

**Prólogo xii**

**Acerca del autor xvi**

---

## **1 Introducción a la construcción de modelos 1**

- 1.1** Introducción a los modelos 1
- 1.2** El proceso de construcción de modelos de los siete pasos 5
- 1.3** CITGO Petroleum 6
- 1.4** Horarios del Departamento de Policía de San Francisco 7
- 1.5** GE Capital 9

---

## **2 Álgebra lineal básica 11**

- 2.1** Matrices y vectores 11
- 2.2** Matrices y sistemas de ecuaciones lineales 20
- 2.3** Solución de sistemas de ecuaciones lineales mediante el método de Gauss-Jordan 22
- 2.4** Independencia y dependencia lineales 32
- 2.5** Inversa de una matriz 36
- 2.6** Determinantes 42

---

## **3 Introducción a la programación lineal 49**

- 3.1** ¿Qué es un problema de programación lineal? 49
- 3.2** Solución gráfica de los problemas de programación lineal de dos variables 56
- 3.3** Casos especiales 63

- 3.4** Un problema de dieta 68
- 3.5** Un problema de horarios de trabajo 72
- 3.6** Un problema de presupuesto de gastos de capital 76
- 3.7** Planificación financiera a corto plazo 82
- 3.8** Problemas de mezcla 85
- 3.9** Modelos del proceso de producción 95
- 3.10** Solución de problemas de decisión de periodos múltiples mediante programación lineal: un modelo de inventario 100
- 3.11** Modelos financieros para periodos múltiples 105
- 3.12** Programación del trabajo en varios periodos 109

---

## **4 Algoritmo simplex y la programación por objetivos 127**

- 4.1** Cómo convertir un PL en una forma estándar 127
- 4.2** Preliminares del algoritmo simplex 130
- 4.3** Dirección de no acotamiento 134
- 4.4** ¿Por qué un PL tiene una sfb óptima? 136
- 4.5** Algoritmo simplex 140
- 4.6** Solución de problemas de minimización mediante el algoritmo simplex 149
- 4.7** Soluciones óptimas alternas 152
- 4.8** PL no acotados 154
- 4.9** El paquete para computadora LINDO 158
- 4.10** Generadores de matrices, LINGO y escala de PL 163
- 4.11** Degeneración y la convergencia del algoritmo simplex 168
- 4.12** Método de la gran M 172

- 4.13 Método simplex de dos fases 178
- 4.14 Variables sin restricción de signo 184
- 4.15 Método de Karmarkar para resolver PL 190
- 4.16 Toma de decisiones con varios atributos en ausencia de incertidumbre: programación por objetivos 191
- 4.17 Uso de Solver de Excel para solucionar PL 202

---

## 5 Análisis de sensibilidad: un enfoque aplicado 227

- 5.1 Introducción gráfica al análisis de sensibilidad 227
- 5.2 La computadora y el análisis de sensibilidad 232
- 5.3 Aplicación administrativa de los precios sombra 246
- 5.4 ¿Qué sucede con el valor óptimo de  $z$  si la base actual ya no es óptima? 248

---

## 6 Análisis de sensibilidad y dualidad 262

- 6.1 Introducción gráfica al análisis de sensibilidad 262
- 6.2 Algunas fórmulas importantes 267
- 6.3 Análisis de sensibilidad 275
- 6.4 Análisis de sensibilidad cuando cambia más de un parámetro: regla del 100% 289
- 6.5 Determinación del dual de un PL 295
- 6.6 Interpretación económica del problema dual 302
- 6.7 Teorema del dual y sus consecuencias 304
- 6.8 Precios sombra 313
- 6.9 Dualidad y análisis de sensibilidad 323
- 6.10 Holgura complementaria 325
- 6.11 Método simple para el dual 329
- 6.12 Análisis de ponderación de datos 335

