro formas de representar una función	22
2.4. Gráficas de funciones	23
2.4.1. Gráficas de funciones por localización de puntos	23
2.4.2. La prueba de la recta vertical	24
2.5. Aplicación	25
2.6. Aplicación 2	26
3. Restricciones	31
3.1. Ejemplo 1	31
3.2. Ejemplo 2	34
3.3. Ejemplo 3	37
3.4. Ejemplo 4	40
3.5. Ejemplo 5	42
4. Método de Newton Raphson	45

4.1. Fundamento teórico	45
4.2. Condiciones de convergencia	45
4.3. Criterio de parada	46
4.4. Algoritmo del método de Newton-Raphson	46
4.5. Aplicación del método en Python	46
5. Método de Bisección	51
5.1. Idea fundamental del método	51
5.2. Criterios de parada	51
5.3. Ventajas del método	52
5.4. Desventajas	52
5.5. Aplicación del método en Python	52
6. Método de la Secante	57
6.1. Fundamento teórico	57
6.2. Interpretación geométrica	57
6.3. Convergencia	58
6.4. Ventajas y limitaciones	58
6.5. Aplicación del método en Python	58
7. Método de Punto Fijo	63
7.1. Definición y formulación básica	63
7.2. Condición de convergencia	63
7.3. Orden de convergencia	64
7.4. Errores y criterios de parada	64
7.5. Ventajas del método	64
7.6. Desventajas	65
7.7. Interpretación gráfica	65
7.8. Conclusión	65

7.9. Aplicación del método en Python	66
8. Método de Regula Falsi	71
8.1. Idea fundamental del método	71
8.2. Actualización del intervalo	71
8.3. Convergencia	72
8.4. Criterios de parada	72
8.5. Ventajas y desventajas	72
8.6. Resumen conceptual	73
8.7. Aplicación del método en Python	73
II Unidad II	77
9. Gradiente de una función	79
9.1. Definición	79
9.2. Interpretación geométrica	79
9.3. Derivada direccional	80
9.4. Propiedades fundamentales	80
9.5. Gradiente y optimización	80
9.6. Aplicaciones	81
9.6.1. Física clásica y electromagnetismo.	81
9.6.2. Ingeniería y modelado.	81
9.6.3. Aprendizaje automático y regresión.	81
9.6.4. Economía y análisis de funciones multivariadas.	81
9.6.5. Métodos numéricos.	81
9.7. Aplicación de la gradiente en R	82
9.8. Aplicación de la gradiente en un artículo de investigación	85
10. Diferenciación Numérica	87
10.1. Introducción	87

10.2. Fundamento teórico	87
10.2.1. Series de Taylor	87
10.3. Fórmulas de diferencias finitas	87
10.3.1. Diferencia hacia adelante	87
10.3.2. Diferencia hacia atrás	88
10.3.3. Diferencia centrada	88
10.4. Aproximaciones para derivadas de orden superior	88
10.4.1. Segunda derivada	88
10.4.2. Derivadas superiores	89
10.5. Análisis del error	89
10.5.1. Error de truncamiento	89
10.5.2. Error de redondeo	89
10.6. Aplicaciones de la diferenciación numérica	89
10.6.1. Solución de ecuaciones diferenciales	90
10.6.2. Optimización	90
10.6.3. Procesamiento de datos y señales	90
10.7. Ejemplos	90
10.7.1. Ejemplo 1	90
10.7.2. Ejemplo 2	94
10.7.3. Ejemplo 3	100
10.7.4. Ejemplo 4	106
10.7.5. Ejemplo 5	112
10.7.6. Ejemplo 6	117
10.7.7. Ejemplo 7	122
10.8. Conclusiones	127
11. Interpolación	129
11.1. Introducción	129

11.2. Fundamentos teóricos	129
11.2.1. Definición del problema	129
11.3. Interpolación polinómica	129
11.3.1. Polinomio interpolante	129
11.4. Método de interpolación de Lagrange	130
11.4.1. Polinomio de Lagrange	130
11.4.2. Error en el polinomio de Lagrange	130
11.5. Interpolación por diferencias divididas de Newton	130
11.5.1. Diferencias divididas	130
11.5.2. Polinomio de Newton	131
11.5.3. Error del polinomio de Newton	131
11.6. Problemas del polinomio global	131
11.6.1. Fenómeno de Runge	131
11.6.2. Crecimiento del error para grados altos	131
11.7. Interpolación por tramos: splines	132
11.7.1. Concepto de spline	132
11.7.2. Spline cúbico	132
11.8. Aplicaciones de la interpolación	132
11.9. Conclusiones	133
12. Valores y Vectores Propios	135
12.1. ¿Qué son y por qué importan?	135
12.2. La transformación fundamental	135
12.3. Proceso de cálculo	136
12.3.1. Paso 1: La ecuación característica	137
12.3.2. Paso 2: Cálculo de los valores propios (λ)	137
12.3.3. Paso 3: Cálculo de los vectores propios (\mathbf{v})	138
12.4. Ejemplo guiado	138

12.5. Propiedades y diagonalización	139
12.5.1. Independencia lineal	140
12.5.2. El teorema de diagonalización	140
12.5.3. Aplicación: Potencia de matrices	140
12.6. Implementación en R	141
12.6.1. Explicación del código	141
12.6.2. Visualización de resultados	142
12.7. Eigenvalues y eigenvectores aplicados	142
III Apéndice	157
13. Índice H	159
13.1. Autores con índice H con investigaciones en métodos numéricos	159
13.2. Índice H de docentes de la Facultad de Ingeniería Estadística e Informática	160
14. El problema de los caramelos	161
15. Aplicación del algoritmo Demons	167
Conclusiones	171
Bibliografía	173

Índice de figuras

1.1.	Analizador de funciones	16
1.2.	Analizador de funciones con Tkinter	20
2.1.	Diagrama de flechas de f	22
2.2.	Cuatro formas de representar una función	23
2.3.	La altura de la gráfica arriba del punto x es el valor de $f(x)$	24
2.4.	Funciones lineal y constante	24
2.5.	Prueba de la recta vertical	25
2.6.	Graficar funciones	26
2.7.	Graficar 2 funciones lineales	27
2.8.	Graficador de 2 funciones lineales con Tkinter	30
3.1.	Aplicación de restricciones 1 en Python	32
3.2.	Aplicación de restricciones 2 en Python	35
3.3.	Aplicación de restricciones 3 en Python	38
3.4.	Aplicación de restricciones 4 en Python	40
3.5.	Aplicación de restricciones 5 en Python	42
4.1.	Método de Newthon-Rapshon en Python	49
5.1.	Método de Bisección en Python	56
6.1.	Método de la Secante en Python	61
7.1.	Método de Punto Fijo en Python	69
8.1.	Método de Regula Falsi en Python	76
9.1.	Gradiente de una función en R	84

12.1. Comparación de transformaciones. A la izquierda, un vector común cambia de dirección. A la derecha, un vector propio mantiene su dirección, solo cambia su longitud.	136
12.2. Salida de la consola en R mostrando los valores propios y la matriz resultante \mathbf{A}^{20}	142
12.3. Matriz de transición inicial - Flujo de pacientes y dietas hospitalarias	147
12.4. Matriz de transición con intervención - Fortalecimiento de Medicina Interna	147
12.5. Eigenvalores de la matriz de transición modificada	150
12.6. Distribución estacionaria de pacientes (Equilibrio a largo plazo)	153
14.1. El problema de los caramelos	165

Parte I

Unidad I

1 Programación Numérica

La programación numérica es una disciplina que combina las matemáticas aplicadas y la informática con el objetivo de resolver problemas cuantitativos mediante métodos computacionales. Se centra en el diseño, análisis e implementación de algoritmos que permiten obtener soluciones aproximadas a ecuaciones, sistemas y modelos que, en la mayoría de los casos, no pueden resolverse de forma analítica (Burden et al., 2016; Chapra & Canale, 2015).

A diferencia de la programación convencional, que busca desarrollar aplicaciones funcionales o sistemas de información, la programación numérica se orienta a la resolución eficiente y precisa de problemas matemáticos. Entre sus principales aplicaciones se encuentran la simulación de fenómenos físicos y biológicos, la modelización económica, la ingeniería de datos, la inteligencia artificial y el análisis estadístico en ciencias de la salud (Press et al., 2007).

El objetivo fundamental de esta área es transformar problemas continuos en representaciones discretas que puedan ser tratadas por un computador. De esta forma, se logra aproximar soluciones a problemas de optimización, integración, derivación, interpolación, ajuste de curvas y resolución de ecuaciones diferenciales.

En términos prácticos, la programación numérica permite al investigador o profesional:

- Resolver ecuaciones no lineales mediante métodos iterativos.
- Aproximar derivadas e integrales de funciones cuando no se dispone de una forma analítica.
- Interpolar o ajustar funciones a datos experimentales.
- Optimizar funciones de una o varias variables bajo restricciones.
- Analizar errores y estimar la estabilidad numérica de los métodos empleados.

Actualmente, lenguajes como Python, R, MATLAB y Julia ofrecen bibliotecas especializadas que facilitan el desarrollo de algoritmos numéricos de alto rendimiento. Estos entornos han hecho posible que la programación numérica sea una herramienta accesible y poderosa para la investigación científica, la ingeniería y la docencia (Chapra & Canale, 2015).

En síntesis, la programación numérica constituye una base esencial para la solución computacional de problemas científicos y técnicos, integrando el razonamiento matemático con la capacidad de cómputo moderna.

1.1 Ejemplo

Utilizando la programación numérica desarrollar una aplicación que permita analizar operaciones matemáticas (Identificador de funciones).

```

1 import re
2
3 def analizar_funcion(funcion):
4     funcion = funcion.replace(" ", "")
5     variables = sorted(set(re.findall(r'[a-zA-Z]', funcion)))
6     terminos = re.findall(r'[-+]?[a-zA-Z]?\^?\d*', funcion)
7     terminos = [t for t in terminos if t]
8     coeficientes = []
9     signos = []
10    for t in terminos:
11        if t.startswith('-'):
12            signos.append('-')
13        else:
14            signos.append('+')
15        c = re.findall(r'[-+]?\d+', t)
16        if c:
17            coef = int(c[0])
18        else:
19            coef = -1 if t.startswith('-') else 1
20        coeficientes.append(coef)
21    print(f"\n    Función ingresada: {funcion}")
22    print(f"    Variables encontradas: {variables}")
23    print(f"    Términos: {terminos}")
24    print(f"    Coeficientes: {coeficientes}")
25    print(f"    Signos: {signos}")
26
27 print("== ANALIZADOR DE FUNCIONES ALGEBRAICAS ==")
28 funcion = input("    Ingresa una función (ejemplo: 3x^2 - 4x + 7): ")
29 analizar_funcion(funcion)

```

```

== ANALIZADOR DE FUNCIONES ALGEBRAICAS ==
Ingresa una función (ejemplo: 3x^2 - 4x + 7): 3x^2 - 4x + 7

Función ingresada: 3x^2-4x+7
Variables encontradas: ['x']
Términos: ['3x^2', '-4x', '+7']
Coeficientes: [3, -4, 7]
Signos: ['+', '-', '+']

```

Figura 1.1: Analizador de funciones

Explicación

El problema se resolvió utilizando el lenguaje de programación Python y el módulo `re` (expresiones regulares), que permite analizar y extraer patrones dentro de una cadena de texto.

1. Limpieza de la función

```
funcion = funcion.replace(" ", "")
```

Se eliminan los espacios en blanco para facilitar el análisis de la expresión algebraica.

2. Identificación de variables

```
variables = sorted(set(re.findall(r'[a-zA-Z]', funcion)))
```

- Se usa una expresión regular para encontrar todas las letras.
- Se eliminan duplicados con `set`.
- Se ordenan alfabéticamente.

3. Separación de términos algebraicos

```
terminos = re.findall(r'[+-]?\d*[a-zA-Z]?\^?\d*', funcion)
terminos = [t for t in terminos if t]
```

Se extraen los términos considerando:

- Signo opcional (+ o -)
- Coeficiente numérico
- Variable
- Potencia (si existe)

4. Obtención de coeficientes y signos

```
for t in terminos:
    if t.startswith('-'):
        signos.append('-')
    else:
        signos.append('+')
```

Se determina el signo de cada término.

```
c = re.findall(r'[+-]?\d+', t)
if c:
    coef = int(c[0])
else:
    coef = -1 if t.startswith('-') else 1
```

- Si hay número explícito, se toma como coeficiente.

- Si no hay número, se asume 1 o -1.

5. Presentación de resultados

```
print(f"  Función ingresada: {funcion}")
print(f"  Variables encontradas: {variables}")
print(f"  Términos: {terminos}")
print(f"  Coeficientes: {coeficientes}")
print(f"  Signos: {signos}")
```

Objetivo del código

El objetivo principal de este programa es analizar una función algebraica ingresada por el usuario y extraer sus componentes fundamentales, específicamente:

- Identificar las variables presentes en la función.
- Separar la función en términos algebraicos.
- Determinar los coeficientes numéricos de cada término.
- Reconocer el signo (positivo o negativo) de cada término.

Este análisis es útil como paso previo en aplicaciones como:

- Simplificación de expresiones algebraicas.
- Derivación e integración simbólica.
- Clasificación de polinomios.
- Desarrollo de software educativo matemático.

Código en Python usando Tkinter

```
1 import re
2 import tkinter as tk
3 from tkinter import messagebox
4
5 def analizar_funcion():
6     funcion = entrada_funcion.get().replace(" ", " ")
7
8     if not funcion:
9         messagebox.showwarning("Advertencia", "Ingrese una función algebraica")
10    return
11
12 variables = sorted(set(re.findall(r'[a-zA-Z]', funcion)))
```

```
13 terminos = re.findall(r'[+-]?\d*[a-zA-Z]?[^?\d*]', funcion)
14 terminos = [t for t in terminos if t]
15
16 coeficientes = []
17 signos = []
18
19 for t in terminos:
20     if t.startswith('-'):
21         signos.append('-')
22     else:
23         signos.append('+')
24
25 c = re.findall(r'[+-]?\d+', t)
26 if c:
27     coef = int(c[0])
28 else:
29     coef = -1 if t.startswith('-') else 1
30
31 coeficientes.append(coef)
32
33 salida.config(state="normal")
34 salida.delete("1.0", tk.END)
35 salida.insert(tk.END, f"    Función ingresada: {funcion}\n")
36 salida.insert(tk.END, f"    Variables encontradas: {variables}\n")
37 salida.insert(tk.END, f"    Términos: {terminos}\n")
38 salida.insert(tk.END, f"    Coeficientes: {coeficientes}\n")
39 salida.insert(tk.END, f"    Signos: {signos}\n")
40 salida.config(state="disabled")
41
42 ventana = tk.Tk()
43 ventana.title("Analizador de Funciones Algebraicas")
44 ventana.geometry("500x400")
45 ventana.resizable(False, False)
46
47 titulo = tk.Label(
48     ventana,
49     text="ANALIZADOR DE FUNCIONES ALGEBRAICAS",
50     font=("Arial", 14, "bold")
51 )
52 titulo.pack(pady=10)
53
54 label_funcion = tk.Label(
55     ventana,
56     text="Ingrese la función (ejemplo: 3x^2 - 4x + 7):"
57 )
58 label_funcion.pack()
59
60 entrada_funcion = tk.Entry(
61     ventana,
62     width=40,
63     font=("Arial", 12)
64 )
```

```
65 entrada_funcion.pack(pady=5)
66
67 boton = tk.Button(
68 ventana,
69 text="Analizar función",
70 font=("Arial", 11),
71 command=analizar_funcion
72 )
73 boton.pack(pady=10)
74
75 salida = tk.Text(
76 ventana,
77 height=10,
78 width=55,
79 state="disabled",
80 font=("Consolas", 10)
81 )
82 salida.pack(pady=10)
83
84 ventana.mainloop()
```

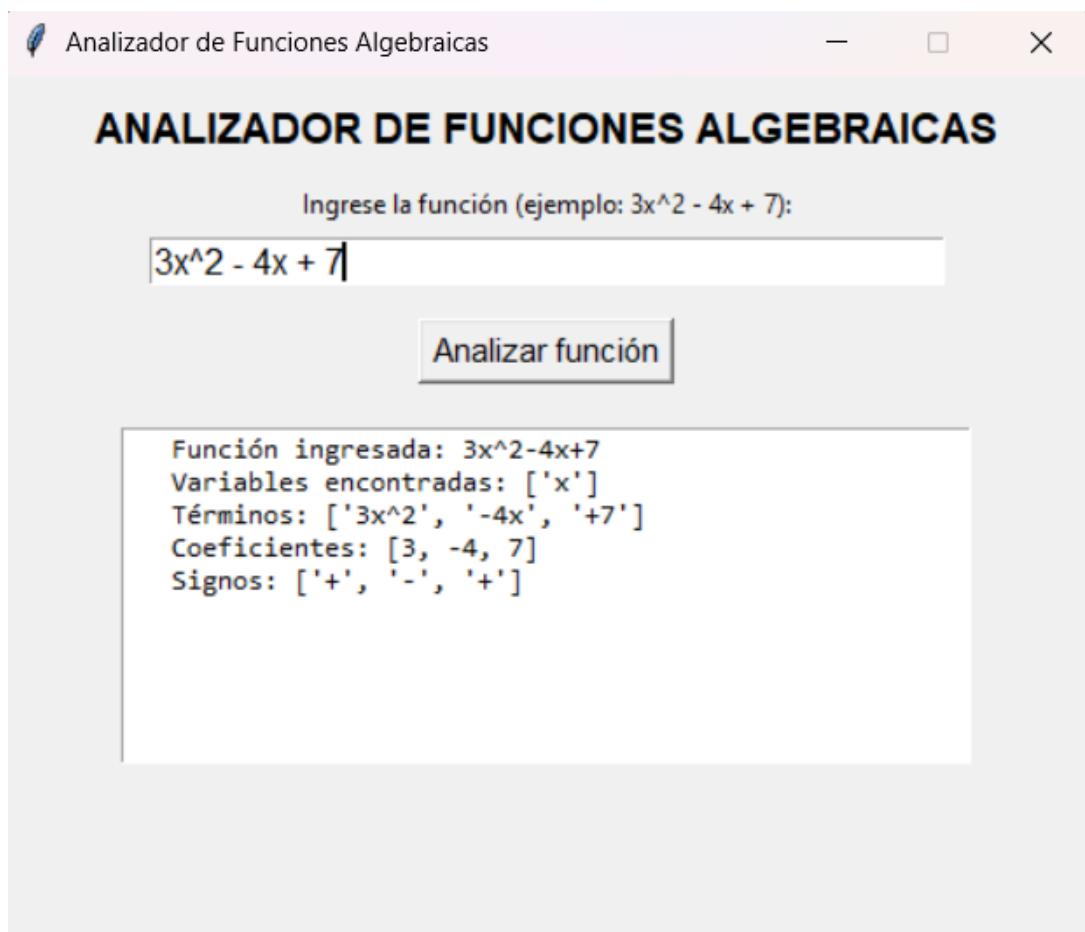


Figura 1.2: Analizador de funciones con Tkinter

2 Funciones

2.1 Funciones a nuestro alrededor

En casi todos los fenómenos físicos observamos que una cantidad depende de otra. Por ejemplo, la estatura de una persona depende de su edad, la temperatura de la fecha, el costo de enviar un paquete por correo depende de su peso. Usamos el término función para describir esta dependencia de una cantidad con respecto a otra. Esto es, decimos lo siguiente: (Stewart et al., 2001)

- La estatura es una función de la edad.
- La temperatura es una función de la fecha.
- El costo de enviar un paquete por correo depende de su peso.

2.2 Definición de función

Una función f es una regla que asigna a cada elemento x de un conjunto A exactamente un elemento, llamado $f(x)$, de un conjunto B.

Para hablar de una función, es necesario darle un nombre. Usaremos letras como f, g, h, \dots para representar funciones. Por ejemplo, podemos usar la letra f para representar una regla como sigue:

” f ” es la regla ”elevar al cuadrado el número”

cuando escribimos $f(2)$ queremos decir ”aplicar la regla f al número 2”. La aplicación de la regla da $f(2) = 2^2 = 4$. Del mismo modo, $f(3) = 3^2 = 9$, $f(4) = 4^2 = 16$, y en general $f(x) = x^2$. (Stewart et al., 2001)

Por lo general consideramos funciones para las cuales los conjuntos A y B son conjuntos de número reales. El símbolo $f(x)$ se lee ” f de x ” o ” f en x ” y se denomina valor de f en x , o la imagen de x bajo f . El conjunto A recibe el nombre de dominio de la función. El rango de f es el conjunto de todos los valores posibles de $f(x)$ cuando x varía en todo el dominio. El símbolo que representa un número arbitrario del dominio de una función f se llama variable independiente. El símbolo que representa un número en el rango de f se llama variable dependiente. Por tanto, si escribimos $y = f(x)$, entonces x es la variable independiente y y es la variable dependiente. (Stewart et al., 2001)

Es útil considerar una función como una **máquina**. Si x está en el dominio de la función f , entonces cuando x entra a la máquina, es aceptada como entrada y la máquina produce una salida $f(x)$ de acuerdo con la regla de la función. Así, podemos considerar el dominio como el conjunto de todas las posibles entradas y el rango como el conjunto de todas las posibles salidas. (Stewart et al., 2001)

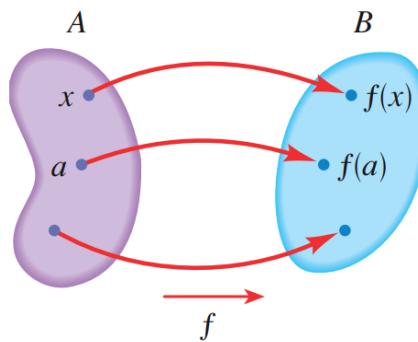


Figura 2.1: Diagrama de flechas de f

2.3 Cuatro formas de representar una función

Para entender mejor lo que es una función, podemos describir una función específica en las siguientes cuatro formas: (Stewart et al., 2016)

- verbalmente (por descripción en palabras)
- algebraicamente (por una fórmula explícita)
- visualmente (por una gráfica)
- numéricamente (por una tabla de valores)

Una función individual puede estar representada en las cuatro formas, y con frecuencia es útil pasar de una representación a otra para adquirir más conocimientos sobre la función. No obstante, ciertas funciones se describen en forma más natural por medio de un método que por los otros. Un ejemplo de una descripción verbal es la siguiente regla para convertir entre escalas de temperatura: (Stewart et al., 2016)

"Para hallar el equivalente Fahrenheit de una temperatura Celsius, multiplicar por $\frac{9}{5}$ la temperatura Celsius y luego sumar 32"

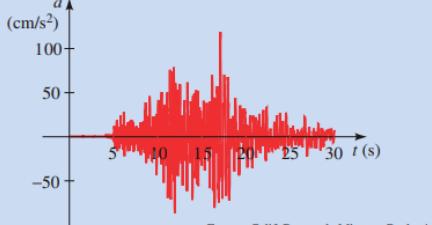
<p>Verbal</p> <p>Con palabras:</p> <p>$P(t)$ es la “población del mundo en el instante t”</p> <p>Relación de la población P y el tiempo t</p>	<p>Algebraica</p> <p>Por medio de una fórmula:</p> $A(r) = \pi r^2$ <p>Área de un círculo</p>														
<p>Visual</p> <p>Por medio de una gráfica:</p>  <p>Fuente: Calif. Depto. de Minas y Geología</p> <p>Aceleración vertical durante un terremoto</p>	<p>Numérica</p> <p>Por medio de una tabla de valores:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>w (onzas)</th> <th>$C(w)$ (dólares)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$0 < w \leq 1$</td> <td>0.37</td> </tr> <tr> <td>$1 < w \leq 2$</td> <td>0.60</td> </tr> <tr> <td>$2 < w \leq 3$</td> <td>0.83</td> </tr> <tr> <td>$3 < w \leq 4$</td> <td>1.06</td> </tr> <tr> <td>$4 < w \leq 5$</td> <td>1.29</td> </tr> <tr> <td>⋮</td> <td>⋮</td> </tr> </tbody> </table> <p>Costo de enviar una carta por correo de primera clase</p>	w (onzas)	$C(w)$ (dólares)	$0 < w \leq 1$	0.37	$1 < w \leq 2$	0.60	$2 < w \leq 3$	0.83	$3 < w \leq 4$	1.06	$4 < w \leq 5$	1.29	⋮	⋮
w (onzas)	$C(w)$ (dólares)														
$0 < w \leq 1$	0.37														
$1 < w \leq 2$	0.60														
$2 < w \leq 3$	0.83														
$3 < w \leq 4$	1.06														
$4 < w \leq 5$	1.29														
⋮	⋮														

Figura 2.2: Cuatro formas de representar una función

2.4 Gráficas de funciones

2.4.1 Gráficas de funciones por localización de puntos

Para graficar una función f localizamos los puntos $(x, f(x))$ en un plano de coordenadas. En otras palabras, localizamos los puntos (x, y) cuya coordenada x es una entrada y cuya coordenada y es la correspondiente salida de la función. (Stewart et al., 2016)

Si f es una función con dominio A , entonces la gráfica de f es el conjunto de pares ordenados

$$(x, f(x)) | x \in A$$

localizados en un plano de coordenadas. En otras palabras, la gráfica de f es el conjunto de todos los puntos (x, y) tales que $y = f(x)$; esto es, la gráfica de f es la gráfica de la ecuación $y = f(x)$.

La gráfica de una función f da un retrato del comportamiento o ”historia de la vida” de la función. Podemos leer el valor de $f(x)$ a partir de la gráfica como la altura de la gráfica arriba del punto x . (Stewart et al., 2016)

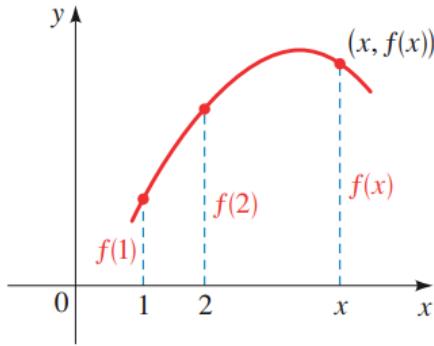


Figura 2.3: La altura de la gráfica arriba del punto x es el valor de $f(x)$

Una función f de la forma $f(x) = mx + b$ se denomina función lineal porque su gráfica es la gráfica de la ecuación $y = mx + b$, que representa una recta con pendiente m y punto de intersección b en y . Un caso especial de una función lineal se presenta cuando la pendiente es $m = 0$. La función $f(x) = b$, donde b es un número determinado, recibe el nombre de *función constante* porque todos sus valores son el mismo número, es decir, b . Su gráfica es la recta horizontal $y = b$. (Stewart et al., 2016)

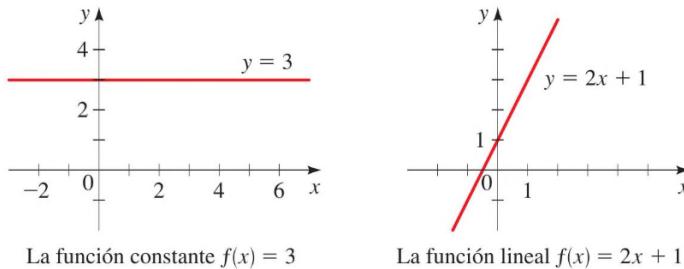


Figura 2.4: Funciones lineal y constante

2.4.2 La prueba de la recta vertical

La gráfica de una función es una curva en el plano xy . Pero surge la pregunta. ¿Cuáles curvas del plano xy son gráficas de funciones? Esto se contesta por medio de la prueba siguiente. (Stewart et al., 2016)

Una curva en el plano de coordenadas es la gráfica de una función si y sólo si ninguna recta vertical cruza la curva más de una vez.

Podemos ver la Figura 2.5 para entender por qué la Prueba de la Recta Vertical es verdadera. Si cada recta vertical $x = a$ cruza la curva sólo una vez en (a, b) , entonces exactamente un valor funcional está definido por $f(a) = b$. Pero si una recta $x = a$ cruza la curva dos veces, en (a, b) y en (a, c) , entonces la curva no puede representar una función porque una función no puede asignar dos valores diferentes a a .

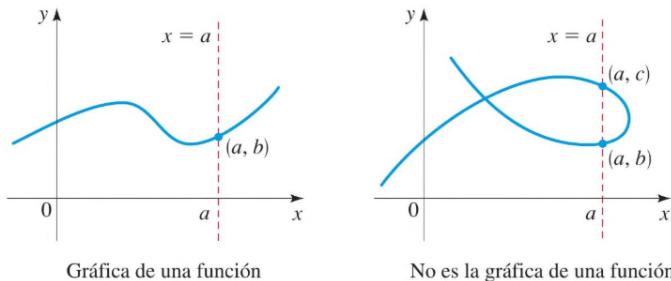


Figura 2.5: Prueba de la recta vertical

2.5 Aplicación 1

Se presentará un código en Python que sea capaz de graficar funciones, según los datos de entrada que se pidan.

```

1 import sympy as sp
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 # === Ingreso de la función por el usuario ===
6 expr_str = input("Ingrese la función en términos de x (ejemplo: sin(x), x**2 + 3*x
    ↪ - 5, exp(-x)*cos(x)): ")
7
8 # === Definición de variable simbólica ===
9 x = sp.Symbol('x')
10
11 # === Conversión del texto a expresión simbólica ===
12 try:
13     expr = sp.sympify(expr_str)
14 except sp.SympifyError:
15     print("Error: la función ingresada no es válida.")
16     exit()
17
18 # === Creación de función numérica evaluable ===
19 f = sp.lambdify(x, expr, modules=['numpy'])
20
21 # === Intervalo de graficación ===
22 x_vals = np.linspace(-10, 10, 400)
23 y_vals = f(x_vals)
24
25 # === Graficar ===
26 plt.figure(figsize=(7,5))
27 plt.plot(x_vals, y_vals, label=f"$f(x) = {sp.latex(expr)}$",
    color='navy')
28 plt.title("Gráfica de la función ingresada", fontsize=13)
29 plt.xlabel("x")
30 plt.ylabel("f(x)")
31 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
32 plt.axhline(0, color='black', linewidth=1)
33 plt.axvline(0, color='black', linewidth=1)
34 plt.legend()
35 plt.show()
```

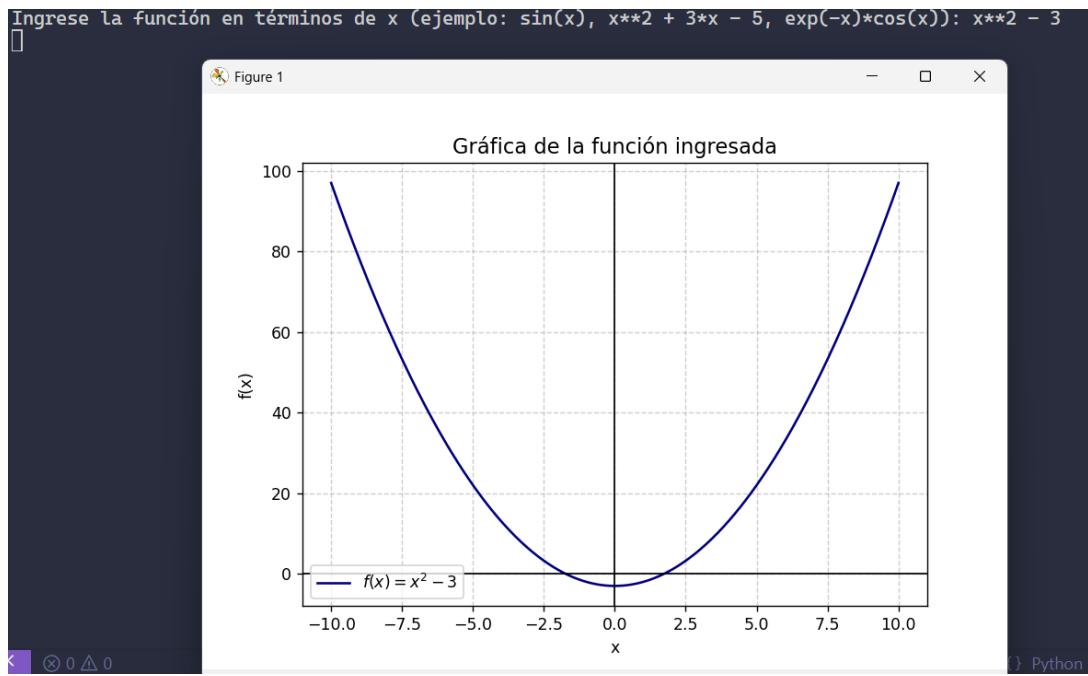


Figura 2.6: Graficar funciones

2.6 Aplicación 2

Se presentará un código en Python que sea capaz de graficar 2 funciones lineales.

