



INVESTIGACIÓN de OPERACIONES

7ª edición



HAMDY A. TAHA

Contenido abreviado

Prefacio xv

Acerca del autor xvii

Capítulo 1 ¿Qué es la investigación de operaciones? 1

Capítulo 2 Introducción a la programación lineal 11

Capítulo 3 El método simplex 71

Capítulo 4 Análisis de dualidad y sensibilidad 115

Capítulo 5 Modelo de transporte y sus variantes 165

Capítulo 6 Modelos de redes 213

Capítulo 7 Programación lineal avanzada 289

Capítulo 8 Programación de metas 347

Capítulo 9 Programación lineal entera 361

Capítulo 10 Programación dinámica determinística 401

Capítulo 11 Modelos determinísticos de inventarios 429

Capítulo 12 Repaso de probabilidad básica 463

Capítulo 13 Modelos de pronósticos 491

Capítulo 14 Análisis de decisiones y juegos 503

Capítulo 15 Programación dinámica probabilística 547

Capítulo 16 Modelos probabilísticos de inventario 559

Capítulo 17 Sistemas de colas 579

Capítulo 18 Modelado de simulación 639

Capítulo 19 Proceso de decisión markoviana 675

Capítulo 20 Teoría clásica de la optimización 701

Capítulo 21 Algoritmos de programación no lineal 731

Apéndice A Repaso de vectores y matrices 765

Apéndice B Introducción a TORA 779

Apéndice C Tablas estadísticas 785

Apéndice D Respuestas parciales de problemas seleccionados 789

Índice 825

Contenido

Prefacio xv

Acerca del autor xvii

Capítulo 1 ¿Qué es la investigación de operaciones? 1

- 1.1 Modelos de investigación de operaciones 1
- 1.2 Solución del modelo de investigación de operaciones 4
- 1.3 Modelos de colas y simulación 5
- 1.4 El arte del modelado 5
- 1.5 Más que sólo matemáticas 6
- 1.6 Fases de un estudio de investigación de operaciones 8
- 1.7 Acerca de este libro 9

Capítulo 2 Introducción a la programación lineal 11

- 2.1 Modelo de programación lineal con dos variables 11
- 2.2 Solución gráfica de la programación lineal 14
 - 2.2.1 Solución de un modelo de maximización 15
 - 2.2.2 Solución de un modelo de minimización 18
 - 2.2.3 Solución gráfica con TORA 20
- 2.3 Análisis gráfico de sensibilidad 23
 - 2.3.1 Cambios en los coeficientes de la función objetivo 24
 - 2.3.2 Cambio en disponibilidad de recursos 27
 - 2.3.3 Valor por unidad de un recurso 28
- 2.4 Soluciones de problemas de programación lineal en computadora 33
 - 2.4.1 Solución de programación lineal con TORA 33
 - 2.4.2 Solución de programación lineal con Solver de Excel 36
 - 2.4.3 Solución de programación lineal con LINGO y AMPL 38
- 2.5 Análisis de modelos seleccionados de programación lineal 47
 - Referencias seleccionadas 66
 - Problemas integrales 67

Capítulo 3 El método simplex 71

- 3.1 Espacio de soluciones en forma de ecuación 71
 - 3.1.1 Conversión de desigualdades a ecuaciones 71
 - 3.1.2 Manejo de variables no restringidas 73
- 3.2 Transición de solución gráfica a solución algebraica 75
- 3.3 El método simplex 80
 - 3.3.1 Naturaleza iterativa del método simplex 80
 - 3.3.2 Detalles de cálculo del algoritmo simplex 83
 - 3.3.3 Iteraciones simplex con TORA 92

- 3.4 Solución artificial de inicio 94
 - 3.4.1 Método M 94
 - 3.4.2 Método de dos fases 98
- 3.5 Casos especiales de aplicación del método simplex 103
 - 3.5.1 Degeneración 103
 - 3.5.2 Óptimos alternativos 106
 - 3.5.3 Solución no acotada 109
 - 3.5.4 Solución no factible 110
- Referencias seleccionadas 112
- Problemas integrales 112

Capítulo 4 Análisis de dualidad y sensibilidad 115

- 4.1 Definición del problema dual 115
- 4.2 Relaciones primal-dual 120
 - 4.2.1 Repaso de operaciones matriciales sencillas 120
 - 4.2.2 Planteamiento de la tabla simplex 122
 - 4.2.3 Solución dual óptima 122
 - 4.2.4 Cálculos con la tabla simplex 126
 - 4.2.5 Valor objetivo primal y dual 130
- 4.3 Interpretación económica de la dualidad 132
 - 4.3.1 Interpretación económica de las variables duales 132
 - 4.3.2 Interpretación económica de las restricciones duales 135
- 4.4 Otros algoritmos simplex para programación lineal 137
 - 4.4.1 Método dual simplex 137
 - 4.4.2 Algoritmo simplex generalizado 143
- 4.5 Análisis postóptimo o de sensibilidad 144
 - 4.5.1 Cambios que afectan la factibilidad 145
 - 4.5.2 Cambios que afectan la optimalidad 155
- Referencias seleccionadas 161
- Problemas integrales 162

