

# Contenido

**Lo nuevo de la décima edición xxiii**

**Agradecimientos xxv**

**Acerca del autor xxvii**

**Marcas registradas xxix**

## **Capítulo 1 ¿Qué es la investigación de operaciones? 1**

- 1.1 Introducción 1
- 1.2 Modelos de investigación de operaciones 1
- 1.3 Solución del modelo de IO 4
- 1.4 Modelos de colas y de simulación 5
- 1.5 El arte del modelado 6
- 1.6 Más que sólo matemáticas 7
- 1.7 Fases de un estudio de IO 9
- 1.8 Acerca de este libro 11
  - Bibliografía 11
  - Problemas 12

## **Capítulo 2 Modelado con programación lineal 15**

- 2.1 Modelo de PL con dos variables 15
  - 2.2 Solución gráfica de PL 17
    - 2.2.1 Solución de un modelo de maximización 18
    - 2.2.2 Solución de un modelo de minimización 20
  - 2.3 Solución por computadora con Solver y AMPL 22
    - 2.3.1 Solución de PL con Excel Solver 22
    - 2.3.2 Solución de PL con AMPL 26
  - 2.4 Aplicaciones de programación lineal 29
    - 2.4.1 Inversión 30
    - 2.4.2 Planeación de la producción y control del inventario 32
    - 2.4.3 Planeación de la fuerza de trabajo 37
    - 2.4.4 Planeación del desarrollo urbano 40
    - 2.4.5 Mezcla y refinación 43
    - 2.4.6 Aplicaciones adicionales de PL 46
- Bibliografía 46**
- Problemas 46**

**Capítulo 3 Método simplex y análisis de sensibilidad 69**

- 3.1 Modelo de PL en forma de ecuación 69
- 3.2 Transición de la solución gráfica a la algebraica 70
- 3.3 Método simplex 73
  - 3.3.1 Naturaleza iterativa del método simplex 73
  - 3.3.2 Detalles de cálculo del algoritmo simplex 75
  - 3.3.3 Resumen del método simplex 81
- 3.4 Solución artificial inicial 82
  - 3.4.1 Método  $M$  82
  - 3.4.2 Método de las dos fases 85
- 3.5 Casos especiales en el método simplex 87
  - 3.5.1 Degeneración 88
  - 3.5.2 Óptimos alternativos 89
  - 3.5.3 Solución no acotada 91
  - 3.5.4 Solución no factible (o no existente) 92
- 3.6 Análisis de sensibilidad 93
  - 3.6.1 Análisis de sensibilidad gráfico 94
  - 3.6.2 Análisis de sensibilidad algebraica: Cambios en el lado derecho 98
  - 3.6.3 Análisis de sensibilidad algebraica: Función objetivo 102
  - 3.6.4 Análisis de sensibilidad con TORA, Solver y AMPL 106
- 3.7 Temas de cálculo en la programación lineal 108
  - Bibliografía 112
  - Estudio de caso: Optimización de la producción de válvulas cardíacas 112
  - Problemas 115

**Capítulo 4 Dualidad y análisis postóptimo 139**

- 4.1 Definición del problema dual 139
- 4.2 Relaciones primal-dual 142
  - 4.2.1 Repaso de operaciones con matrices simples 142
  - 4.2.2 Diseño de la tabla simplex 143
  - 4.2.3 Solución dual óptima 144
  - 4.2.4 Cálculos en la tabla simplex 147
- 4.3 Interpretación económica de la dualidad 148
  - 4.3.1 Interpretación económica de las variables duales 149
  - 4.3.2 Interpretación económica de las restricciones duales 150
- 4.4 Algoritmos simplex adicionales 152
  - 4.4.1 Algoritmo simplex dual 152
  - 4.4.2 Algoritmo simplex generalizado 154

- 4.5 **Análisis postóptimo 155**
  - 4.5.1 Cambios que afectan la factibilidad 156
  - 4.5.2 Cambios que afectan la optimalidad 159
- Bibliografía 162**
- Problemas 162**