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 x = np.linspace(-10, 10, 100)
5
6 y1 = 2 * x + 3
7 y2 = -1 * x + 5
8
9 plt.figure(figsize=(8, 6))
10 plt.plot(x, y1, label='f(x) = 2x + 3', color='blue', linewidth=2)
11 plt.plot(x, y2, label='f(x) = -x + 5', color='red', linewidth=2)
12
13 plt.title('Gráfico de dos funciones lineales')
14 plt.xlabel('Eje X')
15 plt.ylabel('Eje Y')
16 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
17 plt.legend()
18 plt.axhline(0, color='black', linewidth=1)
19 plt.axvline(0, color='black', linewidth=1)
20
21 plt.show()
```

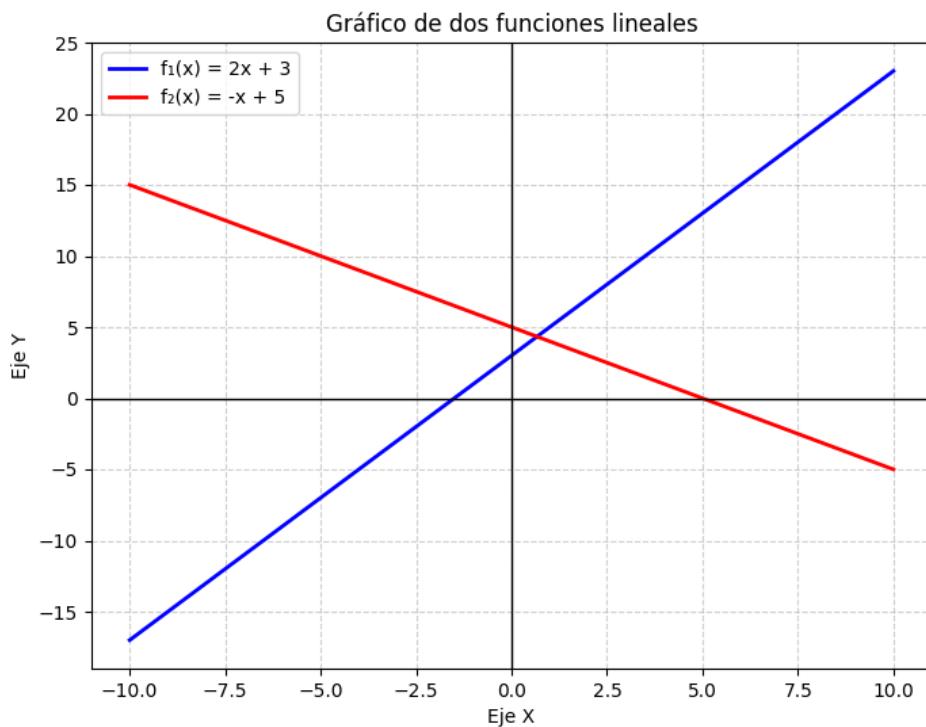


Figura 2.7: Graficar 2 funciones lineales

Explicación

1. Importación de librerías

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

NumPy se utiliza para crear arreglos numéricos y manejar datos de forma eficiente. Matplotlib permite generar gráficos científicos en dos dimensiones.

2. Definición del rango de valores

```
x = np.linspace(-10, 10, 100)
```

Se genera un arreglo de 100 valores equidistantes en el intervalo $[-10, 10]$. Estos valores representan el dominio sobre el cual se evaluarán las funciones.

3. Definición de las funciones lineales

Se definen dos funciones lineales:

- $f_1(x) = 2x + 3$: pendiente positiva, función creciente.

- $f_2(x) = -x + 5$: pendiente negativa, función decreciente.

Cada función se evalúa para todos los valores del arreglo x .

4. Creación del gráfico

```
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(x, y1, label='f (x) = 2x + 3', color='blue', linewidth=2)
plt.plot(x, y2, label='f (x) = -x + 5', color='red', linewidth=2)
```

Se crea una figura y se grafican ambas funciones con diferentes colores y etiquetas para distinguirlas visualmente.

5. Personalización del gráfico

```
plt.title('Gráfico de dos funciones lineales')
plt.xlabel('Eje X')
plt.ylabel('Eje Y')
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
plt.legend()
plt.axhline(0)
plt.axvline(0)
```

6. Visualización final

```
plt.show()
```

Objetivo del código

El objetivo del programa es representar gráficamente funciones lineales para analizar su comportamiento, permitiendo observar la pendiente, el crecimiento o decrecimiento y la intersección con los ejes coordenados.

Código en Python usando Tkinter

```
1 import tkinter as tk
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
5
6 def graficar():
7     x = np.linspace(-10, 10, 100)
8     y1 = 2 * x + 3
9     y2 = -1 * x + 5
10
11    fig, ax = plt.subplots(figsize=(6, 4))
```

```
12 ax.plot(x, y1, label=' f(x) = 2x + 3', linewidth=2)
13 ax.plot(x, y2, label=' f(x) = -x + 5', linewidth=2)
14
15 ax.set_title("Gráfico de dos funciones lineales")
16 ax.set_xlabel("Eje X")
17 ax.set_ylabel("Eje Y")
18 ax.axhline(0)
19 ax.axvline(0)
20 ax.grid(True)
21 ax.legend()
22
23 canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=ventana)
24 canvas.draw()
25 canvas.get_tk_widget().pack(pady=10)
26
27 ventana = tk.Tk()
28 ventana.title("Gráfico de funciones lineales")
29 ventana.geometry("700x500")
30
31 titulo = tk.Label(
32 ventana,
33 text="GRÁFICO DE FUNCIONES LINEALES",
34 font=("Arial", 14, "bold")
35 )
36 titulo.pack(pady=10)
37
38 boton = tk.Button(
39 ventana,
40 text="Mostrar gráfica",
41 font=("Arial", 11),
42 command=graficar
43 )
44 boton.pack(pady=5)
45
46 ventana.mainloop()
```

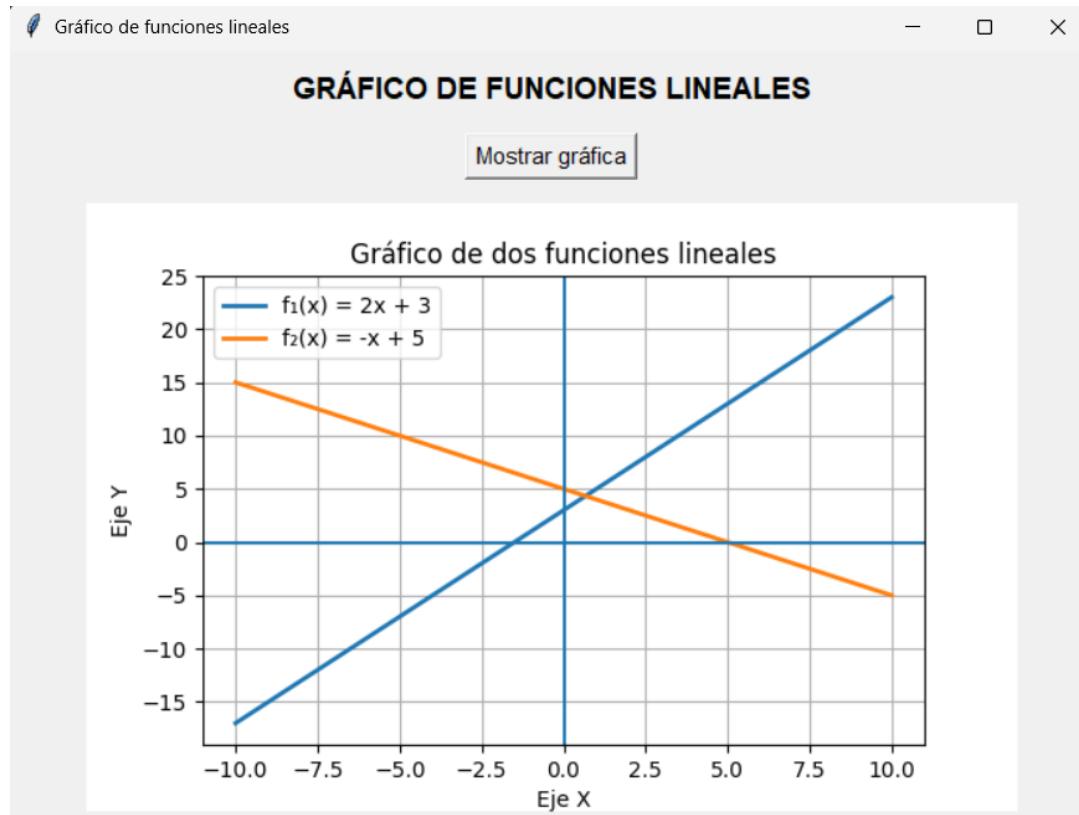


Figura 2.8: Graficador de 2 funciones lineales con Tkinter

3 Restricciones

Las restricciones son condiciones que limitan el conjunto de valores posibles que pueden tomar las variables en un problema matemático. Estas limitaciones definen el espacio factible o región factible, dentro del cual se busca una o más soluciones que cumplan con determinados criterios. Las restricciones pueden ser igualdades (por ejemplo, $x + y = 10$) o desigualdades (por ejemplo, $x \geq 0$), y desempeñan un papel fundamental en los problemas de optimización, programación lineal y análisis numérico. (Chapra & Canale, 2015)

Un sistema de ecuaciones consiste en un conjunto de ecuaciones que comparten las mismas variables. Resolverlo implica encontrar los valores que satisfacen todas las ecuaciones simultáneamente. Estos sistemas pueden clasificarse en lineales y no lineales, y sus métodos de resolución varían desde técnicas algebraicas clásicas (como la sustitución o igualación) hasta procedimientos numéricos avanzados (como el método de Gauss-Seidel o Newton-Raphson). (Chapra & Canale, 2015)

En el contexto de la programación numérica, las restricciones se representan y manipulan mediante código, permitiendo no solo resolver el sistema de ecuaciones sino también visualizar gráficamente la región factible y el punto óptimo. Esta representación es especialmente útil para comprender la interacción entre las ecuaciones y las limitaciones impuestas, facilitando el análisis y la toma de decisiones en problemas aplicados de ingeniería, economía y ciencias computacionales. (Chapra & Canale, 2015)

3.1 Ejemplo 1

Un desarrollador tiene 15 horas semanales para dedicar al desarrollo de software de front-end (x) y back-end (y). Además:

- Debe dedicar al menos 5 horas al desarrollo de front-end para cumplir con los entregables del cliente.
- El tiempo total no puede exceder 15 horas por restricciones de tiempo del sprint.

Formule las restricciones, represéntelas gráficamente e identifique las combinaciones posibles de tiempo a invertir en cada actividad.

Variables

- x = horas dedicadas al front-end
- y = horas dedicadas al back-end

Restricciones

1. Debe dedicar al menos 5 horas al mes.

- $x \geq 5$

2. El tiempo total no puede exceder a 15 horas.

- $x + y \leq 15$

Gráfico generado con python



Figura 3.1: Aplicación de restricciones 1 en Python

Interpretación del gráfico

En la representación gráfica se observa la región factible determinada por las restricciones planteadas:

- $x \geq 5$: el desarrollador debe dedicar al menos 5 horas al front-end. Esta condición aparece como una línea vertical en $x = 5$ y la región válida se encuentra a la derecha de ella.
- $y \geq 0$: el tiempo dedicado al back-end no puede ser negativo, por lo que la región se limita a la parte superior del eje x .
- $x + y \leq 15$: la suma de horas asignadas a front-end y back-end no puede superar las 15 horas semanales. Gráficamente, corresponde a la semirrecta bajo la línea $x + y = 15$.

La intersección de estas tres restricciones genera una región triangular factible delimitada por los puntos $(5, 0)$, $(15, 0)$ y $(5, 10)$. Esto significa que cualquier combinación de horas ubicada dentro o sobre este triángulo cumple con las condiciones del problema. Por ejemplo, el desarrollador podría dedicar:

- 5 horas a front-end y 10 horas a back-end,
- 10 horas a front-end y 5 horas a back-end,
- o bien 15 horas únicamente a front-end.

En conclusión, la región sombreada representa todas las combinaciones posibles de tiempo de trabajo entre front-end y back-end que respetan tanto el mínimo requerido en front-end como la restricción máxima de 15 horas semanales.

Código en Python

```

1 # Función para preparar expresiones lineales
2 def preparar_expresion(expr: str) -> str:
3     expr = expr.replace(" ", "")           # quitar espacios
4     expr = expr.replace("^", "**")        # potencia
5     expr = expr.replace("-x", "-1*x")    # caso -x
6     expr = expr.replace("+x", "+1*x")    # caso +x
7     if expr.startswith("x"):
8         expr = "1*" + expr
9     expr = expr.replace("x", "*x")        # poner multiplicación
10    expr = expr.replace("**x", "*x")      # corregir si se duplicó
11    return expr
12
13 # Restricciones:
14 # 1) x = 5 (vertical)
15 # 2) x + y = 15 -> y = -x + 15
16 func2 = preparar_expresion("-x+15")
17
18 # Rango de la gráfica
19 xmin, xmax = -5, 20
20 ymin, ymax = -5, 20
21
22 # Recorremos el plano
23 for y in range(ymax, ymin - 1, -1):

```

```

24 linea = ""
25 for x in range(xmin, xmax + 1):
26     # Recta 1: x = 5
27     cond1 = (x == 5)
28
29     # Recta 2: y = -x + 15
30     try:
31         y2 = eval(func2)
32     except:
33         y2 = None
34     cond2 = (y2 is not None and abs(y - y2) < 0.5)
35
36     # Región factible: x>=5, y>=0, x+y<=15
37     region = (x >= 5 and y >= 0 and x + y <= 15)
38
39     # Qué dibujar
40     if cond1 and cond2:
41         linea += "#"
42     elif cond1:
43         linea += "*"
44     elif cond2:
45         linea += "o"
46     elif x == 0 and y == 0:
47         linea += "+"
48     elif x == 0:
49         linea += "|"
50     elif y == 0:
51         linea += "-"
52     elif region:
53         linea += "."
54     else:
55         linea += " "
56     print(linea)
57
58 # Leyenda
59 print("\nLeyenda del gráfico:")
60 print(" * = x = 5")
61 print(" o = x + y = 15")
62 print(" # = Intersección")
63 print(" . = Región factible")
64 print(" | = Eje Y")
65 print(" - = Eje X")
66 print(" + = Origen (0,0)")

```

3.2 Ejemplo 2

Un ingeniero de datos administra dos tipos de servidores en la nube: Servidores A y Servidores B. El costo por hora de Servidor A es S/3 y de Servidor B es S/5. El presupuesto máximo semanal asignado para mantener los servidores es de S/20. Determine cuántas horas puede mantener activos cada tipo de servidor, formule el sistema de ecuaciones y represéntelo gráficamente.

Variables

- x = horas de uso de Servidor A
- y = horas de uso de Servidor B

Restricción

1. Se sabe que la hora de Servidor A cuesta S/3, cada hora de Servidor B cuesta S/5 y el presupuesto máximo es S/20.

- $3x + 5y \leq 20$

Sistema de ecuaciones lineales

$$\begin{cases} 3x + 5y \leq 20 \\ x \geq 0 \\ y \geq 0 \end{cases}$$

Gráfico generado en Python

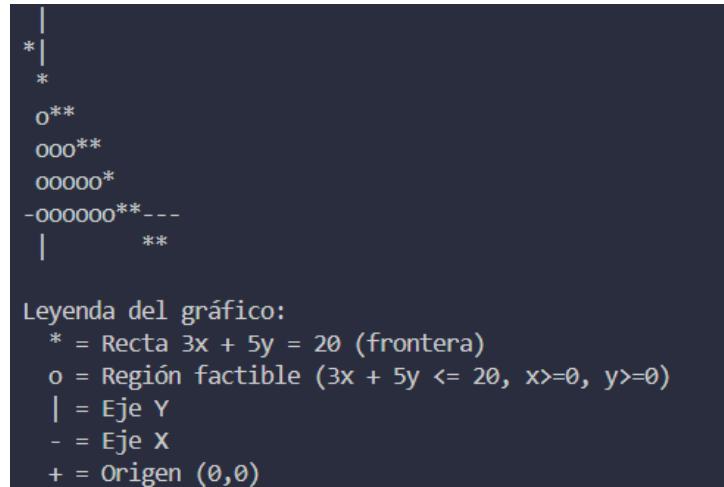


Figura 3.2: Aplicación de restricciones 2 en Python

Interpretación del gráfico

La recta límite está dada por $3x + 5y = 20$. Al interceptar con los ejes coordenados se obtiene que, si $x = 0$, entonces $y = 4$, y si $y = 0$, entonces $x = \frac{20}{3} \approx 6.67$.

La región factible corresponde al triángulo delimitado por los puntos $(0,0)$, $(6.67,0)$ y $(0,4)$. Cualquier combinación de horas (x,y) dentro de esta región satisface las condiciones de costo máximo.

En conclusión, el ingeniero de datos puede asignar:

- hasta 6 horas con 40 minutos únicamente a servidores A,
- hasta 4 horas únicamente a servidores B,
- o bien cualquier combinación intermedia que cumpla con el presupuesto, como por ejemplo $(x = 2, y = 2)$ o $(x = 3, y = 1)$.

Código en Python

```

1 # Restricción principal: 3x + 5y <= 20 → y <= (20 - 3x)/5
2 func = "(20 - 3*x)/5"
3
4 # Definimos el rango del gráfico (valores de X y Y)
5 xmin, xmax = -1, 10      # un poco más para ver bien
6 ymin, ymax = -1, 6
7
8 # Recorremos los valores de Y de arriba hacia abajo
9 for y in range(ymax, ymin - 1, -1):
10    linea = ""
11
12   for x in range(xmin, xmax + 1):
13     try:
14       y_line = eval(func)
15     except:
16       y_line = None
17
18   # Condición para la recta
19   cond_line = (y_line is not None and abs(y - y_line) < 0.5)
20
21   # Condición para la región factible: debajo de la recta y en el primer cuadrante
22   cond_region = (y_line is not None and y <= y_line and x >= 0 and y >= 0)
23
24   if cond_line:
25     linea += "*"
26   elif cond_region:
27     linea += "o"
28   elif x == 0 and y == 0:
29     linea += "+"
30   elif x == 0:
31     linea += "|"
32   elif y == 0:
33     linea += "-"
34   else:
35     linea += " "
36   print(linea)
37
38 # Leyenda
39 print("\nLeyenda del gráfico:")
40 print(" * = Recta 3x + 5y = 20 (frontera)")
41 print(" o = Región factible (3x + 5y <= 20, x>=0, y>=0)")
42 print(" | = Eje Y")
43 print(" - = Eje X")

```

44 | `print(" + = Origen (0,0)")`

3.3 Ejemplo 3

Un administrador de proyectos tecnológicos organiza su tiempo entre reuniones con stakeholders (x) y trabajo en la documentación técnica (y). Las reuniones requieren al menos 4 horas semanales y la documentación al menos 6 horas. Si dispone de 12 horas para ambas actividades, determine la región factible y analice las combinaciones posibles de tiempo.

Variables

- x = horas dedicadas a reuniones con stakeholders
- y = horas dedicadas a la documentación técnica

Condiciones

1. Reuniones de al menos 4 horas
 - $x \geq 4$
2. Documentación de al menos 6 horas
 - $y \geq 6$
3. Tiempo total disponible máximo de 12 horas
 - $x + y \leq 12$

Sistema de ecuaciones lineales

$$\begin{cases} x \geq 4 \\ y \geq 6 \\ x + y \leq 12 \end{cases}$$

Gráfico generado en Python

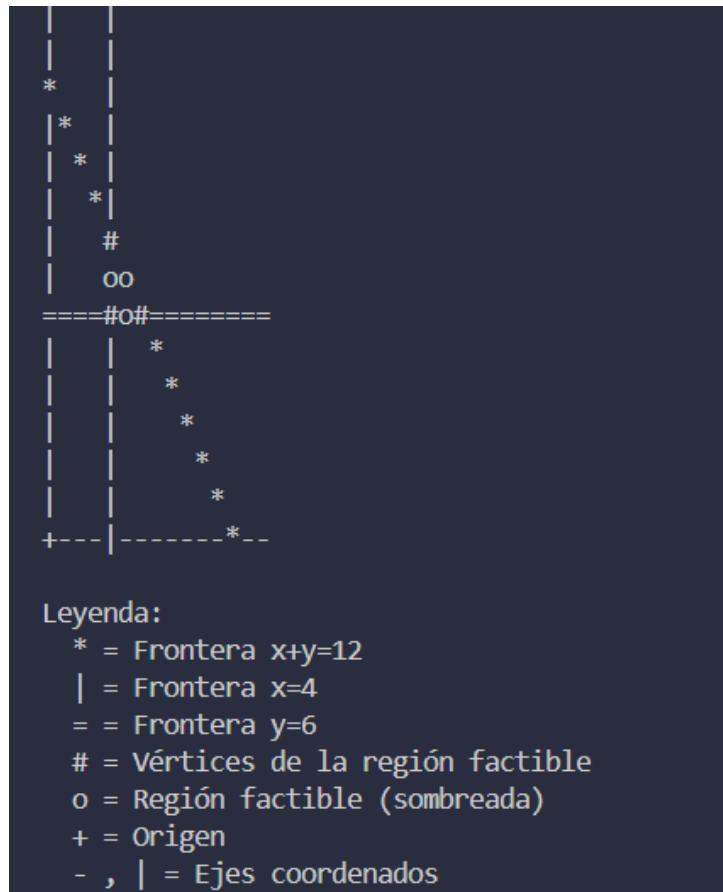


Figura 3.3: Aplicación de restricciones 3 en Python

Interpretación del gráfico

La recta límite es $x + y = 12$, que corta los ejes en los puntos $(12, 0)$ y $(0, 12)$. Aplicando las condiciones $x \geq 4$ y $y \geq 6$, la región factible se reduce al triángulo formado por los puntos:

$$(4, 6), \quad (4, 8), \quad (6, 6).$$

Esto significa que el administrador debe dedicar al menos 4 horas a reuniones y 6 horas a documentación, pero no más de 12 horas en total.

En consecuencia, puede combinar su tiempo de distintas formas dentro de ese triángulo, por ejemplo:

- $(x = 4, y = 7)$: 4 horas de reuniones y 7 de documentación.
- $(x = 5, y = 6)$: 5 horas de reuniones y 6 de documentación.
- $(x = 6, y = 6)$: combinación en el límite máximo permitido.

Código en Python

```

1 # Graficar restricciones del problema 3 en ASCII con sombreado de la región
2   ↪ factible
3
4 xmin, xmax = 0, 14
5 ymin, ymax = 0, 14
6
7 for y in range(ymax, ymin - 1, -1):
8 linea = ""
9 for x in range(xmin, xmax + 1):
10
11 # Restricciones
12 cond_recta = (abs(x + y - 12) < 0.5)      # frontera x+y=12
13 cond_x = (x == 4)                            # frontera x=4
14 cond_y = (y == 6)                            # frontera y=6
15
16 # Región factible: x>=4, y>=6, x+y<=12
17 cond_region = (x >= 4 and y >= 6 and (x + y <= 12))
18
19 # Puntos de intersección (vértices)
20 vertices = [(4,6), (4,8), (6,6)]
21 cond_vertice = (x,y) in vertices
22
23 # Dibujar con prioridad
24 if cond_vertice:
25   linea += "#"
26 elif cond_region:
27   linea += "o"
28 elif cond_recta:
29   linea += "*"
30 elif cond_x:
31   linea += "|"
32 elif cond_y:
33   linea += "="
34 elif x == 0 and y == 0:
35   linea += "+"
36 elif x == 0:
37   linea += "|"
38 elif y == 0:
39   linea += "-"
40 else:
41   linea += " "
42 print(linea)
43
44 print("\nLeyenda:")
45 print(" * = Frontera x+y=12")
46 print(" | = Frontera x=4")
47 print(" = = Frontera y=6")
48 print(" # = Vértices de la región factible")
49 print(" o = Región factible (sombreada)")
50 print(" + = Origen")
51 print(" - , | = Ejes coordenados")

```

3.4 Ejemplo 4

Una empresa de desarrollo de videojuegos produce dos tipos de assets: Modelos 3D (P1) y Texturas (P2). Cada modelo 3D requiere 2 horas de trabajo y cada textura requiere 3 horas. El equipo de arte tiene un total de 18 horas disponibles semanalmente. Formule las restricciones, represéntelas gráficamente y determine cuántos assets de cada tipo pueden producirse en función del tiempo disponible.

Variables

- x = número de modelos 3D (P1)
- y = número de texturas (P2)

Restricciones

- Restricción principal: $2x + 3y \leq 18$
- Restricciones adicionales: $x \geq 0, y \geq 0$

Gráfico generado con Python

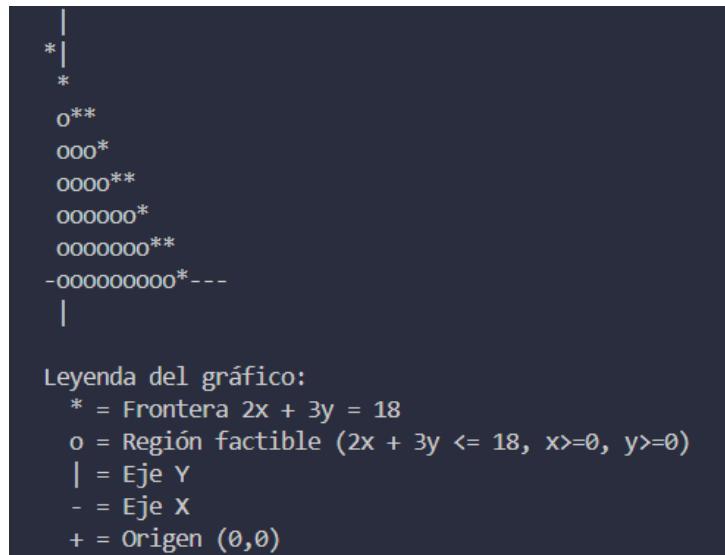


Figura 3.4: Aplicación de restricciones 4 en Python

Interpretación del gráfico

La frontera de la región factible está dada por la recta $2x + 3y = 18$, que corta al eje x en el punto $(9, 0)$ y al eje y en $(0, 6)$. La región factible corresponde al triángulo con vértices $(0, 0)$, $(9, 0)$ y $(0, 6)$.

El equipo puede producir hasta 9 modelos 3D si dedica todo el tiempo a ellos, o hasta 6 texturas si dedica todo a ese tipo de asset. También puede realizar combinaciones intermedias, siempre

que se cumpla $2x + 3y \leq 18$. Por ejemplo, 3 modelos y 4 texturas consumen exactamente las 18 horas disponibles, mientras que 5 modelos y 2 texturas consumen 16 horas, quedando dentro de la región factible.

Código en Python

```

1 # Problema 4 - Modelos 3D y Texturas
2
3 # Definimos el rango del gráfico
4 xmin, xmax = -1, 12
5 ymin, ymax = -1, 8
6
7 # Recorremos los valores de Y de arriba hacia abajo
8 for y in range(ymax, ymin - 1, -1):
9     linea = ""
10
11    for x in range(xmin, xmax + 1):
12
13        # Ecuación de la frontera: 2x + 3y = 18
14        y_line = (18 - 2*x) / 3 if (18 - 2*x) >= 0 else None
15
16        # Condición para estar en la recta
17        cond_line = (y_line is not None and abs(y - y_line) < 0.5)
18
19        # Condición para estar en la región factible
20        cond_region = (x >= 0 and y >= 0 and (2*x + 3*y <= 18))
21
22        if cond_line:
23            linea += "*"
24        elif cond_region:
25            linea += "o"
26        elif x == 0 and y == 0:
27            linea += "+"
28        elif x == 0:
29            linea += "|"
30        elif y == 0:
31            linea += "-"
32        else:
33            linea += " "
34    print(linea)
35
36 # Leyenda
37 print("\nLeyenda del gráfico:")
38 print(" * = Frontera 2x + 3y = 18")
39 print(" o = Región factible (2x + 3y <= 18, x>=0, y>=0)")
40 print(" | = Eje Y")
41 print(" - = Eje X")
42 print(" + = Origen (0,0)")
```

3.5 Ejemplo 5

Una startup de hardware dispone de un máximo de 50 unidades de componentes electrónicos. Para ensamblar un dispositivo tipo A se necesitan 5 unidades y para un dispositivo tipo B se necesitan 10 unidades. Determine cuántos dispositivos de cada tipo puede ensamblar sin exceder las 50 unidades de componentes. Formule el problema, resuélalo gráficamente y explique las posibles combinaciones de producción.

Variables

- x = número de dispositivos tipo A
- y = número de dispositivos tipo B

Restricciones

- Restricción principal: $5x + 10y \leq 50$
- Restricciones adicionales: $x \geq 0, y \geq 0$

Gráfico generado con Python

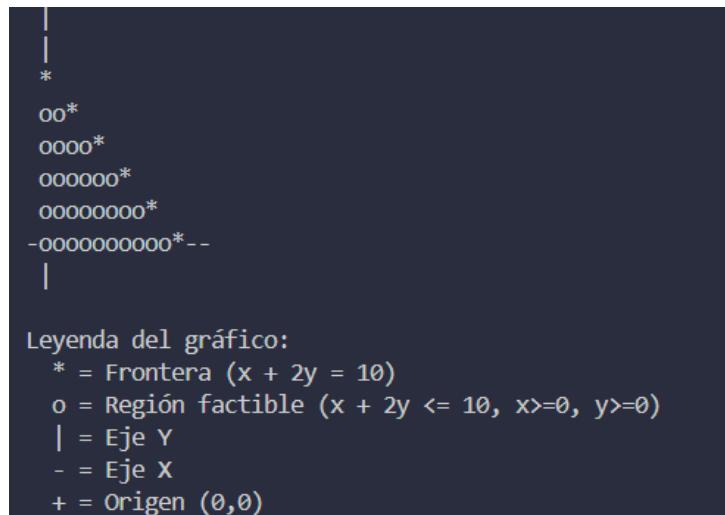


Figura 3.5: Aplicación de restricciones 5 en Python

Interpretación

La frontera de la región factible está dada por la recta $5x + 10y = 50$, equivalente a $x + 2y = 10$. Esta recta corta al eje x en el punto $(10, 0)$ y al eje y en $(0, 5)$. La región factible corresponde al triángulo con vértices $(0, 0)$, $(10, 0)$ y $(0, 5)$.

La empresa puede ensamblar hasta 10 dispositivos tipo A si dedica todos los componentes a ellos, o hasta 5 dispositivos tipo B si dedica todos los componentes a ese tipo. También puede realizar

combinaciones intermedias, siempre que se cumpla $5x + 10y \leq 50$. Por ejemplo, 6 dispositivos tipo A y 2 tipo B utilizan exactamente las 50 unidades, al igual que 4 dispositivos tipo A y 3 tipo B.

Código en Python

```

1 # Problema 5 - Dispositivos A y B
2
3 # Definimos el rango del gráfico
4 xmin, xmax = -1, 12
5 ymin, ymax = -1, 7
6
7 # Recorremos los valores de Y de arriba hacia abajo
8 for y in range(ymax, ymin - 1, -1):
9     linea = ""
10
11    for x in range(xmin, xmax + 1):
12
13        # Recta de frontera: x + 2y = 10 -> y = (10 - x)/2
14        y_line = (10 - x) / 2 if (10 - x) >= 0 else None
15
16        # Condición para estar en la recta
17        cond_line = (y_line is not None and abs(y - y_line) < 0.5)
18
19        # Condición para estar en la región factible
20        cond_region = (x >= 0 and y >= 0 and (x + 2*y <= 10))
21
22        if cond_line:
23            linea += "*"
24        elif cond_region:
25            linea += "o"
26        elif x == 0 and y == 0:
27            linea += "+"
28        elif x == 0:
29            linea += "|"
30        elif y == 0:
31            linea += "-"
32        else:
33            linea += " "
34    print(linea)
35
36 # Leyenda
37 print("\nLeyenda del gráfico:")
38 print(" * = Frontera (x + 2y = 10)")
39 print(" o = Región factible (x + 2y <= 10, x>=0, y>=0)")
40 print(" | = Eje Y")
41 print(" - = Eje X")
42 print(" + = Origen (0,0)")
```


4 Método de Newton Raphson

El método de Newton-Raphson es una técnica iterativa utilizada para encontrar raíces de ecuaciones no lineales de la forma:

$$f(x) = 0$$

Es uno de los métodos más eficaces y ampliamente utilizados debido a su rapidez de convergencia cuando se cumplen las condiciones necesarias. Fue propuesto originalmente por Isaac Newton y posteriormente generalizado por Joseph Raphson (Chapra & Canale, 2015)

4.1 Fundamento teórico

La idea básica del método consiste en aproximar la función $f(x)$ mediante su expansión de Taylor alrededor de un punto x_i y despreciar los términos de orden superior:

$$f(x) \approx f(x_i) + f'(x_i)(x - x_i)$$

Para hallar la raíz, se hace $f(x) = 0$, y despejando x se obtiene la fórmula iterativa:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$$

Esta expresión permite calcular una mejor aproximación de la raíz en cada iteración. El proceso continúa hasta que el valor de x_{i+1} converge a la raíz real con una tolerancia previamente establecida (Chapra & Canale, 2015)

4.2 Condiciones de convergencia

El método de Newton-Raphson presenta convergencia cuadrática, es decir, el error disminuye aproximadamente al cuadrado en cada iteración, siempre que se cumplan las siguientes condiciones (Sullivan, 2004):

- La función $f(x)$ es continua y derivable en un intervalo que contiene la raíz buscada.
- La derivada $f'(x)$ no se anula en el entorno de la raíz.
- La estimación inicial x_0 está suficientemente cerca de la raíz real.

Sin embargo, si $f'(x_i)$ se approxima a cero o si la estimación inicial está muy alejada, el método puede divergir o generar oscilaciones (Burden et al., 2016).

4.3 Criterio de parada

El proceso iterativo se detiene cuando se cumple alguna de las siguientes condiciones (Chapra & Canale, 2015):

- $|f(x_{i+1})| < \varepsilon$

- $|x_{i+1} - x_i| < \varepsilon$

donde ε es la tolerancia o el error máximo permitido.

4.4 Algoritmo del método de Newton-Raphson

1. Elegir una estimación inicial x_0 .
2. Calcular $f(x_0)$ y $f'(x_0)$.
3. Evaluar:

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

4. Repetir el proceso:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$$

hasta que se cumpla el criterio de convergencia.

4.5 Aplicación del método en Python

El objetivo fue desarrollar en el lenguaje de programación Python un programa que permita al usuario ingresar una función $f(x)$ y graficarla en un intervalo definido. Esta etapa inicial tiene como propósito ayudar al usuario a identificar visualmente las posibles raíces y decidir si desea aplicar el método de Newton-Raphson.

En caso afirmativo, el programa solicita un valor inicial x_1 basado en la observación de la gráfica y ejecuta el algoritmo iterativo de Newton-Raphson hasta que la diferencia entre dos aproximaciones sucesivas sea menor a una tolerancia predefinida. Finalmente, el programa muestra en pantalla la raíz aproximada encontrada y el número de iteraciones necesarias para alcanzarla.

Este enfoque combina la interpretación gráfica con el análisis numérico, promoviendo una comprensión más completa del comportamiento de la función y de la eficacia del método iterativo.

Entrada

Una cadena de texto que representa una función matemática.

$$f(x) = x^3 - x - 1$$

Salida

- Gráfica para evaluar si realizar o no el método.
- La raíz encontrada.
- Número de iteraciones realizadas hasta encontrar la raíz.

Código

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # === 1. Ingreso de la función ===
5 func_str = input("Ingrese la función f(x): ") # Ejemplo: x**3 - x - 1
6
7 # Definimos la función y su derivada (usando derivada numérica)
8 def f(x):
9     return eval(func_str)
10
11 def f_prime(x, h=1e-6): # derivada numérica
12     return (f(x + h) - f(x - h)) / (2 * h)
13
14 # === 2. Graficar la función ===
15 xmin = float(input("Ingrese el valor mínimo de x: "))
16 xmax = float(input("Ingrese el valor máximo de x: "))
17
18 x = np.linspace(xmin, xmax, 400)
19 y = f(x)
20
21 plt.figure(figsize=(8, 5))
22 plt.plot(x, y, label=f"f(x) = {func_str}", color='blue')
23 plt.axhline(0, color='black', linestyle='--')
24 plt.axvline(0, color='black', linestyle='--')
25 plt.title("Gráfico de la función ingresada")
26 plt.xlabel("x")
27 plt.ylabel("f(x)")
28 plt.legend()
29 plt.grid(True)
30 plt.show()
31
32 # === 3. Pregunta si desea aplicar Newton-Raphson ===
33 op = input("¿Desea encontrar una raíz con el método de Newton-Raphson? (s/n): ")
34     ↪ lower()
35
36 if op == "s":
37 # === 4. Ingreso de punto inicial ===

```

```
37 x0 = float(input("Basado en la gráfica, ingrese el valor inicial x1: "))
38
39 # Parámetros del método
40 tol = 1e-6
41 max_iter = 100
42
43 # Iteraciones
44 for i in range(1, max_iter + 1):
45     fx = f(x0)
46     fpx = f_prime(x0)
47
48     if fpx == 0:
49         print(f"La derivada es cero en x = {x0}. El método no puede continuar.")
50         break
51
52     x1 = x0 - fx / fpx
53
54     # Verificar convergencia
55     if abs(x1 - x0) < tol:
56         print(f"\nRaíz aproximada encontrada: {x1:.6f}")
57         print(f"Iteraciones realizadas: {i}")
58         break
59
60     x0 = x1
61 else:
62     print("\nNo se alcanzó la convergencia después de", max_iter, "iteraciones.")
63
64 else:
65     print("No se aplicó el método de Newton-Raphson.")
```

Ejecución

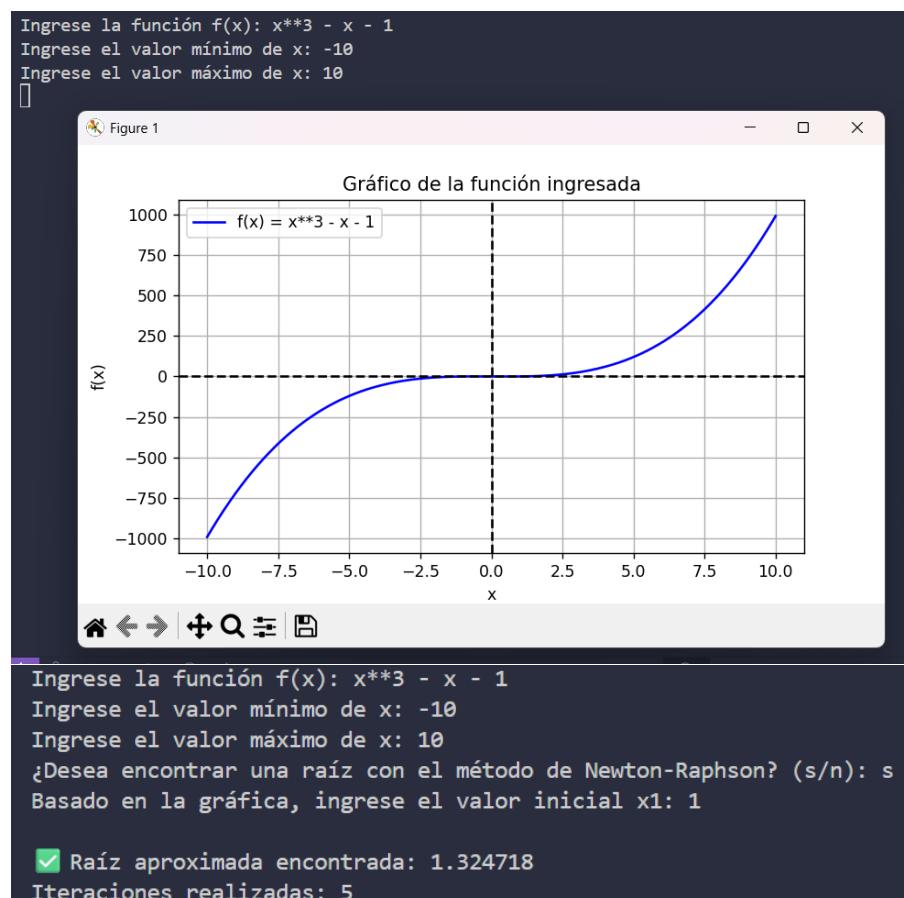


Figura 4.1: Método de Newthon-Rapshon en Python

5 Método de Bisección

El método de bisección es uno de los algoritmos más simples, robustos y confiables para la localización de raíces de ecuaciones no lineales de la forma

$$f(x) = 0.$$

Su fundamento teórico se basa en el Teorema del Valor Intermedio, el cual garantiza la existencia de una raíz siempre que la función sea continua en un intervalo cerrado $[a, b]$ y que se cumpla la condición

$$f(a) f(b) < 0.$$

Esto indica que en el intervalo ocurre un cambio de signo y, por tanto, debe existir al menos una raíz en su interior (Burden et al., 2016).

