

# Contenido

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>I</b> | <b>Inteligencia artificial</b>                                     | <b>1</b>  |
| <b>1</b> | <b>Introducción</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1      | ¿Qué es IA?  | 4         |
|          | Actuar como humano: el enfoque de la prueba de Turing              | 5         |
|          | Pensar como humano: el enfoque del modelo cognoscitivo             | 6         |
|          | Pensar racionalmente: el enfoque de las leyes del pensamiento      | 7         |
|          | Actuar en forma racional: el enfoque del agente racional           | 8         |
| 1.2      | Los fundamentos de la inteligencia artificial                      | 9         |
|          | Filosofía (de 428 a. C. al presente)                               | 9         |
|          | Matemáticas (aproximadamente del año 800 al presente)              | 11        |
|          | Psicología (de 1879 al presente)                                   | 13        |
|          | Ingeniería computacional (de 1940 al presente)                     | 15        |
|          | Lingüística (de 1957 al presente)                                  | 16        |
| 1.3      | Historia de la inteligencia artificial                             | 17        |
|          | Génesis de la inteligencia artificial (1943-1956)                  | 17        |
|          | Entusiasmo inicial, grandes esperanzas (1952-1969)                 | 18        |
|          | Una dosis de realidad (1966-1974)                                  | 21        |
|          | Sistemas basados en el conocimiento: ¿clave del poder? (1969-1979) | 23        |
|          | IA se convierte en una industria (1980-1988)                       | 25        |
|          | Regreso de las redes neuronales (de 1986 al presente)              | 26        |
|          | Acontecimientos recientes (de 1987 al presente)                    | 26        |
| 1.4      | El estado del arte. Los últimos avances                            | 28        |
| 1.5      | Resumen  | 29        |
|          | Notas bibliográficas e históricas                                  | 29        |
|          | Ejercicios   | 30        |
| <b>2</b> | <b>Agentes inteligentes</b>  | <b>33</b> |
| 2.1      | Introducción   | 33        |
| 2.2      | Cómo debe proceder un agente                                       | 33        |
|          | Mapeo ideal de las secuencias de percepciones para acciones        | 36        |
|          | Autonomía  | 37        |
| 2.3      | Estructura de los agentes inteligentes                             | 38        |
|          | Programas de agentes   | 40        |
|          | ¿No sería más sencillo limitarse a buscar las respuestas?          | 40        |
|          | Un ejemplo   | 41        |
|          | Agentes de reflejo simple  | 42        |
|          | Agentes bien informados de todo lo que pasa                        | 44        |
|          | Agentes basados en metas   | 45        |
|          | Agentes basados en utilidad  | 47        |
| 2.4      | Ambientes  | 47        |
|          | Propiedades de los ambientes                                       | 48        |
|          | Programas de ambientes   | 50        |
| 2.5      | Resumen  | 51        |

|  |           |
|--|-----------|
| Notas bibliográficas e históricas . . . . .  | 52        |
| Ejercicios . . . . .   | 53        |
| <b>II Procedimientos para la solución de problemas</b>                               | <b>57</b> |
| <b>3 Solución de problemas mediante la búsqueda</b>                                  | <b>59</b> |
| 3.1 Agentes que resuelven problemas . . . . .  | 60        |
| 3.2 Formulación de problemas . . . . .   | 62        |
| Conocimiento y tipos de problemas . . . . .  | 62        |
| Problemas bien definidos y soluciones . . . . .                                      | 64        |
| Cómo medir la eficiencia para resolver problemas . . . . .                           | 65        |
| Cómo escoger estados y acciones . . . . .  | 66        |
| 3.3 Problemas de ejemplo . . . . .   | 67        |
| Problemas de juego . . . . .   | 68        |
| Problemas reales . . . . .   | 74        |
| 3.4 Búsqueda de soluciones . . . . .   | 75        |
| Generación de secuencias de acciones . . . . .                                       | 76        |
| Estrategias de datos para los árboles de búsqueda . . . . .                          | 77        |
| 3.5 Estrategias de búsqueda . . . . .  | 78        |
| Búsqueda preferente por amplitud . . . . .   | 79        |
| Búsqueda de costo uniforme . . . . .   | 81        |
| Búsqueda preferente por profundidad . . . . .  | 82        |
| Búsqueda limitada por profundidad . . . . .  | 84        |
| Búsqueda por profundización iterativa . . . . .                                      | 84        |
| Búsqueda bidireccional . . . . .   | 86        |
| Comparación de las diversas estrategias de búsqueda . . . . .                        | 87        |
| 3.6 Cómo evitar estados repetidos . . . . .  | 88        |
| 3.7 Búsqueda mediante la satisfacción de restricciones . . . . .                     | 89        |
| 3.8 Resumen . . . . .  | 91        |
| Notas bibliográficas e históricas . . . . .  | 92        |
| Ejercicios . . . . .   | 93        |
| <b>4 Métodos de búsqueda respaldados con información</b>                             | <b>99</b> |
| 4.1 Búsqueda preferente por lo mejor . . . . .                                       | 99        |
| Reducir al mínimo el costo estimado para alcanzar una meta: búsqueda avara . . . . . | 100       |
| Reducir al mínimo el costo de ruta total: búsqueda A* . . . . .                      | 104       |
| 4.2 Funciones heurísticas . . . . .  | 108       |
| El efecto, en el desempeño de la exactitud heurística . . . . .                      | 109       |
| Cómo inventar funciones heurísticas . . . . .  | 110       |
| La heurística en problemas que satisfacen restricciones . . . . .                    | 112       |
| 4.3 Búsqueda limitada por la capacidad de la memoria . . . . .                       | 113       |
| Búsqueda A* por profundización iterativa (A*PI) . . . . .                            | 113       |