## **Capítulo 5 Modelo de transporte y sus variantes 177**

- 5.1 **Definición del modelo de transporte 177**
- 5.2 **Modelos de transporte no tradicionales 181**
- 5.3 **Algoritmo de transporte 184**
  - 5.3.1 Determinación de la solución inicial 186
  - 5.3.2 Cálculos iterativos del algoritmo de transporte 190
  - 5.3.3 Explicación del método de los multiplicadores usando el método simplex 196
- 5.4 **Modelo de asignación 197**
  - 5.4.1 Método húngaro 197
  - 5.4.2 Explicación del método húngaro con simplex 200
- Bibliografía 201**
- Estudio de caso: Programación de citas en eventos comerciales de la Comisión de Turismo Australiana 202**
- Problemas 206**

## **Capítulo 6 Modelo de redes 217**

- 6.1 **Alcance y definición de modelos de redes 217**
- 6.2 **Algoritmo del árbol de expansión mínima 220**
- 6.3 **Problema de la ruta más corta 221**
  - 6.3.1 Ejemplos de aplicaciones de la ruta más corta 222
  - 6.3.2 Algoritmos de la ruta más corta 225
  - 6.3.3 Formulación de programación lineal del problema de la ruta más corta 231
- 6.4 **Modelo de flujo máximo 235**
  - 6.4.1 Enumeración de cortes 236
  - 6.4.2 Algoritmo de flujo máximo 237
  - 6.4.3 Formulación de programación lineal en el modo de flujo máximo 242
- 6.5 **CPM y PERT 243**
  - 6.5.1 Representación en red 244
  - 6.5.2 Cálculos en el método de la ruta crítica (CPM) 246
  - 6.5.3 Construcción del cronograma 249

6.5.4 Formulación de programación lineal de CPM 252

6.5.5 Redes PERT 253

**Bibliografía 255**

**Estudio de caso: Ahorro de recursos federales para viajes 256**

**Problemas 259**

## **Capítulo 7 Programación lineal avanzada 275**

**7.1 Fundamentos del método simplex 275**

7.1.1 De puntos extremos a soluciones básicas 276

7.1.2 Tabla simplex generalizada en forma matricial 279

**7.2 Método simplex revisado 281**

7.2.1 Desarrollo de las condiciones de optimalidad y factibilidad 281

7.2.2 Algoritmo simplex revisado 282

7.2.3 Aspectos computacionales en el método simplex revisado 285

**7.3 Algoritmo de variables acotadas 287**

**7.4 Dualidad 292**

7.4.1 Definición matricial del problema dual 292

7.4.2 Solución dual óptima 292

**7.5 Programación lineal paramétrica 295**

7.5.1 Cambios paramétricos en C 295

7.5.2 Cambios paramétricos en b 297

**7.6 Más temas de programación lineal 299**

**Bibliografía 300**

**Problemas 300**

## **Capítulo 8 Programación de metas 311**

**8.1 Formulación de una programación de metas 311**

**8.2 Algoritmos de programación de metas 313**

8.2.1 Método de los pesos 313

8.2.2 Método preventivo 315

**Bibliografía 320**

**Estudio de caso: Asignación de tiempo de quirófano en el Hospital Monte Siná 320**

**Problemas 324**

## **Capítulo 9 Programación lineal entera 329**

**9.1 Aplicaciones ilustrativas 329**

9.1.1 Presupuesto de capital 330

9.1.2 Problema de cobertura de conjunto 331

- 9.1.3 Problema de cargo fijo 332
- 9.1.4 Restricciones uno-u-otro y si-entonces 334
- 9.2 Algoritmos de programación entera 336**
  - 9.2.1 Algoritmo de ramificación y acotamiento (B&B) 337
  - 9.2.2 Algoritmo de plano cortante 343
- Bibliografía 348**
- Problemas 349**

## **Capítulo 10 Programación heurística 367**

- 10.1 Introducción 367**
- 10.2 Heurística codiciosa (búsqueda local) 368**
  - 10.2.1 Heurística de variable discreta 369
  - 10.2.2 Heurística de variable continua 371
- 10.3 Metaheurística 374**
  - 10.3.1 Algoritmo de búsqueda tabú 374
  - Resumen del algoritmo de búsqueda tabú 378*
  - 10.3.2 Algoritmo de recocido simulado 378
  - Resumen del algoritmo de recocido simulado 380*
  - 10.3.3 Algoritmo genético 381
  - Resumen del algoritmo genético 384*
- 10.4 Aplicación de metaheurística a programas lineales enteros 385**
  - 10.4.1 Algoritmo tabú aplicado a un PLE 386
  - 10.4.2 Algoritmo de recocido simulado aplicado a una PLE 388
  - 10.4.3 Algoritmo genético aplicado a la PLE 390
- 10.5 Introducción a la programación de restricciones (PR) 393**
  - Bibliografía 395**
  - Problemas 395**