5.1 Idea fundamental del método

El método consiste en dividir sucesivamente el intervalo $[a, b]$ por su punto medio. Si llamamos

$$c = \frac{a + b}{2},$$

entonces evaluamos $f(c)$ y determinamos en qué subintervalo persiste el cambio de signo:

- Si $f(a) f(c) < 0$, la raíz se encuentra en $[a, c]$.
- Si $f(c) f(b) < 0$, la raíz se encuentra en $[c, b]$.

Este proceso se repite recursivamente, produciendo intervalos cada vez más pequeños. Debido a su naturaleza, el método siempre converge cuando la función es continua y se inicia con un intervalo válido, aunque la convergencia es relativamente lenta (Chapra & Canale, 2015).

5.2 Criterios de parada

El método se detiene cuando se cumple alguna de las siguientes condiciones:

1. El ancho del intervalo es menor que una tolerancia establecida:

$$|b - a| < \varepsilon.$$

2. El valor funcional es cercano a cero:

$$|f(c)| < \delta.$$

3. Se alcanza un número máximo de iteraciones:

$$n \geq n_{\max}.$$

El error después de n iteraciones está acotado por

$$|x - c_n| \leq \frac{b - a}{2^n},$$

lo cual permite estimar de manera precisa el número de pasos necesarios para obtener una tolerancia deseada (Süli & Mayers, 2003).

5.3 Ventajas del método

El método de bisección posee varias ventajas importantes:

- Garantiza convergencia siempre que exista un cambio de signo en el intervalo.
- Es simple de implementar.
- Permite una estimación directa del error en cada iteración.
- Es estable numéricamente y no requiere derivadas.

Estas características lo convierten en un método ideal para iniciar procesos de localización de raíces o para validar aproximaciones obtenidas mediante métodos más rápidos pero menos robustos, como Newton-Raphson o la secante (Press et al., 2007).

5.4 Desventajas

A pesar de su robustez, el método de bisección presenta algunas limitaciones:

- La convergencia es lineal y relativamente lenta en comparación con otros métodos.
- Requiere conocer un intervalo donde la función cambie de signo.
- No obtiene raíces múltiples o raíces donde la función no cambia de signo.

Aun así, su combinación de simplicidad y fiabilidad lo convierte en un método fundamental dentro de los algoritmos de análisis numérico (Burden et al., 2016).

5.5 Aplicación del método en Python

Se desarrolló en Python un programa que permite al usuario ingresar una función matemática y visualizar su gráfico en un intervalo definido. Esta etapa inicial facilita la elección del intervalo $[a, b]$ donde la función cambia de signo.

Una vez seleccionado el intervalo, el programa ejecuta el método de bisección iterativamente, mostrando en pantalla una tabla con los valores de a , b , c , $f(c)$ y el error de cada iteración. El proceso finaliza cuando se cumple la condición de tolerancia o se alcanza el número máximo de iteraciones. Finalmente, se presenta la raíz aproximada encontrada.

Este enfoque combina el análisis gráfico con la interpretación numérica, permitiendo comprender mejor el comportamiento de la función y la estabilidad del método.

Entrada

Una cadena de texto que representa una función matemática.

$$f(x) = x^3 - x - 1$$

Salida

- Gráfica para evaluar el intervalo de búsqueda.
- Tabla con las iteraciones del método.
- Raíz aproximada y número de iteraciones realizadas.

Restricciones

El método requiere que:

- $f(x)$ sea continua en el intervalo $[a, b]$.
- Se cumpla la condición $f(a) \cdot f(b) < 0$.

Código

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # === 1. Ingreso de la función ===
5 func_str = input("Ingrese la función f(x): ") # Ejemplo: x**3 - x - 1
6
7 # Definimos la función
8 def f(x):
9     return eval(func_str, {"np": np, "x": x})
10
11 # === 2. Graficar la función ===
12 xmin = float(input("Ingrese el valor mínimo de x: "))
13 xmax = float(input("Ingrese el valor máximo de x: "))
14
15 x = np.linspace(xmin, xmax, 400)

```

```

16 y = f(x)
17
18 plt.figure(figsize=(8, 5))
19 plt.plot(x, y, label=f"f(x) = {func_str}", color='blue')
20 plt.axhline(0, color='black', linestyle='--')
21 plt.axvline(0, color='black', linestyle='--')
22 plt.title("Gráfico de la función ingresada")
23 plt.xlabel("x")
24 plt.ylabel("f(x)")
25 plt.legend()
26 plt.grid(True)
27 plt.show()
28
29 # === 3. Pregunta si desea aplicar el método de Bisección ===
30 op = input("¿Desea encontrar una raíz con el método de Bisección? (s/n): ").lower()
31
32 if op == "s":
33 # === 4. Ingreso del intervalo inicial ===
34 a = float(input("Ingrese el extremo izquierdo del intervalo (a): "))
35 b = float(input("Ingrese el extremo derecho del intervalo (b): "))
36
37 # Verificación del cambio de signo
38 if f(a) * f(b) > 0:
39 print("\n No hay cambio de signo en el intervalo [a, b]. Intente con otro intervalo
      ↪ .")
40 else:
41 # Parámetros del método
42 tol = 1e-6
43 max_iter = 100
44
45 print("\nIteración |     a         |     b         |     c         |     f(c)     |
      ↪ Error")
46 print("-----")
47
48 for i in range(1, max_iter + 1):
49 c = (a + b) / 2
50 fc = f(c)
51 error = abs(b - a) / 2
52
53 print(f"{i:9d} | {a:10.6f} | {b:10.6f} | {c:10.6f} | {fc:10.6f} | {error:10.6f}")
54
55 if abs(fc) < tol or error < tol:
56 print("\n Raíz aproximada encontrada: {c:.6f}")
57 print(f"Iteraciones realizadas: {i}")
58 break
59
60 if f(a) * fc < 0:
61 b = c
62 else:
63 a = c
64 else:
65 print("\n No se alcanzó la convergencia después de", max_iter, "iteraciones.")

```

```
66 | else:  
67 |     print("No se aplicó el método de Bisección.")
```

Ejecución

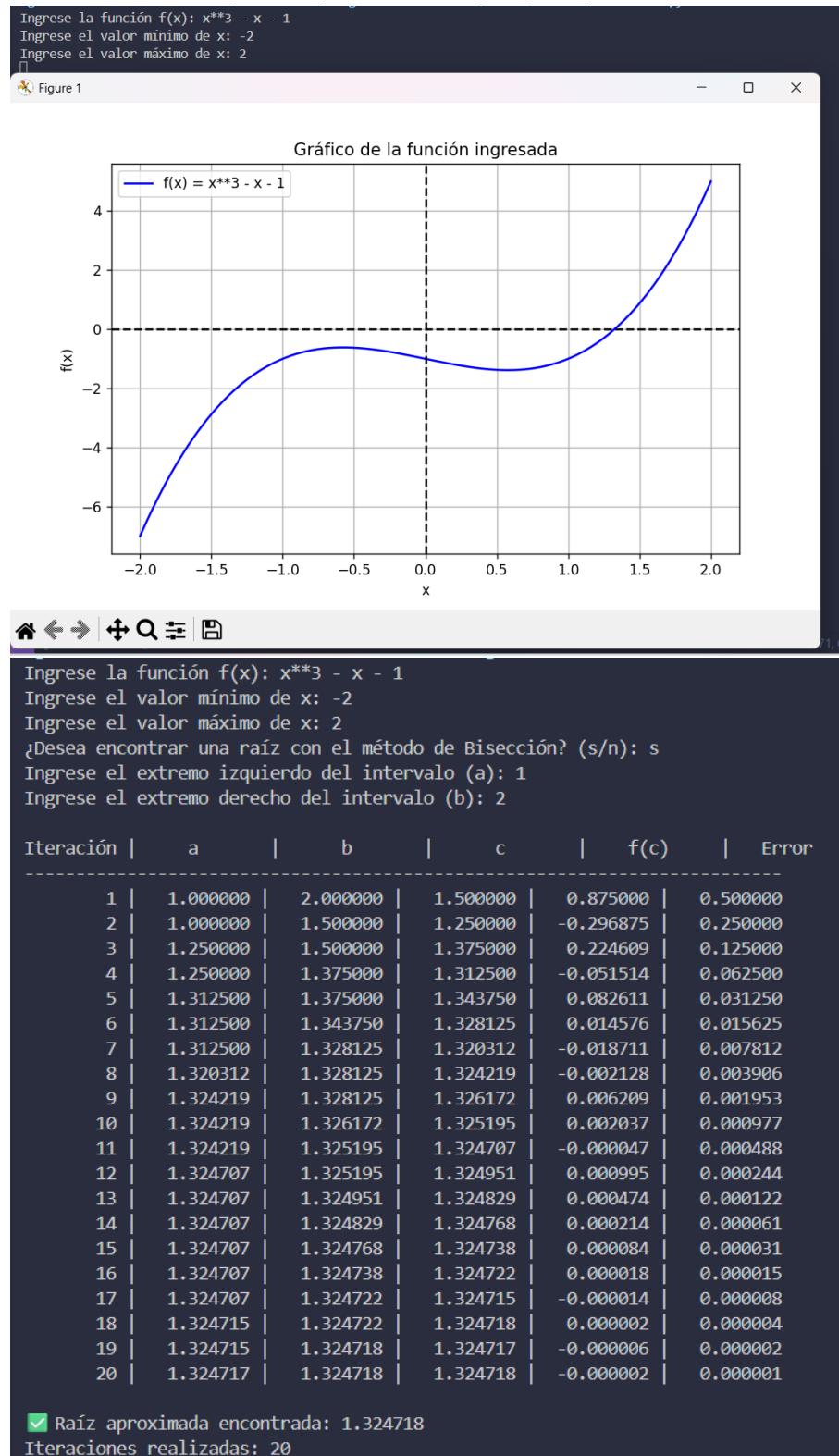


Figura 5.1: Método de Bisección en Python

6 Método de la Secante

El método de la secante es una técnica numérica ampliamente utilizada para la resolución de ecuaciones no lineales, especialmente en contextos donde la derivada de la función no está disponible o resulta difícil de calcular. A diferencia del método de Newton–Raphson, que requiere la evaluación explícita de la derivada, la secante se basa en una aproximación numérica de la misma utilizando dos puntos consecutivos de la función (Burden & Faires, 2011; Chapra & Canale, 2015).

6.1 Fundamento teórico

El método surge de la idea de aproximar la derivada de la función mediante un cociente incremental, reemplazando la derivada verdadera por:

$$f'(x_n) \approx \frac{f(x_n) - f(x_{n-1})}{x_n - x_{n-1}}.$$

Sustituyendo esta expresión en la fórmula de Newton–Raphson se obtiene la iteración del método de la secante:

$$x_{n+1} = x_n - f(x_n) \frac{x_n - x_{n-1}}{f(x_n) - f(x_{n-1})}.$$

La deducción formal y el análisis matemático del método pueden consultarse en textos clásicos de análisis numérico (Burden & Faires, 2011), así como en manuales modernos de métodos computacionales (Atkinson, 2009; Chapra & Canale, 2015).

6.2 Interpretación geométrica

Geométricamente, el método consiste en trazar la recta secante que pasa por los puntos $(x_{n-1}, f(x_{n-1}))$ y $(x_n, f(x_n))$, y encontrar su intersección con el eje x . Esta construcción geométrica proporciona una aproximación sucesiva a la raíz de la ecuación $f(x) = 0$ (Sullivan, 2004).

La secante generada en cada iteración reemplaza el uso de la tangente del método de Newton, permitiendo que el método avance sin necesidad de calcular derivadas. Esta propiedad convierte a la secante en un algoritmo eficiente en problemas aplicados donde la evaluación de $f'(x)$ puede ser costosa o inestable (Cheney & Kincaid, 2009).

6.3 Convergencia

El método posee una convergencia superlineal, cuya razón de convergencia es aproximadamente 1.618, el número áureo. Aunque es menos rápido que Newton–Raphson, suele ser más eficiente cuando la derivada no está disponible o cuando su cálculo es propenso a errores numéricos (Atkinson, 2009). Sin embargo, su éxito requiere seleccionar dos valores iniciales adecuados para evitar divisiones entre valores de función muy pequeños o iteraciones divergentes (Burden & Faires, 2011).

6.4 Ventajas y limitaciones

Entre sus principales ventajas destacan:

- No requiere el cálculo de la derivada de la función.
- Tiende a ser más estable que Newton–Raphson cuando la derivada es difícil de evaluar.
- Posee una tasa de convergencia superior al método de bisección.

Sus principales limitaciones incluyen:

- No garantiza convergencia global.
- Requiere dos valores iniciales definidos.
- Puede divergir si los valores iniciales no son adecuados o si la función presenta discontinuidades o múltiples raíces cercanas.

Para un análisis detallado de sus propiedades teóricas y aplicaciones prácticas pueden consultarse referencias especializadas en análisis numérico (Atkinson, 2009; Burden & Faires, 2011; Chapra & Canale, 2015; Cheney & Kincaid, 2009).

6.5 Aplicación del método en Python

Se desarrolló un programa en Python que permite al usuario ingresar una función $f(x)$ y graficarla en un intervalo definido. Esta etapa inicial facilita la identificación visual de posibles raíces y la selección de los valores iniciales x_0 y x_1 .

Luego, el programa aplica el método de la secante iterativamente hasta alcanzar una tolerancia establecida o un número máximo de iteraciones. En cada iteración, se muestran los valores de x_0 , x_1 , $f(x_0)$, $f(x_1)$, la nueva aproximación x_2 y el error absoluto. Finalmente, se imprime la raíz aproximada encontrada y el número de iteraciones necesarias.

Este procedimiento combina la exploración gráfica con el razonamiento numérico, fomentando una comprensión más completa de la convergencia y del comportamiento de la función.

Entrada

Una cadena de texto que representa una función matemática.

$$f(x) = x^3 - x - 1$$

Salida

- Gráfica para visualizar la función y elegir los puntos iniciales.
- Tabla con los valores de cada iteración.
- Raíz aproximada y número de iteraciones necesarias.

Restricciones

- $f(x)$ debe ser continua en el intervalo analizado.
- Los valores iniciales x_0 y x_1 deben ser distintos y cercanos a la raíz.

Código

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # === 1. Ingreso de la función ===
5 func_str = input("Ingrese la función f(x): " ) # Ejemplo: x**3 - x - 1
6
7 # Definimos la función
8 def f(x):
9     return eval(func_str, {"np": np, "x": x})
10
11 # === 2. Graficar la función ===
12 xmin = float(input("Ingrese el valor mínimo de x: "))
13 xmax = float(input("Ingrese el valor máximo de x: "))
14
15 x = np.linspace(xmin, xmax, 400)
16 y = f(x)
17
18 plt.figure(figsize=(8, 5))
19 plt.plot(x, y, label=f"f(x) = {func_str}", color='blue')
20 plt.axhline(0, color='black', linestyle='--')
21 plt.axvline(0, color='black', linestyle='--')
22 plt.title("Gráfico de la función ingresada")
23 plt.xlabel("x")
24 plt.ylabel("f(x)")
25 plt.legend()

```

```

26 plt.grid(True)
27 plt.show()
28
29 # === 3. Pregunta si desea aplicar el método de la secante ===
30 op = input("¿Desea encontrar una raíz con el método de la Secante? (s/n): ").lower
    ↪ ()
31
32 if op == "s":
33 # === 4. Ingreso de puntos iniciales ===
34 x0 = float(input("Ingrese el primer valor inicial x0: "))
35 x1 = float(input("Ingrese el segundo valor inicial x1: "))
36
37 # Parámetros del método
38 tol = 1e-6
39 max_iter = 100
40
41 print("\nIteración | x0 | x1 | f(x0) | f(x1) |")
    ↪ x2 | Error)
42 print("-----")
43
44 for i in range(1, max_iter + 1):
45 f0 = f(x0)
46 f1 = f(x1)
47
48 if f1 - f0 == 0:
49 print(f"\nDivisión por cero en la iteración {i}. El método no puede continuar.")
50 break
51
52 x2 = x1 - f1 * (x1 - x0) / (f1 - f0)
53 error = abs(x2 - x1)
54
55 print(f"{i:9d} | {x0:10.6f} | {x1:10.6f} | {f0:12.6f} | {f1:12.6f} | {x2:10.6f} | {error:10.6f}")
56
57 if error < tol:
58 print(f"\nRaíz aproximada encontrada: {x2:.6f}")
59 print(f"Iteraciones realizadas: {i}")
60 break
61
62 x0, x1 = x1, x2
63
64 else:
65 print("\nNo se alcanzó la convergencia después de", max_iter, "iteraciones.")
66 else:
67 print("No se aplicó el método de la Secante.")

```

Ejecución

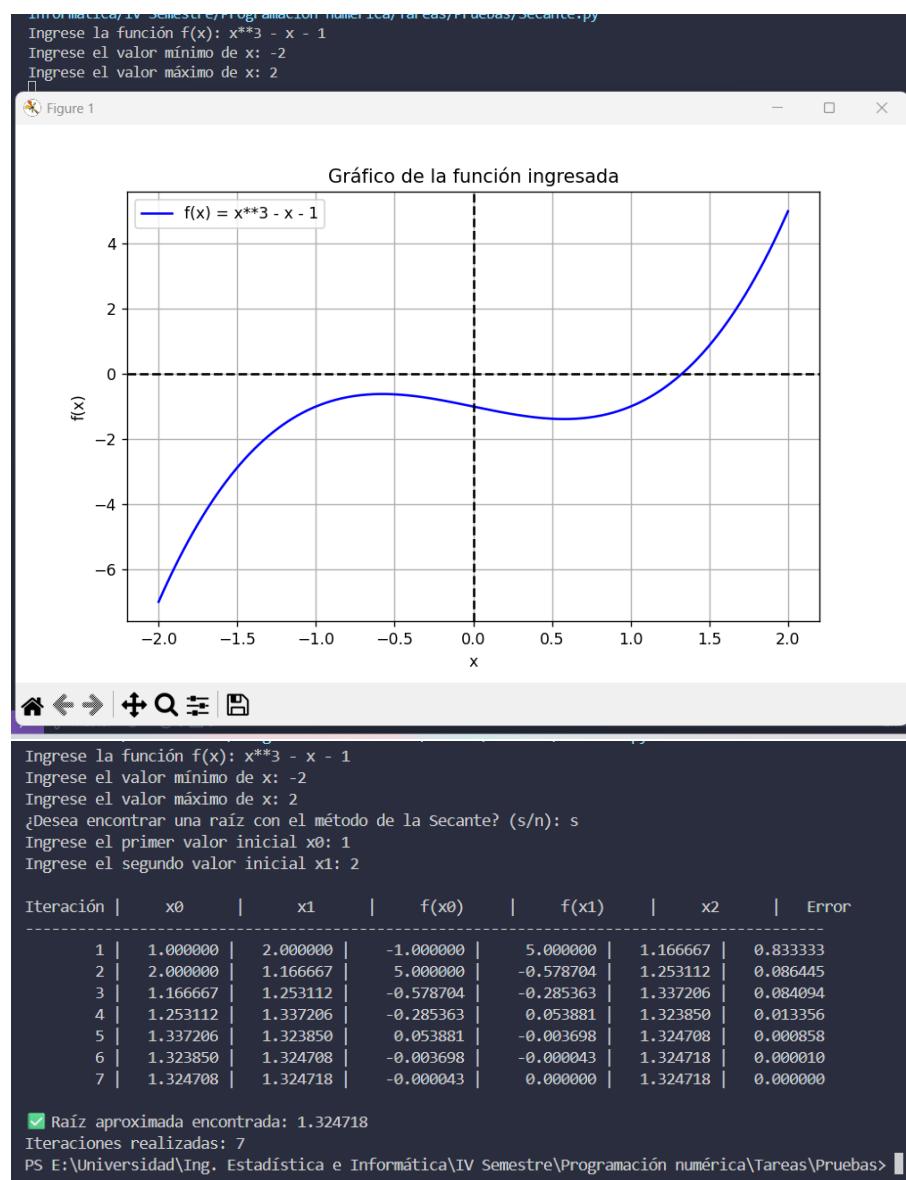


Figura 6.1: Método de la Secante en Python

7 Método de Punto Fijo

El método de punto fijo es uno de los procedimientos fundamentales para resolver ecuaciones no lineales de la forma

$$f(x) = 0.$$

A diferencia de otros métodos basados directamente en la función $f(x)$, el método de punto fijo se construye a partir de una transformación adecuada de la ecuación original en una función equivalente

$$x = g(x),$$

de modo que la raíz buscada es un punto fijo de la función g , es decir, un valor r tal que $g(r) = r$ (Burden et al., 2016).

La ecuación original puede expresarse de diversas maneras para obtener distintas funciones de iteración $g(x)$. La elección de esta función es crucial para garantizar la convergencia y determinar la eficiencia del método.

7.1 Definición y formulación básica

Dado un valor inicial x_0 , la aproximación iterativa se construye mediante el proceso repetitivo:

$$x_{n+1} = g(x_n), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Si esta sucesión converge a un valor r , entonces

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = r \Rightarrow r = g(r),$$

lo que confirma que r es un punto fijo de g y, por ende, una solución de la ecuación original (Chapra & Canale, 2015).

7.2 Condición de convergencia

El comportamiento del método depende de las propiedades de la función $g(x)$. Uno de los resultados más importantes para garantizar convergencia es el siguiente:

Criterio de convergencia. Supongamos que la función g es continua en un intervalo I y que además su derivada $g'(x)$ es continua en el mismo intervalo. Si existe una constante $0 < k < 1$ tal que

$$|g'(x)| \leq k \quad \text{para todo } x \in I,$$

entonces el método de punto fijo es convergente para cualquier elección de $x_0 \in I$, y la sucesión generada converge a un único punto fijo en dicho intervalo (Burden & Faires, 2011).

Este criterio implica que la derivada de g controla la “fuerza” con la que la iteración se acerca al punto fijo. En términos prácticos:

$$|g'(r)| < 1 \Rightarrow \text{convergencia local},$$

$$|g'(r)| > 1 \Rightarrow \text{divergencia}.$$

Esto hace evidente que la elección de la forma $g(x)$ no es arbitraria. Algunas transformaciones del tipo $x = g(x)$ producen convergencia, otras generan oscilaciones y otras divergencia total (Cheney & Kincaid, 2009).

7.3 Orden de convergencia

El método de punto fijo tiene convergencia lineal bajo las condiciones mencionadas. Esto significa que existe una constante C tal que

$$|x_{n+1} - r| \approx C |x_n - r|,$$

lo cual sugiere una velocidad de aproximación más lenta frente a métodos como Newton-Raphson, cuya convergencia es cuadrática (Atkinson, 2009). Sin embargo, su simplicidad lo convierte en una herramienta útil para la enseñanza y para establecer intervalos iniciales seguros para otros métodos más rápidos.

7.4 Errores y criterios de parada

El error en la iteración puede estimarse mediante:

$$|x_{n+1} - x_n| < \varepsilon \quad \text{o bien} \quad |g(x_n) - x_n| < \varepsilon,$$

donde ε es una tolerancia escogida. Otra forma consiste en fijar un número máximo de iteraciones si la función converge lentamente o presenta oscilaciones (Press et al., 2007).

7.5 Ventajas del método

El método de punto fijo presenta varias virtudes importantes:

- Su implementación es extremadamente sencilla.
- No requiere derivadas como Newton-Raphson.
- Es útil para analizar transformaciones funcionales equivalentes.
- Proporciona un marco general para estudiar muchos métodos iterativos.

- Permite visualizar la convergencia mediante diagramas cobweb (trampas de telaraña), muy utilizados en la enseñanza (Anton et al., 2012).

Además, su estructura simple hace posible analizar la estabilidad de los puntos fijos en modelos matemáticos aplicados, como ecuaciones diferenciales, sistemas dinámicos y procesos iterativos en ingeniería (Süli & Mayers, 2003).

7.6 Desventajas

A pesar de su utilidad conceptual y didáctica, el método presenta ciertas limitaciones:

- La convergencia depende fuertemente de la elección de $g(x)$.
- Incluso con una buena elección, la convergencia es lineal, por lo que puede ser lenta.
- Si $|g'(x)| \geq 1$, la iteración diverge.
- No siempre es sencillo encontrar una transformación apropiada.

En aplicaciones industriales o científicas, suele preferirse utilizar punto fijo como método preliminar para garantizar la existencia de una raíz antes de usar algoritmos más robustos o rápidos, como Newton-Raphson, la secante o métodos híbridos (Chapra & Canale, 2015).

7.7 Interpretación gráfica

Gráficamente, el método consiste en trazar la curva $y = g(x)$ junto con la recta $y = x$. El punto donde ambas se intersectan es el punto fijo. La iteración sigue los pasos:

1. Comenzar en $(x_0, g(x_0))$.
2. Proyectar verticalmente hacia la curva.
3. Proyectar horizontalmente hacia la recta $y = x$.

Este proceso se repite hasta alcanzar una convergencia visual. Este tipo de representación, conocida como diagrama cobweb, es muy útil para estudiar estabilidad y para reforzar la intuición del método (Riley et al., 2006).

7.8 Conclusión

El método de punto fijo constituye una herramienta esencial en el análisis numérico. Aunque no es el método más rápido ni el más eficiente, su simplicidad, su fundamento teórico sólido y su relación con otros métodos iterativos lo hacen indispensable en la formación matemática y en el estudio formal de la convergencia de algoritmos numéricos.

Su aplicación correcta depende de una adecuada elección de la función $g(x)$ y de un análisis cuidadoso de las condiciones de convergencia. Esto permite utilizarlo como punto de partida en el estudio y aplicación de métodos más avanzados para la resolución de ecuaciones no lineales (Burden et al., 2016).

7.9 Aplicación del método en Python

El objetivo fue desarrollar un programa en Python que permita ingresar una función $f(x)$ y su forma iterativa $g(x)$, graficar la función y luego aplicar el método de Punto Fijo si el usuario lo desea. El programa calcula sucesivamente los valores de $x_{n+1} = g(x_n)$ hasta alcanzar una precisión deseada y muestra los resultados obtenidos.

Entrada

- Una cadena de texto que representa la función original $f(x)$.
- La forma iterativa correspondiente $g(x)$.
- El intervalo para graficar.
- El valor inicial x_0 .

$$\begin{aligned}f(x) &= \cos(x) - x \\g(x) &= \cos(x)\end{aligned}$$

Salida

- Gráfica de la función $f(x)$.
- La raíz aproximada encontrada.
- Número de iteraciones realizadas hasta cumplir la tolerancia.

Restricciones

- El método requiere que $|g'(x)| < 1$ en el entorno de la raíz para garantizar la convergencia.
- La función debe ser continua y evaluable en todo el intervalo seleccionado.

Código

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # === 1. Ingreso de la función y su forma iterativa g(x) ===
5 print("==> MÉTODO DEL PUNTO FIJO ==>")
6 print("Recuerde que f(x) = 0 se reescribe como x = g(x)")
7 print("Ejemplo: Si f(x) = cos(x) - x, entonces g(x) = cos(x)\n")
8
9 func_str = input("Ingrese la función original f(x): ")      # Ejemplo: np.cos(x) - x
10 g_str = input("Ingrese la función iterativa g(x): ")        # Ejemplo: np.cos(x)
11
12 # Definición de funciones
13 def f(x):
14     return eval(func_str, {"np": np, "x": x})
15
16 def g(x):
17     return eval(g_str, {"np": np, "x": x})
18
19 # === 2. Graficar la función f(x) ===
20 xmin = float(input("Ingrese el valor mínimo de x: "))
21 xmax = float(input("Ingrese el valor máximo de x: "))
22
23 x = np.linspace(xmin, xmax, 400)
24 y = f(x)
25
26 plt.figure(figsize=(8, 5))
27 plt.plot(x, y, label=f"f(x) = {func_str}", color='blue')
28 plt.axhline(0, color='black', linestyle='--')
29 plt.axvline(0, color='black', linestyle='--')
30 plt.title("Gráfico de la función ingresada")
31 plt.xlabel("x")
32 plt.ylabel("f(x)")
33 plt.legend()
34 plt.grid(True)
35 plt.show()
36
37 # === 3. Pregunta si desea aplicar el método de punto fijo ===
38 op = input("¿Desea aplicar el método de Punto Fijo? (s/n): ").lower()
39
40 if op == "s":
41     # === 4. Ingreso de valor inicial ===
42     x0 = float(input("Ingrese el valor inicial x0: "))
43
44 tol = 1e-6
45 max_iter = 100
46
47 print("\nIteración | x0 | g(x0) | f(x0) | Error")
48 print("-----")
49
50 for i in range(1, max_iter + 1):
51     x1 = g(x0)
```

```
52 error = abs(x1 - x0)
53
54 print(f"\n{i:9d} | {x0:10.6f} | {x1:12.6f} | {f(x1):12.6f} | {error:10.6f}")
55
56 if error < tol:
57     print("\n Raíz aproximada encontrada: {x1:.6f}")
58     print(f"Iteraciones realizadas: {i}")
59     break
60
61 x0 = x1
62 else:
63     print("\n No se alcanzó la convergencia después de", max_iter, "iteraciones.")
64 else:
65     print("No se aplicó el método de Punto Fijo.")
```

Ejecución

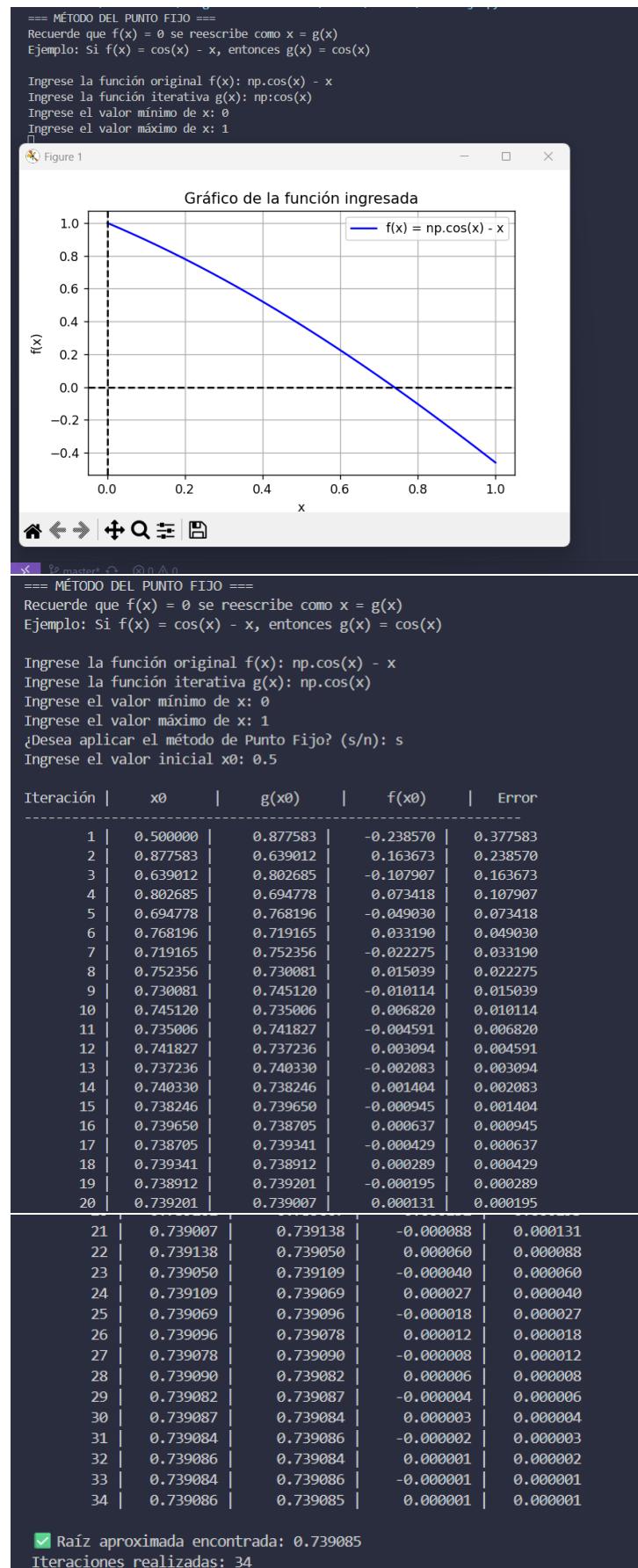


Figura 7.1: Método de Punto Fijo en Python

8 Método de Regula Falsi

El método de regula falsi, también conocido como método de la falsa posición, es una técnica clásica para la solución numérica de ecuaciones no lineales de la forma

$$f(x) = 0.$$

Este método combina aspectos del método de la bisección y del método de la secante, manteniendo siempre un intervalo que contiene la raíz mientras utiliza una aproximación lineal similar a la secante para generar nuevas aproximaciones. Su origen se remonta a prácticas matemáticas antiguas, pero su formalización moderna aparece descrita en textos fundamentales de análisis numérico (Burden & Faires, 2011; Chapra & Canale, 2015; Cheney & Kincaid, 2009).

8.1 Idea fundamental del método

Sea un intervalo cerrado $[a, b]$ tal que la función f sea continua en él y satisfaga la condición

$$f(a) f(b) < 0,$$

lo cual garantiza, mediante el Teorema del Valor Intermedio, la existencia de al menos una raíz en dicho intervalo. A diferencia del método de la bisección, que toma el punto medio como nueva aproximación, el método de regula falsi utiliza la recta secante que une los puntos $(a, f(a))$ y $(b, f(b))$ para obtener una aproximación más refinada a la raíz (Burden et al., 2016; Chapra & Canale, 2015).

El punto donde esta recta corta al eje x se calcula mediante la fórmula:

$$x_r = b - \frac{f(b)(a - b)}{f(a) - f(b)}.$$

Este x_r se denomina falsa posición y representa la aproximación actual de la raíz.

8.2 Actualización del intervalo

Una vez calculado x_r , se evalúa $f(x_r)$ y se conserva el intervalo que garantice el cambio de signo. Es decir:

$$\begin{cases} a = x_r & \text{si } f(a) f(x_r) < 0, \\ b = x_r & \text{si } f(a) f(x_r) > 0. \end{cases}$$

Este proceso asegura que la raíz permanece dentro del intervalo, proporcionando la robustez característica del método de bisección, pero con un paso adicional guiado por la pendiente de

la secante, lo que permite avanzar de manera más eficiente en muchas situaciones (Atkinson, 2009; Süli & Mayers, 2003).

8.3 Convergencia

El método de regula falsi es linealmente convergente, aunque en algunos casos su velocidad puede ser lenta. Esto ocurre especialmente cuando uno de los extremos del intervalo permanece fijo durante muchas iteraciones, lo cual puede suceder si la función presenta curvaturas pronunciadas o cambios de pendiente que provocan que la secante tienda a acercarse preferentemente a uno de los extremos (Burden & Faires, 2011; Press et al., 2007).

A pesar de ello, su principal ventaja es que **nunca pierde la raíz**, ya que siempre mantiene el intervalo acotado con un cambio de signo, lo que lo hace más seguro que métodos que no usan acotamiento, como el método de la secante clásico.

8.4 Criterios de parada

Los criterios más empleados para finalizar el proceso iterativo son:

- Error relativo entre iteraciones:

$$\left| \frac{x_r^{(k)} - x_r^{(k-1)}}{x_r^{(k)}} \right| < \varepsilon.$$

- Evaluación de la función:

$$|f(x_r)| < \varepsilon.$$

- Máximo número de iteraciones: Se detiene el proceso cuando se supera un número preestablecido de iteraciones.

Estos criterios permiten controlar la precisión deseada y asegurar que la aproximación obtenida es suficientemente cercana a la raíz (Burden et al., 2016; Chapra & Canale, 2015).

8.5 Ventajas y desventajas

Ventajas:

- Conserva la propiedad de acotamiento del método de la bisección.
- Puede converger más rápido que la bisección en muchas funciones.
- No requiere cálculo de derivadas.

Desventajas:

- La convergencia puede ser muy lenta si uno de los extremos del intervalo queda “atrapado”.
- Usualmente tiene una convergencia lineal, más lenta que la del método de la secante o Newton-Raphson.

8.6 Resumen conceptual

El método de regula falsi representa un compromiso entre estabilidad y velocidad: mantiene la seguridad del acotamiento, pero intenta mejorar la rapidez usando una aproximación lineal. Por ello, es especialmente útil cuando se requiere una garantía estricta de que la raíz no se perderá, pero se desea evitar la lentitud del método de la bisección tradicional (Burden & Faires, 2011; Chapra & Canale, 2015; Cheney & Kincaid, 2009).

8.7 Aplicación del método en Python

El objetivo fue desarrollar un programa en Python que permita al usuario ingresar una función $f(x)$, graficarla en un intervalo definido y aplicar el método de Regula Falsi si así lo desea. El programa realiza iteraciones hasta que se cumpla un criterio de tolerancia, mostrando en cada paso los valores de a , b , c , $f(c)$ y el error estimado.

Entrada

- Una cadena de texto que representa la función matemática $f(x)$.
- Los valores iniciales a y b que delimitan el intervalo de búsqueda.
- El intervalo para graficar la función.

$$f(x) = x^3 - x - 1$$

Salida

- Gráfica de la función $f(x)$ en el intervalo ingresado.
- La raíz aproximada encontrada.
- Número de iteraciones realizadas hasta cumplir la tolerancia.

Restricciones

- La función debe ser continua en el intervalo $[a, b]$.
- Debe cumplirse la condición de cambio de signo $f(a)f(b) < 0$.

Código

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # === 1. Ingreso de la función ===
5 print("==> MÉTODO DE REGULA FALSI (FALSA POSICIÓN) ==>")
6 func_str = input("Ingrese la función f(x): " ) # Ejemplo: x**3 - x - 1
7
8 # Definición de la función
9 def f(x):
10    return eval(func_str, {"np": np, "x": x})
11
12 # === 2. Graficar la función ===
13 xmin = float(input("Ingrese el valor mínimo de x: "))
14 xmax = float(input("Ingrese el valor máximo de x: "))
15
16 x = np.linspace(xmin, xmax, 400)
17 y = f(x)
18
19 plt.figure(figsize=(8, 5))
20 plt.plot(x, y, label=f"f(x) = {func_str}", color='blue')
21 plt.axhline(0, color='black', linestyle='--')
22 plt.axvline(0, color='black', linestyle='--')
23 plt.title("Gráfico de la función ingresada")
24 plt.xlabel("x")
25 plt.ylabel("f(x)")
26 plt.legend()
27 plt.grid(True)
28 plt.show()
29
30 # === 3. Pregunta si desea aplicar el método de Regula Falsi ===
31 op = input("¿Desea aplicar el método de Regula Falsi? (s/n): ").lower()
32
33 if op == "s":
34 # === 4. Ingreso de los extremos del intervalo ===
35 a = float(input("Ingrese el valor de a (extremo izquierdo): "))
36 b = float(input("Ingrese el valor de b (extremo derecho): "))
37
38 # Comprobación del cambio de signo
39 if f(a) * f(b) > 0:
40    print(" La función no cambia de signo en el intervalo. No se puede aplicar el
        ↪ método.")
41 else:
42    tol = 1e-6
43    max_iter = 100
44
45 print("\nIteración |      a      |      b      |      c      |      f(c)      |
        ↪ Error")
46 print("-----")
47
48 c_old = a
49 for i in range(1, max_iter + 1):