Capítulo 5 Modelo de transporte y sus variantes 165

- 5.1 Definición del modelo de transporte 165
- 5.2 Modelos no tradicionales de transporte 172
- 5.3 El algoritmo de transporte 177
 - 5.3.1 Determinación de la solución de inicio 178
 - 5.3.2 Cálculos iterativos del algoritmo de transporte 182
 - 5.3.3 Solución del modelo de transporte con TORA 187
 - 5.3.4 Explicación del método de los multiplicadores con el método simplex 195
- 5.4 El modelo de asignación 196
 - 5.4.1 El método húngaro 197
 - 5.4.2 Explicación del método húngaro con el método simplex 202

5.5	El modelo de transbordo	203
	Referencias seleccionadas	208
	Problemas integrales	208

Capítulo 6 Modelos de redes 213

6.1	Definiciones para redes	214
6.2	Algoritmo de árbol de expansión mínima	215
6.3	Problema de la ruta más corta	220
6.3.1	Ejemplos de aplicaciones de ruta más corta	220
6.3.2	Algoritmos de ruta más corta	224
6.3.3	Formulación del problema de la ruta más corta en programación lineal	234
6.3.4	Solución del problema de la ruta más corta con hoja de cálculo Excel	237
6.4	Modelo de flujo máximo	239
6.4.1	Enumeración de cortes	240
6.4.2	Algoritmo de flujo máximo	241
6.4.3	Formulación del problema de flujo máximo con programación lineal	250
6.4.4	Solución del problema de flujo máximo con hoja de cálculo Excel	250
6.5	Problema del flujo capacitado con costo mínimo	252
6.5.1	Representación en red	252
6.5.2	Formulación con programación lineal	254
6.5.3	Algoritmo símplex de red capacitada	259
6.5.4	Solución del modelo de flujo capacitado con costo mínimo con hoja de cálculo Excel	265
6.6	Métodos CPM y PERT	266
6.6.1	Representación en red	267
6.6.2	Cálculos para la ruta crítica (CPM)	272
6.6.3	Construcción del cronograma	275
6.6.4	Formulación del método de la ruta crítica con programación lineal	281
6.6.5	Redes de PERT	283
	Referencias seleccionadas	286
	Problemas integrales	286

Capítulo 7 Programación lineal avanzada 289

7.1	Fundamentos de método símplex	289
7.1.1	Desde puntos extremos hasta soluciones básicas	290
7.1.2	Tabla símplex generalizada en forma matricial	294
7.2	Método símplex modificado	297
7.2.1	Desarrollo de las condiciones de optimalidad y factibilidad	298
7.2.2	Algoritmo símplex modificado	300
7.3	Algoritmo de variables acotadas	305

- 7.4 Algoritmo de descomposición 312
- 7.5 Dualidad 322
 - 7.5.1 Definición matricial del problema dual 322
 - 7.5.2 Solución dual óptima 322
- 7.6 Programación lineal paramétrica 326
 - 7.6.1 Cambios paramétricos en C 327
 - 7.6.2 Cambios paramétricos en b 329
- 7.7 Método del punto interior de Karmarkar 332
 - 7.7.1 Idea básica del algoritmo del punto interior 332
 - 7.7.2 Algoritmo del punto interior 334
- Referencias seleccionadas 344
- Problemas integrales 344

Capítulo 8 Programación de metas 347

- 8.1 Una formulación de programación de metas 347
- 8.2 Algoritmos de programación de metas 352
 - 8.2.1 El método de factores de ponderación 352
 - 8.2.2 El método por jerarquías 354
- Referencias seleccionadas 359
- Problemas integrales 359

Capítulo 9 Programación lineal entera 361

- 9.1 Aplicaciones ilustrativas 361
- 9.2 Algoritmos de programación entera 372
 - 9.2.1 Algoritmo de ramificación y acotamiento (B&B) 373
 - 9.2.2 Árbol de ramificación y acotamiento generado con TORA 379
 - 9.2.3 Algoritmo del plano cortante 384
 - 9.2.4 Consideraciones computacionales en programación lineal entera 389
- 9.3 Solución del problema del agente viajero 390
 - 9.3.1 Algoritmo de solución con ramificación y acotamiento 393
 - 9.3.2 Algoritmo del plano de corte 396
- Referencias seleccionadas 397
- Problemas integrales 397