---

## 7 Problemas de transporte, asignación y transbordo 360

- 7.1 Cómo formular problemas de transporte 360
- 7.2 Cómo hallar las soluciones básicas factibles para problemas de transporte 373
- 7.3 Método de simplex de transporte 382
- 7.4 Análisis de sensibilidad para problemas de transporte 390
- 7.5 Problemas de asignación 393
- 7.6 Problemas de transbordo 400

---

## 8 Modelos de red 413

- 8.1 Definiciones básicas 413
- 8.2 Problemas de trayectoria más corta 414
- 8.3 Problemas de flujo máximo 419
- 8.4 CPM y PERT 431
- 8.5 Red de costo mínimo para problemas de flujo 450
- 8.6 Problemas de árbol de expansión mínima 456
- 8.7 Método simplex para redes 459

---

## 9 Programación entera 475

- 9.1 Introducción a la programación entera 475
- 9.2 Planteamiento de problemas de programación entera 477
- 9.3 Método de ramificación y acotamiento para resolver problemas de programación pura con enteros 512
- 9.4 Método de ramificación y acotamiento para resolver problemas de programación mezclados con enteros (Programación mixta) 523
- 9.5 Resolución de problemas de la mochila por el método de ramificación y acotamiento 524
- 9.6 Solución de problemas de optimización combinatoria mediante el método de ramificación y acotamiento 527
- 9.7 Enumeración implícita 540
- 9.8 El algoritmo del plano de corte 545

---

## **10 Temas avanzados de programación lineal 562**

- 10.1** Algoritmo del método simplex revisado 562
- 10.2** La forma producto de la inversa 567
- 10.3** Uso de la generación de columnas para resolver PLs de gran escala 570
- 10.4** Algoritmo de descomposición de Dantzig-Wolfe 576
- 10.5** Método simplex para variables acotadas superiormente 593
- 10.6** Método de Karmarkar para resolver PLs 597

---

## **11 Programación no lineal 610**

- 11.1** Repaso de cálculo diferencial 610
- 11.2** Conceptos preliminares 616
- 11.3** Funciones convexas cóncavas 630
- 11.4** Solución de PNL con una variable 637
- 11.5** Búsqueda de la sección áurea 649
- 11.6** Maximización y minimización no restringidas con varias variables 655
- 11.7** Método de ascenso escalonado 660
- 11.8** Multiplicadores de Lagrange 663
- 11.9** Condiciones de Kuhn-Tucker 670
- 11.10** Programación cuadrática 680
- 11.11** Programación separable 688
- 11.12** Método de las direcciones factibles 693
- 11.13** Optimalidad de Pareto y curvas de transacción 695

---

## **12 Repaso de cálculo y probabilidad 707**

- 12.1** Repaso de cálculo integral 707
- 12.2** Diferenciación de integrales 710
- 12.3** Reglas básicas de probabilidad 710
- 12.4** Regla de Bayes 713
- 12.5** Variables aleatorias, media, varianza y covarianza 715
- 12.6** Distribución normal 722
- 12.7** Transformadas  $z$  730

---

## **13 Toma de decisiones bajo incertidumbre 737**

- 13.1** Criterios de decisión 737
- 13.2** Teoría de la utilidad 741
- 13.3** Fallas en la maximización esperada de la utilidad: teoría prospectiva y efectos de encuadre 755
- 13.4** Árboles de decisión 758
- 13.5** Regla de Bayes y árboles de decisión 767
- 13.6** Toma de decisiones con objetivos múltiples 773
- 13.7** Proceso de jerarquía analítica 785

---

## **14 Teoría de juegos 803**

- 14.1** Juegos de suma cero y de suma constante para dos personas: Puntos silla 803
- 14.2** Juegos de suma cero para dos personas: estrategias aleatorias, dominación y solución gráfica 807
- 14.3** Programación lineal y juegos de suma cero 816
- 14.4** Juegos de suma no constante para dos personas 827
- 14.5** Introducción a la teoría de juegos para  $n$  personas 832
- 14.6** Núcleo de un juego para  $n$  personas 834
- 14.7** El valor de Shapley 837