## **Capítulo 11 Problema del agente viajero (TSP) 405**

- 11.1 Alcances del TSP 405**
- 11.2 Modelo del TSP matemático 407**
- 11.3 Algoritmos del TSP exactos 411**
  - 11.3.1 Algoritmo B&B 411
  - 11.3.2 Algoritmo del plano cortante 414
- 11.4 Heurísticas de búsqueda local 415**
  - 11.4.1 Heurística del vecino más cercano 415
  - 11.4.2 Heurística de inversión 416
- 11.5 Metaheurísticas 419**
  - 11.5.1 Algoritmo tabú aplicado al modelo del TSP 419
  - 11.5.2 Algoritmo de recocido simulado aplicado al modelo del TSP 422

11.5.3 Algoritmo genético del TSP 424

Bibliografía 428

Problemas 428

## **Capítulo 12 Programación dinámica determinística 439**

12.1 Naturaleza recursiva de los cálculos de programación dinámica (PD) 439

12.2 Recursividad de avance y de retroceso 443

12.3 Aplicaciones de PD seleccionadas 444

12.3.1 Modelo de la mochila/equipo de vuelo/carga de contenedor 445

12.3.2 Modelo de tamaño de la fuerza laboral 450

12.3.3 Modelo de reemplazo de equipo 452

12.3.4 Modelo de inversión 455

12.3.5 Modelos de inventario 458

12.4 Problema de dimensionalidad 458

Bibliografía 460

Estudio de caso: Optimización del corte de árboles y asignación de troncos en Weyerhaeuser 461

Problemas 464

## **Capítulo 13 Modelos de inventario (con introducción a las cadenas de suministro) 471**

13.1 Problema de inventario: una perspectiva de la cadena de suministro 471

13.1.1 Una métrica de inventario en las cadenas de suministro 472

13.1.2 Elementos del modelo de optimización del inventario 474

13.2 El papel de la demanda en el desarrollo de modelos de inventario 475

13.3 Modelos estáticos de la cantidad económica de pedido (EOQ) 477

13.3.1 Modelo EOQ clásico 477

13.3.2 EOQ con reducciones de precios 481

13.3.3 EOQ de varios artículos con limitación de almacenamiento 484

13.4 Modelos dinámicos de la EOQ 487

13.4.1 Modelo de EOQ sin costo de preparación 488

13.4.2 Modelo de EOQ con costo de preparación 491

13.5 Problemas pegajosos en el modelado de inventarios 500

Bibliografía 501

Estudio de caso: Kroger mejora la gestión de inventarios de farmacia 501

Problemas 505

**Capítulo 14 Repaso de probabilidad básica 513**

- 14.1 Leyes de probabilidad 513
  - 14.1.1 Ley de la adición de probabilidad 514
  - 14.1.2 Ley de probabilidad condicional 514
- 14.2 Variables aleatorias y distribuciones de probabilidad 515
- 14.3 Esperanza de una variable aleatoria 517
  - 14.3.1 Media y varianza (desviación estándar) de una variable aleatoria 517
  - 14.3.2 Variables aleatorias conjuntas 518
- 14.4 Cuatro distribuciones de probabilidad comunes 521
  - 14.4.1 Distribución binomial 521
  - 14.4.2 Distribución de Poisson 521
  - 14.4.3 Distribución exponencial negativa 522
  - 14.4.4 Distribución normal 523
- 14.5 Distribuciones empíricas 525
  - Bibliografía 530
  - Problemas 530

**Capítulo 15 Análisis de decisiones y juegos 537**

- 15.1 Toma de decisiones bajo certidumbre: proceso de jerarquía analítica (PJA) 537
- 15.2 Toma de decisiones bajo riesgo 544
  - 15.2.1 Árbol de decisiones con base en el criterio del valor esperado 544
  - 15.2.2 Variantes del criterio del valor esperado 546
- 15.3 Decisión bajo incertidumbre 551
- 15.4 Teoría de juegos 555
  - 15.4.1 Solución óptima de juegos de suma cero entre dos personas 555
  - 15.4.2 Solución de juegos con estrategias combinadas 557
- Bibliografía 562
- Estudio de caso: Límites en las reservaciones de un hotel 563
- Problemas 565