| Búsqueda A*SRM . . . . .   | 115       |
| 4.4 Algoritmos de mejoramiento iterativo . . . . .                                   | 118       |
| Búsqueda por ascenso de cima . . . . .   | 119       |
| Endurecimiento simulado . . . . .  | 120       |
| Aplicación a problemas que satisfacen restricciones . . . . .                        | 121       |
| 4.5 Resumen . . . . .  | 122       |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
|            | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                               | 123        |
|            | Ejercicios . . . . .  | 125        |
| <b>5</b>   | <b>Juegos</b>   | <b>130</b> |
| 5.1        | Introducción: los juegos como problemas de búsqueda . . . . .             | 130        |
| 5.2        | Decisiones perfectas en juegos de dos participantes . . . . .             | 131        |
| 5.3        | Decisiones imperfectas . . . . .  | 135        |
|            | Funciones de evaluación . . . . .   | 135        |
|            | Suspensión de una búsqueda . . . . .                                      | 136        |
| 5.4        | Poda alfa-beta . . . . .  | 138        |
|            | Eficiencia de la poda alfa-beta . . . . .                                 | 140        |
| 5.5        | Juegos en los que interviene un elemento aleatorio . . . . .              | 141        |
|            | Evaluación de la posición en juegos que tienen nodos aleatorios . . . . . | 142        |
|            | Complejidad del valor minimax esperado . . . . .                          | 144        |
| 5.6        | Lo último en programas de juegos . . . . .                                | 145        |
|            | Ajedrez . . . . .   | 145        |
|            | Juegos de fichas o damas . . . . .  | 147        |
|            | Othelo . . . . .  | 147        |
|            | Backgammon . . . . .  | 147        |
|            | Go . . . . .  | 148        |
| 5.7        | Comentario . . . . .  | 148        |
| 5.8        | Resumen . . . . .   | 150        |
|            | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                               | 150        |
|            | Ejercicios . . . . .  | 154        |
| <b>III</b> | <b>Conocimiento y razonamiento</b>  | <b>159</b> |
| <b>6</b>   | <b>Agentes que razonan de manera lógica</b>                               | <b>161</b> |
| 6.1        | Un agente basado en el conocimiento . . . . .                             | 162        |
| 6.2        | El ambiente del mundo de wumpus . . . . .                                 | 163        |
|            | Especificación del ambiente . . . . .                                     | 164        |
|            | Cómo actuar y razonar en el mundo de wumpus . . . . .                     | 165        |
| 6.3        | Representación, razonamiento y lógica . . . . .                           | 167        |
|            | Representación . . . . .  | 170        |
|            | Inferencia . . . . .  | 173        |
|            | Lógica . . . . .  | 175        |
| 6.4        | Lógica propositiva: un tipo de lógica muy sencillo . . . . .              | 176        |
|            | Sintaxis . . . . .  | 176        |
|            | Semántica . . . . .   | 178        |
|            | Validez e inferencia . . . . .  | 179        |
|            | Modelos . . . . .   | 180        |
|            | Reglas de inferencia en la lógica propositiva . . . . .                   | 181        |
|            | Complejidad de la inferencia propositiva . . . . .                        | 183        |
| 6.5        | Un agente para el mundo de wumpus . . . . .                               | 184        |
|            | La base de conocimientos . . . . .  | 185        |
|            | Cómo encontrar al wumpus . . . . .  | 186        |
|            | Traducción del conocimiento en las acciones . . . . .                     | 186        |
|            | Problemas relacionados con el agente propositivo . . . . .                | 187        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.6      | Resumen . . . . .   | 188        |
|          | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                                       | 189        |
|          | Ejercicios . . . . .  | 191        |
| <b>7</b> | <b>Lógica de primer orden</b>   | <b>195</b> |
| 7.1      | Sintaxis y semántica . . . . .  | 196        |
|          | Términos . . . . .  | 198        |
|          | Oraciones atómicas . . . . .  | 199        |
|          | Oraciones complejas . . . . .   | 199        |
|          | Cuantificadores . . . . .   | 200        |
|          | Igualdad . . . . .  | 204        |
| 7.2      | Extensiones y variaciones en la notación . . . . .                                | 205        |
|          | Lógica de orden superior . . . . .  | 205        |
|          | Expresiones funcionales y de predicado usando el operador ( $\lambda$ ) . . . . . | 205        |
|          | El cuantificador de unicidad ( $\exists$ ) . . . . .                              | 206        |
|          | El operador de unicidad ( $\iota$ ) . . . . .                                     | 206        |
|          | Variaciones en la notación . . . . .  | 207        |
| 7.3      | Uso de una lógica de primer orden . . . . .                                       | 207        |
|          | El dominio del parentesco . . . . .   | 208        |
|          | Axiomas, definiciones y teoremas . . . . .  | 208        |
|          | El dominio de los conjuntos . . . . .   | 209        |
|          | Notaciones especiales para conjuntos, listas y aritmética . . . . .               | 210        |
|          | Cómo formular preguntas y obtener respuestas . . . . .                            | 211        |
| 7.4      | Agentes lógicos para el mundo de wumpus . . . . .                                 | 212        |
| 7.5      | Un agente reflejo simple . . . . .  | 213        |
|          | Limitaciones de los agentes reflejos simples . . . . .                            | 213        |
| 7.6      | Cómo representar los cambios en el mundo . . . . .                                | 214        |