---

## **15 Modelos determinísticos de inventario 846**

- 15.1** Introducción a los modelos de inventario básicos 846
- 15.2** Modelo básico de lote económico de pedido 848
- 15.3** Cálculo de la cantidad óptima de pedido cuando se permiten descuentos de cantidad 859
- 15.4** Modelo EOQ de tasa continua 865
- 15.5** Modelo EOQ en el que se permiten pedidos atrasados 868
- 15.6** Cuándo usar modelos EOQ 872
- 15.7** Modelos EOQ de producto múltiple 873

---

## 16 Modelos probabilísticos de inventarios 880

- 16.1 Modelos de decisión única 880
- 16.2 Concepto de análisis marginal 880
- 16.3 El problema del vendedor de periódicos: demanda discreta 881
- 16.4 Problema del vendedor de periódicos: demanda continua 886
- 16.5 Otros modelos de periodo único 888
- 16.6 La EOQ con demanda incierta: modelos  $(r, q)$  y  $(s, S)$  890
- 16.7 La EOQ con demanda incierta: método del nivel de servicio para determinar el nivel de existencias de seguridad 898
- 16.8 Estrategia de revisión periódica  $(R, S)$  907
- 16.9 Sistema de clasificación de inventario ABC 911
- 16.10 Curvas de cambio 913

---

## 17 Cadenas de Markov 923

- 17.1 ¿Qué es un proceso estocástico? 923
- 17.2 ¿Qué es una cadena de Markov? 924
- 17.3 Probabilidades de transición en la  $n$ -ésima etapa 928
- 17.4 Clasificación de los estados en una cadena de Markov 931
- 17.5 Probabilidades de estado estable y tiempos promedio de primer paso 934
- 17.6 Cadenas absorbentes 942
- 17.7 Modelos para planificar la fuerza de trabajo 950

---

## 18 Programación dinámica determinista 961

- 18.1 Dos acertijos 961
- 18.2 Un problema de redes 962
- 18.3 Un problema de inventario 969
- 18.4 Problemas de asignación de recursos 974
- 18.5 Problemas de reemplazo de equipo 985
- 18.6 Planteamiento de recursiones en programación dinámica 989
- 18.7 Algoritmo de Wagner-Whitin y el planteamiento heurístico de Silver-Meal 1001

- 18.8 Resolución de problemas de programación dinámica mediante Excel 1006

---

## 19 Programación dinámica probabilística 1016

- 19.1 Cuando los costos de la etapa actual son inciertos, pero es seguro el estado del siguiente periodo 1016
- 19.2 Modelo de inventario probabilístico 1019
- 19.3 Cómo maximizar la probabilidad de que ocurra un suceso favorable 1023
- 19.4 Más ejemplos de formulaciones de programación dinámica probabilística 1029
- 19.5 Proceso de decisión de Markov 1036

---

## 20 Teoría de líneas de espera (también teoría de colas) 1051

- 20.1 Terminología para las líneas de espera 1051
- 20.2 Modelado de procesos de llegada y servicio 1053
- 20.3 Procesos de nacimiento y muerte 1053
- 20.4 Sistema de líneas de espera  $M/M/1/GD/\infty/\infty$  y la fórmula de colas  $L = \lambda W$  1072
- 20.5 Sistema de colas  $M/M/1/GD/c/\infty$  1083
- 20.6 Sistema de colas  $M/M/s/GD/\infty/\infty$  1087
- 20.7 Modelos  $M/G/\infty/GD/\infty/\infty$  y  $GI/G/\infty/GD/\infty/\infty$  1095
- 20.8 Sistema de líneas de espera  $M/G/1/GD/\infty/\infty$  1097
- 20.9 Modelos de origen finito: modelo de reparación de máquinas 1099
- 20.10 Líneas de espera exponenciales en serie y redes abiertas de líneas de espera 1104
- 20.11 Sistema  $M/G/s/GD/s/\infty$  (eliminación de clientes rechazados) 1112
- 20.12 Cómo saber si los tiempos entre llegadas y los tiempos de servicio son exponenciales 1115
- 20.13 Redes cerradas de líneas de espera 1119