Capítulo 10 Programación dinámica determinística 401

- 10.1 Naturaleza recursiva de los cálculos en programación dinámica 401
- 10.2 Recursión en avance y en reversa 404
- 10.3 Aplicaciones de programación dinámica 406
 - 10.3.1 Problema de la mochila/equipo de vuelo/carga del contenedor 407
 - 10.3.2 Modelo del tamaño de la fuerza de trabajo 415
 - 10.3.3 Modelo de reposición de equipo 418
 - 10.3.4 Modelo de inversión 421
 - 10.3.5 Modelos de inventario 425

- 10.4 Problema de dimensionalidad 425
- Referencias seleccionadas 428
- Problema integral 428

Capítulo 11 Modelos determinísticos de inventarios 429

- 11.1 Modelo general de inventario 429
- 11.2 Modelos estáticos de cantidad económica de pedido (CEP, o EOQ) 430
 - 11.2.1 Modelo clásico de cantidad económica de pedido 430
 - 11.2.2 Cantidad económica de pedido con discontinuidades de precio 435
 - 11.2.3 Cantidad económica de pedido de varios artículos con limitación de almacén 439
- 11.3 Modelos dinámicos de cantidad económica de pedido 443
 - 11.3.1 Modelo sin costo de preparación 444
 - 11.3.2 Modelo con preparación 448
- Referencias seleccionadas 460
- Problemas integrales 460

Capítulo 12 Repaso de probabilidad básica 463

- 12.1 Leyes de la probabilidad 463
 - 12.1.1 Ley aditiva de las probabilidades 464
 - 12.1.2 Ley de la probabilidad condicional 465
- 12.2 Variables aleatorias y distribuciones de probabilidades 467
- 12.3 Expectativa de una variable aleatoria 469
 - 12.3.1 Media y varianza de una variable aleatoria 470
 - 12.3.2 Media y varianza de variables aleatorias conjuntas 471
- 12.4 Cuatro distribuciones comunes de probabilidades 474
 - 12.4.1 Distribución binomial 474
 - 12.4.2 Distribución de Poisson 476
 - 12.4.3 Distribución exponencial negativa 477
 - 12.4.4 Distribución normal 478
- 12.5 Distribuciones empíricas 480
- Referencias seleccionadas 489

Capítulo 13 Modelos de pronóstico 491

- 13.1 Técnica del promedio móvil 491
- 13.2 Suavización exponencial 495
- 13.3 Regresión 497
- Referencias seleccionadas 501
- Problema integral 502

Capítulo 14 Análisis de decisiones y juegos 503

- 14.1 Toma de decisiones bajo certidumbre: proceso de jerarquía analítica (AHP) 503

- 14.2 Toma de decisiones bajo riesgo 513
 - 14.2.1 Criterio del valor esperado 514
 - 14.2.2 Variaciones del criterio del valor esperado 519
- 14.3 Decisión bajo incertidumbre 527
- 14.4 Teoría de juegos 532
 - 14.4.1 Solución óptima de juegos de dos personas con suma cero 532
 - 14.4.2 Solución de juegos con estrategia mixta 536
- Referencias seleccionadas 543
- Problemas integrales 543

Capítulo 15 Programación dinámica probabilística 547

- 15.1 Un juego aleatorio 547
- 15.2 Problema de inversión 550
- 15.3 Maximización del evento de lograr una meta 554
 - Referencias seleccionadas 558
 - Problema integral 558

Capítulo 16 Modelos probabilísticos de inventario 559

- 16.1 Modelos de revisión continua 559
 - 16.1.1 Modelo "probabilizado" de cantidad económica de pedido 559
 - 16.1.2 Modelo probabilista de cantidad económica de pedido 562
- 16.2 Modelos de un periodo 567
 - 16.2.1 Modelo sin preparación 567
 - 16.2.2 Modelo con preparación (política s-S) 571
- 16.3 Modelos de varios periodos 573
 - Referencias seleccionadas 576
 - Problemas integrales 576

Capítulo 17 Sistemas de colas 579

- 17.1 ¿Por qué estudiar sistemas de colas? 579
- 17.2 Elementos de un modelo de cola 581
- 17.3 Papel de la distribución exponencial 582
- 17.4 Modelos con nacimientos y muertes puras (relación entre las distribuciones exponencial y de Poisson) 585
 - 17.4.1 Modelo de nacimientos puros 586
 - 17.4.2 Modelo de muertes puras 590
- 17.5 Modelo generalizado de cola de Poisson 593
- 17.6 Colas especializadas de Poisson 597
 - 17.6.1 Medidas de desempeño en estado estacionario 599
 - 17.6.2 Modelos con un servidor 602
 - 17.6.3 Modelos con varios servidores 611
 - 17.6.4 Modelo de servicio a máquinas— $(M/M/R) : (DG/K/K), R \leq K$ 621
- 17.7 $(M/G/1) : (DG/\infty/\infty)$ —Fórmula de Pollaczek-Khintchine (P-K) 624