|          | Cálculo de situaciones . . . . .  | 215        |
|          | Cómo mantener un registro de la ubicación . . . . .                               | 217        |
| 7.7      | Cómo deducir propiedades ocultas del mundo . . . . .                              | 219        |
| 7.8      | Preferencia de una acción en vez de otra . . . . .                                | 220        |
| 7.9      | Hacia un agente basado en metas . . . . .   | 221        |
| 7.10     | Resumen . . . . .   | 222        |
|          | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                                       | 223        |
|          | Ejercicios . . . . .  | 224        |
| <b>8</b> | <b>Conformación de una base de conocimientos</b>                                  | <b>229</b> |
| 8.1      | Características de las buenas y de las malas bases de conocimiento . . . . .      | 230        |
| 8.2      | Ingeniería del conocimiento . . . . .   | 233        |
| 8.3      | El dominio de los circuitos electrónicos . . . . .                                | 235        |
|          | Decidir de qué se va a hablar . . . . .   | 235        |
|          | Escoger el vocabulario . . . . .  | 236        |
|          | Codificar reglas generales . . . . .  | 237        |
|          | Codificación del caso específico . . . . .  | 238        |
|          | Hacer consultas al procedimiento de inferencia . . . . .                          | 238        |
| 8.4      | Ontología general . . . . .   | 239        |
|          | Representación de categorías . . . . .  | 242        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
|           | Medidas . . . . .   | 244        |
|           | Objetos compuestos . . . . .                                    | 246        |
|           | Representación del cambio mediante eventos . . . . .            | 247        |
|           | Momentos, intervalos y acciones . . . . .                       | 251        |
|           | Regreso a los objetos . . . . .                                 | 253        |
|           | Sustancias y objetos . . . . .                                  | 255        |
|           | Eventos mentales y objetos mentales . . . . .                   | 257        |
|           | Conocimiento y acción . . . . .                                 | 260        |
| 8.5       | El mundo de la tienda de abarrotes . . . . .                    | 261        |
|           | Una descripción completa de la simulación de compras . . . . .  | 261        |
|           | Cómo organizar el conocimiento . . . . .                        | 262        |
|           | Planificación del menú . . . . .                                | 263        |
|           | Navegación . . . . .  | 266        |
|           | Recopilación . . . . .  | 267        |
|           | Comunicación . . . . .  | 268        |
|           | Pago . . . . .  | 268        |
| 8.6       | Resumen . . . . .   | 270        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                     | 270        |
|           | Ejercicios . . . . .  | 275        |
| <b>9</b>  | <b>La inferencia en la lógica de primer orden</b>               | <b>280</b> |
| 9.1       | Reglas de inferencia relacionadas con cuantificadores . . . . . | 280        |
| 9.2       | Ejemplo de una demostración . . . . .                           | 282        |
| 9.3       | <i>Modus ponens</i> (modo de colocar) generalizado . . . . .    | 284        |
|           | Forma canónica . . . . .  | 285        |
|           | Unificación . . . . .   | 286        |
|           | Regreso a la verificación de muestra . . . . .                  | 287        |
| 9.4       | Encadenamiento hacia adelante y hacia atrás . . . . .           | 288        |
|           | Algoritmo del encadenamiento hacia adelante . . . . .           | 288        |
|           | Algoritmo del encadenamiento hacia atrás . . . . .              | 290        |
| 9.5       | Completez . . . . .   | 292        |
| 9.6       | Resolución: un procedimiento completo de inferencia . . . . .   | 293        |
|           | La regla de inferencia de resolución . . . . .                  | 293        |
|           | Formas canónicas de la resolución . . . . .                     | 294        |
|           | Pruebas de resolución . . . . .                                 | 295        |
|           | Conversión a la forma normal . . . . .                          | 296        |
|           | Prueba de ejemplo . . . . .                                     | 298        |
|           | Cómo arreglárselas con la igualdad . . . . .                    | 300        |
|           | Estrategias de resolución . . . . .                             | 300        |
| 9.7       | Completez de una resolución . . . . .                           | 302        |
| 9.8       | Resumen . . . . .   | 306        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                     | 307        |
|           | Ejercicios . . . . .  | 310        |
| <b>10</b> | <b>Sistemas de razonamiento lógico</b>                          | <b>313</b> |
| 10.1      | Introducción . . . . .  | 313        |
| 10.2      | Indización, recuperación y unificación . . . . .                | 315        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
|           | Implantación de oraciones y términos . . . . .                     | 315        |
|           | Guardar y recoger . . . . .  | 315        |
|           | Indización basada en tablas . . . . .                              | 316        |
|           | Indización basada en árboles . . . . .                             | 317        |
|           | El algoritmo de unificación . . . . .                              | 319        |
| 10.3      | Sistemas de programación lógicos . . . . .                         | 319        |
|           | El lenguaje Prolog . . . . .                                       | 321        |
|           | Implantación . . . . .   | 322        |
|           | Compilación de programas lógicos . . . . .                         | 323        |
|           | Otros lenguajes de programación lógicos . . . . .                  | 324        |