```

```
50 # Fórmula de Regula Falsi
51 c = b - (f(b) * (a - b)) / (f(a) - f(b))
52 error = abs(c - c_old)
53 c_old = c
54
55 print(f"\n{i:9d} | {a:10.6f} | {b:10.6f} | {c:10.6f} | {f(c):10.6f} | {error:10.6f}")
56
57 if abs(f(c)) < tol or error < tol:
58     print(f"\n Raíz aproximada encontrada: {c:.6f}")
59     print(f"Iteraciones realizadas: {i}")
60     break
61
62 # Actualización de intervalos
63 if f(a) * f(c) < 0:
64     b = c
65 else:
66     a = c
67 else:
68     print("\n No se alcanzó la convergencia después de", max_iter, "iteraciones.")
69 else:
70     print("No se aplicó el método de Regula Falsi.")
```

Ejecución

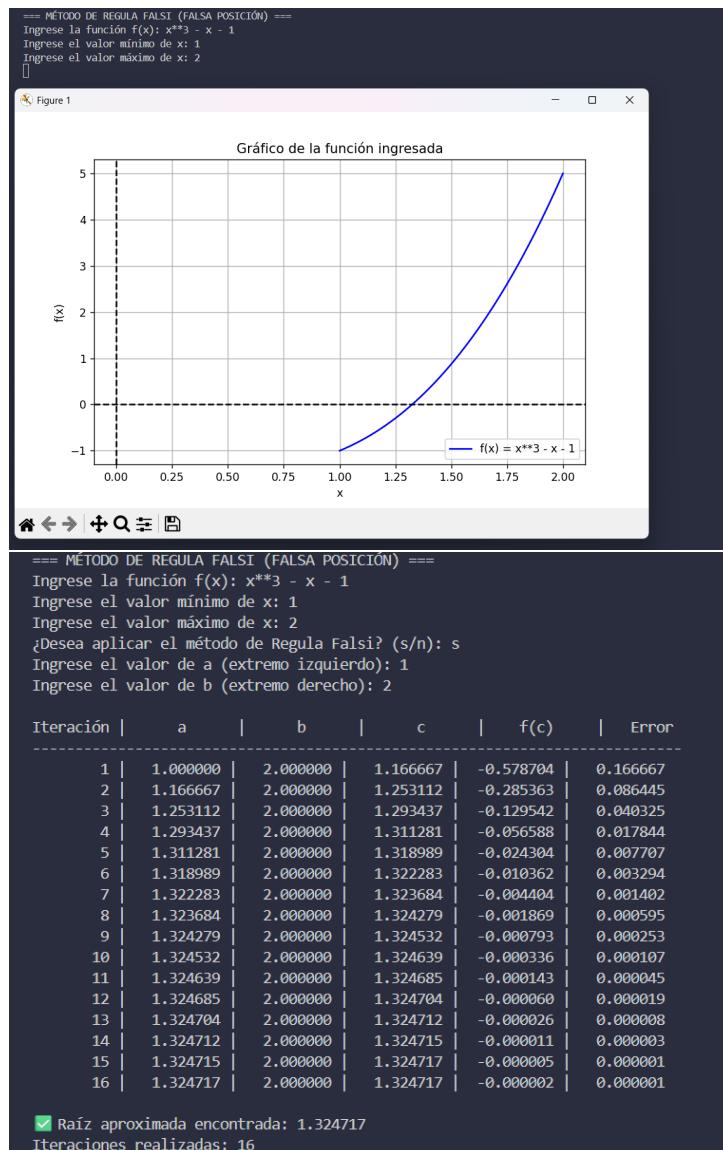


Figura 8.1: Método de Regula Falsi en Python

Parte II

Unidad II

9 Gradiente de una función

La gradiente es uno de los conceptos fundamentales del cálculo multivariable y del análisis numérico. Representa la dirección de mayor crecimiento de una función escalar y constituye una herramienta esencial en optimización, análisis de modelos matemáticos y métodos iterativos numéricos (Anton et al., 2012; Stewart et al., 2016). Su aplicación se extiende a la física, ingeniería, economía, aprendizaje automático y solución de ecuaciones diferenciales (Burden et al., 2016; Riley et al., 2006).

9.1 Definición

Sea una función escalar de varias variables

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

que es diferenciable en un punto del dominio. La gradiente de f , denotada por ∇f o $\text{grad } f$, se define como el vector cuyas componentes son las derivadas parciales primeras de f :

$$\nabla f(x_1, \dots, x_n) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right).$$

Este vector constituye una generalización natural del concepto de derivada en una dimensión, extendiéndolo a espacios de dimensión superior (Anton et al., 2012; Sullivan, 2004).

9.2 Interpretación geométrica

El vector gradiente posee una interpretación geométrica fundamental:

$\nabla f(\mathbf{x})$ apunta en la dirección de máximo crecimiento de f .

Además:

- La magnitud $\|\nabla f\|$ indica la tasa máxima de cambio.
- Es perpendicular (normal) a las curvas (o superficies) de nivel de f , es decir,

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c.$$

Esta propiedad es clave en optimización y geometría diferencial, donde el análisis de superficies y sus normales es crucial (Anton et al., 2012; Riley et al., 2006).

9.3 Derivada direccional

La gradiente se relaciona directamente con la derivada direccional. Para un vector unitario \mathbf{u} , la derivada direccional de f en la dirección de \mathbf{u} se define como:

$$D_{\mathbf{u}}f(\mathbf{x}) = \nabla f(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u}.$$

Esta expresión demuestra que la gradiente actúa como “coeficiente de cambio” de la función en cualquier dirección dada. De esta fórmula se deduce que $D_{\mathbf{u}}f$ es máximo cuando \mathbf{u} es paralelo a ∇f , lo que reafirma la interpretación geométrica (Anton et al., 2012; Riley et al., 2006).

9.4 Propiedades fundamentales

- Linealidad:

$$\nabla(af + bg) = a\nabla f + b\nabla g.$$

- Producto:

$$\nabla(fg) = f\nabla g + g\nabla f.$$

- Cociente:

$$\nabla\left(\frac{f}{g}\right) = \frac{g\nabla f - f\nabla g}{g^2}.$$

- Composición (regla de la cadena):

$$\nabla(f \circ \mathbf{g}) = J_{\mathbf{g}}^T \nabla f(\mathbf{g}(x)),$$

donde $J_{\mathbf{g}}$ es la matriz Jacobiana.

Estas propiedades son esenciales en el diseño de algoritmos numéricos de optimización y métodos iterativos (Burden et al., 2016; Chapra & Canale, 2015).

9.5 Gradiante y optimización

El gradiente es el pilar de numerosos métodos de optimización, tanto teóricos como computacionales:

- Condición de óptimo: Un punto crítico \mathbf{x}^* cumple

$$\nabla f(\mathbf{x}^*) = \mathbf{0}.$$

- Método de descenso del gradiente: El movimiento en dirección opuesta al gradiente,

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha_k \nabla f(\mathbf{x}_k),$$

permite aproximar mínimos locales de manera iterativa.

- Método de Newton multivariable: Utiliza gradiente y Hessiana:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - H_f^{-1}(\mathbf{x}_k) \nabla f(\mathbf{x}_k).$$

Estos métodos son fundamentales en ingeniería, estadística, ciencia de datos y aprendizaje automático (Burden et al., 2016; Chapra & Canale, 2015; Riley et al., 2006).

9.6 Aplicaciones

La gradiente aparece de forma natural en numerosas áreas:

9.6.1 Física clásica y electromagnetismo.

La fuerza conservativa se relaciona mediante:

$$\mathbf{F} = -\nabla U,$$

donde U es la energía potencial (Riley et al., 2006).

9.6.2 Ingeniería y modelado.

Gradientes se utilizan en:

- Modelos térmicos (flujo de calor).
- Dinámica de fluidos.
- Elasticidad de materiales.
- Procesos de control.

9.6.3 Aprendizaje automático y regresión.

Los algoritmos de entrenamiento, como regresión lineal, redes neuronales y SVM, utilizan métodos basados en gradiente para minimizar funciones de costo.

9.6.4 Economía y análisis de funciones multivariadas.

El gradiente describe sensibilidades o tasas de variación respecto a variables económicas, como producción, precios o utilidades (Stewart et al., 2016).

9.6.5 Métodos numéricos.

En métodos iterativos para resolver ecuaciones no lineales y optimización se requiere calcular gradientes en cada iteración (Burden et al., 2016; Chapra & Canale, 2015).

9.7 Aplicación de la gradiente en R

El siguiente código en R simula el proceso del gradiente descendente para la función $f(x) = x^2$, cuya derivada es $f'(x) = 2x$. Se observa cómo los valores de x van disminuyendo gradualmente hasta aproximarse al punto mínimo en $x = 0$.

```

1 # -----
2 # Simulación y gráfico de f(x), f'(x) y gradiente en R
3 # grad guarda el "nuevo" valor de x: x(i) - n * f'(x(i))
4 # -----
5
6 # Parámetro n
7 n <- 0.01
8
9 # Definimos la función f(x) = x^2 y su derivada f'(x) = 2x
10 f <- function(x) x^2
11 f_deriv <- function(x) 2 * x
12
13 # Valor inicial y número de iteraciones
14 x0 <- 3
15 iter <- 21
16
17 # Vectores vacíos
18 x <- numeric(iter)
19 fx <- numeric(iter)
20 fpx <- numeric(iter)
21 grad <- numeric(iter)
22
23 # Primer valor
24 x[1] <- x0
25
26 # Bucle de cálculo
27 for (i in 1:iter) {
28   fx[i] <- f(x[i])
29   fpx[i] <- f_deriv(x[i])
30   grad[i] <- x[i] - n * fpx[i]
31   if (i < iter) {
32     x[i + 1] <- grad[i]
33   }
34 }
35
36 # Crear tabla
37 tabla <- data.frame(
38   xo = x,
39   fx = fx,
40   fpx = fpx,
41   grad = grad
42 )
43 print(tabla)
44
45 # Gráfico con ggplot2
46 if(!require(ggplot2)) install.packages("ggplot2", repos = "https://cloud.r-project.org")

```

```
    ↪ org")
47 if(!require(tidyr))  install.packages("tidyr",  repos = "https://cloud.r-project.org")
48
49 library(ggplot2)
50 library(tidyr)
51
52 datos_long <- tabla |>
53 pivot_longer(cols = c(fx, fpx, grad),
54 names_to = "variable",
55 values_to = "valor")
56
57 ggplot(datos_long, aes(x = xo, y = valor, color = variable)) +
58 geom_point(size = 2) +
59 geom_line(linewidth = 1) +
60 scale_color_manual(values = c("blue", "red", "green"),
61 labels = c("f(x)", "f'(x)", "gradiente (x actualizado)")) +
62 labs(title = "Comparación de f(x), f'(x) y gradiente (x actualizado)",
63 x = "x",
64 y = "Valor",
65 color = "Variable") +
66 theme_minimal(base_size = 13)
```

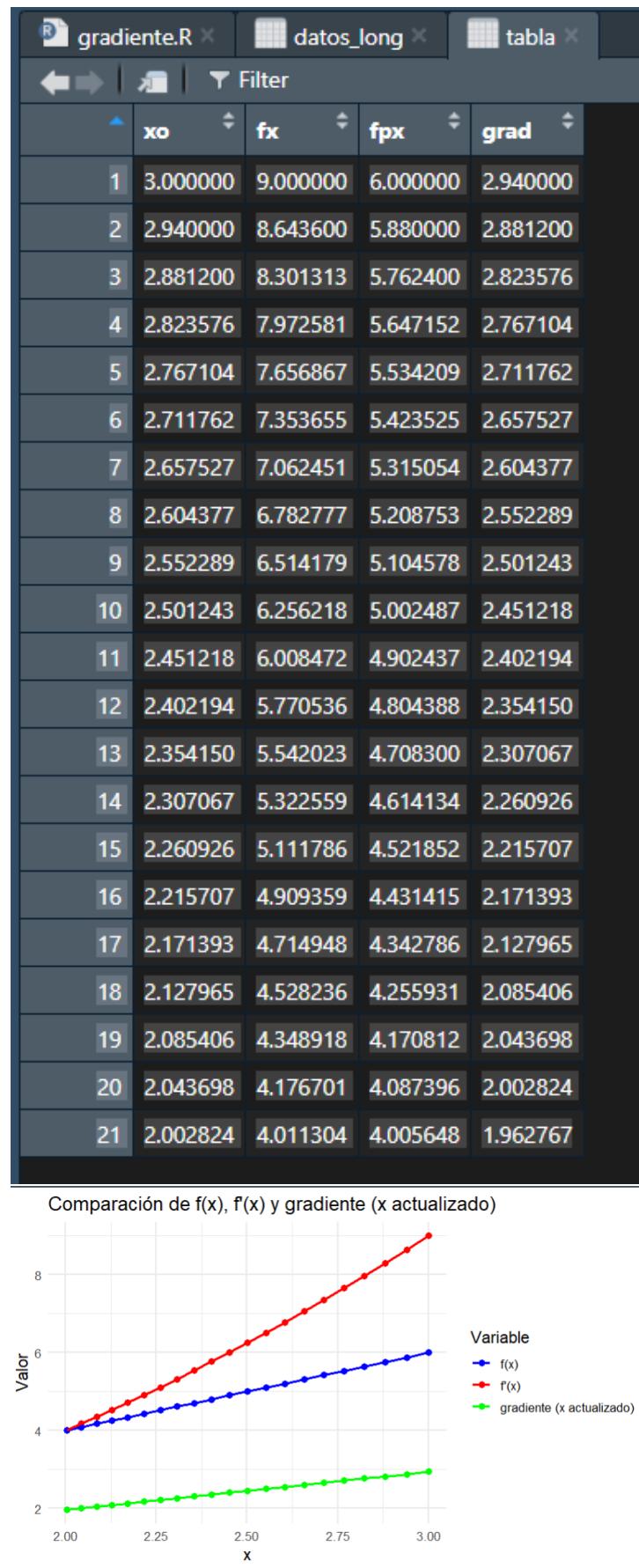


Figura 9.1: Gradiente de una función en R

9.8 Aplicación de la gradiente en un artículo de investigación

En el artículo Comparing the Moore–Penrose Pseudoinverse and Gradient Descent for Solving Linear Regression Problems: A Performance Analysis (Adams, 2025) se comparan dos métodos fundamentales para resolver problemas de regresión lineal: el pseudoinverso de Moore–Penrose y el descenso de gradiente. La regresión lineal busca encontrar los parámetros que mejor predicen una variable dependiente a partir de variables independientes, minimizando los errores cuadrados (OLS).

El pseudoinverso de Moore–Penrose ofrece una solución analítica exacta mediante operaciones matriciales, proporcionando el mínimo error posible. Sin embargo, puede ser computacionalmente costoso e inestable cuando la matriz de características es muy grande o está mal condicionada. En cambio, el descenso de gradiente es un método iterativo que ajusta los parámetros gradualmente en función de la dirección del gradiente negativo del error, controlado por una tasa de aprendizaje. Aunque no garantiza una solución exacta, es escalable y adaptable a grandes volúmenes de datos.

En el marco teórico, se explica que la estabilidad numérica y la eficiencia de cada método dependen del tamaño del conjunto de datos (n), el número de variables (d) y la condición de la matriz X . El pseudoinverso utiliza descomposición SVD, mientras que el descenso de gradiente requiere pasos controlados y puede verse afectado por la escala de las variables.

En la metodología, el autor realizó experimentos con datos sintéticos y reales. Los datos sintéticos permitieron manipular parámetros como el número de muestras, la dimensionalidad y el factor de condición. Para los datos reales se usaron los conjuntos California Housing (20,640 muestras y 8 variables) y Diabetes (442 muestras y 10 variables). En ambos casos se evaluaron tres métricas: tiempo de ejecución, error cuadrático medio (MSE) y, para el descenso de gradiente, el número de iteraciones hasta la convergencia. Los experimentos se implementaron en Python, usando la función `pinv()` para el pseudoinverso y un algoritmo de gradiente con tasa de aprendizaje $\alpha = 0.01$ y tolerancia 10^{-6} .

Los resultados mostraron que el pseudoinverso fue más rápido y preciso en conjuntos pequeños o moderados, manteniendo una alta estabilidad numérica. En cambio, el descenso de gradiente necesitó más iteraciones y su rendimiento dependió fuertemente del escalado de las variables y del valor de la tasa de aprendizaje. Sin embargo, en escenarios de alta dimensionalidad o grandes volúmenes de datos, el descenso de gradiente (y sus variantes como el estocástico) resultó más escalable y eficiente.

En conclusión, el pseudoinverso de Moore–Penrose es ideal para conjuntos de datos bien condicionados y de tamaño moderado, ofreciendo soluciones exactas con bajo error. El descenso de gradiente es preferible para problemas de gran escala, aunque requiere ajuste de hiperparámetros y un buen preprocesamiento. Ambos métodos son esenciales en el análisis de regresión, y su elección depende del equilibrio entre exactitud, estabilidad y costo computacional.

10 Diferenciación Numérica

10.1 Introducción

La diferenciación numérica es una herramienta fundamental en el análisis numérico y en la computación científica. Su objetivo es aproximar derivadas de funciones cuando no es posible obtenerlas de manera analítica, o cuando la función se conoce únicamente a través de datos discretos (Burden et al., 2016; Chapra & Canale, 2015). Este enfoque es ampliamente utilizado en ingeniería, física, análisis de datos, modelos matemáticos aplicados y simulaciones computacionales.

El problema central consiste en aproximar derivadas mediante expresiones que utilizan valores de la función evaluados en puntos cercanos. Dichas expresiones se obtienen mediante la expansión en series de Taylor y constituyen la base de los métodos de diferencias finitas (Anton et al., 2012; Riley et al., 2006).

10.2 Fundamento teórico

10.2.1 Series de Taylor

Sea f una función suficientemente diferenciable en un intervalo que contiene el punto x . La expansión de Taylor alrededor de x permite escribir:

$$f(x+h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2}f''(x) + \frac{h^3}{6}f^{(3)}(x) + \dots,$$

$$f(x-h) = f(x) - hf'(x) + \frac{h^2}{2}f''(x) - \frac{h^3}{6}f^{(3)}(x) + \dots.$$

Estas expresiones permiten deducir fórmulas para aproximar derivadas y analizar el error local de truncamiento asociado a cada aproximación (Atkinson, 2009; Burden et al., 2016).

10.3 Fórmulas de diferencias finitas

Las fórmulas para aproximar derivadas se clasifican según la manera en que utilizan los valores de la función.

10.3.1 Diferencia hacia adelante

Usando la expansión de Taylor se obtiene la fórmula:

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x)}{h},$$

con un error dado por:

$$E = O(h).$$

Esta aproximación es de primer orden y suele utilizarse por su simplicidad computacional, aunque es menos precisa que otras alternativas (Burden et al., 2016; Chapra & Canale, 2015).

10.3.2 Diferencia hacia atrás

De manera análoga, se obtiene:

$$f'(x) \approx \frac{f(x) - f(x-h)}{h},$$

con el mismo error $O(h)$. Esta fórmula se utiliza cuando la evaluación hacia adelante no está disponible, como en métodos que avanzan en el tiempo y solo tienen datos previos (Chapra & Canale, 2015).

10.3.3 Diferencia centrada

Restando las expansiones de $f(x+h)$ y $f(x-h)$ se obtiene:

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h},$$

con un error:

$$E = O(h^2).$$

Esta fórmula es más precisa porque utiliza información simétrica alrededor de x . Es ampliamente preferida en aplicaciones científicas donde se busca alta precisión (Anton et al., 2012; Riley et al., 2006).

10.4 Aproximaciones para derivadas de orden superior

10.4.1 Segunda derivada

Sumando las expansiones de Taylor se obtiene:

$$f''(x) \approx \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2},$$

con error:

$$E = O(h^2).$$

Esta expresión es fundamental en la solución numérica de ecuaciones diferenciales, problemas de vibraciones, transferencia de calor y modelos físicos discretizados (Chapra & Canale, 2015; Riley et al., 2006).

10.4.2 Derivadas superiores

Usando combinaciones de series de Taylor o matrices de diferencias finitas, es posible obtener fórmulas generales para derivadas de orden superior. Estas aproximaciones suelen presentar errores más sensibles al tamaño de paso y requieren mayor precisión numérica (Atkinson, 2009; Burden et al., 2016).

10.5 Análisis del error

10.5.1 Error de truncamiento

El error de truncamiento proviene de ignorar términos de orden superior en la serie de Taylor. Para una fórmula dada, el orden del método indica cómo disminuye el error cuando h se hace más pequeño. Por ejemplo:

- Diferencia hacia adelante: $O(h)$
- Diferencia centrada: $O(h^2)$
- Segunda derivada centrada: $O(h^2)$

El análisis de error es esencial para comprender la estabilidad y precisión de los métodos numéricos (Atkinson, 2009; Burden et al., 2016).

10.5.2 Error de redondeo

Cuando h es demasiado pequeño, el error por cancelación y redondeo puede aumentar significativamente debido a las limitaciones de la aritmética de punto flotante. Esto genera un equilibrio óptimo entre reducir h y mantener un nivel adecuado de estabilidad numérica (Chapra & Canale, 2015; Press et al., 2007).

10.6 Aplicaciones de la diferenciación numérica

10.6.1 Solución de ecuaciones diferenciales

Las discretizaciones basadas en derivadas numéricas se utilizan en:

- Ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO).
- Ecuaciones diferenciales parciales (EDP).
- Modelos de dinámica de fluidos, calor, ondas y elasticidad.

Estas técnicas permiten transformar problemas continuos en sistemas algebraicos manejables computacionalmente (Press et al., 2007; Riley et al., 2006).

10.6.2 Optimización

Los métodos de optimización requieren derivadas para estimar direcciones de búsqueda, calcular gradientes y aproximar Hessianas. En muchos casos se emplean derivadas numéricas cuando la función no es diferenciable analíticamente (Burden et al., 2016).

10.6.3 Procesamiento de datos y señales

En análisis de datos discretos se utilizan derivadas numéricas para:

- detectar cambios bruscos,
- hallar picos en señales,
- calcular tasas de crecimiento,
- aproximar tendencias locales.

Estas aplicaciones son comunes en ingeniería, finanzas y ciencia experimental.

10.7 Ejemplos

10.7.1 Ejemplo 1

Un startup de tecnología registra el número acumulado de usuarios activos mensuales:

Mes	1	2	3	4	5	6	7
Usuarios (miles)	10	15	23	34	48	65	85

Tareas

1. Calcula la tasa de crecimiento de usuarios (usuarios nuevos por mes) en el mes 4 usando diferencia centrada.
2. Calcula la tasa de crecimiento en el mes 1 (usa diferencia adelante)
3. Calcula la tasa de crecimiento en el mes 7 (usa diferencia atrás)
4. ¿En qué mes fue mayor la aceleración del crecimiento? (calcula la segunda derivada en cada punto)
5. Interpreta: ¿la startup está creciendo de forma acelerada o desacelerada?

Datos:

Mes	1	2	3	4	5	6	7
Usuarios (miles)	10	15	23	34	48	65	85

Sea $h = 1$ mes (intervalo entre observaciones).

- 1) Tasa de crecimiento en el mes 4 (diferencia centrada)

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h}$$

Para $x = 4$:

$$f'(4) = \frac{f(5) - f(3)}{2} = \frac{48 - 23}{2} = 12.5$$

$f'(4) = 12.5$ miles de usuarios/mes

-
- 2) Tasa de crecimiento en el mes 1 (diferencia hacia adelante)

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$$

Para $x = 1$:

$$f'(1) = f(2) - f(1) = 15 - 10 = 5$$

$f'(1) = 5$ miles de usuarios/mes

—
3) Tasa de crecimiento en el mes 7 (diferencia hacia atrás)

$$f'(x) \approx \frac{f(x) - f(x-h)}{h}$$

Para $x = 7$:

$$f'(7) = f(7) - f(6) = 85 - 65 = 20$$

$f'(7) = 20 \text{ miles de usuarios/mes}$

—
4) Aceleración del crecimiento (segunda derivada)

$$f''(x) \approx \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2}$$

Para los puntos interiores ($x = 2, 3, 4, 5, 6$):

$$\begin{aligned} f''(2) &= 23 - 2(15) + 10 = 3 \\ f''(3) &= 34 - 2(23) + 15 = 3 \\ f''(4) &= 48 - 2(34) + 23 = 3 \\ f''(5) &= 65 - 2(48) + 34 = 3 \\ f''(6) &= 85 - 2(65) + 48 = 3 \end{aligned}$$

$f''(x) = 3 \text{ miles de usuarios/mes}^2$ (constante en los meses 2 a 6)

—
5) Interpretación

Como la segunda derivada es positiva y constante, la tasa de crecimiento aumenta de forma continua.

La startup crece de forma acelerada.

En términos prácticos, cada mes la tasa de nuevos usuarios aumenta en aproximadamente 3 mil usuarios/mes², lo que refleja un crecimiento sostenido y cada vez más rápido.

Código en R

```

1 # Datos
2 mes <- 1:7
3 usuarios <- c(10, 15, 23, 34, 48, 65, 85)
4 h <- 1
5
6 # 1. Derivadas (tasa de crecimiento)
7 # Diferencia adelante, atrás y centrada
8 dif_adelante <- (usuarios[2] - usuarios[1]) / h
9 dif_atras <- (usuarios[7] - usuarios[6]) / h
10 dif_centrada <- (usuarios[5] - usuarios[3]) / (2*h)
11
12 cat("Tasa mes 1 (adelante):", dif_adelante, "miles/mes\n")
13 cat("Tasa mes 4 (centrada):", dif_centrada, "miles/mes\n")
14 cat("Tasa mes 7 (atrás):", dif_atras, "miles/mes\n")
15
16 # 2. Segunda derivada (aceleración) en puntos interiores
17 f2 <- numeric(length(usuarios))
18 for (i in 2:(length(usuarios)-1)) {
19   f2[i] <- (usuarios[i+1] - 2*usuarios[i] + usuarios[i-1]) / (h^2)
20 }
21 f2
22
23 cat("\nSegunda derivada (aceleración) por mes:\n")
24 print(data.frame(mes=mes, aceleracion=f2))
25
26 # 3. Interpretación
27 if (all(f2[2:6] > 0)) {
28   cat("\nLa aceleración es positiva → crecimiento acelerado.\n")
29 } else if (all(f2[2:6] < 0)) {
30   cat("\nLa aceleración es negativa → crecimiento desacelerado.\n")
31 } else {
32   cat("\nLa aceleración varía → crecimiento irregular.\n")
33 }
```

Ejecución

```

1 > # Datos
2 > mes <- 1:7
3 > usuarios <- c(10, 15, 23, 34, 48, 65, 85)
4 > h <- 1
5 >
6 > # 1. Derivadas (tasa de crecimiento)
7 > # Diferencia adelante, atrás y centrada
8 > dif_adelante <- (usuarios[2] - usuarios[1]) / h
9 > dif_atras <- (usuarios[7] - usuarios[6]) / h
10 > dif_centrada <- (usuarios[5] - usuarios[3]) / (2*h)
11 >
12 > cat("Tasa mes 1 (adelante):", dif_adelante, "miles/mes\n")
13 Tasa mes 1 (adelante): 5 miles/mes
14 > cat("Tasa mes 4 (centrada):", dif_centrada, "miles/mes\n")
15 Tasa mes 4 (centrada): 12.5 miles/mes
```

```

16 > cat("Tasa mes 7 (atrás):", dif_atras, "miles/mes\n")
17 Tasa mes 7 (atrás): 20 miles/mes
18 >
19 > # 2. Segunda derivada (aceleración) en puntos interiores
20 > f2 <- numeric(length(usuarios))
21 > for (i in 2:(length(usuarios)-1)) {
22   +   f2[i] <- (usuarios[i+1] - 2*usuarios[i] + usuarios[i-1]) / (h^2)
23   + }
24 > f2
25 [1] 0 3 3 3 3 3 0
26 >
27 > cat("\nSegunda derivada (aceleración) por mes:\n")
28
29 Segunda derivada (aceleración) por mes:
30 > print(data.frame(mes=mes, aceleracion=f2))
31 mes aceleracion
32 1     1          0
33 2     2          3
34 3     3          3
35 4     4          3
36 5     5          3
37 6     6          3
38 7     7          0
39 >
40 > # 3. Interpretación
41 > if (all(f2[2:6] > 0)) {
42   +   cat("\nLa aceleración es positiva → crecimiento acelerado.\n")
43   + } else if (all(f2[2:6] < 0)) {
44   +   cat("\nLa aceleración es negativa → crecimiento desacelerado.\n")
45   + } else {
46   +   cat("\nLa aceleración varía → crecimiento irregular.\n")
47   + }
48
49 La aceleración es positiva → crecimiento acelerado.

```

10.7.2 Ejemplo 2

Durante el entrenamiento de un modelo de Machine Learning, se registra la función de pérdida (loss) en cada época:

Época	0	10	20	30	40	50
Loss	2.45	1.82	1.35	1.08	0.95	0.89

Tareas

1. Calcula la tasa de cambio del loss en la época 20 usando diferencia centrada con $h = 10$.
2. Calcula la segunda derivada en la época 30. ¿Qué indica sobre la convergencia?

3. Si la tasa de cambio del loss es menor que 0.01 por época, el entrenamiento puede detenerse.
 ¿En qué época se alcanza este criterio?
4. Estima el loss en la época 25 usando interpolación lineal basada en las derivadas.

Datos:

Época	0	10	20	30	40	50
Loss	2.45	1.82	1.35	1.08	0.95	0.89

Sea $h = 10$ (épocas entre mediciones).

- 1) Tasa de cambio del loss en la época 20 (diferencia centrada, $h = 10$)

La diferencia centrada con paso h :

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h}.$$

Para $x = 20$:

$$f'(20) \approx \frac{f(30) - f(10)}{2 \cdot 10} = \frac{1.08 - 1.82}{20} = \frac{-0.74}{20} = -0.037.$$

$f'(20) \approx -0.037$ (loss por época)

(es decir, la loss decrece aproximadamente 0.037 por época).

- 2) Segunda derivada en la época 30 (centrada, $h = 10$)

Fórmula de segunda derivada centrada:

$$f''(x) \approx \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2}.$$

Para $x = 30$:

$$f''(30) \approx \frac{f(40) - 2f(30) + f(20)}{10^2} = \frac{0.95 - 2(1.08) + 1.35}{100} = \frac{0.14}{100} = 0.0014.$$

$f''(30) \approx 0.0014$ (loss por época²)

Interpretación: la segunda derivada es positiva y pequeña, lo que indica que la pendiente (tasa de decremento del loss) se está volviendo menos negativa: la disminución del loss se está frenando — es decir, el entrenamiento está tendiendo a converger (la curva se aplana).

3) ¿En qué época la tasa de cambio del loss es menor que 0.01 por época?

Calculamos las derivadas aproximadas en cada época usando diferencias hacia adelante/centradas/atrás con $h = 10$:

$$\begin{aligned}f'(0) &\approx \frac{f(10) - f(0)}{10} = \frac{1.82 - 2.45}{10} = -0.063 \\f'(10) &\approx \frac{f(20) - f(0)}{20} = \frac{1.35 - 2.45}{20} = -0.055 \\f'(20) &\approx -0.037 \quad (\text{ya calculado}) \\f'(30) &\approx \frac{f(40) - f(20)}{20} = \frac{0.95 - 1.35}{20} = -0.020 \\f'(40) &\approx \frac{f(50) - f(30)}{20} = \frac{0.89 - 1.08}{20} = -0.0095 \\f'(50) &\approx \frac{f(50) - f(40)}{10} = \frac{0.89 - 0.95}{10} = -0.006\end{aligned}$$

El criterio es $|f'| < 0.01$. El primer punto donde se cumple es la época 40 (a partir de la época 40 la magnitud de la tasa cae por debajo de 0.01).

4) Estima el loss en la época 25 usando interpolación lineal basada en las derivadas

Usamos una aproximación lineal (expansión de primer orden) tomando el punto conocido en época 20 y la derivada en 20:

$$f(25) \approx f(20) + f'(20) \cdot (25 - 20).$$

Sustituyendo:

$$f(25) \approx 1.35 + (-0.037) \cdot 5 = 1.35 - 0.185 = 1.165.$$

$$f(25) \approx 1.165$$

Nota: la interpolación lineal clásica entre los puntos $(20, 1.35)$ y $(30, 1.08)$ daría el punto medio $(1.35 + 1.08)/2 = 1.215$. La estimación basada en la derivada (linealización en 20) da 1.165; ambas son aproximaciones distintas (la elección depende del método que prefieras).