- 17.8 Otros modelos de cola 627
- 17.9 Modelos de decisión con colas 627
 - 17.9.1 Modelos de costo 627
 - 17.9.2 Modelo de nivel de aspiración 632
- Referencias seleccionadas 634
- Problemas integrales 634

Capítulo 18 Modelado de simulación 639

- 18.1 Simulación Monte Carlo 639
- 18.2 Tipos de simulación 644
- 18.3 Elementos de simulación de evento discreto 645
 - 18.3.1 Definición genérica de eventos 645
 - 18.3.2 Muestreo a partir de distribuciones de probabilidades 647
- 18.4 Generación de números aleatorios 656
- 18.5 Mecánica de la simulación discreta 657
 - 18.5.1 Simulación manual de un modelo con un servidor 657
 - 18.5.2 Simulación del modelo con un servidor basado en hoja de cálculo 663
- 18.6 Métodos para reunir observaciones estadísticas 666
 - 18.6.1 Método del subintervalo 667
 - 18.6.2 Método de réplica 669
 - 18.6.3 Método regenerativo (ciclo) 669
- 18.7 Lenguajes de simulación 672
- Referencias seleccionadas 674

Capítulo 19 Proceso de decisión markoviana 675

- 19.1 Alcance del problema de decisión markoviana: el problema del jardinero 675
- 19.2 Modelo de programación dinámica con etapas finitas 677
- 19.3 Modelo con etapas infinitas 681
 - 19.3.1 Método de enumeración exhaustiva 681
 - 19.3.2 Método de iteración de política sin descuento 684
 - 19.3.3 Método de iteración de política con descuento 687
- 19.4 Solución con programación lineal 690
- 19.5 Apéndice: repaso de las cadenas de Markov 693
 - 19.5.1 Procesos de Markov 694
 - 19.5.2 Cadenas de Markov 694
- Referencias seleccionadas 700

Capítulo 20 Teoría clásica de la optimización 701

- 20.1 Problemas sin restricción 701
 - 20.1.1 Condiciones necesarias y suficientes 702
 - 20.1.2 El método de Newton-Raphson 706
- 20.2 Problemas con restricciones 708
 - 20.2.1 Restricciones de igualdad 708
 - 20.2.2 Restricciones de desigualdad 723
- Referencias seleccionadas 730

Capítulo 21 Algoritmos de programación no lineal 731

- 21.1 Algoritmos sin restricción 731**
 - 21.1.1 Método de búsqueda directa 731
 - 21.1.2 Método del gradiente 735
- 21.2 Algoritmos con restricción 738**
 - 21.2.1 Programación separable 739
 - 21.2.2 Programación cuadrática 747
 - 21.2.3 Programación geométrica 752
 - 21.2.4 Programación estocástica 757
 - 21.2.5 Método de combinaciones lineales 761
 - 21.2.6 Algoritmo SUMT 763
 - Referencias seleccionadas 764

Apéndice A Repaso de vectores y matrices 765

- A.1 Vectores 765**
 - A.1.1 Definición de un vector 765
 - A.1.2 Suma (resta) de vectores 765
 - A.1.3 Multiplicación de vectores por escalares 766
 - A.1.4 Vectores linealmente independientes 766
- A.2 Matrices 766**
 - A.2.1 Definición de una matriz 766
 - A.2.2 Tipos de matrices 766
 - A.2.3 Operaciones aritméticas de matrices 767
 - A.2.4 Determinante de una matriz cuadrada 768
 - A.2.5 Matrices no singulares 770
 - A.2.6 Inversa de una matriz no singular 770
 - A.2.7 Métodos para calcular la inversa de una matriz 771
- A.3 Formas cuadráticas 775**
- A.4 Funciones convexas y cóncavas 777**
 - Referencias seleccionadas 777
 - Problemas 777

Apéndice B Introducción a TORA 779

- B.1 Menú principal 779**
- B.2 Modo y formato de ingreso de datos 780**
- B.3 Pantalla de ingreso de datos 780**
- B.4 Menú Solve/Modify 781**
- B.5 Formato de los resultados 782**
- B.6 Pantalla de resultados 782**

Apéndice C Tablas estadísticas 785

Apéndice D Respuestas parciales de problemas seleccionados 789

Índice 825