|           | Recursos avanzados de control . . . . .                            | 325        |
| 10.4      | Demostradores de teoremas . . . . .                                | 327        |
|           | Diseño de un verificador de teoremas . . . . .                     | 327        |
|           | Ampliación de Prolog . . . . .                                     | 329        |
|           | Los verificadores de teoremas como auxiliares . . . . .            | 330        |
|           | Aplicaciones prácticas de los demostradores de teoremas . . . . .  | 330        |
| 10.5      | Sistemas de producción por encadenamiento hacia adelante . . . . . | 331        |
|           | Fase de cotejo . . . . .   | 332        |
|           | Fase de solución de conflictos . . . . .                           | 333        |
|           | Aplicaciones prácticas de los sistemas de producción . . . . .     | 333        |
| 10.6      | Sistemas de marco y redes semánticas . . . . .                     | 334        |
|           | Sintaxis y semántica de las redes semánticas . . . . .             | 335        |
|           | Herencia con excepciones . . . . .                                 | 335        |
|           | Herencia múltiple . . . . .  | 337        |
|           | Herencia y cambio . . . . .  | 338        |
|           | Implantación de redes semánticas . . . . .                         | 339        |
|           | Expresividad de las redes semánticas . . . . .                     | 340        |
| 10.7      | Lógicas para la descripción . . . . .                              | 341        |
|           | Aplicaciones prácticas de las lógicas de descripción . . . . .     | 343        |
| 10.8      | Manejo de retractaciones, suposiciones y explicaciones . . . . .   | 343        |
| 10.9      | Resumen . . . . .  | 345        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                        | 346        |
|           | Ejercicios . . . . .   | 350        |
| <b>IV</b> | <b>Cómo actuar en forma lógica</b>                                 | <b>355</b> |
| <b>11</b> | <b>Planificación</b>   | <b>357</b> |
| 11.1      | Un agente de planificación simple . . . . .                        | 357        |
| 11.2      | De la solución de problemas a la planificación . . . . .           | 358        |
| 11.3      | La planificación en el cálculo de situaciones . . . . .            | 361        |
| 11.4      | Representaciones básicas en la planificación . . . . .             | 363        |
|           | Representaciones de estados y objetivos . . . . .                  | 363        |
|           | Representaciones de acciones . . . . .                             | 364        |
|           | Espacio de situaciones y espacio de planes . . . . .               | 365        |
|           | Representaciones de planes . . . . .                               | 366        |
|           | Soluciones . . . . .   | 368        |
| 11.5      | Un ejemplo de planificación de orden parcial . . . . .             | 370        |
| 11.6      | Un algoritmo para la planificación de orden parcial . . . . .      | 375        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 11.7      | Planificación mediante operadores concretizados parcialmente . . . . .  | 377        |
| 11.8      | La ingeniería del conocimiento en la planificación . . . . .            | 379        |
|           | El mundo de los bloques . . . . .                                       | 379        |
|           | El mundo de Shakey . . . . .  | 380        |
| 11.9      | Resumen . . . . .   | 382        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                             | 383        |
|           | Ejercicios . . . . .  | 385        |
| <b>12</b> | <b>Planificación práctica</b> . . . . .                                 | <b>388</b> |
| 12.1      | Planificadores prácticos . . . . .                                      | 388        |
|           | Armado, integración y verificación de naves espaciales . . . . .        | 388        |
|           | Programación de actividades . . . . .                                   | 390        |
|           | Programación en las misiones espaciales . . . . .                       | 391        |
|           | Edificios, transportadores de aeronaves y fábricas de cerveza . . . . . | 392        |
| 12.2      | Descomposición jerárquica . . . . .                                     | 393        |
|           | Ampliación del lenguaje . . . . .                                       | 393        |
|           | Modificación del planificador . . . . .                                 | 395        |
| 12.3      | Análisis de la descomposición jerárquica . . . . .                      | 397        |
|           | Descomposición y compartición . . . . .                                 | 400        |
|           | Una comparación de la descomposición y de la aproximación . . . . .     | 401        |
| 12.4      | Descripciones de operadores más expresivas . . . . .                    | 402        |
|           | Efectos condicionales . . . . .   | 403        |
|           | Metas negadas y disyuntivas . . . . .                                   | 404        |
|           | Cuantificación universal . . . . .                                      | 405        |
|           | Un planificador para descripciones de operador expresivas . . . . .     | 406        |
| 12.5      | Restricciones de los recursos . . . . .                                 | 408        |
|           | Empleo de mediciones en la planificación . . . . .                      | 408        |
|           | Restricciones temporales . . . . .                                      | 410        |
| 12.6      | Resumen . . . . .   | 411        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                             | 412        |
|           | Ejercicios . . . . .  | 413        |
| <b>13</b> | <b>Planificación y actuación</b> . . . . .                              | <b>415</b> |
| 13.1      | Planificación condicional . . . . .                                     | 416        |
|           | La naturaleza de los planes condicionales . . . . .                     | 416        |