Código en R

```

1 # Datos
2 época <- c(0,10,20,30,40,50)
3 loss  <- c(2.45, 1.82, 1.35, 1.08, 0.95, 0.89)
4 h <- 10
5
6 # Funciones para derivadas (usando h fijo = 10)
7 # Diferencia hacia adelante (para primer punto)
8 d_forward <- function(i) {
9   (loss[i+1] - loss[i]) / h

```

```

10  }
11 # Diferencia hacia atrás (para último punto)
12 d_backward <- function(i) {
13   (loss[i] - loss[i-1]) / h
14 }
15 # Diferencia centrada (para puntos interiores)
16 d_center <- function(i) {
17   (loss[i+1] - loss[i-1]) / (2*h)
18 }
19 # Segunda derivada centrada
20 d2_center <- function(i) {
21   (loss[i+1] - 2*loss[i] + loss[i-1]) / (h^2)
22 }
23
24 # Calcular derivadas en cada época
25 deriv <- numeric(length(loss))
26 for (i in seq_along(loss)) {
27   if (i == 1) deriv[i] <- d_forward(i)
28   else if (i == length(loss)) deriv[i] <- d_backward(i)
29   else deriv[i] <- d_center(i)
30 }
31
32 # Calcular segunda derivada en puntos interiores
33 d2 <- rep(NA, length(loss))
34 for (i in 2:(length(loss)-1)) {
35   d2[i] <- d2_center(i)
36 }
37
38 # Resultados pedidos:
39 cat("Derivadas (loss por época):\n")
40 print(data.frame(epoca=epoca, loss=loss, derivada=round(deriv, 5)))
41
42 cat("\nSegunda derivada (solo puntos interiores):\n")
43 print(data.frame(epoca=epoca, segunda_derivada=round(d2, 6)))
44
45 # 1) Tasa en época 20 (índice de época 3)
46 idx20 <- which(epoca == 20)
47 cat("\n1) f'(20) (centrada, h=10):", round(deriv[idx20], 5), " (loss/época)\n")
48
49 # 2) Segunda derivada en época 30
50 idx30 <- which(epoca == 30)
51 cat("2) f''(30):", round(d2[idx30], 6), " (loss/época^2)\n")
52
53 # Interpretación (impresa)
54 if (!is.na(d2[idx30])) {
55   if (d2[idx30] > 0) {
56     cat("    Interpretación: f''(30) > 0 → la magnitud de la pendiente se está
57         ↪ reduciendo; la disminución del loss se está frenando (convergencia en curso)
58         ↪ .\n")
59   } else if (d2[idx30] < 0) {
60     cat("    Interpretación: f''(30) < 0 → la disminución se está acelerando.\n")
61   } else {
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
629
630
631
632
633
634
635
636
637
637
638
639
639
640
641
642
643
644
645
645
646
647
647
648
649
649
650
651
652
652
653
654
654
655
656
656
657
657
658
658
659
659
660
660
661
661
662
662
663
663
664
664
665
665
666
666
667
667
668
668
669
669
670
670
671
671
672
672
673
673
674
674
675
675
676
676
677
677
678
678
679
679
680
680
681
681
682
682
683
683
684
684
685
685
686
686
687
687
688
688
689
689
690
690
691
691
692
692
693
693
694
694
695
695
696
696
697
697
698
698
699
699
700
700
701
701
702
702
703
703
704
704
705
705
706
706
707
707
708
708
709
709
710
710
711
711
712
712
713
713
714
714
715
715
716
716
717
717
718
718
719
719
720
720
721
721
722
722
723
723
724
724
725
725
726
726
727
727
728
728
729
729
730
730
731
731
732
732
733
733
734
734
735
735
736
736
737
737
738
738
739
739
740
740
741
741
742
742
743
743
744
744
745
745
746
746
747
747
748
748
749
749
750
750
751
751
752
752
753
753
754
754
755
755
756
756
757
757
758
758
759
759
760
760
761
761
762
762
763
763
764
764
765
765
766
766
767
767
768
768
769
769
770
770
771
771
772
772
773
773
774
774
775
775
776
776
777
777
778
778
779
779
780
780
781
781
782
782
783
783
784
784
785
785
786
786
787
787
788
788
789
789
790
790
791
791
792
792
793
793
794
794
795
795
796
796
797
797
798
798
799
799
800
800
801
801
802
802
803
803
804
804
805
805
806
806
807
807
808
808
809
809
810
810
811
811
812
812
813
813
814
814
815
815
816
816
817
817
818
818
819
819
820
820
821
821
822
822
823
823
824
824
825
825
826
826
827
827
828
828
829
829
830
830
831
831
832
832
833
833
834
834
835
835
836
836
837
837
838
838
839
839
840
840
841
841
842
842
843
843
844
844
845
845
846
846
847
847
848
848
849
849
850
850
851
851
852
852
853
853
854
854
855
855
856
856
857
857
858
858
859
859
860
860
861
861
862
862
863
863
864
864
865
865
866
866
867
867
868
868
869
869
870
870
871
871
872
872
873
873
874
874
875
875
876
876
877
877
878
878
879
879
880
880
881
881
882
882
883
883
884
884
885
885
886
886
887
887
888
888
889
889
890
890
891
891
892
892
893
893
894
894
895
895
896
896
897
897
898
898
899
899
900
900
901
901
902
902
903
903
904
904
905
905
906
906
907
907
908
908
909
909
910
910
911
911
912
912
913
913
914
914
915
915
916
916
917
917
918
918
919
919
920
920
921
921
922
922
923
923
924
924
925
925
926
926
927
927
928
928
929
929
930
930
931
931
932
932
933
933
934
934
935
935
936
936
937
937
938
938
939
939
940
940
941
941
942
942
943
943
944
944
945
945
946
946
947
947
948
948
949
949
950
950
951
951
952
952
953
953
954
954
955
955
956
956
957
957
958
958
959
959
960
960
961
961
962
962
963
963
964
964
965
965
966
966
967
967
968
968
969
969
970
970
971
971
972
972
973
973
974
974
975
975
976
976
977
977
978
978
979
979
980
980
981
981
982
982
983
983
984
984
985
985
986
986
987
987
988
988
989
989
990
990
991
991
992
992
993
993
994
994
995
995
996
996
997
997
998
998
999
999
1000
1000
1001
1001
1002
1002
1003
1003
1004
1004
1005
1005
1006
1006
1007
1007
1008
1008
1009
1009
1010
1010
1011
1011
1012
1012
1013
1013
1014
1014
1015
1015
1016
1016
1017
1017
1018
1018
1019
1019
1020
1020
1021
1021
1022
1022
1023
1023
1024
1024
1025
1025
1026
1026
1027
1027
1028
1028
1029
1029
1030
1030
1031
1031
1032
1032
1033
1033
1034
1034
1035
1035
1036
1036
1037
1037
1038
1038
1039
1039
1040
1040
1041
1041
1042
1042
1043
1043
1044
1044
1045
1045
1046
1046
1047
1047
1048
1048
1049
1049
1050
1050
1051
1051
1052
1052
1053
1053
1054
1054
1055
1055
1056
1056
1057
1057
1058
1058
1059
1059
1060
1060
1061
1061
1062
1062
1063
1063
1064
1064
1065
1065
1066
1066
1067
1067
1068
1068
1069
1069
1070
1070
1071
1071
1072
1072
1073
1073
1074
1074
1075
1075
1076
1076
1077
1077
1078
1078
1079
1079
1080
1080
1081
1081
1082
1082
1083
1083
1084
1084
1085
1085
1086
1086
1087
1087
1088
1088
1089
1089
1090
1090
1091
1091
1092
1092
1093
1093
1094
1094
1095
1095
1096
1096
1097
1097
1098
1098
1099
1099
1100
1100
1101
1101
1102
1102
1103
1103
1104
1104
1105
1105
1106
1106
1107
1107
1108
1108
1109
1109
1110
1110
1111
1111
1112
1112
1113
1113
1114
1114
1115
1115
1116
1116
1117
1117
1118
1118
1119
1119
1120
1120
1121
1121
1122
1122
1123
1123
1124
1124
1125
1125
1126
1126
1127
1127
1128
1128
1129
1129
1130
1130
1131
1131
1132
1132
1133
1133
1134
1134
1135
1135
1136
1136
1137
1137
1138
1138
1139
1139
1140
1140
1141
1141
1142
1142
1143
1143
1144
1144
1145
1145
1146
1146
1147
1147
1148
1148
1149
1149
1150
1150
1151
1151
1152
1152
1153
1153
1154
1154
1155
1155
1156
1156
1157
1157
1158
1158
1159
1159
1160
1160
1161
1161
1162
1162
1163
1163
1164
1164
1165
1165
1166
1166
1167
1167
1168
1168
1169
1169
1170
1170
1171
1171
1172
1172
1173
1173
1174
1174
1175
1175
1176
1176
1177
1177
1178
1178
1179
1179
1180
1180
1181
1181
1182
1182
1183
1183
1184
1184
1185
1185
1186
1186
1187
1187
1188
1188
1189
1189
1190
1190
1191
1191
1192
1192
1193
1193
1194
1194
1195
1195
1196
1196
1197
1197
1198
1198
1199
1199
1200
1200
1201
1201
1202
1202
1203
1203
1204
1204
1205
1205
1206
1206
1207
1207
1208
1208
1209
1209
1210
1210
1211
1211
1212
1212
1213
1213
1214
1214
1215
1215
1216
1216
1217
1217
1218
1218
1219
1219
1220
1220
1221
1221
1222
1222
1223
1223
1224
1224
1225
1225
1226
1226
1227
1227
1228
1228
1229
1229
1230
1230
1231
1231
1232
1232
1233
1233
1234
1234
1235
1235
1236
1236
1237
1237
1238
1238
1239
1239
1240
1240
1241
1241
1242
1242
1243
1243
1244
1244
1245
1245
1246
1246
1247
1247
1248
1248
1249
1249
1250
1250
1251
1251
1252
1252
1253
1253
1254
1254
1255
1255
1256
1256
1257
1257
1258
1258
1259
1259
1260
1260
1261
1261
1262
1262
1263
1263
1264
1264
1265
1265
1266
1266
1267
1267
1268
1268
1269
1269
1270
1270
1271
1271
1272
1272
1273
1273
1274
1274
1275
1275
1276
1276
1277
1277
1278
1278
1279
1279
1280
1280
1281
1281
1282
1282
1283
1283
1284
1284
1285
1285
1286
1286
1287
1287
1288
1288
1289
1289
1290
1290
1291
1291
1292
1292
1293
1293
1294
1294
1295
1295
1296
1296
1297
1297
1298
1298
1299
1299
1300
1300
1301
1301
1302
1302
1303
1303
1304
1304
1305
1305
1306
1306
1307
1307
1308
1308
1309
1309
1310
1310
1311
1311
1312
1312
1313
1313
1314
1314
1315
1315
1316
1316
1317
1317
1318
1318
1319
1319
1320
1320
1321
1321
1322
1322
1323
1323
1324
1324
1325
1325
1326
1326
1327
1327
1328
1328
1329
1329
1330
1330
1331
1331
1332
1332
1333
1333
1334
1334
1335
1335
1336
1336
1337
1337
1338
1338
1339
1339
1340
1340
1341
1341
1342
1342
1343
1343
1344
1344
1345
1345
1346
1346
1347
1347
1348
1348
1349
1349
1350
1350
1351
1351
1352
1352
1353
1353
1354
1354
1355
1355
1356
1356
1357
1357
1358
1358
1359
1359
1360
1360
1361
1361
1362
1362
1363
1363
1364
1364
1365
1365
1366
1366
1367
1367
1368
1368
1369
1369
1370
1370
1371
1371
1372
1372
1373
1373
1374
1374
1375
1375
1376
1376
1377
1377
1378
1378
1379
1379
1380
1380
1381
1381
1382
1382
1383
1383
1384
1384
1385
1385
1386
1386
1387
1387
1388
1388
1389
1389
1390
1390
1391
1391
1392
1392
1393
1393
1394
1394
1395
1395
1396
1396
1397
1397
1398
1398
1399
1399
1400
1400
1401
1401
1402
1402
1403
1403
1404
1404
1405
1405
1406
1406
1407
1407
1408
1408
1409
1409
1410
1410
1411
1411
1412
1412
1413
1413
1414
1414
1415
1415
1416
1416
1417
1417
1418
1418
1419
1419
1420
1420
1421
1421
1422
1422
1423
1423
1424
1424
1425
1425
1426
1426
1427
1427
1428
1428
1429
1429
1430
1430
1431
1431
1432
1432
1433
1433
1434
1434
1435
1435
1436
1436
1437
1437
1438
1438
1439
1439
1440
1440
1441
1441
1442
1442
1443
1443
1444
1444
1445
1445
1446
1446
1447
1447
1448
1448
1449
1449
1450
1450
1451
1451
1452
1452
1453
1453
1454
1454
1455
1455
1456
1456
1457
1457
1458
1458
1459
1459
1460
1460
1461
1461
1462
1462
1463
1463
1464
1464
1465
1465
1466
1466
1467
1467
1468
1468
1469
1469
1470
1470
1471
1471
1472
1472
1473
1473
1474
1474
1475
1475
1476
1476
1477
1477
1478
1478
1479
1479
1480
1480
1481
1481
1482
1482
1483
1483
1484
1484
1485
1485
1486
1486
1487
1487
1488
1488
1489
1489
1490
1490
1491
1491
1492
1492
1493
1493
1494
1494
1495
1495
1496
1496
1497
1497
1498
1498
1499
1499
1500
1500
1501
1501
1502
1502
1503
1503
1504
1504
1505
1505
1506
1506
1507
1507
1508
1508
1509
1509
1510
1510
1511
1511
1512
1512
1513
1513
1514
1514
1515
1515
1516
1516
1517
1517
1518
1518
1519
1519
1520
1520
1521
1521
1522
15
```

```

60         cat("  Interpretación:  $f''(30) = 0 \rightarrow$  curva cercana a lineal localmente.\n")
61     }
62 }
63
64 # 3) ¿En qué época  $|f'| < 0.01$  ?
65 idx_crit <- which(abs(deriv) < 0.01)
66 if (length(idx_crit) > 0) {
67   cat("\n3) Épocas donde  $|f'| < 0.01:$ ", epoca[idx_crit], "\n")
68   cat("  Primera época que cumple el criterio:", epoca[min(idx_crit)], "\n")
69 } else {
70   cat("\n3) No se alcanza  $|f'| < 0.01$  en las épocas dadas.\n")
71 }
72
73 # 4) Estimación de loss en época 25 usando linearización en época 20:
74 t_target <- 25
75 t0 <- 20
76 f_t0 <- loss[which(epoca == t0)]
77 fprime_t0 <- deriv[which(epoca == t0)]
78 f25_est <- f_t0 + fprime_t0 * (t_target - t0)
79 cat("\n4) Estimación lineal (usando derivada en 20):  $f(25) =$ , round(f25_est, 4), "\n"
    ↪ )
80
81 # Para comparación: interpolación lineal directa entre 20 y 30
82 f20 <- f_t0
83 f30 <- loss[which(epoca == 30)]
84 f25_lin_between <- f20 + (f30 - f20) * ( (t_target - 20) / (30 - 20) )
85 cat("  Interpolación lineal entre 20 y 30:  $f(25) =$ , round(f25_lin_between,4), "\n"
    ↪ )

```

Ejecución

```

1 > # Datos
2 > epoca <- c(0,10,20,30,40,50)
3 > loss <- c(2.45, 1.82, 1.35, 1.08, 0.95, 0.89)
4 > h <- 10
5 >
6 > # Funciones para derivadas (usando  $h$  fijo = 10)
7 > # Diferencia hacia adelante (para primer punto)
8 > d_forward <- function(i) {
9   + (loss[i+1] - loss[i]) / h
10  + }
11 > # Diferencia hacia atrás (para último punto)
12 > d_backward <- function(i) {
13   + (loss[i] - loss[i-1]) / h
14  + }
15 > # Diferencia centrada (para puntos interiores)
16 > d_center <- function(i) {
17   + (loss[i+1] - loss[i-1]) / (2*h)
18  + }
19 > # Segunda derivada centrada
20 > d2_center <- function(i) {
21   + (loss[i+1] - 2*loss[i] + loss[i-1]) / (h^2)

```

```

22      +
23  >
24  > # Calcular derivadas en cada época
25  > deriv <- numeric(length(loss))
26  > for (i in seq_along(loss)) {
27      +   if (i == 1) deriv[i] <- d_forward(i)
28      +   else if (i == length(loss)) deriv[i] <- d_backward(i)
29      +   else deriv[i] <- d_center(i)
30      +
31  >
32  > # Calcular segunda derivada en puntos interiores
33  > d2 <- rep(NA, length(loss))
34  > for (i in 2:(length(loss)-1)) {
35      +   d2[i] <- d2_center(i)
36      +
37  >
38  > # Resultados pedidos:
39  > cat("Derivadas (loss por época):\n")
40 Derivadas (loss por época):
41 > print(data.frame(epoca=epoca, loss=loss, derivada=round(deriv, 5)))
42 epoca loss derivada
43 1     0  2.45 -0.0630
44 2    10  1.82 -0.0550
45 3    20  1.35 -0.0370
46 4    30  1.08 -0.0200
47 5    40  0.95 -0.0095
48 6    50  0.89 -0.0060
49 >
50 > cat("\nSegunda derivada (solo puntos interiores):\n")
51
52 Segunda derivada (solo puntos interiores):
53 > print(data.frame(epoca=epoca, segunda_derivada=round(d2, 6)))
54 epoca segunda_derivada
55 1     0             NA
56 2    10            0.0016
57 3    20            0.0020
58 4    30            0.0014
59 5    40            0.0007
60 6    50             NA
61 >
62 > # 1) Tasa en época 20 (índice de época 3)
63 > idx20 <- which(epoca == 20)
64 > cat("\n1) f'(20) (centrada, h=10):", round(deriv[idx20], 5), " (loss/época)\n")
65
66 1) f'(20) (centrada, h=10): -0.037 (loss/época)
67 >
68 > # 2) Segunda derivada en época 30
69 > idx30 <- which(epoca == 30)
70 > cat("2) f''(30):", round(d2[idx30], 6), " (loss/época^2)\n")
71 2) f''(30): 0.0014 (loss/época^2)
72 >
73 > # Interpretación (impresa)

```

```

74 > if (!is.na(d2[idx30])) {
75   +   if (d2[idx30] > 0) {
76     +     cat("  Interpretación:  $f''(30) > 0 \rightarrow$  la magnitud de la pendiente se
77     ↪ está reduciendo; la disminución del loss se está frenando (convergencia en
78     ↪ curso).\n")
79   +   } else if (d2[idx30] < 0) {
80     +     cat("  Interpretación:  $f''(30) < 0 \rightarrow$  la disminución se está
81     ↪ acelerando.\n")
82   +   } else {
83     +     cat("  Interpretación:  $f''(30) = 0 \rightarrow$  curva cercana a lineal
84     ↪ localmente.\n")
85   +   }
86 + }
87 Interpretación:  $f''(30) > 0 \rightarrow$  la magnitud de la pendiente se está reduciendo; la
88   ↪ disminución del loss se está frenando (convergencia en curso).
89 >
90 > # 3) ¿En qué época  $|f'| < 0.01$  ?
91 > idx_crit <- which(abs(deriv) < 0.01)
92 > if (length(idx_crit) > 0) {
93   +   cat("\n3) Épocas donde  $|f'| < 0.01:$ ", epoca[idx_crit], "\n")
94   +   cat("  Primera época que cumple el criterio:", epoca[min(idx_crit)], "\n")
95   + } else {
96   +   cat("\n3) No se alcanza  $|f'| < 0.01$  en las épocas dadas.\n")
97   + }
98
99 3) Épocas donde  $|f'| < 0.01:$  40 50
100 Primera época que cumple el criterio: 40
101 >
102 > # 4) Estimación de loss en época 25 usando linearización en época 20:
103 > t_target <- 25
104 > t0 <- 20
105 > f_t0 <- loss[which(epoca == t0)]
106 > fprime_t0 <- deriv[which(epoca == t0)]
107 > f25_est <- f_t0 + fprime_t0 * (t_target - t0)
108 > cat("\n4) Estimación lineal (usando derivada en 20):  $f(25) =$  ", round(f25_est, 4),
109   ↪ "\n")
110
111 4) Estimación lineal (usando derivada en 20):  $f(25) = 1.165$ 
112 >
113 > # Para comparación: interpolación lineal directa entre 20 y 30
114 > f20 <- f_t0
115 > f30 <- loss[which(epoca == 30)]
116 > f25_lin_between <- f20 + (f30 - f20) * ( (t_target - 20) / (30 - 20) )
117 > cat("  Interpolación lineal entre 20 y 30:  $f(25) =$  ", round(f25_lin_between, 4), "\n")
118 Interpolación lineal entre 20 y 30:  $f(25) = 1.215$ 

```

10.7.3 Ejemplo 3

Una empresa de e-commerce registra sus ventas diarias (en miles de dólares) durante una semana de campaña:

Día	Lun	Mar	Mié	Jue	Vie	sáb	Dom
Ventas (\$k)	45	52	61	58	73	89	95

Tareas

1. calcula la velocidad de crecimiento de ventas (derivada) para cada día usando diferencias finitas apropiadas.
2. Identifica el día con mayor aceleración de ventas (segunda derivada positiva máxima)
3. El jueves hubo una caída en la tendencia. Calcula la magnitud de esta desaceleración.
4. Si la tendencia del domingo se mantiene, ¿Cuántas ventas esperarías el lunes siguiente? (usa extrapolación lineal con la derivada)

Datos:

Día	Lun	Mar	Mié	Jue	Vie	Sáb	Dom
Ventas (\$k)	45	52	61	58	73	89	95

Sea $h = 1$ día.

- 1) Velocidad de crecimiento (primera derivada) — diferencias finitas

Usamos diferencia hacia adelante en el primer día, hacia atrás en el último, y centrada en los puntos interiores:

$$\begin{aligned}
 f'(1) \text{ (Lun, adelante)} &= \frac{f(2) - f(1)}{1} = 52 - 45 = 7 \\
 f'(2) \text{ (Mar, centrada)} &= \frac{f(3) - f(1)}{2} = \frac{61 - 45}{2} = 8 \\
 f'(3) \text{ (Mié, centrada)} &= \frac{f(4) - f(2)}{2} = \frac{58 - 52}{2} = 3 \\
 f'(4) \text{ (Jue, centrada)} &= \frac{f(5) - f(3)}{2} = \frac{73 - 61}{2} = 6 \\
 f'(5) \text{ (Vie, centrada)} &= \frac{f(6) - f(4)}{2} = \frac{89 - 58}{2} = 15.5 \\
 f'(6) \text{ (Sáb, centrada)} &= \frac{f(7) - f(5)}{2} = \frac{95 - 73}{2} = 11 \\
 f'(7) \text{ (Dom, atrás)} &= \frac{f(7) - f(6)}{1} = 95 - 89 = 6
 \end{aligned}$$

$f' = [7, 8, 3, 6, 15.5, 11, 6]$ (\$k por día)

2) Aceleración (segunda derivada) y día con mayor aceleración positiva

Segunda derivada centrada para puntos interiores:

$$f''(x) \approx f(x+1) - 2f(x) + f(x-1)$$

Cálculos:

$$f''(\text{Mar}) = 61 - 2(52) + 45 = 2$$

$$f''(\text{Mié}) = 58 - 2(61) + 52 = -12$$

$$f''(\text{Jue}) = 73 - 2(58) + 61 = 18$$

$$f''(\text{Vie}) = 89 - 2(73) + 58 = 1$$

$$f''(\text{Sáb}) = 95 - 2(89) + 73 = -10$$

$$f'' = [\text{NA}, 2, -12, 18, 1, -10, \text{NA}] \quad (\$/\text{día}^2)$$

La segunda derivada máxima positiva es $f''(\text{Jue}) = 18$, por lo que Jueves es el día con mayor aceleración positiva de ventas (magnitud $18 \ \$/\text{día}^2$).

3) Caída en la tendencia el jueves — magnitud de la desaceleración

Hay dos formas de cuantificar lo pedido:

- Caída directa en ventas (valor absoluto): las ventas bajaron de miércoles a jueves: $58 - 61 = -3$. Es decir, hubo una caída de $\$3k$ en ventas ese día.
- Desaceleración medida por la segunda derivada: el valor $f''(\text{Mié}) = -12$ indica una fuerte desaceleración alrededor del miércoles (la pendiente se hace más negativa allí). En cambio $f''(\text{Jue}) = +18$ porque inmediatamente después (viernes) las ventas suben mucho (73), lo que provoca una aceleración positiva en el punto jueves cuando se evalúa con el vecino viernes.

Conclusión: la caída instantánea de ventas el jueves fue 3 \$k. La desaceleración local más fuerte corresponde a $f''(\text{Mié}) = -12 \ (\$/\text{día}^2)$, indicando que justo en torno al miércoles la tendencia se frenó fuertemente.

4) Extrapolación lineal: ventas el lunes siguiente

Usamos la derivada en el domingo (diferencia atrás) como tasa diaria y extrapolamos 1 día:

$$f(\text{Lun siguiente}) \approx f(\text{Dom}) + f'(\text{Dom}) \cdot 1 = 95 + 6 = 101$$

Ventas esperadas el lunes siguiente $\approx 101 \$k$

Resumen numérico rápido:

$$f' : [7, 8, 3, 6, 15.5, 11, 6] (\$/día)$$

$$f'' : [\text{NA}, 2, -12, 18, 1, -10, \text{NA}] (\$/día^2)$$

Mayor aceleración positiva : Jue (18 $\$/\text{día}^2$)

Caída en Jue (ventas) : -3 $\$k$

Proyección Lun siguiente : 101 $\$k$

Código en R

```

1 # Datos
2 dias <- c("Lun", "Mar", "Mié", "Jue", "Vie", "Sáb", "Dom")
3 ventas <- c(45, 52, 61, 58, 73, 89, 95) # en $k
4 h <- 1
5
6 # 1) Primera derivada: adelante en primer punto, atrás en último, centrada en
   ↪ interiores
7 deriv <- numeric(length(ventas))
8 for (i in seq_along(ventas)) {
9   if (i == 1) {
10     deriv[i] <- (ventas[i+1] - ventas[i]) / h
11   } else if (i == length(ventas)) {
12     deriv[i] <- (ventas[i] - ventas[i-1]) / h
13   } else {
14     deriv[i] <- (ventas[i+1] - ventas[i-1]) / (2*h)
15   }
16 }
17
18 # 2) Segunda derivada (centrada) en puntos interiores
19 d2 <- rep(NA, length(ventas))
20 for (i in 2:(length(ventas)-1)) {
21   d2[i] <- (ventas[i+1] - 2*ventas[i] + ventas[i-1]) / (h^2)
22 }
23
24 # Identificar día con mayor aceleración positiva
25 idx_max_acc <- which.max(d2) # returns first max (NA treated as -Inf)
26 # but ensure it's interior (non-NA)
27 if (is.na(d2[idx_max_acc]) || length(idx_max_acc) == 0) {
28   dia_max_acc <- NA
29   max_acc <- NA
30 } else {
31   dia_max_acc <- dias[idx_max_acc]
32   max_acc <- d2[idx_max_acc]
33 }
```

```

34
35 # 3) Magnitud de la caída el jueves (drop Mié -> Jue)
36 drop_jue <- ventas[4] - ventas[3] # index 4 = Jue, 3 = Mié
37
38 # 4) Extrapolación lineal para Lunes siguiente usando derivada en Domingo
39 f_dom <- ventas[length(ventas)]
40 fprime_dom <- deriv[length(ventas)]
41 f_lun_sig <- f_dom + fprime_dom * 1
42
43 # Mostrar resultados
44 cat("Primera derivada (ventas $k/día) por día:\n")
45 print(data.frame(dia=dias, ventas=ventas, derivada=deriv))
46
47 cat("\nSegunda derivada (ventas $k/día^2) en puntos interiores:\n")
48 print(data.frame(dia=dias, segunda_derivada=d2))
49
50 cat("\nDía con mayor aceleración positiva:\n")
51 cat(" ", dia_max_acc, "con f' =", max_acc, "\n")
52
53 cat("\nCaida en ventas Mié -> Jue: ", drop_jue, " $k (si es negativo, es caída)\n")
54
55 cat("\nProyección lunes siguiente (usando derivada en domingo):\n")
56 cat(" Ventas domingo =", f_dom, " $k\n")
57 cat(" Tasa domingo =", fprime_dom, " $k/día\n")
58 cat(" Estimación lunes siguiente =", f_lun_sig, " $k\n")

```

Ejecución

```

1 > # Datos
2 > dias <- c("Lun", "Mar", "Mié", "Jue", "Vie", "Sáb", "Dom")
3 > ventas <- c(45, 52, 61, 58, 73, 89, 95) # en $k
4 > h <- 1
5 >
6 > # 1) Primera derivada: adelante en primer punto, atrás en último, centrada en
   ↪ interiores
7 > deriv <- numeric(length(ventas))
8 > for (i in seq_along(ventas)) {
9     + if (i == 1) {
10        + deriv[i] <- (ventas[i+1] - ventas[i]) / h
11        + } else if (i == length(ventas)) {
12        + deriv[i] <- (ventas[i] - ventas[i-1]) / h
13        + } else {
14        + deriv[i] <- (ventas[i+1] - ventas[i-1]) / (2*h)
15        + }
16    + }
17 >
18 > # 2) Segunda derivada (centrada) en puntos interiores
19 > d2 <- rep(NA, length(ventas))
20 > for (i in 2:(length(ventas)-1)) {
21     + d2[i] <- (ventas[i+1] - 2*ventas[i] + ventas[i-1]) / (h^2)
22     + }
23 >

```

```

24 > # Identificar día con mayor aceleración positiva
25 > idx_max_acc <- which.max(d2) # returns first max (NA treated as -Inf)
26 > # but ensure it's interior (non-NA)
27 > if (is.na(d2[idx_max_acc]) || length(idx_max_acc) == 0) {
28     + dia_max_acc <- NA
29     + max_acc <- NA
30     + } else {
31     + dia_max_acc <- dias[idx_max_acc]
32     + max_acc <- d2[idx_max_acc]
33     + }
34 >
35 > # 3) Magnitud de la caída el jueves (drop Mié -> Jue)
36 > drop_jue <- ventas[4] - ventas[3] # index 4 = Jue, 3 = Mié
37 >
38 > # 4) Extrapolación lineal para Lunes siguiente usando derivada en Domingo
39 > f_dom <- ventas[length(ventas)]
40 > fprime_dom <- deriv[length(ventas)]
41 > f_lun_sig <- f_dom + fprime_dom * 1
42 >
43 > # Mostrar resultados
44 > cat("Primera derivada (ventas $k/día) por día:\n")
45 Primera derivada (ventas $k/día) por día:
46 > print(data.frame(dia=dias, ventas=ventas, derivada=deriv))
47 dia ventas derivada
48 1 Lun      45      7.0
49 2 Mar      52      8.0
50 3 Mié      61      3.0
51 4 Jue      58      6.0
52 5 Vie      73     15.5
53 6 Sáb      89     11.0
54 7 Dom      95      6.0
55 >
56 > cat("\nSegunda derivada (ventas $k/día^2) en puntos interiores:\n")
57
58 Segunda derivada (ventas $k/día^2) en puntos interiores:
59 > print(data.frame(dia=dias, segunda_derivada=d2))
60 dia segunda_derivada
61 1 Lun          NA
62 2 Mar          2
63 3 Mié         -12
64 4 Jue          18
65 5 Vie          1
66 6 Sáb         -10
67 7 Dom          NA
68 >
69 > cat("\nDía con mayor aceleración positiva:\n")
70
71 Día con mayor aceleración positiva:
72 > cat(" ", dia_max_acc, "con f'' =", max_acc, "\n")
73 Jue con f'' = 18
74 >
75 > cat("\nCaída en ventas Mié -> Jue: ", drop_jue, " $k (si es negativo, es caída)\n"

```

```

76   ↵ ")
77 Caída en ventas Mié -> Jue: -3 $k (si es negativo, es caída)
78 >
79 > cat("\nProyección lunes siguiente (usando derivada en domingo):\n")
80
81 Proyección lunes siguiente (usando derivada en domingo):
82 > cat(" Ventas domingo =", f_dom, " $k\n")
83 Ventas domingo = 95 $k
84 > cat(" Tasa domingo =", fprime_dom, " $k/día\n")
85 Tasa domingo = 6 $k/día
86 > cat(" Estimación lunes siguiente =", f_lun_sig, " $k\n")
87 Estimación lunes siguiente = 101 $k

```

10.7.4 Ejemplo 4

En redes neuronales, necesitas calcular el gradiente de la función sigmoide $\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ en varios puntos para el backpropagation. No tienes la derivada analítica programada.

Datos evaluados de la función:

x	-3.0	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0
$\sigma(x)$	0.0474	0.1192	0.2689	0.5000	0.7311	0.8808	0.9526

Tareas

1. Calcula $\sigma'(0)$ usando diferencia centrada con $h = 1$.
2. Calcula $\sigma'(-2)$ y $\sigma'(2)$ usando diferencias centradas.
3. Compara tus resultados numéricos con la derivada analítica: $\sigma'(x) = \sigma(x)(1 - \sigma(x))$
4. ¿Qué tamaño de h recomendarías para este cálculo? Justifica.
5. ¿Por qué la derivada es simétrica alrededor de $x = 0$?

Datos:

x	-3.0	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0
$\sigma(x)$	0.0474	0.1192	0.2689	0.5000	0.7311	0.8808	0.9526

Sea $h = 1$.

- 1) Cálculo numérico de $\sigma'(0)$ (diferencia centrada, $h = 1$)

$$\sigma'(x) \approx \frac{\sigma(x+h) - \sigma(x-h)}{2h}.$$

Para $x = 0$:

$$\sigma'(0) \approx \frac{\sigma(1) - \sigma(-1)}{2} = \frac{0.7311 - 0.2689}{2} = \frac{0.4622}{2} = 0.2311.$$

$\sigma'(0)_{\text{num}} \approx 0.2311$

2) Cálculo numérico de $\sigma'(-2)$ y $\sigma'(2)$ (centradas, $h = 1$)

Para $x = -2$:

$$\sigma'(-2) \approx \frac{\sigma(-1) - \sigma(-3)}{2} = \frac{0.2689 - 0.0474}{2} = \frac{0.2215}{2} = 0.11075.$$

Para $x = 2$:

$$\sigma'(2) \approx \frac{\sigma(3) - \sigma(1)}{2} = \frac{0.9526 - 0.7311}{2} = \frac{0.2215}{2} = 0.11075.$$

$\sigma'(-2)_{\text{num}} = \sigma'(2)_{\text{num}} \approx 0.11075$

3) Comparación con la derivada analítica

La derivada analítica es

$$\sigma'(x) = \sigma(x)(1 - \sigma(x)).$$

Calculando:

$$\sigma'(0)_{\text{ana}} = 0.5(1 - 0.5) = 0.25,$$

$$\sigma'(-2)_{\text{ana}} = 0.1192(1 - 0.1192) = 0.1192 \cdot 0.8808 \approx 0.10499136,$$

$$\sigma'(2)_{\text{ana}} = 0.8808(1 - 0.8808) = 0.8808 \cdot 0.1192 \approx 0.10499136.$$

Errores absolutos y relativos:

En $x = 0$: num = 0.2311, ana = 0.25, $\Delta = -0.0189$ ($\approx -7.56\%$)

En $x = \pm 2$: num = 0.11075, ana \approx 0.10499136, $\Delta \approx 0.00575864$ ($\approx +5.48\%$)

Comentario: las aproximaciones centradas con $h = 1$ están cerca pero muestran errores de varios por ciento; la diferencia es mayor en $x = 0$ porque la curvatura local y la escala hacen que un paso grande (1) afecte más la precisión.

4) Recomendación sobre el tamaño de h

- Si puedes evaluar la función analíticamente (como la sigmoide), usa un h muy pequeño para las diferencias finitas — por ejemplo $h \approx 10^{-5}$ a 10^{-6} suele ser razonable en doble precisión, o usar la fórmula analítica directamente (lo ideal).
 - Si solo dispones de valores tabulados con separación discreta (aquí los datos están a paso 1), entonces el único h disponible para diferencias finitas sin interpolar es $h = 1$. Para mejorar la precisión necesitarías interpolar o ajustar una función (p. ej. ajustar la sigmoide) y luego derivar esa función.
 - Regla práctica (análisis numérico): el error truncamiento $O(h^2)$ para la diferencia centrada, pero el error de redondeo aumenta al tomar h muy pequeño. Si usas la función analítica, elegir h en torno a $\sqrt{\varepsilon} \cdot \text{escala}$ (donde ε es la máquina, $2.2e-16$) da un buen compromiso; en práctica $h \approx 10^{-5}$ suele funcionar bien.
-

5) ¿Por qué la derivada es simétrica alrededor de $x = 0$?

La sigmoide cumple la relación

$$\sigma(-x) = 1 - \sigma(x).$$

Entonces

$$\sigma'(-x) = \sigma(-x)(1 - \sigma(-x)) = (1 - \sigma(x))(1 - (1 - \sigma(x))) = \sigma(x)(1 - \sigma(x)) = \sigma'(x).$$

Por tanto $\sigma'(x)$ es una función par (even): $\sigma'(-x) = \sigma'(x)$. Esa es la razón de la simetría alrededor de $x = 0$.