**Capítulo 16 Modelos de inventario probabilísticos 581**

- 16.1 Modelos de revisión continua 581
  - 16.1.1 Modelo EOQ "probabilizado" 581
  - 16.1.2 Modelo EOQ probabilístico 583
- 16.2 Modelos de un solo periodo 587
  - 16.2.1 Modelo sin costo de preparación (del vendedor de periódicos) 588
  - 16.2.2 Modelo con costo de preparación (política s-S) 590

- 16.3 Modelo de varios periodos múltiples 593
  - Bibliografía 595
  - Problemas 595

## **Capítulo 17 Cadenas de Markov 599**

- 17.1 Definición de una cadena de Markov 599
- 17.2 Probabilidades de transición absolutas y de  $n$  pasos 602
- 17.3 Clasificación de los estados en una cadena de Markov 603
- 17.4 Probabilidades de estado estable y tiempos de retorno promedio de cadenas ergódicas 604
- 17.5 Tiempo de primera visita 606
- 17.6 Análisis de los estados absorbentes 609
  - Bibliografía 612
  - Problemas 612

## **Capítulo 18 Sistemas de colas 623**

- 18.1 ¿Por qué estudiar las colas? 623
- 18.2 Elementos de un modelo de colas 624
- 18.3 Papel de la distribución exponencial 626
- 18.4 Modelos de nacimiento y muerte puros (relación entre las distribuciones exponencial y de Poisson) 627
  - 18.4.1 Modelo de nacimiento puro 628
  - 18.4.2 Modelo de muerte pura 631
- 18.5 Modelo de colas general de Poisson 632
- 18.6 Colas de Poisson especializadas 635
  - 18.6.1 Medidas de desempeño de estado estable 637
  - 18.6.2 Modelos de un solo servidor 640
  - 18.6.3 Modelos de varios servidores 644
  - 18.6.4 Modelo de servicio de máquinas— $(M/M/R): (GD/K/K), R < K$  650
- 18.7  $(M/G/1):(GD/\infty/\infty)$ —Fórmula de Pollaczek-Khintchine (P-K) 652
- 18.8 Otros modelos de colas 653
- 18.9 Modelos de decisión en colas 654
  - 18.9.1 Modelos de costos 654
  - 18.9.2 Modelo del nivel de aspiración 656
- Bibliografía 658

Estudio de caso: Análisis de un sistema de transporte interno en una planta de manufactura 658

Problemas 660

## **Capítulo 19 Modelado de simulación 681**

19.1 Simulación de Montecarlo 681

19.2 Tipos de simulación 685

19.3 Elementos de la simulación de evento discreto 685

19.3.1 Definición genérica de los eventos 685

19.3.2 Muestreo a partir de distribuciones de probabilidad 686

19.4 Generación de números aleatorios 690

19.5 Mecánica de la simulación discreta 692

19.5.1 Simulación manual de un modelo de un solo servidor 692

19.5.2 Simulación basada en hoja de cálculo del modelo de un solo servidor 696

19.6 Métodos para reunir observaciones estadísticas 698

19.6.1 Método de subintervalos 699

19.6.2 Método de réplica 700

19.7 Lenguajes de simulación 701

Bibliografía 703

Problemas 703

## **Capítulo 20 Teoría de optimización clásica 711**

20.1 Problemas no restringidos 711

20.1.1 Condiciones necesarias y suficientes 712

20.1.2 Método de Newton-Raphson 714

20.2 Problemas restringidos 716

20.2.1 Restricciones de igualdad 717

20.2.2 Restricciones de desigualdad: Condiciones de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 724

Bibliografía 728

Problemas 728

## **Capítulo 21 Algoritmos de programación no lineal 733**

21.1 Algoritmos no restringidos 733

21.1.1 Método de búsqueda directa 733

21.1.2 Método del gradiente 736

21.2 Algoritmos restringidos 739

21.2.1 Programación separable 740

21.2.2 Programación cuadrática 747

21.2.3 Programación estocástica	751
21.2.4 Método de combinaciones lineales	755
21.2.5 Algoritmo SUMT	757
Bibliografía	758
Problemas	758

**Apéndice A Tablas estadísticas 763**

**Apéndice B Respuestas parciales a problemas seleccionados 767**

**Índice 803**