|           | Un algoritmo para generar planes condicionales . . . . .                | 419        |
|           | Ampliación del lenguaje del plan . . . . .                              | 423        |
| 13.2      | Un agente de replanificación simple . . . . .                           | 424        |
|           | Replanificación simple con monitoreo de ejecución . . . . .             | 425        |
| 13.3      | Planificación y ejecución totalmente integradas . . . . .               | 427        |
| 13.4      | Comentarios y extensiones . . . . .                                     | 430        |
|           | Comparación entre planificación condicional y replanificación . . . . . | 432        |
|           | Coerción y abstracción . . . . .  | 433        |
| 13.5      | Resumen . . . . .   | 434        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                             | 434        |
|           | Ejercicios . . . . .  | 435        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>V</b>  | <b>Conocimiento incierto y razonamiento</b>                                 | <b>437</b> |
| <b>14</b> | <b>Incertidumbre</b>  | <b>439</b> |
| 14.1      | Cómo actuar ante la incertidumbre . . . . .                                 | 439        |
|           | El manejo del conocimiento incierto . . . . .                               | 440        |
|           | La incertidumbre y las decisiones racionales . . . . .                      | 442        |
|           | El diseño de un agente de decisiones teóricas . . . . .                     | 443        |
| 14.2      | Notación básica en probabilidad . . . . .                                   | 443        |
|           | Probabilidad a priori . . . . .   | 444        |
|           | Probabilidad condicional . . . . .  | 445        |
| 14.3      | Los axiomas de probabilidad . . . . .                                       | 446        |
|           | Por qué son razonables los axiomas de probabilidad . . . . .                | 448        |
|           | La distribución de probabilidad conjunta . . . . .                          | 449        |
| 14.4      | La regla de Bayes y cómo se emplea . . . . .                                | 450        |
|           | Cómo aplicar la regla de Bayes: El caso más sencillo . . . . .              | 451        |
|           | Normalización . . . . .   | 452        |
|           | Uso de la regla de Bayes: Combinación de la evidencia . . . . .             | 453        |
| 14.5      | ¿Cuál es el origen de las probabilidades? . . . . .                         | 455        |
| 14.6      | Resumen . . . . .   | 456        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                                 | 457        |
|           | Ejercicios . . . . .  | 458        |
| <b>15</b> | <b>Sistemas de razonamiento probabilístico</b>                              | <b>462</b> |
| 15.1      | Representación del conocimiento en un dominio incierto . . . . .            | 662        |
| 15.2      | La semántica de las redes de creencia . . . . .                             | 465        |
|           | Representación de la distribución de probabilidad conjunta . . . . .        | 465        |
|           | Relaciones de independencia condicional en las redes de creencia . . . . .  | 471        |
| 15.3      | La inferencia en las redes de creencia . . . . .                            | 471        |
|           | La naturaleza de las inferencias probabilistas . . . . .                    | 473        |
|           | Un algoritmo para dar respuesta a consultas . . . . .                       | 474        |
| 15.4      | La inferencia en redes de creencia con múltiples conexiones . . . . .       | 478        |
|           | Métodos de agrupamiento . . . . .   | 480        |
|           | Métodos de condicionamiento por conjunto corte . . . . .                    | 481        |
|           | Métodos estocásticos de simulación . . . . .                                | 481        |
| 15.5      | La ingeniería del conocimiento en el razonamiento incierto . . . . .        | 483        |
|           | Estudio de un caso: El sistema Pathfinder (localizador de ruta) . . . . .   | 484        |
| 15.6      | Otros enfoques para el razonamiento incierto . . . . .                      | 485        |
|           | Razonamiento predefinido . . . . .  | 486        |
|           | Métodos basados en reglas que se aplican al razonamiento incierto . . . . . | 487        |
|           | Cómo representar la ignorancia: La teoría de Dempster-Shafer . . . . .      | 489        |
|           | Cómo representar la vaguedad: Conjuntos difusos y lógica difusa . . . . .   | 490        |
| 15.7      | Resumen . . . . .   | 491        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                                 | 492        |
|           | Ejercicios . . . . .  | 495        |
| <b>16</b> | <b>Toma de decisiones sencillas</b>   | <b>499</b> |
| 16.1      | Combinación de creencias y deseos en condiciones de incertidumbre . . . . . | 499        |
| 16.2      | Las bases de la teoría de la utilidad . . . . .                             | 501        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
|           | Restricciones que se aplican a preferencias racionales . . . . .               | 501        |
|           | ... y entonces apareció la utilidad . . . . .                                  | 503        |
| 16.3      | Funciones de utilidad . . . . .  | 503        |
|           | La utilidad del dinero . . . . .   | 504        |
|           | Escalas de utilidad y evaluación de la utilidad . . . . .                      | 507        |
| 16.4      | Funciones de utilidad de atributos múltiples . . . . .                         | 509        |
|           | Dominancia . . . . .   | 509        |
|           | Estructura de preferencia y la utilidad de atributos múltiples . . . . .       | 511        |
| 16.5      | Redes de decisión . . . . .  | 513        |
|           | Representación de un problema de decisión mediante redes de decisión . . . . . | 513        |
|           | Evaluación de las redes de decisión . . . . .                                  | 515        |