Código en R

```

1 # Datos
2 x <- c(-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3)
3 sigma <- c(0.0474, 0.1192, 0.2689, 0.5000, 0.7311, 0.8808, 0.9526)
4 h <- 1
5
6 # Indices helper
7 idx <- function(val) which(x == val)
8
9 # 1) Derivada centrada para x = 0, -2, 2
10 deriv_centered <- function(xval) {
11     i <- idx(xval)

```

```

12  # asumiendo que xval tiene vecinos (x-h) y (x+h) disponibles
13  (sigma[i + 1] - sigma[i - 1]) / (2 * h)
14 }
15
16 d0_num <- deriv_centered(0)
17 dminus2_num <- deriv_centered(-2)
18 d2_num <- deriv_centered(2)
19
20 # 2) Derivada analítica sigma*(1-sigma)
21 d_analytic <- sigma * (1 - sigma)
22 d0_ana <- d_analytic[idx(0)]
23 dminus2_ana <- d_analytic[idx(-2)]
24 d2_ana <- d_analytic[idx(2)]
25
26 # 3) Errores
27 abs_err_0 <- d0_num - d0_ana
28 rel_err_0 <- abs_err_0 / d0_ana * 100
29
30 abs_err_m2 <- dminus2_num - dminus2_ana
31 rel_err_m2 <- abs_err_m2 / dminus2_ana * 100
32
33 abs_err_2 <- d2_num - d2_ana
34 rel_err_2 <- abs_err_2 / d2_ana * 100
35
36 # Mostrar resultados
37 cat("Resultados (h = 1):\n\n")
38
39 cat("x = 0:\n")
40 cat(" derivada num (entrada) =", d0_num, "\n")
41 cat(" derivada analítica      =", d0_ana, "\n")
42 cat(" error absoluto =", abs_err_0, ", error relativo (%) =", rel_err_0, "\n\n")
43
44 cat("x = -2:\n")
45 cat(" derivada num (entrada) =", dminus2_num, "\n")
46 cat(" derivada analítica      =", dminus2_ana, "\n")
47 cat(" error absoluto =", abs_err_m2, ", error relativo (%) =", rel_err_m2, "\n\n")
48
49 cat("x = 2:\n")
50 cat(" derivada num (entrada) =", d2_num, "\n")
51 cat(" derivada analítica      =", d2_ana, "\n")
52 cat(" error absoluto =", abs_err_2, ", error relativo (%) =", rel_err_2, "\n\n")
53
54 # Tabla resumen
55 res <- data.frame(
56   x = x,
57   sigma = sigma,
58   deriv_analitica = round(d_analytic, 8),
59   deriv_entrada = c(NA, dminus2_num, NA, d0_num, NA, d2_num, NA)
60 )
61 cat("Tabla resumen:\n")
62 print(res)
63

```

```

64 # Recomendación sobre h (comentario)
65 cat("\nNota: si puedes evaluar sigma(x) analíticamente, usa h pequeño (p.ej. 1e-5)
    ↪ o mejor aún usa la derivada analítica.\n")

```

Ejecución

```

1 > # Datos
2 > x <- c(-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3)
3 > sigma <- c(0.0474, 0.1192, 0.2689, 0.5000, 0.7311, 0.8808, 0.9526)
4 > h <- 1
5 >
6 > # Índices helper
7 > idx <- function(val) which(x == val)
8 >
9 > # 1) Derivada centrada para x = 0, -2, 2
10 > deriv_centered <- function(xval) {
11   +   i <- idx(xval)
12   +   # asumiendo que xval tiene vecinos (x-h) y (x+h) disponibles
13   +   (sigma[i + 1] - sigma[i - 1]) / (2 * h)
14   + }
15 >
16 > d0_num <- deriv_centered(0)
17 > dminus2_num <- deriv_centered(-2)
18 > d2_num <- deriv_centered(2)
19 >
20 > # 2) Derivada analítica sigma*(1-sigma)
21 > d_analytic <- sigma * (1 - sigma)
22 > d0_ana <- d_analytic[idx(0)]
23 > dminus2_ana <- d_analytic[idx(-2)]
24 > d2_ana <- d_analytic[idx(2)]
25 >
26 > # 3) Errores
27 > abs_err_0 <- d0_num - d0_ana
28 > rel_err_0 <- abs_err_0 / d0_ana * 100
29 >
30 > abs_err_m2 <- dminus2_num - dminus2_ana
31 > rel_err_m2 <- abs_err_m2 / dminus2_ana * 100
32 >
33 > abs_err_2 <- d2_num - d2_ana
34 > rel_err_2 <- abs_err_2 / d2_ana * 100
35 >
36 > # Mostrar resultados
37 > cat("Resultados (h = 1):\n\n")
38 Resultados (h = 1):
39
40 >
41 > cat("x = 0:\n")
42 x = 0:
43 > cat("  derivada num (centrada) =", d0_num, "\n")
44 derivada num (centrada) = 0.2311
45 > cat("  derivada analítica      =", d0_ana, "\n")
46 derivada analítica      = 0.25

```

```

47 > cat("  error absoluto =", abs_err_0, ", error relativo (%) =", rel_err_0, "\n\n")
48 error absoluto = -0.0189 , error relativo (%) = -7.56
49
50 >
51 > cat("x = -2:\n")
52 x = -2:
53 > cat("  derivada num (centrada) =", dminus2_num, "\n")
54 derivada num (centrada) = 0.11075
55 > cat("  derivada analítica      =", dminus2_ana, "\n")
56 derivada analítica      = 0.1049914
57 > cat("  error absoluto =", abs_err_m2, ", error relativo (%) =", rel_err_m2, "\n\n"
58   ↪ ")
58 error absoluto = 0.00575864 , error relativo (%) = 5.48487
59
60 >
61 > cat("x = 2:\n")
62 x = 2:
63 > cat("  derivada num (centrada) =", d2_num, "\n")
64 derivada num (centrada) = 0.11075
65 > cat("  derivada analítica      =", d2_ana, "\n")
66 derivada analítica      = 0.1049914
67 > cat("  error absoluto =", abs_err_2, ", error relativo (%) =", rel_err_2, "\n\n")
68 error absoluto = 0.00575864 , error relativo (%) = 5.48487
69
70 >
71 > # Tabla resumen
72 > res <- data.frame(
73 +   x = x,
74 +   sigma = sigma,
75 +   deriv_analitica = round(d_analytic, 8),
76 +   deriv_centrala = c(NA, dminus2_num, NA, d0_num, NA, d2_num, NA)
77 + )
78 > cat("Tabla resumen:\n")
79 Tabla resumen:
80 > print(res)
81 x sigma deriv_analitica deriv_centrala
82 1 -3 0.0474    0.04515324      NA
83 2 -2 0.1192    0.10499136    0.11075
84 3 -1 0.2689    0.19659279      NA
85 4  0 0.5000    0.25000000    0.23110
86 5  1 0.7311    0.19659279      NA
87 6  2 0.8808    0.10499136    0.11075
88 7  3 0.9526    0.04515324      NA
89 >
90 > # Recomendación sobre h (comentario)
91 > cat("\nNota: si puedes evaluar sigma(x) analíticamente, usa h pequeño (p.ej. 1e
92   ↪ -5) o mejor aún usa la derivada analítica.\n")
93 Nota: si puedes evaluar sigma(x) analíticamente, usa h pequeño (p.ej. 1e-5) o mejor
93   ↪ aún usa la derivada analítica.

```

10.7.5 Ejemplo 5

Un sistema de monitoreo registra el tiempo de respuesta (en ms) de una API cada hora durante un incidente:

Hora	0	1	2	3	4	5	6	7
Latencia (ms)	120	125	128	135	280	290	275	155

Tareas

1. Calcula la primera derivada (tasa de cambio) para cada hora usando diferencias finitas apropiadas.
2. Identifica el momento del "pico de anomalía calculando dónde la segunda derivada cambia de signo (de positiva a negativa)
3. Entre las horas 3 y 4 hay un salto brusco. Calcula la magnitud de este cambio.
4. A partir de la hora 6, el sistema comienza a recuperarse. Calcula la tasa de recuperación (derivada negativa)
5. Si defines una anomalía como un cambio mayor a 50 ms/hora, ¿en qué momentos se detectarían anomalías?

Datos:

Hora	0	1	2	3	4	5	6	7
Latencia (ms)	120	125	128	135	280	290	275	155

Sea $h = 1$ hora.

- 1) Primera derivada (tasa de cambio) — diferencias finitas

Usamos diferencia hacia adelante en la hora 0, hacia atrás en la hora 7 y centrada en los puntos interiores:

$$\begin{aligned}
 f'(0) &= \frac{f(1) - f(0)}{1} = 125 - 120 = 5 \\
 f'(1) &= \frac{f(2) - f(0)}{2} = \frac{128 - 120}{2} = 4 \\
 f'(2) &= \frac{f(3) - f(1)}{2} = \frac{135 - 125}{2} = 5 \\
 f'(3) &= \frac{f(4) - f(2)}{2} = \frac{280 - 128}{2} = 76 \\
 f'(4) &= \frac{f(5) - f(3)}{2} = \frac{290 - 135}{2} = 77.5 \\
 f'(5) &= \frac{f(6) - f(4)}{2} = \frac{275 - 280}{2} = -2.5 \\
 f'(6) &= \frac{f(7) - f(5)}{2} = \frac{155 - 290}{2} = -67.5 \\
 f'(7) &= \frac{f(7) - f(6)}{1} = 155 - 275 = -120
 \end{aligned}$$

$f' = [5, 4, 5, 76, 77.5, -2.5, -67.5, -120] \text{ (ms/h)}$

—

2) Pico de anomalía (cambio de signo en la segunda derivada)

Segunda derivada centrada (para puntos interiores):

$$f''(x) \approx f(x+1) - 2f(x) + f(x-1)$$

Cálculos:

$$\begin{aligned}
 f''(1) &= 128 - 2(125) + 120 = -2 \\
 f''(2) &= 135 - 2(128) + 125 = 4 \\
 f''(3) &= 280 - 2(135) + 128 = 138 \\
 f''(4) &= 290 - 2(280) + 135 = -135 \\
 f''(5) &= 275 - 2(290) + 280 = -25 \\
 f''(6) &= 155 - 2(275) + 290 = -105
 \end{aligned}$$

La segunda derivada pasa de positiva (en $x = 3$, $f''(3) = 138$) a negativa (en $x = 4$, $f''(4) = -135$). Por tanto el pico de anomalía ocurre entre la hora 3 y hora 4, interpretándose el momento máximo del choque en la hora 4 (cuando la latencia alcanza 280 ms).

—

3) Magnitud del salto brusco entre hora 3 y 4

$$\Delta = f(4) - f(3) = 280 - 135 = 145 \text{ ms.}$$

Salto brusco = 145 ms

4) Tasa de recuperación a partir de la hora 6

Usando la derivada calculada:

- Derivada centrada en hora 6: $f'(6) = -67.5 \text{ ms/h}$ — tasa de recuperación promedio alrededor de la hora 6. - Entre hora 6 y 7 (derivada hacia atrás en 7): $f'(7) = -120 \text{ ms/h}$ — recuperación más rápida en ese intervalo.

Tasa de recuperación (aprox.) $\approx -67.5 \text{ ms/h}$ (cent.) ; entre 6→7: -120 ms/h

5) Detección de anomalías ($|cambio| > 50 \text{ ms/h}$)

Tomando los valores absolutos de f' :

$$|f'| = [5, 4, 5, 76, 77.5, 2.5, 67.5, 120]$$

(he puesto 2.5 positivo para la magnitud en la hora 5).

Los instantes donde $|f'| > 50$ son las horas: 3, 4, 6, 7 — es decir, se detectarían anomalías a partir de la hora 3 (inicio del ascenso brusco), en la hora 4 (máximo del salto), y durante la recuperación rápida en las horas 6 y 7.

Resumen:

$$f' = [5, 4, 5, 76, 77.5, -2.5, -67.5, -120] \text{ (ms/h)}$$

$$f''(\text{interiores}) = [-2, 4, 138, -135, -25, -105] \text{ (ms/h}^2\text{)}$$

Pico de anomalía: entre h=3 y h=4 (latencia máxima en h=4)

Salto 3→4: 145 ms

Tasa recuperación (h 6): -67.5 ms/h (cent.) ; 6→7: -120 ms/h

Anomalías ($|f'| > 50$): horas 3, 4, 6, 7

Código en R

```

1 # Código R para calcular automáticamente lo anterior
2
3 # Datos
4 hora <- 0:7
5 latencia <- c(120, 125, 128, 135, 280, 290, 275, 155)
6 h <- 1

```

```

7
8 # 1) Primera derivada: adelante, centrada, atrás
9 fprime <- numeric(length(latencia))
10 for (i in seq_along(latencia)) {
11   if (i == 1) {
12     fprime[i] <- (latencia[i+1] - latencia[i]) / h           # forward
13   } else if (i == length(latencia)) {
14     fprime[i] <- (latencia[i] - latencia[i-1]) / h           # backward
15   } else {
16     fprime[i] <- (latencia[i+1] - latencia[i-1]) / (2*h)      # centered
17   }
18 }
19
20 # 2) Segunda derivada centrada (puntos interiores)
21 f2 <- rep(NA, length(latencia))
22 for (i in 2:(length(latencia)-1)) {
23   f2[i] <- (latencia[i+1] - 2*latencia[i] + latencia[i-1]) / (h^2)
24 }
25
26 # 3) Magnitud salto 3->4
27 salto_3_4 <- latencia[5] - latencia[4]  # indices: hora 4 is index 5, hora 3 is
28   ↪ index 4
29
30 # 4) Tasas de recuperación (a partir de la hora 6)
31 idx6 <- which(hora == 6)
32 tasa_recuperacion_cent <- fprime[idx6]
33 # derivada entre 6->7 (forward from 6 or backward at 7)
34 tasa_6_7 <- (latencia[8] - latencia[7]) / h  # index 8=hora7, 7=hora6
35
36 # 5) Detección de anomalías: |f'| > 50 ms/h
37 umbral <- 50
38 anomalias_idx <- which(abs(fprime) > umbral)
39 anomalias_horas <- hora[anomalias_idx]
40
41 # Imprimir resultados
42 cat("Primera derivada f' (ms/h) por hora:\n")
43 print(data.frame(hora=hora, latencia=latencia, fprime=round(fprime,4)))
44
45 cat("\nSegunda derivada f'' (ms/h^2) en puntos interiores:\n")
46 print(data.frame(hora=hora, f2=f2))
47
48 cat("\nSalto brusco 3->4 (ms):", salto_3_4, "\n")
49
50 cat("\nTasa de recuperación (hora 6, centrada):", tasa_recuperacion_cent, "ms/h\n")
51 cat("Tasa entre 6->7:", tasa_6_7, "ms/h\n")
52
53 if (length(anomalias_idx) > 0) {
54   cat("\nAnomalías detectadas (|f'| >", umbral, "ms/h) en horas:", anomalias_
55       ↪ horas, "\n")
56 } else {
57   cat("\nNo se detectaron anomalías con el umbral dado.\n")
58 }
```

Ejecución

```

1 > # Código R para calcular automáticamente lo anterior
2 >
3 > # Datos
4 > hora <- 0:7
5 > latencia <- c(120, 125, 128, 135, 280, 290, 275, 155)
6 > h <- 1
7 >
8 > # 1) Primera derivada: adelante, centrada, atrás
9 > fprime <- numeric(length(latencia))
10 > for (i in seq_along(latencia)) {
11   +   if (i == 1) {
12     +     fprime[i] <- (latencia[i+1] - latencia[i]) / h           # forward
13     +   } else if (i == length(latencia)) {
14     +     fprime[i] <- (latencia[i] - latencia[i-1]) / h           # backward
15     +   } else {
16     +     fprime[i] <- (latencia[i+1] - latencia[i-1]) / (2*h)      # centered
17     +   }
18   + }
19 >
20 > # 2) Segunda derivada centrada (puntos interiores)
21 > f2 <- rep(NA, length(latencia))
22 > for (i in 2:(length(latencia)-1)) {
23   +   f2[i] <- (latencia[i+1] - 2*latencia[i] + latencia[i-1]) / (h^2)
24   + }
25 >
26 > # 3) Magnitud salto 3->4
27 > salto_3_4 <- latencia[5] - latencia[4] # indices: hora 4 is index 5, hora 3 is
28   ↪ index 4
29 >
30 > # 4) Tasas de recuperación (a partir de la hora 6)
31 > idx6 <- which(hora == 6)
32 > tasa_recuperacion_cent <- fprime[idx6]
33 > # derivada entre 6->7 (forward from 6 or backward at 7)
34 > tasa_6_7 <- (latencia[8] - latencia[7]) / h # index 8=hora7, 7=hora6
35 >
36 > # 5) Detección de anomalías: |f'| > 50 ms/h
37 > umbral <- 50
38 > anomalias_idx <- which(abs(fprime) > umbral)
39 > anomalias_horas <- hora[anomalias_idx]
40 >
41 > # Imprimir resultados
42 > cat("Primera derivada f' (ms/h) por hora:\n")
43 > print(data.frame(hora=hora, latencia=latencia, fprime=round(fprime,4)))
44 hora latencia fprime
45 1    0      120    5.0
46 2    1      125    4.0
47 3    2      128    5.0
48 4    3      135   76.0
49 5    4      280   77.5
50 6    5      290   -2.5

```

```

51 7     6      275 -67.5
52 8     7      155 -120.0
53 >
54 > cat("\nSegunda derivada f'' (ms/h^2) en puntos interiores:\n")
55
56 Segunda derivada f'' (ms/h^2) en puntos interiores:
57 > print(data.frame(hora=hora, f2=f2))
58 hora   f2
59 1     0    NA
60 2     1    -2
61 3     2     4
62 4     3   138
63 5     4  -135
64 6     5   -25
65 7     6  -105
66 8     7    NA
67 >
68 > cat("\nSalto brusco 3->4 (ms):", salto_3_4, "\n")
69
70 Salto brusco 3->4 (ms): 145
71 >
72 > cat("\nTasa de recuperación (hora 6, centrada):", tasa_recuperacion_cent, "ms/h\n"
73   ↪ ")
74
75 Tasa de recuperación (hora 6, centrada): -67.5 ms/h
76 > cat("Tasa entre 6->7:", tasa_6_7, "ms/h\n")
77 Tasa entre 6->7: -120 ms/h
78 >
79 > if (length(anomalias_idx) > 0) {
80   +   cat("\nAnomalías detectadas (|f'| >", umbral, "ms/h) en horas:", anomalias_
81     ↪ horas, "\n")
82   + } else {
83   +   cat("\nNo se detectaron anomalías con el umbral dado.\n")
84   + }
85
86 Anomalías detectadas (|f'| > 50 ms/h) en horas: 3 4 6 7

```

10.7.6 Ejemplo 6

Una campaña de marketing muestra la siguiente tasa de conversión (porcentaje) en función del gasto en publicidad (en miles de dólares):

Gasto (\$k)	0	5	10	15	20	25
Conversión (%)	2.1	3.8	5.2	6.1	6.7	7.0

Tareas

1. Calcula el ROI marginal (derivada de conversión respecto al gasto) en cada punto usando diferencias centradas.

2. ¿En qué momento de gasto el ROI marginal es mayor que 0.2 % por cada \$1000 invertido?
3. La segunda derivada indica rendimientos decrecientes. Calcula la segunda derivada en \$15k.
4. con base en las derivadas ¿recomendarías aumentar el gasto más allá de \$25k? Justifique matemáticamente.

Datos:

Gasto (\$k)	0	5	10	15	20	25
Conversión (%)	2.1	3.8	5.2	6.1	6.7	7.0

Sea $h = 5$ (miles de dólares entre puntos).

- 1) ROI marginal (derivada de conversión respecto al gasto)

Usamos diferencia centrada para los puntos interiores y diferencias adelante/atrás en los extremos (paso $h = 5$):

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h}$$

Cálculos (en % por \$1k):

$$\begin{aligned} f'(0) \text{ (adelante)} &= \frac{3.8 - 2.1}{5} = 0.34 \\ f'(5) \text{ (centrada)} &= \frac{5.2 - 2.1}{10} = 0.31 \\ f'(10) \text{ (centrada)} &= \frac{6.1 - 3.8}{10} = 0.23 \\ f'(15) \text{ (centrada)} &= \frac{6.7 - 5.2}{10} = 0.15 \\ f'(20) \text{ (centrada)} &= \frac{7.0 - 6.1}{10} = 0.09 \\ f'(25) \text{ (atrás)} &= \frac{7.0 - 6.7}{5} = 0.06 \end{aligned}$$

$f' = [0.34, 0.31, 0.23, 0.15, 0.09, 0.06] \text{ (% por $1k)}$

-
- 2) ¿Cuándo el ROI marginal > 0.2 % por \$1k?

Comparando los valores anteriores, las posiciones donde $f'(x) > 0.2$ son:

$$x = 0, 5, 10 (\$0k, \$5k, \$10k).$$

Es decir, hasta \$10k el ROI marginal supera 0.2 %/\$1k. Si se desea el punto exacto donde $f'(x) = 0.2$ entre 10 y 15k, interpolando linealmente entre $f'(10) = 0.23$ y $f'(15) = 0.15$ obtenemos:

$$x^* \approx 10 + \frac{0.23 - 0.20}{0.23 - 0.15} \cdot 5 \approx 11.875 (\$k).$$

Por tanto, para gasto mayor a $\approx \$11.88k$ el ROI marginal cae por debajo de 0.2 % por \$1k.

3) Segunda derivada en \$15k (indicador de rendimientos decrecientes)

La fórmula centrada de segunda derivada:

$$f''(x) \approx \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2}.$$

Para $x = 15$ (con $h = 5$):

$$f''(15) \approx \frac{6.7 - 2(6.1) + 5.2}{5^2} = \frac{6.7 - 12.2 + 5.2}{25} = \frac{-0.3}{25} = -0.012.$$

$$f''(15) \approx -0.012 (\% / (\$1k)^2)$$

El valor negativo confirma rendimientos decrecientes (la ganancia marginal de conversión disminuye con gasto).

4) Recomendación sobre aumentar gasto más allá de \$25k (interpretación matemática)

- La primera derivada en \$25k es $f'(25) = 0.06\%$ por \$1k — positiva pero muy pequeña. - La segunda derivada en los puntos interiores es negativa (ej. $f''(15) \approx -0.012$), lo que indica que el ROI marginal está decreciendo al aumentar el gasto: $f'(\cdot)$ es decreciente. - Además, el umbral práctico que propusimos (0.2 %/\$1k) ya se supera sólo hasta $\approx \$11.88k$; más allá de eso la ganancia marginal cae por debajo de un valor atractivo.

Por estas razones matemáticas (ROI marginal pequeño y decreciente), no es recomendable aumentar el gasto más allá de \$25k. Sin embargo, la decisión final puede depender de razones externas (p. ej. límites de escala, objetivos de branding, o expectativa de nonlinealidades fuera del rango observado).

Resumen numérico

$$f' : [0.34, 0.31, 0.23, 0.15, 0.09, 0.06] \%/\$1k$$

$$f''(15) \approx -0.012 \% / (\$1k)^2$$

Umbral 0.2 \%/\$1k alcanzado hasta \$10k (corte $\approx \$11.875k$)

Recomendación : No aumentar significativamente más allá de \$25k (rendimientos decrecientes).

Código en R

```

1 # Código R: cálculo automático de derivadas y decisiones
2 gasto <- c(0, 5, 10, 15, 20, 25)    # en $k
3 conv  <- c(2.1, 3.8, 5.2, 6.1, 6.7, 7.0) # en %
4 h <- 5 # en $k
5
6 # 1) Derivadas (ROI marginal) - forward/back/centered
7 deriv <- numeric(length(conv))
8 for (i in seq_along(conv)) {
9   if (i == 1) {
10     deriv[i] <- (conv[i+1] - conv[i]) / h      # forward
11   } else if (i == length(conv)) {
12     deriv[i] <- (conv[i] - conv[i-1]) / h      # backward
13   } else {
14     deriv[i] <- (conv[i+1] - conv[i-1]) / (2*h) # centered
15   }
16 }
17
18 # 2) Segunda derivada centrada (interiores)
19 d2 <- rep(NA, length(conv))
20 for (i in 2:(length(conv)-1)) {
21   d2[i] <- (conv[i+1] - 2*conv[i] + conv[i-1]) / (h^2)
22 }
23
24 # 3) ¿Dónde  $f'(x) > 0.2 \% \text{ por } \$1k?$ 
25 idx_gt_02 <- which(deriv > 0.2)
26 gasto_gt_02 <- gasto[idx_gt_02]
27
28 # punto aproximado donde  $f'(x)=0.2$  (lineal entre 10 y 15 si desea precisión)
29 d10 <- deriv[which(gasto==10)]
30 d15 <- deriv[which(gasto==15)]
31 if (d10 != d15) {
32   frac <- (d10 - 0.2) / (d10 - d15)
33   x_threshold <- 10 + frac * (15 - 10) # en $k
34 } else {
35   x_threshold <- NA
36 }
37
38 # Impresión de resultados
39 cat("Gasto ($k) : ", gasto, "\n")
40 cat("Conversion % : ", conv, "\n\n")
```

```

41 cat("ROI marginal f' (% per $1k):\n")
42 print(round(deriv, 4))
43
44 cat("\nSegunda derivada (interiores) f'' (% per ($1k)^2):\n")
45 print(round(d2, 5))
46
47 cat("\nPuntos donde f' > 0.2 (% per $1k):", gasto_gt_02, "\n")
48 cat("Umbral f'(x)=0.2 ocurre aproximadamente en gasto = ", round(x_threshold, 3), "
    ↪ $k\n\n")
49
50 # Recomendación basada en derivadas
51 cat("Interpretación:\n")
52 cat("- f'(25) =", round(deriv[length(deriv)], 4), "%/ $1k (marginal positivo pero
    ↪ bajo)\n")
53 cat("- f'' en interiores (ej. f''(15) =", round(d2[which(gasto==15)], 5), ") indica
    ↪ rendimientos decrecientes\n")
54 cat("--> Matemáticamente no conviene aumentar demasiado el gasto más allá de 25k si
    ↪ la meta es obtener conversión % por dólar adicional.\n")

```

Ejecución

```

1 > # Código R: cálculo automático de derivadas y decisiones
2 > gasto <- c(0, 5, 10, 15, 20, 25)    # en $k
3 > conv  <- c(2.1, 3.8, 5.2, 6.1, 6.7, 7.0)  # en %
4 > h <- 5  # en $k
5 >
6 > # 1) Derivadas (ROI marginal) - forward/back/centered
7 > deriv <- numeric(length(conv))
8 > for (i in seq_along(conv)) {
9   +   if (i == 1) {
10     +     deriv[i] <- (conv[i+1] - conv[i]) / h      # forward
11     +   } else if (i == length(conv)) {
12     +     deriv[i] <- (conv[i] - conv[i-1]) / h      # backward
13     +   } else {
14     +     deriv[i] <- (conv[i+1] - conv[i-1]) / (2*h)  # centered
15     +   }
16   + }
17 >
18 > # 2) Segunda derivada centrada (interiores)
19 > d2 <- rep(NA, length(conv))
20 > for (i in 2:(length(conv)-1)) {
21   +   d2[i] <- (conv[i+1] - 2*conv[i] + conv[i-1]) / (h^2)
22   + }
23 >
24 > # 3) ¿Dónde f'(x) > 0.2 % por $1k?
25 > idx_gt_02 <- which(deriv > 0.2)
26 > gasto_gt_02 <- gasto[idx_gt_02]
27 >
28 > # punto aproximado donde f'(x)=0.2 (lineal entre 10 y 15 si desea precisión)
29 > d10 <- deriv[which(gasto==10)]
30 > d15 <- deriv[which(gasto==15)]
31 > if (d10 != d15) {

```

```

32      +   frac <- (d10 - 0.2) / (d10 - d15)
33      +   x_threshold <- 10 + frac * (15 - 10) # en $k
34    + } else {
35      +   x_threshold <- NA
36    + }
37  >
38  > # Impresión de resultados
39  > cat("Gasto ($k) :", gasto, "\n")
40 Gasto ($k) : 0 5 10 15 20 25
41 > cat("Conversion % :", conv, "\n\n")
42 Conversion % : 2.1 3.8 5.2 6.1 6.7 7
43
44 > cat("ROI marginal f' (% per $1k):\n")
45 ROI marginal f' (% per $1k):
46 > print(round(deriv, 4))
47 [1] 0.34 0.31 0.23 0.15 0.09 0.06
48 >
49 > cat("\nSegunda derivada (interiores) f'' (% per ($1k)^2):\n")
50
51 Segunda derivada (interiores) f'' (% per ($1k)^2):
52 > print(round(d2, 5))
53 [1] NA -0.012 -0.020 -0.012 -0.012 NA
54 >
55 > cat("\nPuntos donde f' > 0.2 (% per $1k):", gasto_gt_02, "\n")
56
57 Puntos donde f' > 0.2 (% per $1k): 0 5 10
58 > cat("Umbral f'(x)=0.2 ocurre aproximadamente en gasto = ", round(x_threshold, 3),
59   ↪ " $k\n\n")
60 Umbral f'(x)=0.2 ocurre aproximadamente en gasto = 11.875 $k
61 >
62 > # Recomendación basada en derivadas
63 > cat("Interpretación:\n")
64 Interpretación:
65 > cat("- f'(25) =", round(deriv[length(deriv)], 4), "%/ $1k (marginal positivo pero
66   ↪ bajo)\n")
67 - f'(25) = 0.06 %/ $1k (marginal positivo pero bajo)
68 > cat("- f'' en interiores (ej. f''(15) =", round(d2[which(gasto==15)], 5), ")
69   ↪ indica rendimientos decrecientes\n")
70 - f'' en interiores (ej. f''(15) = -0.012 ) indica rendimientos decrecientes
71 > cat("--> Matemáticamente no conviene aumentar demasiado el gasto más allá de 25k
72   ↪ si la meta es obtener conversion % por dolar adicional.\n")
73 --> Matemáticamente no conviene aumentar demasiado el gasto más allá de 25k si la
74   ↪ meta es obtener conversion % por dolar adicional.

```

10.7.7 Ejemplo 7

Tienes un dataset con la señal de un sensor de temperatura en un proceso industrial medida cada segundo:

Tiempo (s)	0	1	2	3	4	5	6	7
Temp (°C)	20.1	20.3	20.8	21.5	22.6	24.2	26.1	28.5

Tareas

1. Crea una nueva feature: la velocidad de cambio de temperatura (primera derivada en cada punto).
2. Crea otra feature: la aceleración del cambio (segunda derivada)
3. Un aumento de temperatura mayor a $0.8^{\circ}\text{C}/\text{s}$ indica un problema. ¿En qué momentos se detectaría esta alerta?
4. Normaliza las features derivadas usando min-max scaling.
5. Explica por qué estas features derivadas pueden ser útiles para un modelo de clasificación que detecta anomalías.

Datos:

Tiempo (s)	0	1	2	3	4	5	6	7
$T(C)$	20.1	20.3	20.8	21.5	22.6	24.2	26.1	28.5

Sea $h = 1 \text{ s}$.

-
- 1) Velocidad de cambio de temperatura (primera derivada)

$$T'(t) \approx \frac{T(t+h) - T(t-h)}{2h}$$

(con diferencias centradas; adelante y atrás en los extremos)

$$\begin{aligned}
 T'(0) &= \frac{20.3 - 20.1}{1} = 0.2 \\
 T'(1) &= \frac{20.8 - 20.1}{2} = 0.35 \\
 T'(2) &= \frac{21.5 - 20.3}{2} = 0.6 \\
 T'(3) &= \frac{22.6 - 20.8}{2} = 0.9 \\
 T'(4) &= \frac{24.2 - 21.5}{2} = 1.35 \\
 T'(5) &= \frac{26.1 - 22.6}{2} = 1.75 \\
 T'(6) &= \frac{28.5 - 24.2}{2} = 2.15 \\
 T'(7) &= \frac{28.5 - 26.1}{1} = 2.4
 \end{aligned}$$

$$T' = [0.2, 0.35, 0.6, 0.9, 1.35, 1.75, 2.15, 2.4] \text{ °C/s}$$

2) Aceleración del cambio (segunda derivada)

$$T''(t) \approx \frac{T(t+h) - 2T(t) + T(t-h)}{h^2}$$

$$\begin{aligned}
 T''(1) &= 20.8 - 2(20.3) + 20.1 = 0.3 \\
 T''(2) &= 21.5 - 2(20.8) + 20.3 = 0.2 \\
 T''(3) &= 22.6 - 2(21.5) + 20.8 = 0.4 \\
 T''(4) &= 24.2 - 2(22.6) + 21.5 = 0.5 \\
 T''(5) &= 26.1 - 2(24.2) + 22.6 = 0.3 \\
 T''(6) &= 28.5 - 2(26.1) + 24.2 = 0.5
 \end{aligned}$$

$$T'' = [\text{NA}, 0.3, 0.2, 0.4, 0.5, 0.3, 0.5, \text{NA}]$$

3) Alertas de temperatura (cuando $T'(t) > 0.8 \text{ C/s}$)

$$T'(t) > 0.8 \Rightarrow t = 3, 4, 5, 6, 7$$

Alerta desde $t = 3 \text{ s}$ hasta $t = 7 \text{ s}$

4) Normalización (Min-Max Scaling)

Para cada feature derivada x_i :

$$x' = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

$$\min(T') = 0.2, \max(T') = 2.4$$

$$T'_{norm} = \frac{T' - 0.2}{2.4 - 0.2} = \frac{T' - 0.2}{2.2}$$

$$\Rightarrow T'_{norm} = [0.0, 0.068, 0.182, 0.318, 0.523, 0.682, 0.875, 1.0]$$

Para la segunda derivada (ignorando extremos):

$$\min(T'') = 0.2, \max(T'') = 0.5$$

$$T''_{norm} = \frac{T'' - 0.2}{0.3} \Rightarrow [\text{NA}, 0.33, 0.0, 0.67, 1.0, 0.33, 1.0, \text{NA}]$$

5) Interpretación (utilidad en modelos de clasificación)

Las features derivadas (T' y T'') capturan no solo el nivel absoluto de la temperatura, sino también:

- **Cambios rápidos (gradiente):** ayudan a detectar aumentos anómalos incluso si la temperatura absoluta sigue dentro del rango normal.
- **Patrones de aceleración:** la segunda derivada permite distinguir un incremento sostenido (problema) de una fluctuación puntual.
- En modelos de clasificación (por ejemplo, detección de anomalías o mantenimiento predictivo), estas características enriquecen la representación temporal, permitiendo al modelo aprender dinámicas en lugar de solo estados estáticos.

Las derivadas actúan como detectores de tendencia y estabilidad del sistema.