- 20.14 Una aproximación para el sistema de líneas de espera  $G/G/m$  1124
- 20.15 Modelos de líneas de espera con preferencias 1126
- 20.16 Comportamiento momentáneo de los sistemas de líneas de espera 1131

---

## 21 Simulación 1145

- 21.1 Terminología básica 1146
- 21.2 Ejemplo de una simulación de eventos discretos 1147
- 21.3 Números aleatorios y simulación de Monte Carlo 1153
- 21.4 Ejemplo de una simulación de Monte Carlo 1158
- 21.5 Simulaciones con variables aleatorias continuas 1162
- 21.6 Ejemplo de simulación estocástica 1173
- 21.7 Análisis estadístico en simulaciones 1180
- 21.8 Lenguajes de simulación 1183
- 21.9 Proceso de simulación 1184

---

## 22 Simulación con Process Model 1191

- 22.1 Simulación de un sistema de colas  $M/M/1$  1191
- 22.2 Simulación de un sistema  $M/M/2$  1195
- 22.3 Simulación de un sistema en serie 1199
- 22.4 Simulación de redes de colas abiertas 1203
- 22.5 Simulación de tiempos de servicio de Erlang 1206
- 22.6 ¿Qué otra cosa puede hacer Process Model? 1210

---

## 23 Simulación con el programa de ayuda de Excel @Risk 1212

- 23.1 Introducción a @Risk: el problema del vendedor de periódicos 1212
- 23.2 Modelado de flujos de efectivo de un producto nuevo 1222
- 23.3 Modelos de programación de proyecto 1232

- 23.4 Confiabilidad y modelado de garantía 1238
- 23.5 Función RISKGENERAL 1244
- 23.6 Variable aleatoria RISKCUMULATIVE 1247
- 23.7 Variable aleatoria RISKTRIGEN 1249
- 23.8 Creación de una distribución basada en un pronóstico puntual 1250
- 23.9 Pronóstico del ingreso de una gran corporación 1252
- 23.10 Uso de datos para obtener entradas para simulaciones de un producto nuevo 1256
- 23.11 Simulación y licitación 1267
- 23.12 Juego de dados con @Risk 1269
- 23.13 Simulación de las finales de la NBA 1271

---

## 24 Modelos para pronóstico 1275

- 24.1 Métodos de pronóstico con promedio móvil 1275
- 24.2 Suavizamiento exponencial simple 1281
- 24.3 Método de Holt: suavizamiento exponencial con tendencia 1283
- 24.4 Método de Winter: suavizamiento exponencial con estacionalidad 1286
- 24.5 Pronósticos *ad hoc* 1292
- 24.6 Regresión lineal simple 1302
- 24.7 Ajuste de relaciones no lineales 1312
- 24.8 Regresión múltiple 1318

---

## Apéndice 1: Hoja de resumen de @Risk 1336

---

## Apéndice 2: Casos 1350

- Caso 1 ¡Me estoy haciendo viejo! 1351
- Caso 2 Energía solar para su casa 1351
- Caso 3 Golf Sport: operaciones administrativas 1352
- Caso 4 Vision Corporation: producción, planificación y envío 1355
- Caso 5 Control de material en una oficina general de correos 1356

- Caso 6** Selección de programas de capacitación corporativos 1359
- Caso 7** BestChip: estrategia de expansión 1362
- Caso 8** Localización de vehículos para casos de urgencia en Springfield 1364
- Caso 9** System Design: administración del proyecto 1365
- Caso 10** Diseño modular para la compañía Help-You 1366
- Caso 11** Brite Power: Capacidad de expansión 1368

---

## **Apéndice 3: Respuestas a los problemas seleccionados 1370**

**Índice 1402**