| 16.6      | La importancia de la información . . . . .                                     | 515        |
|           | Un ejemplo sencillo . . . . .  | 516        |
|           | Una fórmula general . . . . .  | 517        |
|           | Propiedades del valor de la información . . . . .                              | 518        |
|           | Implantación de un agente recopilador de información . . . . .                 | 519        |
| 16.7      | Sistemas expertos por decisión teórica . . . . .                               | 520        |
| 16.8      | Resumen . . . . .  | 522        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                                    | 522        |
|           | Ejercicios . . . . .   | 524        |
| <b>17</b> | <b>Toma de decisiones complejas</b> . . . . .                                  | <b>527</b> |
| 17.1      | Problemas de decisión secuencial . . . . .                                     | 527        |
| 17.2      | Iteración de valores . . . . .   | 531        |
| 17.3      | Iteración de política . . . . .  | 534        |
| 17.4      | Diseño de un agente por decisión-teórico . . . . .                             | 537        |
|           | El ciclo de decisión de un agente racional . . . . .                           | 537        |
|           | La percepción en los mundos inciertos . . . . .                                | 540        |
| 17.5      | Redes de creencia dinámicas . . . . .  | 543        |
| 17.6      | Redes de decisión dinámicas . . . . .  | 546        |
|           | Comentario . . . . .   | 547        |
| 17.7      | Resumen . . . . .  | 548        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                                    | 549        |
|           | Ejercicios . . . . .   | 550        |
| <b>VI</b> | <b>Aprendizaje</b> . . . . .   | <b>553</b> |
| <b>18</b> | <b>Aprendizaje a partir de la observación</b> . . . . .                        | <b>555</b> |
| 18.1      | Un modelo general de agentes con capacidad para aprender . . . . .             | 555        |
|           | Componentes del elemento de desempeño . . . . .                                | 557        |
|           | Representación de los componentes . . . . .                                    | 558        |
|           | Retroalimentación disponible . . . . .   | 558        |
|           | Conocimiento previo . . . . .  | 559        |
|           | Integración en un todo . . . . .   | 559        |
| 18.2      | Aprendizaje inductivo . . . . .  | 559        |
| 18.3      | Aprendizaje con árboles de decisión . . . . .                                  | 562        |
|           | Los árboles de decisión como elementos de desempeño . . . . .                  | 562        |
|           | Expresividad de los árboles de decisión . . . . .                              | 563        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
|           | Cómo inducir árboles de decisión a partir de ejemplos . . . . .                   | 564        |
|           | Evaluación de la eficiencia de un algoritmo de aprendizaje . . . . .              | 568        |
|           | Aplicaciones prácticas del aprendizaje por árbol de decisión . . . . .            | 569        |
| 18.4      | Empleo de la teoría de la información . . . . .                                   | 571        |
|           | Ruido y sobreadaptación . . . . .   | 573        |
|           | Ampliación de los usos de los árboles de decisión . . . . .                       | 574        |
| 18.5      | Aprendizaje de las descripciones lógicas generales . . . . .                      | 575        |
|           | Hipótesis . . . . .   | 576        |
|           | Ejemplos . . . . .  | 576        |
|           | Búsqueda de la mejor hipótesis del momento . . . . .                              | 577        |
|           | Búsqueda basada en el compromiso mínimo . . . . .                                 | 580        |
|           | Comentarios . . . . .   | 583        |
| 18.6      | Por qué funciona el aprendizaje: teoría del aprendizaje computacional . . . . .   | 584        |
|           | ¿Cuántos ejemplos se necesitan? . . . . .   | 584        |
|           | Aprendizaje de listas de decisión . . . . .                                       | 586        |
|           | Comentario . . . . .  | 589        |
| 18.7      | Resumen . . . . .   | 589        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                                       | 590        |
|           | Ejercicios . . . . .  | 592        |
| <b>19</b> | <b>El aprendizaje en las redes neuronales y de creencia</b> . . . . .             | <b>595</b> |
| 19.1      | Cómo funciona el cerebro . . . . .  | 596        |
|           | Una comparación entre cerebros y computadoras digitales . . . . .                 | 598        |
| 19.2      | Redes neuronales . . . . .  | 599        |
|           | Notación . . . . .  | 599        |
|           | Elementos simples de cálculo . . . . .  | 600        |
|           | Estructuras de red . . . . .  | 602        |
|           | Estructura de red óptima . . . . .  | 604        |
| 19.3      | Perceptrones . . . . .  | 605        |
|           | Qué pueden representar los perceptrones . . . . .                                 | 606        |
|           | Aprendizaje de funciones linealmente separables . . . . .                         | 608        |
| 19.4      | Redes de prealimentación con varios niveles . . . . .                             | 610        |
|           | Aprendizaje por propagación posterior . . . . .                                   | 611        |
|           | La propagación posterior como una búsqueda del descenso de gradiente . . . . .    | 613        |
|           | Comentarios . . . . .   | 616        |
| 19.5      | Aplicaciones de las redes neuronales . . . . .                                    | 617        |
|           | Pronunciación . . . . .   | 617        |
|           | Comprensión de caracteres manuscritos . . . . .                                   | 618        |
|           | Conducción . . . . .  | 619        |
| 19.6      | Métodos bayesianos empleados en las redes de creencias para aprendizaje . . . . . | 621        |