Código en R

```

1 # Datos
2 tiempo <- 0:7
3 temp <- c(20.1, 20.3, 20.8, 21.5, 22.6, 24.2, 26.1, 28.5)
4 h <- 1
5
6 # 1. Primera derivada (diferencias finitas)
7 vel <- numeric(length(temp))

```

```

8 | for (i in seq_along(temp)) {
9 |   if (i == 1) vel[i] <- (temp[i+1] - temp[i]) / h
10 |  else if (i == length(temp)) vel[i] <- (temp[i] - temp[i-1]) / h
11 |  else vel[i] <- (temp[i+1] - temp[i-1]) / (2*h)
12 |
13
14 # 2. Segunda derivada
15 acc <- rep(NA, length(temp))
16 for (i in 2:(length(temp)-1)) {
17   acc[i] <- (temp[i+1] - 2*temp[i] + temp[i-1]) / (h^2)
18 }
19
20 # 3. Alertas (cuando velocidad > 0.8 °C/s)
21 alerta <- tiempo[vel > 0.8]
22
23 # 4. Normalización min-max
24 minmax <- function(x) (x - min(x, na.rm=TRUE)) / (max(x, na.rm=TRUE) - min(x, na.rm
25   =TRUE))
25 vel_norm <- minmax(vel)
26 acc_norm <- minmax(acc)
27
28 # Mostrar resultados
29 df <- data.frame(tiempo, temp, vel, acc, vel_norm, acc_norm)
30 print(round(df, 3))
31
32 cat("\nMomentos con alerta (>0.8°C/s):", alerta, "segundos\n")

```

Ejecución

```

1 > # Datos
2 > tiempo <- 0:7
3 > temp <- c(20.1, 20.3, 20.8, 21.5, 22.6, 24.2, 26.1, 28.5)
4 > h <- 1
5 >
6 > # 1. Primera derivada (diferencias finitas)
7 > vel <- numeric(length(temp))
8 > for (i in seq_along(temp)) {
9   +   if (i == 1) vel[i] <- (temp[i+1] - temp[i]) / h
10  +   else if (i == length(temp)) vel[i] <- (temp[i] - temp[i-1]) / h
11  +   else vel[i] <- (temp[i+1] - temp[i-1]) / (2*h)
12  + }
13 >
14 > # 2. Segunda derivada
15 > acc <- rep(NA, length(temp))
16 > for (i in 2:(length(temp)-1)) {
17   +   acc[i] <- (temp[i+1] - 2*temp[i] + temp[i-1]) / (h^2)
18   + }
19 >
20 > # 3. Alertas (cuando velocidad > 0.8 °C/s)
21 > alerta <- tiempo[vel > 0.8]
22 >
23 > # 4. Normalización min-max

```

```

24 > minmax <- function(x) (x - min(x, na.rm=TRUE)) / (max(x, na.rm=TRUE) - min(x, na.
25   ↪ rm=TRUE))
26 > vel_norm <- minmax(vel)
27 > acc_norm <- minmax(acc)
28 >
29 > # Mostrar resultados
30 > df <- data.frame(tiempo, temp, vel, acc, vel_norm, acc_norm)
31 > print(round(df, 3))
32   tiempo temp  vel acc vel_norm acc_norm
33 1      0 20.1 0.20  NA    0.000      NA
34 2      1 20.3 0.35 0.3    0.068    0.333
35 3      2 20.8 0.60 0.2    0.182    0.000
36 4      3 21.5 0.90 0.4    0.318    0.667
37 5      4 22.6 1.35 0.5    0.523    1.000
38 6      5 24.2 1.75 0.3    0.705    0.333
39 7      6 26.1 2.15 0.5    0.886    1.000
40 8      7 28.5 2.40  NA    1.000      NA
41 > cat("\nMomentos con alerta (>0.8°C/s):", alerta, "segundos\n")
42
43 Momentos con alerta (>0.8°C/s): 3 4 5 6 7 segundos

```

10.8 Conclusiones

La diferenciación numérica constituye una herramienta indispensable en las matemáticas aplicadas y la ingeniería. Su fundamento en series de Taylor, su flexibilidad en el uso de datos discretos y su integración con métodos de simulación y optimización la convierten en un componente esencial de la computación científica moderna. Su correcta aplicación requiere comprender tanto el comportamiento del error como la estabilidad de las fórmulas de aproximación (Atkinson, 2009; Burden et al., 2016; Chapra & Canale, 2015).

11 Interpolación

11.1 Introducción

La interpolación es una técnica fundamental del análisis numérico cuyo objetivo es construir una función que pase exactamente por un conjunto de puntos conocidos. A partir de datos discretos, se busca obtener una función aproximante que permita estimar valores intermedios, suavizar información o servir como base para futuros cálculos numéricos (Burden et al., 2016; Chapra & Canale, 2015).

La interpolación es ampliamente utilizada en ingeniería, computación científica, procesamiento de datos, ciencias naturales, economía y muchas otras áreas donde los datos experimentales o simulados son comunes. Su fundamento matemático se basa en la existencia de un polinomio único de grado menor o igual a n que pasa por $n + 1$ puntos distintos (Anton et al., 2012).

11.2 Fundamentos teóricos

11.2.1 Definición del problema

Dado un conjunto de datos:

$$(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$$

donde todos los x_i son distintos, se desea encontrar una función $P(x)$ tal que:

$$P(x_i) = y_i, \quad i = 0, 1, \dots, n.$$

El tipo de función más comúnmente utilizado es un **polinomio interpolante**, debido a sus propiedades analíticas y su simplicidad computacional (Atkinson, 2009).

11.3 Interpolación polinómica

11.3.1 Polinomio interpolante

Existe un único polinomio de grado a lo sumo n que interpola los $n + 1$ puntos dados. Este resultado se conoce como el *Teorema de Interpolación Polinómica* (Burden et al., 2016).

Existen varias formas de construir este polinomio, cada una con ventajas computacionales específicas.

11.4 Método de interpolación de Lagrange

11.4.1 Polinomio de Lagrange

El polinomio de Lagrange se construye como:

$$P(x) = \sum_{i=0}^n y_i L_i(x),$$

donde:

$$L_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}.$$

Cada $L_i(x)$ es un polinomio base que vale 1 en $x = x_i$ y 0 en los demás nodos.

Este método es útil teóricamente y tiene gran valor conceptual, aunque computacionalmente no es el más eficiente cuando se añaden nuevos puntos (Burden et al., 2016; Riley et al., 2006).

11.4.2 Error en el polinomio de Lagrange

El error de interpolación está dado por la expresión:

$$f(x) - P(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \prod_{i=0}^n (x - x_i),$$

para algún ξ en el intervalo que contiene los nodos. Este resultado permite analizar cómo la distancia entre nodos y el grado del polinomio afectan la precisión (Burden et al., 2016).

11.5 Interpolación por diferencias divididas de Newton

11.5.1 Diferencias divididas

Las diferencias divididas son definidas recursivamente como:

$$f[x_i] = y_i,$$

$$f[x_i, x_{i+1}] = \frac{f[x_{i+1}] - f[x_i]}{x_{i+1} - x_i},$$

$$f[x_i, x_{i+1}, x_{i+2}] = \frac{f[x_{i+1}, x_{i+2}] - f[x_i, x_{i+1}]}{x_{i+2} - x_i},$$

y así sucesivamente.

11.5.2 Polinomio de Newton

El polinomio interpolante toma la forma:

$$P(x) = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)(x - x_1) + \cdots + a_n \prod_{i=0}^{n-1} (x - x_i),$$

donde los coeficientes a_k son diferencias divididas:

$$a_k = f[x_0, x_1, \dots, x_k].$$

Esta formulación permite actualizar el polinomio fácilmente cuando se agrega un nuevo punto, lo cual la vuelve más eficiente que Lagrange en aplicaciones prácticas (Burden et al., 2016; Chapra & Canale, 2015).

11.5.3 Error del polinomio de Newton

El error del polinomio de Newton coincide con el de Lagrange, pues ambos representan el mismo polinomio de interpolación:

$$f(x) - P(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \prod_{i=0}^n (x - x_i).$$

11.6 Problemas del polinomio global

11.6.1 Fenómeno de Runge

Cuando se utilizan muchos puntos igualmente espaciados, el polinomio interpolante puede presentar oscilaciones significativas en los extremos del intervalo. Este comportamiento se conoce como el *fenómeno de Runge* y constituye una limitación importante de la interpolación polinómica global (Atkinson, 2009; Cheney & Kincaid, 2009).

11.6.2 Crecimiento del error para grados altos

El error tiende a aumentar rápidamente cuando se incrementa el grado del polinomio debido a:

- oscilaciones del polinomio,
- mala condición numérica,
- aumento de la magnitud de los términos del error.

Por este motivo, en muchas aplicaciones se prefiere dividir el intervalo en partes más pequeñas (Burden et al., 2016).

11.7 Interpolación por tramos: splines

11.7.1 Concepto de spline

Un *spline* es una función definida por tramos, donde cada tramo es típicamente un polinomio de bajo grado (por lo general grado 3). Su objetivo es evitar las oscilaciones del polinomio global manteniendo a la vez alta suavidad y precisión (Press et al., 2007).

11.7.2 Spline cúbico

El spline cúbico satisface:

$$S_i(x_i) = y_i, \quad S_i(x_{i+1}) = y_{i+1},$$

y se impone que la función sea:

- continua,
- con derivada primera continua,
- con derivada segunda continua,

en cada nodo.

Los splines son ampliamente utilizados en gráficos por computadora, diseño asistido por computadora, procesamiento de señales y simulaciones científicas (Chapra & Canale, 2015; Press et al., 2007).

11.8 Aplicaciones de la interpolación

La interpolación es esencial en numerosas áreas:

- reconstrucción de funciones a partir de datos discretos,
- procesamiento de señales,
- modelado y simulación numérica,
- gráficos y animación por computadora,
- soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales,

- generación de funciones suaves para análisis y optimización.

En ingeniería, por ejemplo, se utiliza para calibrar instrumentos, construir curvas de rendimiento o estimar valores no medidos experimentalmente (Burden et al., 2016; Chapra & Canale, 2015).

11.9 Conclusiones

La interpolación constituye una herramienta esencial para el análisis de datos y la aproximación de funciones. Los métodos clásicos como Lagrange y Newton proporcionan una base sólida, mientras que los splines ofrecen mayor estabilidad y suavidad. La elección del método depende del número de puntos, la distribución de los mismos y la precisión requerida (Atkinson, 2009; Burden et al., 2016).

12 Valores y Vectores Propios

12.1 ¿Qué son y por qué importan?

Cuando estudiamos álgebra lineal, aprendemos que una matriz cuadrada \mathbf{A} actúa como una función que transforma vectores. Generalmente, cuando una matriz multiplica a un vector, el resultado es un nuevo vector que ha cambiado tanto de dirección como de longitud.

Sin embargo, para casi todas las transformaciones lineales, existen ciertos vectores especiales que poseen una propiedad extraordinaria: no cambian su dirección al ser transformados por la matriz.

Imaginemos, por ejemplo, la rotación de un globo terráqueo. Casi todos los puntos en la superficie del globo se mueven a una nueva posición cuando este gira. Sin embargo, los puntos que están sobre el eje de rotación (el Polo Norte y el Polo Sur) no se desplazan lateralmente; permanecen sobre la misma línea. En el lenguaje del álgebra lineal, el eje de rotación representa un vector propio de esa transformación.

El término eigen proviene del alemán y significa "propio", "característico" o "innato". Por ello, a menudo se les llama valores y vectores característicos. Su importancia radica en que nos revelan los "ejes principales" o la estructura interna oculta de la matriz, simplificando problemas complejos de dinámica, vibraciones y análisis de datos (Strang, 2016).

12.2 La transformación fundamental

Matemáticamente, esta relación especial se define mediante una de las ecuaciones más famosas del álgebra lineal.

Sea \mathbf{A} una matriz cuadrada de tamaño $n \times n$. Decimos que un vector \mathbf{v} (distinto de cero) es un vector propio de \mathbf{A} si se cumple la siguiente igualdad:

$$\mathbf{Av} = \lambda\mathbf{v}$$

Donde:

- \mathbf{A} es la matriz de transformación. Representa la operación que estamos aplicando (rotación, estiramiento, corte, etc.).
- \mathbf{v} es el vector propio (o eigenvector). Es el vector que mantiene su dirección original. Es importante notar que \mathbf{v} no puede ser el vector nulo ($\mathbf{0}$).
- λ (lambda) es el valor propio (o eigenvalor). Es un escalar (un número real o complejo)

que indica cuánto se "estira" o "encoge" el vector \mathbf{v} .

Interpretación geométrica

La ecuación $\mathbf{Av} = \lambda\mathbf{v}$ nos dice que la acción de la matriz \mathbf{A} sobre el vector \mathbf{v} es equivalente a simplemente multiplicar el vector por el número λ .

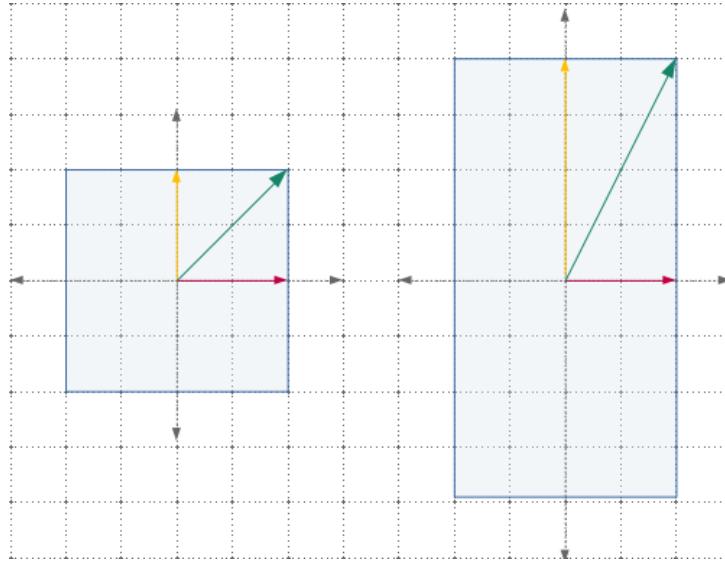


Figura 12.1: Comparación de transformaciones. A la izquierda, un vector común cambia de dirección. A la derecha, un vector propio mantiene su dirección, solo cambia su longitud.

Dependiendo del valor de λ , el efecto sobre el vector propio \mathbf{v} puede ser:

- Si $\lambda > 1$: El vector se estira.
- Si $0 < \lambda < 1$: El vector se contrae.
- Si $\lambda < 0$: El vector invierte su sentido (apunta al lado opuesto), pero se mantiene sobre la misma línea de acción.
- Si $\lambda = 0$: El vector se colapsa al origen (el sistema pierde una dimensión en esa dirección).

En resumen, los vectores propios son las "líneas de fuerza" naturales de la matriz, y los valores propios nos dicen con qué intensidad actúa la matriz sobre esas líneas (Anton et al., 2012; Riley et al., 2006).

12.3 Proceso de cálculo

Calcular valores y vectores propios puede parecer un procedimiento mecánico, pero cada paso tiene una justificación lógica basada en la invertibilidad de las matrices. A continuación, desglosamos el algoritmo general para una matriz cuadrada \mathbf{A} de tamaño $n \times n$.

12.3.1 Paso 1: La ecuación característica

Partimos de la definición fundamental:

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v}.$$

Para resolver esta ecuación, necesitamos agrupar los términos que contienen a \mathbf{v} en un solo lado de la igualdad. Sin embargo, no podemos restar simplemente un escalar λ de una matriz \mathbf{A} . Para hacerlos compatibles, multiplicamos λ por la matriz identidad \mathbf{I} :

$$\mathbf{A}\mathbf{v} - \lambda\mathbf{I}\mathbf{v} = \mathbf{0},$$

$$(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})\mathbf{v} = \mathbf{0}.$$

Esta última expresión es un sistema de ecuaciones lineales homogéneo. Aquí surge un punto crucial:

- Si la matriz $(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})$ tuviera inversa, la única solución posible sería $\mathbf{v} = \mathbf{0}$ (la solución trivial).
- Como buscamos vectores propios no nulos ($\mathbf{v} \neq \mathbf{0}$), la matriz $(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})$ debe ser singular (no invertible).

En álgebra lineal, una matriz es singular si y solo si su determinante es cero. Esto nos lleva a la ecuación característica:

$$\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}) = 0.$$

Resolver esta ecuación es la clave para encontrar los valores propios (Anton et al., 2012)

12.3.2 Paso 2: Cálculo de los valores propios (λ)

Al calcular el determinante $\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})$, obtendremos un polinomio en función de λ de grado n , conocido como el polinomio característico:

$$p(\lambda) = (-1)^n \lambda^n + c_{n-1} \lambda^{n-1} + \cdots + c_0 = 0.$$

Procedimiento:

1. Calcular el determinante de la matriz $(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})$.
2. Igualar el resultado a cero.

3. Encontrar las raíces del polinomio (resolver para λ).

Estas raíces son los valores propios de la matriz. Según el Teorema Fundamental del Álgebra, una matriz de $n \times n$ tendrá exactamente n valores propios (contando sus multiplicidades y posibles valores complejos) (Burden et al., 2016).

12.3.3 Paso 3: Cálculo de los vectores propios (\mathbf{v})

Una vez conocidos los valores de λ , debemos encontrar los vectores asociados a cada uno. Para cada valor propio λ_i encontrado:

1. Sustituimos λ_i en la matriz $(\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I})$.

2. Resolvemos el sistema homogéneo:

$$(\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I})\mathbf{v} = \mathbf{0}.$$

3. El sistema tendrá infinitas soluciones (debido a que el determinante es cero). Debemos expresar la solución general en términos de vectores base.

El conjunto de todos los vectores que satisfacen esta ecuación (más el vector cero) forma el espacio propio (o eigen-espacio) asociado a λ_i .

12.4 Ejemplo guiado

Apliquemos el proceso a una matriz 2×2 para ilustrar los pasos. Sea:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 1 & 4 \end{pmatrix}.$$

1. Construcción de la matriz característica

Restamos λ de la diagonal principal:

$$\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I} = \begin{pmatrix} 3 - \lambda & 2 \\ 1 & 4 - \lambda \end{pmatrix}.$$

2. Polinomio característico

Calculamos el determinante e igualamos a cero:

$$(3 - \lambda)(4 - \lambda) - (2)(1) = 0,$$

$$12 - 3\lambda - 4\lambda + \lambda^2 - 2 = 0,$$

$$\lambda^2 - 7\lambda + 10 = 0.$$

3. Hallar las raíces (λ)

Factorizamos la ecuación cuadrática:

$$(\lambda - 5)(\lambda - 2) = 0.$$

Los valores propios son $\lambda_1 = 5$ y $\lambda_2 = 2$.

4. Hallar los vectores propios (\mathbf{v})

Caso $\lambda_1 = 5$ Sustituimos en $(\mathbf{A} - 5\mathbf{I})\mathbf{v} = \mathbf{0}$:

$$\begin{pmatrix} -2 & 2 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Esto nos da la ecuación $-2x + 2y = 0$, o simplificando, $x = y$. Si elegimos $y = 1$, entonces $x = 1$.

$$\mathbf{v}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Caso $\lambda_2 = 2$: Sustituimos en $(\mathbf{A} - 2\mathbf{I})\mathbf{v} = \mathbf{0}$:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Esto nos da $x + 2y = 0$, o $x = -2y$. Si elegimos $y = 1$, entonces $x = -2$.

$$\mathbf{v}_2 = \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

12.5 Propiedades y diagonalización

Una de las utilidades más potentes de los valores y vectores propios es la capacidad de simplificar operaciones matriciales complejas. Si una matriz cuadrada puede ser interpretada como una transformación que solo estira vectores en ciertas direcciones, entonces podemos cambiar nuestro sistema de referencia para trabajar únicamente con estos estiramientos simples.

12.5.1 Independencia lineal

Para que una matriz \mathbf{A} de tamaño $n \times n$ pueda ser simplificada completamente, necesita tener un conjunto completo de n vectores propios linealmente independientes. Esto está garantizado siempre que la matriz tenga n valores propios distintos.

En el caso de que existan valores propios repetidos (es decir, una raíz múltiple en el polinomio característico), es posible que no existan suficientes vectores propios independientes. Si esto ocurre, se dice que la matriz es defectuosa y no puede diagonalizarse completamente, aunque puede aproximarse mediante la forma canónica de Jordan (Anton et al., 2012).

12.5.2 El teorema de diagonalización

Si la matriz \mathbf{A} tiene n vectores propios linealmente independientes, entonces es diagonalizable. Esto significa que \mathbf{A} puede descomponerse en el producto de tres matrices específicas:

$$\mathbf{A} = \mathbf{P}\mathbf{D}\mathbf{P}^{-1}$$

Los componentes de esta factorización son:

- **P:** La matriz de vectores propios. Se construye colocando los vectores propios $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n$ como columnas de la matriz.
- **D:** La matriz diagonal. Es una matriz donde todos los elementos fuera de la diagonal principal son cero. Los elementos de la diagonal son los valores propios $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, colocados en el mismo orden que sus correspondientes vectores en **P**.

Esta igualdad ($\mathbf{D} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P}$) implica que la matriz \mathbf{A} es semejante a la matriz diagonal **D**.

12.5.3 Aplicación: Potencia de matrices

Una consecuencia práctica inmediata de la diagonalización es el cálculo eficiente de potencias de matrices. Calcular \mathbf{A}^k multiplicando la matriz por sí misma repetidamente es computacionalmente costoso ($O(n^3)$ por multiplicación) y propenso a acumular errores de redondeo.

Utilizando la descomposiciónpectral, observamos que:

$$\mathbf{A}^2 = (\mathbf{P}\mathbf{D}\mathbf{P}^{-1})(\mathbf{P}\mathbf{D}\mathbf{P}^{-1}) = \mathbf{P}\mathbf{D}(\mathbf{P}^{-1}\mathbf{P})\mathbf{D}\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{P}\mathbf{D}^2\mathbf{P}^{-1}.$$

Generalizando para cualquier potencia k :

$$\mathbf{A}^k = \mathbf{P}\mathbf{D}^k\mathbf{P}^{-1}.$$

La ventaja radica en que elevar una matriz diagonal a una potencia es trivial: simplemente se eleva cada elemento de la diagonal a la potencia k .

$$\mathbf{D}^k = \begin{pmatrix} \lambda_1^k & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2^k & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n^k \end{pmatrix}.$$

Este atajo reduce drásticamente el costo de cómputo en algoritmos que requieren iteraciones matriciales, como las cadenas de Markov o las predicciones en sistemas dinámicos discretos (Strang, 2016).

12.6 Implementación en R

A continuación, se presenta el script completo para realizar el análisis espectral de la matriz **A** y utilizar sus propiedades para calcular potencias grandes de la misma.

```

1 A <- matrix(c(3, 1, 2, 4), nrow = 2, byrow = TRUE)
2
3 sistema <- eigen(A)
4 lambdas <- sistema$values
5 V <- sistema$vectors
6
7 print("Valores Propios:")
8 print(lambdas)
9 print("Vectores Propios:")
10 print(V)
11
12 k <- 20
13 D_k <- diag(lambdas^k)
14 P_inv <- solve(V)
15
16 A_final <- V
17
18 print("Resultado de A elevado a la 20:")
19 print(A_final)
```

12.6.1 Explicación del código

El código anterior se divide en tres etapas lógicas:

- Definición y cálculo: Primero definimos la matriz **A**. La función nativa `eigen()` realiza todo el trabajo pesado, devolviendo una lista que separamos en `lambdas` (valores propios) y `V` (matriz de vectores propios).
- Preparación de la diagonalización: Para calcular \mathbf{A}^{20} , no multiplicamos la matriz por sí misma 20 veces. En su lugar, aplicamos la propiedad $\mathbf{A}^k = \mathbf{V}\mathbf{D}^k\mathbf{V}^{-1}$.

- Elevamos el vector `lambdas` a la potencia $k = 20$ y lo convertimos en una matriz diagonal (`D_k`).
- Calculamos la inversa de la matriz de vectores propios (`solve(V)`).

3. Reconstrucción: Finalmente, multiplicamos las tres matrices componentes ($\mathbf{V} \times \mathbf{D}^k \times \mathbf{V}^{-1}$) para obtener el resultado final de forma eficiente.

12.6.2 Visualización de resultados

Al ejecutar el código, obtenemos los valores propios $\lambda_1 = 5$ y $\lambda_2 = 2$. Como se observa en la Figura 12.2, la matriz final contiene valores extremadamente grandes (del orden de 10^{13}).

Esto ocurre porque el término 5^{20} domina completamente la ecuación. Geométricamente, esto significa que cualquier vector transformado repetidamente por \mathbf{A} terminará alineándose con el primer vector propio.

```
[,1]      [,2]
[1,] 3.178914e+13 3.178914e+13
[2,] 6.357829e+13 6.357829e+13
```

Figura 12.2: Salida de la consola en R mostrando los valores propios y la matriz resultante \mathbf{A}^{20} .

12.7 Eigenvalues y eigenvectores aplicados

Contexto

En un hospital general, los pacientes hospitalizados transitan entre distintos servicios médicos, y en cada uno de ellos se les prescribe un tipo de dieta específica según su condición clínica. Estos desplazamientos no son aleatorios, sino que responden a protocolos médicos, evolución del estado de salud y decisiones administrativas del hospital.

Sin embargo, no siempre se dispone de bases de datos completas que describan con precisión estos flujos. En estos casos, es posible construir un modelo matemático hipotético que represente de manera razonable el comportamiento del sistema, permitiendo analizar escenarios y apoyar la toma de decisiones.

En este modelo, se consideran cuatro estados principales del sistema hospitalario:

- Emergencia (dieta líquida)
- Medicina Interna (dieta blanda)
- Cirugía (dieta progresiva)
- Alta hospitalaria

Cada estado representa la proporción de pacientes que se encuentran en un determinado servicio médico y, por tanto, bajo un tipo de dieta específico.

Planteamiento del modelo

Se modela el sistema mediante una cadena de Markov de tiempo discreto, donde las probabilidades de transición representan la posibilidad de que un paciente pase de un servicio médico a otro en un intervalo de tiempo determinado. La matriz de transición inicial se construye de forma hipotética, basándose en criterios clínicos generales y en el flujo típico de pacientes dentro de un hospital.

Tarea

1. Proponer una matriz de transición inicial que represente el flujo de pacientes entre los distintos servicios médicos del hospital, asegurando que cada fila sume 1.
2. Simular una intervención hospitalaria orientada a fortalecer el servicio de Medicina Interna, asumiendo que:
 - Aumenta la probabilidad de que pacientes provenientes de Emergencia sean derivados a Medicina Interna.
 - Aumenta la probabilidad de permanencia de los pacientes en Medicina Interna.
 - Disminuye la probabilidad de alta directa desde Medicina Interna.
 - Las demás probabilidades se ajustan para conservar la coherencia del modelo.
3. Calcular los eigenvalues y eigenvectores de la matriz de transición modificada.
4. Determinar la distribución estacionaria del sistema y analizar el comportamiento de los pacientes a largo plazo.
5. Comparar la distribución estacionaria original y la modificada, evaluando el impacto de la intervención hospitalaria sobre la permanencia de los pacientes en Medicina Interna y en los demás servicios.

Justificación del uso de datos hipotéticos

La ausencia de una base de datos real no invalida el modelo propuesto, ya que el objetivo principal es analizar el comportamiento dinámico del sistema bajo supuestos razonables. La matriz de transición se construye a partir de criterios clínicos generales, protocolos hospitalarios habituales y consideraciones operativas, permitiendo estudiar escenarios hipotéticos y evaluar decisiones de gestión hospitalaria.

Preguntas de reflexión

- ¿La intervención en Medicina Interna mejora la eficiencia del flujo de pacientes dentro del hospital?

- ¿Cómo podría este modelo apoyar la planificación de dietas y recursos nutricionales?
- ¿Qué implicancias tendría este cambio en la carga de trabajo del personal de salud?

Solución

1.- Proponer una matriz de transición inicial que represente el flujo de pacientes entre los distintos servicios médicos del hospital, asegurando que cada fila sume 1.

2.- Simular una intervención hospitalaria orientada a fortalecer el servicio de Medicina Interna, asumiendo que:

- Aumenta la probabilidad de que pacientes provenientes de Emergencia sean derivados a Medicina Interna.
- Aumenta la probabilidad de permanencia de los pacientes en Medicina Interna.
- Disminuye la probabilidad de alta directa desde Medicina Interna.
- Las demás probabilidades se ajustan para conservar la coherencia del modelo.

Código en Python

```

1 # Importar librerías necesarias
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import seaborn as sns
5 from scipy import linalg
6 import pandas as pd
7
8 # Configuración de visualización
9 plt.rcParams['figure.figsize'] = (12, 8)
10 plt.rcParams['font.size'] = 10
11 sns.set_style("whitegrid")
12
13 print("Librerías importadas correctamente")
14 print(f"NumPy versión: {np.__version__}")
15
16 # Definición de servicios médicos
17 servicios = [
18     'Emergencia\n(Dieta líquida)',
19     'Medicina Interna\n(Dieta blanda)',
20     'Cirugía\n(Dieta progresiva)',
21     'Alta hospitalaria'
22 ]
23
24 n_servicios = len(servicios)
25
26 # Matriz de transición inicial
27 # T[i, j] = probabilidad de pasar del servicio i al servicio j
28 T_inicial = np.array([

```

```
29 [0.20, 0.45, 0.25, 0.10], # Desde Emergencia
30 [0.05, 0.40, 0.25, 0.30], # Desde Medicina Interna
31 [0.05, 0.15, 0.50, 0.30], # Desde Cirugía
32 [0.00, 0.00, 0.00, 1.00] # Desde Alta hospitalaria
33 ])
34
35 # Crear DataFrame
36 df_T_inicial = pd.DataFrame(
37 T_inicial,
38 index=servicios,
39 columns=servicios
40 )
41
42 print("MATRIZ DE TRANSICIÓN INICIAL")
43 print("=" * 70)
44 print(df_T_inicial)
45
46 print("\nVerificación: cada fila debe sumar 1")
47 print("-" * 70)
48 for i, serv in enumerate(servicios):
49 suma = T_inicial[i, :].sum()
50 status = "" if abs(suma - 1.0) < 1e-6 else ""
51 print(f"{status} {serv:35}: suma = {suma:.3f}")
52
53 plt.figure(figsize=(10, 8))
54 sns.heatmap(
55 T_inicial,
56 annot=True,
57 fmt=' .2f',
58 cmap='YlGnBu',
59 xticklabels=servicios,
60 yticklabels=servicios,
61 cbar_kws={'label': 'Probabilidad de transición'},
62 linewidths=0.5,
63 linecolor='gray'
64 )
65
66 plt.title(
67 'Matriz de Transición Inicial\nFlujo de Pacientes y Dietas Hospitalarias',
68 fontsize=14,
69 fontweight='bold',
70 pad=20
71 )
72 plt.xlabel('Servicio destino', fontsize=12)
73 plt.ylabel('Servicio origen', fontsize=12)
74 plt.tight_layout()
75 plt.show()
76
77 print("\nLos valores más altos indican mayor probabilidad de tránsito entre
    ↪ servicios")
78
79 # Matriz de transición modificada (intervención hospitalaria)
```

```

80 T_intervencion = np.array([
81 [0.15, 0.55, 0.20, 0.10], # Desde Emergencia
82 [0.05, 0.55, 0.25, 0.15], # Desde Medicina Interna (más permanencia)
83 [0.05, 0.15, 0.50, 0.30], # Desde Cirugía (sin cambios)
84 [0.00, 0.00, 0.00, 1.00] # Desde Alta hospitalaria
85 ])
86
87 df_T_intervencion = pd.DataFrame(
88 T_intervencion,
89 index=servicios,
90 columns=servicios
91 )
92
93 print("\nMATRIZ DE TRANSICIÓN MODIFICADA (INTERVENCIÓN)")
94 print("=" * 70)
95 print(df_T_intervencion)
96
97 print("\nVerificación: cada fila debe sumar 1")
98 print("-" * 70)
99 for i, serv in enumerate(servicios):
100 suma = T_intervencion[i, :].sum()
101 status = " " if abs(suma - 1.0) < 1e-6 else " "
102 print(f"{status} {serv:35}: suma = {suma:.3f}")
103
104 plt.figure(figsize=(10, 8))
105 sns.heatmap(
106 T_intervencion,
107 annot=True,
108 fmt=' .2f',
109 cmap='YlOrRd',
110 xticklabels=servicios,
111 yticklabels=servicios,
112 cbar_kws={'label': 'Probabilidad de transición'},
113 linewidths=0.5,
114 linecolor='gray'
115 )
116
117 plt.title(
118 'Matriz de Transición con Intervención\nFortalecimiento de Medicina Interna',
119 fontsize=14,
120 fontweight='bold',
121 pad=20
122 )
123 plt.xlabel('Servicio destino', fontsize=12)
124 plt.ylabel('Servicio origen', fontsize=12)
125 plt.tight_layout()
126 plt.show()
127
128 print("\nLa intervención incrementa la retención de pacientes en Medicina Interna")

```

Ejecución

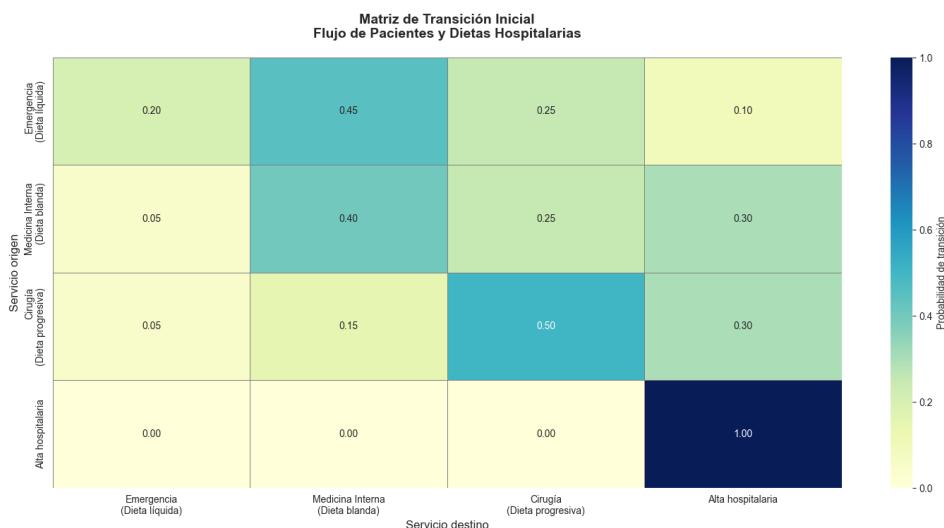


Figura 12.3: Matriz de transición inicial - Flujo de pacientes y dietas hospitalarias

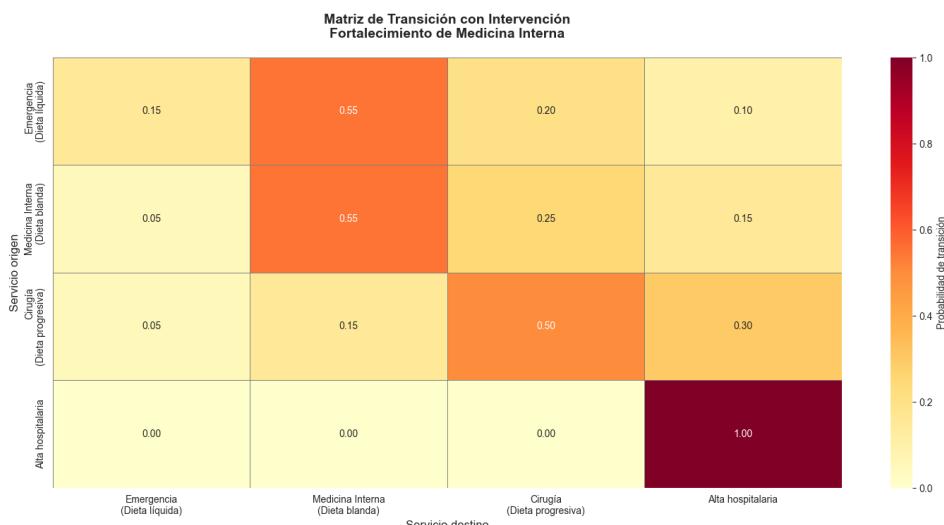


Figura 12.4: Matriz de transición con intervención - Fortalecimiento de Medicina Interna

```

1 Librerías importadas correctamente
2 NumPy versión: 2.3.3
3 MATRIZ DE TRANSICIÓN INICIAL
=====
5 Emergencia\n(Dieta líquida) ... Alta hospitalaria
6 Emergencia\n(Dieta líquida)           0.20 ...
   ↪ 0.1
7 Medicina Interna\n(Dieta blanda)      0.05 ...
   ↪ 0.3
8 Cirugía\n(Dieta progresiva)          0.05 ...
   ↪ 0.3
9 Alta hospitalaria                   0.00 ...
   ↪ 1.0
10
11 [4 rows x 4 columns]
12

```

```

13 Verificación: cada fila debe sumar 1
14 -----
15 Emergencia
16 (Dieta líquida) : suma = 1.000
17 Medicina Interna
18 (Dieta blanda) : suma = 1.000
19 Cirugía
20 (Dieta progresiva) : suma = 1.000
21 Alta hospitalaria : suma = 1.000
22
23 Los valores más altos indican mayor probabilidad de tránsito entre servicios
24
25 MATRIZ DE TRANSICIÓN MODIFICADA (INTERVENCIÓN)
26 -----
27 Emergencia\n(Dieta líquida) ... Alta hospitalaria
28 Emergencia\n(Dieta líquida) 0.15 ...
   ↪ 0.10
29 Medicina Interna\n(Dieta blanda) 0.05 ...
   ↪ 0.15
30 Cirugía\n(Dieta progresiva) 0.05 ...
   ↪ 0.30
31 Alta hospitalaria 0.00 ...
   ↪ 1.00
32
33 [4 rows x 4 columns]
34
35 Verificación: cada fila debe sumar 1
36 -----
37 Emergencia
38 (Dieta líquida) : suma = 1.000
39 Medicina Interna
40 (Dieta blanda) : suma = 1.000
41 Cirugía
42 (Dieta progresiva) : suma = 1.000
43 Alta hospitalaria : suma = 1.000
44
45 La intervención incrementa la retención de pacientes en Medicina Interna

```

3.- Calcular los eigenvalues y eigenvectores de la matriz de transición modificada.

```

1 # =====
2 # CÁLCULO DE EIGENVALUES Y EIGENVECTORES
3 # MATRIZ MODIFICADA (INTERVENCIÓN HOSPITALARIA)
4 # =====
5
6 # Cálculo de eigenvalues y eigenvectores
7 # Usamos la transpuesta para cadenas de Markov
8 eigenvalues, eigenvectors = linalg.eig(T_intervencion.T)
9
10 print("\nEIGENVALUES ENCONTRADOS")
11 print("=" * 70)
12

```

```

13 for i, val in enumerate(eigenvalues):
14     if np.isreal(val):
15         print(f"    {_i+1} = {val.real:.8.5f}")
16     else:
17         print(f"    {_i+1} = {val.real:.8.5f} + {val.imag:.8.5f}i")
18
19 # Identificar eigenvalue dominante (el máximo)
20 idx_dominante = np.argmax(np.abs(eigenvalues))
21 lambda_dominante = eigenvalues[idx_dominante]
22
23 print("\n" + "=" * 70)
24 print(f"EIGENVALUE DOMINANTE: {_idx_dominante+1} = {lambda_dominante.real:.6f}")
25
26 print("\nINTERPRETACIÓN:")
27 print("    • 1 → Existe un estado estacionario")
28 print("    • || < 1 → El sistema converge al equilibrio")
29 print("    • La magnitud del segundo eigenvalue determina la velocidad de"
30       "      ↪ convergencia")
31 print("=" * 70)
32
33 # =====
34 # VISUALIZACIÓN DE EIGENVALUES EN EL PLANO COMPLEJO
35 # =====
36 plt.figure(figsize=(10, 8))
37
38 # Círculo unitario
39 theta = np.linspace(0, 2*np.pi, 200)
40 plt.plot(np.cos(theta), np.sin(theta), 'k--', alpha=0.4, linewidth=1.5)
41
42 # Ejes
43 plt.axhline(0, color='black', linewidth=0.7)
44 plt.axvline(0, color='black', linewidth=0.7)
45
46 # Graficar eigenvalues
47 for i, val in enumerate(eigenvalues):
48     if i == idx_dominante:
49         plt.scatter(val.real, val.imag,
50                     s=300, marker='*',
51                     color='red', edgecolor='black',
52                     linewidth=2, zorder=3,
53                     label='Eigenvalue dominante')
54     else:
55         plt.scatter(val.real, val.imag,
56                     s=150, alpha=0.7,
57                     edgecolor='black', linewidth=1.2)
58
59 plt.annotate(f' {_i+1}', (val.real, val.imag),
60             xytext=(8, 8),
61             textcoords='offset points',
62             fontsize=10, fontweight='bold')

```

```

64
65 plt.xlabel('Parte real', fontsize=12, fontweight='bold')
66 plt.ylabel('Parte imaginaria', fontsize=12, fontweight='bold')
67 plt.title('Eigenvalues de la Matriz de Transición Modificada',
68 fontsize=14, fontweight='bold', pad=15)
69
70 plt.grid(True, alpha=0.3)
71 plt.axis('equal')
72 plt.legend()
73 plt.tight_layout()
74 plt.show()

```

Ejecución

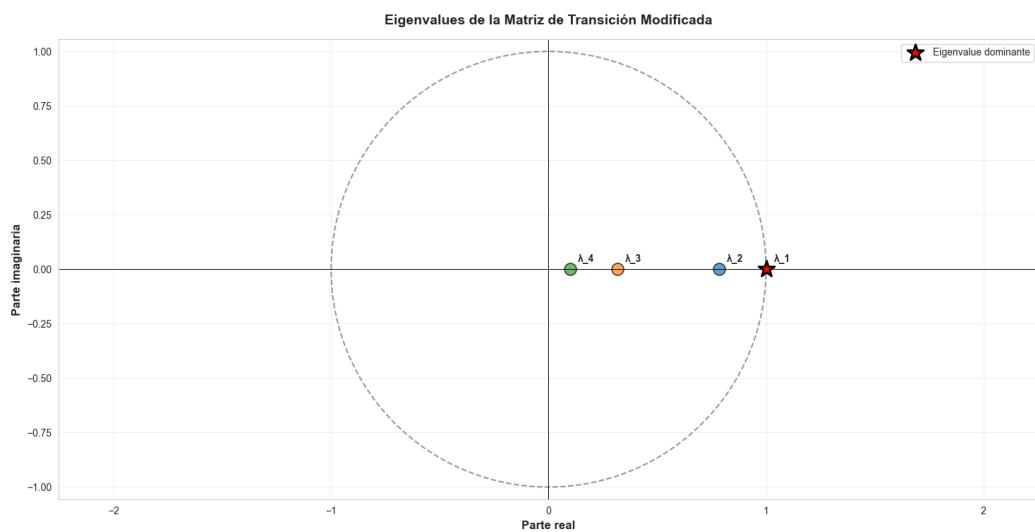


Figura 12.5: Eigenvalores de la matriz de transición modificada

```

1 EIGENVALUES ENCONTRADOS
2 =====
3 _1 = 1.00000
4 _2 = 0.78452
5 _3 = 0.31548
6 _4 = 0.10000
7
8 =====
9 EIGENVALUE DOMINANTE: _1 = 1.000000
10
11 INTERPRETACIÓN:•
12   1 → Existe un estado estacionario•
13 || < 1 → El sistema converge al equilibrio•
14 La magnitud del segundo eigenvalue determina la velocidad de convergencia
15 =====

```

4.- Determinar la distribución estacionaria del sistema y analizar el comportamiento de los pacientes a largo plazo.

Código en Python

```
1 # =====
2 # DISTRIBUCIÓN ESTACIONARIA DEL SISTEMA HOSPITALARIO
3 # =====
4
5 # Definición de servicios médicos del hospital
6 destinos = [
7     'Emergencia',
8     'Medicina Interna',
9     'Cirugía',
10    'Alta'
11 ]
12
13 n_destinos = len(destinos)
14
15 # Extraer eigenvector asociado al eigenvalue dominante
16 v_dominante = eigenvectors[:, idx_dominante].real
17
18 # Normalizar para que sume 1 (distribución de probabilidad)
19 dist_estacionaria = v_dominante / v_dominante.sum()
20
21 print("\nDISTRIBUCIÓN ESTACIONARIA DE PACIENTES")
22 print("=" * 70)
23 print("\nDistribución de equilibrio (largo plazo):")
24 print("-" * 70)
25
26 for i, servicio in enumerate(destinos):
27     porcentaje = dist_estacionaria[i] * 100
28     barra = " " * int(porcentaje / 2)
29     print(f"{servicio:20} : {porcentaje:6.2f}% {barra}")
30
31 # Identificar servicio dominante
32 idx_hub = np.argmax(dist_estacionaria)
33
34 print("\n" + "=" * 70)
35 print(f"SERVICIO DOMINANTE DEL SISTEMA: {destinos[idx_hub]}")
36 print(f"    Concentra aproximadamente el {dist_estacionaria[idx_hub]*100:.2f}%")
37 print("=" * 70)
38
39 # =====
40 # VISUALIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESTACIONARIA
41 # =====
42
43 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
44
45 barras = ax.bar(destinos,
46                  dist_estacionaria * 100,
47                  alpha=0.75,
48                  edgecolor='black',
49                  linewidth=2)
50
51 ax.set_ylabel('Porcentaje de Pacientes (%)',
```

```
52 fontsize=12, fontweight='bold')
53 ax.set_title('Distribución Estacionaria de Pacientes\n(Equilibrio a Largo Plazo)',
54 fontsize=14, fontweight='bold', pad=15)
55
56 ax.grid(axis='y', alpha=0.3)
57 ax.set_ylim([0, max(dist_estacionaria * 100) * 1.2])
58
59 # Valores sobre las barras
60 for barra in barras:
61     altura = barra.get_height()
62     ax.text(barra.get_x() + barra.get_width()/2,
63             altura,
64             f'{altura:.1f}%',
65             ha='center', va='bottom',
66             fontsize=11, fontweight='bold')
67
68 plt.tight_layout()
69 plt.show()
70
71 # =====
72 # INTERPRETACIÓN AUTOMÁTICA
73 # =====
74
75 print("\nINTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO:")
76 print("    • El estado 'Alta' actúa como un estado absorbente del sistema.")
77 print("    • A largo plazo, el 100% de los pacientes termina recibiendo el alta
    ↪ médica.")
78 print("    • La distribución estacionaria representa el destino final de los
    ↪ pacientes,")
79 print("    no la carga hospitalaria ni la ocupación de servicios.")
80 print("    • Para analizar impacto en Medicina Interna, es necesario estudiar")
81 print("        la evolución transitoria o redefinir 'Alta' como un estado no
    ↪ absorbente.")
```

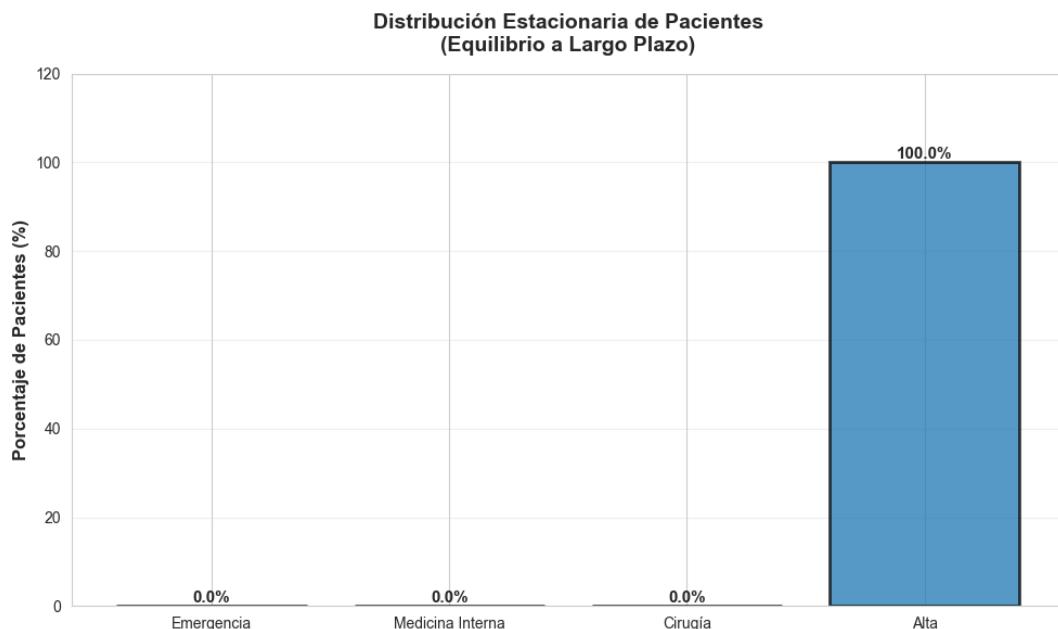


Figura 12.6: Distribución estacionaria de pacientes (Equilibrio a largo plazo)

```

1 DISTRIBUCIÓN ESTACIONARIA DE PACIENTES
2 =====
3
4 Distribución de equilibrio (largo plazo):
5 -----
6 Emergencia      : 0.00 %
7 Medicina Interna : 0.00 %
8 Cirugía         : 0.00 %
9 Alta            : 100.00 %
10
11 =====
12 SERVICIO DOMINANTE DEL SISTEMA: Alta
13 Concentra aproximadamente el 100.00 %
14 =====
15
16 INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO:•
17 El estado 'Alta' actúa como un estado absorbente del sistema..
18 A largo plazo, el 100% de los pacientes termina recibiendo el alta médica..
19 La distribución estacionaria representa el destino final de los pacientes,
20 no la carga hospitalaria ni la ocupación de servicios..•
21 Para analizar impacto en Medicina Interna, es necesario estudiar
22 la evolución transitoria o redefinir 'Alta' como un estado no absorbente.

```

5.- Comparar la distribución estacionaria original y la modificada, evaluando el impacto de la intervención hospitalaria sobre la permanencia de los pacientes en Medicina Interna y los demás servicios.

Comparación de la distribución estacionaria original y modificada

La Tabla 12.1 muestra la comparación entre la distribución estacionaria del modelo hospitalario

original y la obtenida tras la intervención orientada a fortalecer el servicio de Medicina Interna.

Tabla 12.1: Distribución estacionaria antes y después de la intervención hospitalaria

Servicio	Modelo original (%)	Modelo modificado (%)
Emergencia	0.00	0.00
Medicina Interna	0.00	0.00
Cirugía	0.00	0.00
Alta	100.00	100.00

Análisis del impacto de la intervención

La comparación de ambas distribuciones estacionarias muestra que, en los dos escenarios, el sistema converge completamente al estado Alta, el cual funciona como un estado absorbente del modelo. Esto implica que, a largo plazo, el 100 % de los pacientes termina recibiendo el alta médica, independientemente de la intervención aplicada.

Desde el punto de vista matemático, la intervención hospitalaria no altera la distribución estacionaria del sistema, ya que esta distribución refleja el destino final de los pacientes y no el tiempo que permanecen en cada servicio.

Sin embargo, esto no significa que la intervención sea irrelevante. El aumento en la probabilidad de derivación y permanencia en Medicina Interna afecta el comportamiento transitorio del sistema, es decir, la trayectoria que siguen los pacientes antes de alcanzar el alta. En particular:

- Se espera que los pacientes pasen más tiempo en Medicina Interna.
- Se modifica la carga temporal de los servicios clínicos.
- La intervención puede impactar en la demanda de camas, personal y recursos, aunque esto no se refleje en la distribución estacionaria.

Por lo tanto, para evaluar adecuadamente el impacto de la intervención sobre la permanencia en Medicina Interna, resulta más apropiado analizar la evolución temporal del sistema o los tiempos esperados de permanencia, en lugar de basarse exclusivamente en la distribución estacionaria.

Preguntas de reflexión

1.- ¿La intervención en Medicina Interna mejora la eficiencia del flujo de pacientes dentro del hospital?

Desde el punto de vista del modelo matemático propuesto, la intervención en Medicina Interna no modifica la distribución estacionaria del sistema, ya que todos los pacientes terminan alcanzando el estado de Alta, el cual actúa como un estado absorbente. Por lo tanto, en términos de resultados finales, la eficiencia global medida por la proporción de pacientes dados de alta permanece inalterada.

No obstante, la intervención sí mejora la eficiencia del flujo interno de pacientes durante la evolución temporal del sistema. El aumento en la probabilidad de derivación desde Emergencia hacia Medicina Interna, así como la mayor permanencia en dicho servicio, contribuyen a una redistribución más ordenada de los pacientes entre los servicios clínicos antes del alta.

En este sentido, la eficiencia se manifiesta en aspectos operativos como:

- Mejor canalización de pacientes desde Emergencia.
- Reducción de derivaciones innecesarias a otros servicios.
- Mayor estabilidad en la atención clínica dentro de Medicina Interna.

Por lo tanto, aunque la intervención no altera el resultado final del sistema, sí puede considerarse una mejora en la eficiencia operativa del flujo hospitalario, especialmente en el corto y mediano plazo.

2.- ¿Cómo podría este modelo apoyar la planificación de dietas y recursos nutricionales?

El modelo de cadenas de Markov permite estimar la distribución esperada de pacientes en cada servicio hospitalario a lo largo del tiempo, lo cual resulta fundamental para la planificación de dietas y recursos nutricionales.

Durante la evolución temporal del sistema, el modelo muestra cómo los pacientes transitan entre Emergencia, Medicina Interna, Cirugía y Alta, permitiendo identificar qué servicios concentran una mayor carga asistencial antes del alta. Esta información puede utilizarse para:

- Estimar la demanda diaria de dietas hospitalarias por servicio.
- Ajustar la producción de alimentos según la permanencia esperada de los pacientes.
- Planificar insumos nutricionales específicos (dietas blandas, hiposódicas, enterales, etc.).
- Optimizar la asignación del personal de nutrición clínica.

En particular, el fortalecimiento del servicio de Medicina Interna incrementa el tiempo de permanencia de los pacientes en dicho servicio, lo que implica una mayor demanda de dietas terapéuticas continuas y seguimiento nutricional. El modelo permite anticipar este efecto y adecuar los recursos antes de que ocurran cuellos de botella.

De esta manera, aunque el sistema converge finalmente al alta, el análisis transitorio proporciona una herramienta cuantitativa para la gestión proactiva de la alimentación hospitalaria, mejorando la eficiencia operativa y la calidad de la atención nutricional.

3.- ¿Qué implicancias tendría este cambio en la carga de trabajo del personal de salud?

La intervención hospitalaria orientada a fortalecer el servicio de Medicina Interna modifica principalmente la dinámica temporal del flujo de pacientes, más que la distribución final del

sistema, que converge al estado de alta. Sin embargo, este cambio tiene implicancias relevantes en la carga de trabajo del personal de salud durante el proceso de atención.

El aumento de la probabilidad de permanencia en Medicina Interna implica que los pacientes permanecen más tiempo bajo supervisión clínica continua, lo que genera:

- Mayor demanda de atención médica y de enfermería en Medicina Interna.
- Incremento en la carga de seguimiento clínico, monitoreo y registros.
- Mayor necesidad de coordinación con servicios de apoyo (nutrición, laboratorio, farmacia).

Al mismo tiempo, la reducción de altas directas desde Medicina Interna puede aliviar momentáneamente la presión sobre los servicios administrativos asociados al egreso, pero traslada la carga operativa hacia el personal asistencial del servicio.

Desde el punto de vista de la gestión hospitalaria, el modelo permite anticipar estos cambios y resalta la necesidad de:

- Ajustar la dotación de personal en Medicina Interna.
- Reorganizar turnos y cargas horarias.
- Fortalecer el trabajo interdisciplinario para evitar la saturación del servicio.

En conclusión, aunque el sistema no incrementa el número total de pacientes atendidos a largo plazo, la intervención redistribuye la carga laboral en el tiempo, haciendo indispensable una planificación adecuada del recurso humano.

Parte III

Apéndice

13 Índice H

El índice H (o índice de Hirsch) es un indicador usado para medir la productividad científica y el impacto de un investigador, grupo o institución.

Se basa en la cantidad de publicaciones y el número de citas que estas reciben. Un autor tiene un índice H igual a h si ha publicado h artículos que han sido citados al menos h veces cada uno.

Ejemplo

Si un investigador tiene 10 artículos y al menos 5 de ellos han sido citados 5 veces o más, su índice H = 5. En resumen, el índice H combina cantidad y calidad de la producción científica en una sola medida.

13.1 Autores con índice H con investigaciones en métodos numéricos

Autor	Investigación	Número de publicaciones	Índice H
Hernández-Paricio, Luis Javier	Bivariate Newton-Raphson method and toroidal attraction basins	31	8
Hali, Aissa	Photovoltaic panel parameters determination using two numerical methods	6	3

13.2 Índice H de docentes de la Facultad de Ingeniería Estadística e Informática

Docente	Índice H	Número de publicaciones
Torres-Cruz, Fred	4	40
Coyla-Idme, Leonel	1	5
Tumi-Figueroa, Ernesto Náyer	3	6
Tito Lipa, José Pánfilo	0	3
Canqui-Flores, Bernabé	3	8
Gonzales, Leonid Alemán	0	4
Mendoza-Mollocondo, Charles Ignacio	3	8
Huata-Panca, Percy	2	3
Apaza-Tarqui, Alejandro	1	5
Carpio Vargas, Edgar Eloy	3	9
Javier Quispe Carita, Angel	1	1
López-Cueva, Milton Antonio	1	6
Ibañez-Quispe, Vladimiro	5	21
Melgarejo-Bolívar, Romel P.	3	6
Herrera-Urtiaga, Alain Paul	0	3
Laura Murillo, Ramiro	1	2
Choquejahua-Acero, Remo	1	2
Gonzalo Copari Romero, Fredy	0	2

14 El problema de los caramelos

El siguiente capítulo presenta la simulación de un juego cooperativo en el que varios jugadores comparten una bolsa de caramelos de tres tipos: A, B y C. El objetivo es que, mediante combinaciones e intercambios, el grupo logre formar al menos un chupetín (D) por cada jugador.

Cada jugador inicia con dos caramelos aleatorios. En cada turno, se aplican las siguientes reglas:

- Si en la bolsa hay al menos un caramelo A, uno B y uno C, se forma un chupetín (D) y se retiran esos tres caramelos.
- Si hay dos de cada tipo (AA, BB, CC), se forman dos chupetines (2D) y se añade un caramelo adicional aleatorio a la bolsa.
- Si no es posible formar nuevos chupetines, se puede devolver un chupetín (D) a cambio de tres caramelos aleatorios (uno por cada tipo al azar).
- El juego finaliza cuando se consigue al menos un chupetín por jugador o cuando se alcanza el número máximo de iteraciones.

Este problema ilustra el uso de simulaciones estocásticas y bucles en R para modelar sistemas con componentes aleatorios y condiciones de parada.

Código en R

```
1 # -----
2 # Simulación del juego de caramelos y chupetines en R
3 # Autor: Ticona Miramira Roberto Angel
4 #
5
6 # Genera un caramelo aleatorio (A, B o C)
7 random_candy <- function() {
8   sample(c("A", "B", "C"), 1)
9 }
10
11 # Verifica si hay al menos un grupo A,B,C
12 can_form_set <- function(bolsa) {
13   all(c("A", "B", "C") %in% bolsa)
14 }
15
16 # Elimina un grupo A,B,C
17 remove_set <- function(bolsa) {
18   for (candy in c("A", "B", "C")) {
19     idx <- match(candy, bolsa)
20     if (is.na(idx)) return(bolsa)
21     bolsa <- bolsa[-idx]
22   }
}
```

```

23     return(bolsa)
24 }
25
26 # Elimina n ocurrencias de un caramelo
27 remove_n <- function(bolsa, candy, n) {
28   idx <- which(bolsa == candy)
29   if (length(idx) >= n) {
30     bolsa <- bolsa[-idx[1:n]]
31   } else if (length(idx) > 0) {
32     bolsa <- bolsa[-idx]
33   }
34   return(bolsa)
35 }
36
37 # Muestra la bolsa como texto
38 mostrar_bolsa <- function(bolsa) {
39   paste(bolsa, collapse = " ")
40 }
41
42 # --- Programa principal ---
43 juego_caramelos <- function(n_jugadores = 3, max_iter = 1000000) {
44   if (n_jugadores < 3) {
45     cat("Debe haber al menos 3 jugadores\n")
46     return()
47   }
48
49   set.seed(as.integer(Sys.time()))
50   bolsa <- replicate(n_jugadores * 2, random_candy())
51   D <- 0
52   iter <- 0
53
54   cat("\n--- Estado inicial ---\n")
55   cat("Bolsa:", mostrar_bolsa(bolsa), "\n")
56
57   while (iter < max_iter && D < n_jugadores) {
58     iter <- iter + 1
59     cambio <- FALSE
60
61     a <- sum(bolsa == "A")
62     b <- sum(bolsa == "B")
63     c <- sum(bolsa == "C")
64
65     # Regla de 6 caramelos -> 2D + 1 extra
66     dobles <- min(floor(a/2), floor(b/2), floor(c/2))
67     while (dobles > 0) {
68       bolsa <- remove_n(bolsa, "A", 2)
69       bolsa <- remove_n(bolsa, "B", 2)
70       bolsa <- remove_n(bolsa, "C", 2)
71       D <- D + 2
72       extra <- random_candy()
73       bolsa <- c(bolsa, extra)
74       cambio <- TRUE

```

```

75      cat("Regla 6 caramelos -> +2D + extra (", extra, ")\n", sep = "")
76      cat("Total D =", D, ", Bolsa:", mostrar_bolsa(bolsa), "\n")
77
78      a <- sum(bolsa == "A")
79      b <- sum(bolsa == "B")
80      c <- sum(bolsa == "C")
81     dobles <- min(floor(a/2), floor(b/2), floor(c/2))
82  }
83
84  # Regla simple A,B,C -> 1D
85  simples <- min(a, b, c)
86  while (simples > 0) {
87      bolsa <- remove_set(bolsa)
88      D <- D + 1
89      cambio <- TRUE
90      cat("Se formo un chupetin (D). Total D =", D, "\n")
91      cat("Bolsa:", mostrar_bolsa(bolsa), "\n")
92
93      a <- sum(bolsa == "A")
94      b <- sum(bolsa == "B")
95      c <- sum(bolsa == "C")
96      simples <- min(a, b, c)
97  }
98
99  # Si no hubo cambios, devolver un D -> +3 caramelos
100 if (!cambio && D > 0) {
101     D <- D - 1
102     nuevos <- replicate(3, random_candy())
103     bolsa <- c(bolsa, nuevos)
104     cat("Se devolvio un D. Nuevos caramelos:", mostrar_bolsa(nuevos), "\n")
105     cat("Total D =", D, ", Bolsa:", mostrar_bolsa(bolsa), "\n")
106     cambio <- TRUE
107 }
108
109 # Sin movimientos posibles
110 if (!cambio && D == 0 && !can_form_set(bolsa)) {
111     cat("No hay mas movimientos posibles.\n")
112     break
113 }
114
115 # Objetivo alcanzado
116 if (D >= n_jugadores) {
117     cat("Objetivo alcanzado en", iter, "iteraciones.\n")
118     break
119 }
120 }
121
122 cat("\n--- RESULTADOS FINALES ---\n")
123 cat("Jugadores:", n_jugadores, "\n")
124 cat("Chupetines obtenidos:", D, "\n")
125 cat("Caramelos finales:", mostrar_bolsa(bolsa), "\n")
126 cat("Iteraciones:", iter, "\n")

```

```
127  
128     if (D >= n_jugadores)  
129         cat("Todos los jugadores consiguieron su chupetin.\n")  
130     else  
131         cat("No se logro el objetivo dentro del limite.\n")  
132     }  
133  
134 # Ejemplo de ejecución  
135 juego_caramelos(4)
```

```

--- Estado inicial ---
Bolsa: B A A C C A
Se formo un chupetin (D). Total D = 1
Bolsa: A C A
Se devolvio un D. Nuevos caramelos: B C B
Total D = 0 , Bolsa: A C A B C B
Regla 6 caramelos -> +2D + extra (C)
Total D = 2 , Bolsa: C
Se devolvio un D. Nuevos caramelos: C A B
Total D = 1 , Bolsa: C C A B
Se formo un chupetin (D). Total D = 2
Bolsa: C
Se devolvio un D. Nuevos caramelos: B C B
Total D = 1 , Bolsa: C B C B
Se devolvio un D. Nuevos caramelos: A B A
Total D = 0 , Bolsa: C B C B A B A
Regla 6 caramelos -> +2D + extra (A)
Total D = 2 , Bolsa: B A
Se devolvio un D. Nuevos caramelos: B B B
Total D = 1 , Bolsa: B A B B B
Se devolvio un D. Nuevos caramelos: A A C
Total D = 0 , Bolsa: B A B B B A A C
Se formo un chupetin (D). Total D = 1
Bolsa: B B B A A
Se devolvio un D. Nuevos caramelos: C B B
Total D = 0 , Bolsa: B B B A A C B B
Se formo un chupetin (D). Total D = 1
Bolsa: B B A B B
Se devolvio un D. Nuevos caramelos: C A C
Total D = 0 , Bolsa: B B A B B C A C

```

(a) Distribución inicial de los caramelos

```

Regla 6 caramelos -> +2D + extra (A)
Total D = 2 , Bolsa: B B A
Se devolvio un D. Nuevos caramelos: C C C
Total D = 1 , Bolsa: B B A C C C
Se formo un chupetin (D). Total D = 2
Bolsa: B C C
Se devolvio un D. Nuevos caramelos: B A A
Total D = 1 , Bolsa: B C C B A A
Regla 6 caramelos -> +2D + extra (A)
Total D = 3 , Bolsa: A
Objetivo alcanzado en 19 iteraciones.

--- RESULTADOS FINALES ---
Jugadores: 3
Chupetines obtenidos: 3
Caramelos finales en bolsa: A
Iteraciones: 19
Todos los jugadores consiguieron su chupetin.
> |

```

(b) Resultado del reparto

Figura 14.1: El problema de los caramelos

Conclusión

Este ejercicio demuestra cómo un sistema aleatorio con reglas definidas puede modelarse mediante un proceso iterativo en R. El número de iteraciones y el éxito del juego dependen del azar, mostrando cómo la simulación permite explorar escenarios variables sin necesidad de resolver el modelo de manera determinista.

15 Aplicación del algoritmo Demons

En el artículo Non-rigid medical image registration using image field in Demons algorithm (Lan et al., 2019) se aborda uno de los principales retos en el procesamiento de imágenes médicas: el registro preciso de imágenes deformadas. Este proceso permite alinear múltiples imágenes de un mismo paciente, obtenidas en distintas modalidades o momentos, para mejorar el diagnóstico, el seguimiento de enfermedades y la planificación de tratamientos. Aunque las transformaciones rígidas (traslación y rotación) son útiles en casos simples, la mayoría de escenarios clínicos requieren métodos no rígidos capaces de modelar deformaciones anatómicas complejas.

Entre estos, el algoritmo Demons destaca por su precisión y capacidad para manejar grandes deformaciones. Este modelo interpreta el registro como una fuerza que desplaza cada píxel de la imagen móvil hasta alinearla con la imagen de referencia. Sin embargo, las versiones clásicas dependen solo del gradiente de intensidad, sin aprovechar la información direccional de las estructuras anatómicas, lo que limita su desempeño en imágenes con texturas complejas o baja variación de intensidad.

Campo de imagen (Image Field): El campo de imagen es una representación integral que combina información de intensidad, gradiente, orientación y frecuencia. Entre estos, el campo de gradiente y el campo de orientación son los más utilizados en imágenes médicas, ya que describen la variación espacial y la dirección predominante de las estructuras anatómicas. Para una imagen digital I , el gradiente se define como:

$$\vec{I} = (dI_x, dI_y), \quad dI_x(i, j) = I(i + 1, j) - I(i, j), \quad dI_y(i, j) = I(i, j + 1) - I(i, j)$$

donde (i, j) son las coordenadas del píxel. La magnitud del gradiente indica la intensidad de cambio local, mientras que su dirección corresponde a la normal del borde. Este concepto permite modelar la variación direccional de los tejidos, lo que es esencial para un registro más realista.

Métodos Demons basados en registro no rígido: El algoritmo Demons, propuesto por Thirion, se fundamenta en el principio del flujo óptico. La imagen de referencia aplica una fuerza de desplazamiento sobre la imagen deformada para lograr la coincidencia entre ambas. En su formulación clásica, la función objetivo busca minimizar la diferencia de intensidad entre las imágenes y, simultáneamente, imponer suavidad al campo de deformación:

$$E(\vec{u}) = ||R - F \circ \vec{u}||^2 + \sigma^2 ||\vec{u}||^2$$

donde R es la imagen de referencia, F la imagen móvil, \vec{u} el incremento del campo de deformación y σ un parámetro de regularización. El desplazamiento en cada iteración se calcula como:

$$\vec{u} = \frac{\|R - F\| \vec{R}}{\|\vec{R}\|^2 + \|R - F\|^2}$$

En esta expresión, \vec{R} representa el gradiente de la imagen de referencia. Sin embargo, este modelo solo considera la información direccional de R , por lo que resulta adecuado únicamente para deformaciones pequeñas.

Para mejorar esta limitación, Wang et al. incorporaron el gradiente de la imagen móvil F y un parámetro α que ajusta la fuerza de registro:

$$\vec{u} = \frac{\|R - F\| \vec{R}}{\|\vec{R}\|^2 + \alpha^2 \|R - F\|^2} + \frac{\vec{F}}{\|\vec{F}\|^2 + \alpha^2 \|R - F\|^2}$$

Posteriormente, Tang et al. añadieron un coeficiente de balance k , que permitió adaptar la fuerza de los demonios de forma más estable:

$$\vec{u} = \frac{\|R - F\| \vec{R}}{k^2 \|\vec{R}\|^2 + \alpha^2 \|R - F\|^2} + \frac{\vec{F}}{k^2 \|\vec{F}\|^2 + \alpha^2 \|R - F\|^2}$$

Modelo propuesto basado en campo de imagen: Con el fin de mejorar la precisión del registro, los autores propusieron incorporar el campo de orientación dentro del modelo de Demons. En lugar de usar las direcciones del campo de gradiente (\vec{e}_R, \vec{e}_F), se utilizan las direcciones del campo de orientación (\vec{e}_O^R, \vec{e}_O^F), combinadas con las magnitudes de los gradientes correspondientes. Así, el modelo se redefine como:

$$\vec{u} = (R - F) \left(\frac{\vec{F}}{k^2 \vec{F}^2 + \alpha (R - F)^2} \vec{e}_O^F + \frac{\vec{R}}{k^2 \vec{R}^2 + \alpha (R - F)^2} \vec{e}_O^R \right)$$

y puede simplificarse como:

$$\vec{u} = \frac{\sin^2 F \cdot \vec{e}_O^F + \sin^2 R \cdot \vec{e}_O^R}{2k\alpha}$$

Esta formulación permite utilizar la información direccional inherente a las estructuras anatómicas, logrando una estimación más precisa de las deformaciones. El proceso iterativo consta de cinco pasos: cálculo de los campos de gradiente y orientación de R y F ; construcción del mapa de diferencia $\alpha(R - F)$; cálculo del campo de deformación \vec{u} ; aplicación del campo de deformación sobre la imagen móvil; y evaluación de la convergencia mediante una medida de similitud.

Para validar el método, se utilizaron dos conjuntos de datos: 181 pares de imágenes cerebrales por resonancia magnética y 134 pares de imágenes de retina con resolución de 2912×2912 píxeles. Las comparaciones se realizaron frente a los métodos Demons clásico, Demons mejorado por

Wang, Demons con transformación total (TD) y registro basado en B-spline. Los resultados se evaluaron mediante el Error Cuadrático Medio (MSE), la Correlación (Corre), la Información Mutua Normalizada (NMI) y el Error de Junta Media (MJE).

Los resultados mostraron que el método propuesto logró el menor MSE y los valores más altos de Corre y NMI, evidenciando una mejor alineación y preservación de estructuras anatómicas. Además, el análisis de los parámetros α y k mostró que valores intermedios ($\alpha = 1.2, k = 0.9$ para MRI y $\alpha = k = 0.6$ para retina) equilibran precisión y velocidad de convergencia. Valores muy pequeños generan errores elevados, mientras que valores excesivos provocan sobreajuste.

En conclusión, la integración del campo de imagen dentro del algoritmo Demons proporciona una mejora significativa en el registro no rígido de imágenes médicas. Este modelo aprovecha la información direccional de los tejidos para estimar deformaciones más realistas, manteniendo la coherencia estructural sin requerir segmentaciones previas. Por su estabilidad, precisión y eficiencia, el método constituye una contribución relevante al diagnóstico y análisis médico asistido por computadora.

Conclusiones

 Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

 Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

 Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

 Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Bibliografía

- Adams, A. (2025). Comparing the Moore–Penrose Pseudoinverse and Gradient Descent for Solving Linear Regression Problems: A Performance Analysis [Preprint, University of Pittsburgh, May 29, 2025]. arXiv preprint, arXiv:2505.23552. <https://arxiv.org/abs/2505.23552>
- Anton, H., Bivens, I., & Davis, S. (2012). Cálculo (10.^a ed.). Wiley.
- Atkinson, K. (2009). An Introduction to Numerical Analysis (2nd). Wiley.
- Burden, R. L., & Faires, J. D. (2011). Análisis Numérico (9.^a ed.). Cengage Learning.
- Burden, R. L., Faires, J. D., & Burden, A. M. (2016). Análisis numérico (10.^a ed.). Cengage Learning.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2015). Métodos numéricos para ingenieros (7.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Cheney, W., & Kincaid, D. (2009). Numerical Mathematics and Computing (6th). Brooks/Cole.
- Lan, S., Guo, Z., & You, J. (2019). Non-rigid medical image registration using image field in Demons algorithm. *Pattern Recognition Letters*, 125, 98-104.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing (3.^a ed.). Cambridge University Press.
- Riley, K. F., Hobson, M. P., & Bence, S. J. (2006). Mathematical Methods for Physics and Engineering (3.^a ed.). Cambridge University Press.
- Stewart, J., Redlin, L., & Watson, S. (2001). Precálculo: Matemáticas para el Cálculo (5.^a ed.). Thomson.
- Stewart, J., Redlin, L., & Watson, S. (2016). Precálculo: Matemáticas para el Cálculo (7.^a ed.). Cengage Learning.
- Strang, G. (2016). Introduction to Linear Algebra (5th). Wellesley-Cambridge Press.
- Süli, E., & Mayers, D. F. (2003). An Introduction to Numerical Analysis. Cambridge University Press.
- Sullivan, F. (2004). Numerical Methods for Engineers. Prentice Hall.