|           | Aprendizaje bayesianos . . . . .  | 621        |
|           | Problemas del aprendizaje en las redes de creencias . . . . .                     | 622        |
|           | Aprendizaje de redes cuya estructura es fija . . . . .                            | 623        |
|           | Una comparación entre redes de suposición y redes neuronales . . . . .            | 625        |
| 19.7      | Resumen . . . . .   | 626        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                                       | 627        |
|           | Ejercicios . . . . .  | 630        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>20</b>  | <b>Aprendizaje por refuerzo</b>  | <b>632</b> |
| 20.1       | Introducción . . . . .   | 632        |
| 20.2       | Aprendizaje pasivo en ambientes . . . . .                              | 634        |
|            | Actualización ingenua . . . . .  | 635        |
|            | Programación dinámica adaptable . . . . .                              | 637        |
|            | Aprendizaje por diferencia temporal . . . . .                          | 638        |
| 20.3       | Aprendizaje pasivo en un ambiente desconocido . . . . .                | 639        |
| 20.4       | Aprendizaje activo en un entorno desconocido . . . . .                 | 641        |
| 20.5       | Exploración . . . . .  | 643        |
| 20.6       | El aprendizaje de una función acción-valor . . . . .                   | 647        |
| 20.7       | La generalización en el aprendizaje por refuerzo . . . . .             | 648        |
|            | Aplicaciones en los juegos . . . . .                                   | 651        |
|            | Aplicaciones en el control de robots . . . . .                         | 652        |
| 20.8       | Algoritmos genéticos y programación evolutiva . . . . .                | 653        |
| 20.9       | Resumen . . . . .  | 656        |
|            | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                            | 657        |
|            | Ejercicios . . . . .   | 658        |
| <b>21</b>  | <b>El conocimiento en el aprendizaje</b>                               | <b>660</b> |
| 21.1       | El conocimiento en el aprendizaje . . . . .                            | 660        |
|            | Algunos ejemplos sencillos . . . . .                                   | 662        |
|            | Algunos esquemas generales . . . . .                                   | 662        |
| 21.2       | Aprendizaje basado en explicaciones . . . . .                          | 664        |
|            | Obtención de reglas generales a partir de ejemplos . . . . .           | 665        |
|            | Cómo mejorar la eficiencia . . . . .                                   | 667        |
| 21.3       | Aprendizaje a través del uso de información relevante . . . . .        | 668        |
|            | Determinación el espacio de hipótesis . . . . .                        | 669        |
|            | Aprendizaje y uso de información relevante . . . . .                   | 670        |
| 21.4       | Programación por lógica inductiva . . . . .                            | 672        |
|            | Un ejemplo . . . . .   | 672        |
|            | Resolución inversa . . . . .   | 674        |
|            | Métodos de aprendizaje de arriba hacia abajo . . . . .                 | 677        |
| 21.5       | Resumen . . . . .  | 680        |
|            | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                            | 681        |
|            | Ejercicios . . . . .   | 683        |
| <b>VII</b> | <b>Comunicación, percepción y actuación</b>                            | <b>685</b> |
| <b>22</b>  | <b>Agentes que se comunican</b>  | <b>687</b> |
| 22.1       | La comunicación como acción . . . . .                                  | 688        |
|            | Generalidades sobre el lenguaje . . . . .                              | 691        |
|            | Los pasos de que consta una comunicación . . . . .                     | 692        |
|            | Dos modelos de comunicación . . . . .                                  | 695        |
| 22.2       | Tipos de agentes de comunicación . . . . .                             | 696        |
|            | Para establecer una comunicación empleando Decir y Preguntar . . . . . | 696        |
|            | Empleo del lenguaje formal en la comunicación . . . . .                | 698        |
|            | Un agente que se comunica . . . . .                                    | 699        |
| 22.3       | Una gramática formal para un subconjunto del idioma inglés . . . . .   | 699        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
|           | El diccionario de $E_0$ . . . . .   | 700        |
|           | La gramática de $E_0$ . . . . .   | 701        |
| 22.4      | Análisis sintáctico (análisis gramatical) . . . . .                               | 701        |
| 22.5      | Gramática de cláusulas definidas (GCD) . . . . .                                  | 704        |
| 22.6      | Ampliación de una gramática . . . . .   | 705        |
|           | Subcategorización verbal . . . . .  | 707        |
|           | Capacidad generativa de las gramáticas ampliadas . . . . .                        | 709        |
| 22.7      | Interpretación semántica . . . . .  | 709        |
|           | La semántica como ampliación de gramáticas de cláusulas definidas (GCD) . . . . . | 710        |
|           | La semántica de “Juan ama a María” . . . . .                                      | 710        |
|           | La semántica de $E_1$ . . . . .   | 712        |
|           | Conversión de la forma cuasi-lógica a la forma lógica . . . . .                   | 715        |
|           | Interpretación pragmática . . . . .   | 716        |
| 22.8      | Ambigüedad y desambiguación . . . . .   | 718        |
|           | Desambiguación . . . . .  | 719        |
| 22.9      | Un agente para la comunicación . . . . .  | 721        |
| 22.10     | Resumen . . . . .   | 722        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .                                       | 723        |
|           | Ejercicios . . . . .  | 726        |
| <b>23</b> | <b>Procesamiento práctico del lenguaje natural</b> . . . . .                      | <b>729</b> |
| 23.1      | Aplicaciones prácticas . . . . .  | 729        |
|           | Traducción automatizada . . . . .   | 730        |
|           | Acceso a una base de datos . . . . .  | 731        |
|           | Recuperación de información . . . . .   | 733        |
|           | Categorización de textos . . . . .  | 734        |
|           | Obtención de datos de un texto . . . . .  | 734        |
| 23.2      | Análisis gramatical eficiente . . . . .   | 735        |
|           | Uso del diagrama para resumir análisis: empaquetamiento . . . . .                 | 740        |
| 23.3      | Ampliación del diccionario . . . . .  | 742        |
| 23.4      | Ampliación de la gramática . . . . .  | 744        |
|           | Compuestos nominales y aposición . . . . .  | 745        |
|           | Frases (sintagmas) adjetivas . . . . .  | 747        |
|           | Determinadores . . . . .  | 748        |
|           | Reencuentro con las frases (sintagmas) sustantivas . . . . .                      | 749        |
|           | Claúsulas que sirven de complemento . . . . .                                     | 749        |
|           | Claúsulas relativas . . . . .   | 750        |
|           | Preguntas . . . . .   | 751        |
|           | Cómo manejar cadenas no gramaticales . . . . .                                    | 752        |
| 23.5      | Ambigüedad . . . . .  | 752        |
|           | Evidencia sintáctica . . . . .  | 753        |
|           | Evidencia léxica . . . . .  | 753        |
|           | Evidencia semántica . . . . .   | 753        |
|           | Metonimia . . . . .   | 754        |
|           | Metáfora . . . . .  | 755        |
| 23.6      | Comprensión del discurso . . . . .  | 755        |
|           | La estructura del discurso coherente . . . . .                                    | 757        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
|           | La estructura del discurso coherente . . . . .                                      | 757        |
| 23.7      | Resumen . . . . .   | 779        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .   | 760        |
|           | Ejercicios . . . . .  | 761        |
| <b>24</b> | <b>Percepción</b>   | <b>764</b> |
| 24.1      | Introducción . . . . .  | 764        |
| 24.2      | Formación de imágenes . . . . .   | 765        |
|           | Cámara de orificio . . . . .  | 766        |
|           | Sistemas de lentes . . . . .  | 767        |
|           | Fotometría de la formación de imágenes . . . . .                                    | 769        |
|           | Espectrofotometría de la formación de imágenes . . . . .                            | 770        |
| 24.3      | Operaciones del procesamiento de imágenes en la visión primera . . . . .            | 770        |
|           | Convolución usando filtros lineales . . . . .                                       | 772        |
|           | Detección de bordes . . . . .   | 773        |
| 24.4      | Obtención de información tridimensional por percepción visual . . . . .             | 774        |
|           | Movimiento . . . . .  | 775        |
|           | Visión Estereoscópica binocular . . . . .   | 777        |
|           | Gradientes de textura . . . . .   | 783        |
|           | Sombreado . . . . .   | 784        |
|           | Contorno . . . . .  | 786        |
| 24.5      | Empleo de la visión para la manipulación y navegación . . . . .                     | 789        |
| 24.6      | Representación y reconocimiento de objetos . . . . .                                | 790        |
|           | El método de la alineación . . . . .  | 793        |
|           | Empleo de invariantes proyectivas . . . . .   | 795        |
| 24.7      | Comprensión de sonidos vocales . . . . .  | 797        |
|           | Procesamiento de señales . . . . .  | 799        |
|           | Definición de un modelo general para el reconocimiento de sonidos vocales . . . . . | 800        |
|           | El modelo del lenguaje: P (palabras) . . . . .                                      | 801        |
|           | El modelo acústico: P (señal palabras) . . . . .                                    | 803        |
|           | Integración de los modelos . . . . .  | 806        |
|           | El algoritmo de búsqueda . . . . .  | 806        |
|           | Cómo entrenar el modelo . . . . .   | 808        |
| 24.8      | Resumen . . . . .   | 808        |
|           | Notas bibliográficas e históricas . . . . .   | 809        |
|           | Ejercicios . . . . .  | 812        |
| <b>25</b> | <b>Robótica</b>   | <b>815</b> |
| 25.1      | Introducción . . . . .  | 815        |
| 25.2      | Tareas: ¿para qué sirven los robots? . . . . .                                      | 816        |
|           | Fabricación y manejo de materiales . . . . .  | 816        |
|           | Robots mensajeros . . . . .   | 817        |
|           | Ambientes peligrosos . . . . .  | 818        |
|           | Telepresencia y realidad virtual . . . . .  | 818        |
|           | Ampliación de las capacidades humanas . . . . .                                     | 819        |
| 25.3      | Partes: ¿de qué están hechos los robots? . . . . .                                  | 819        |
|           | Efectores: herramientas para la ejecución . . . . .                                 | 820        |

---

|                         |                                      |            |
|-------------------------|--------------------------------------|------------|
|                         | Las funciones como valores . . . . . | 905        |
| B.3                     | El depósito de código . . . . .      | 905        |
| B.4                     | Comentarios . . . . .                | 905        |
| <b>Bibliografía</b>     |                                      | <b>907</b> |
| <b>Índice analítico</b> |                                      | <b>953</b> |