

# Conocimientos Fundamentales de Computación



## UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. José Narro Robles  
RECTOR

Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro  
SECRETARIO GENERAL

Mtro. Juan José Pérez Castañeda  
SECRETARIO ADMINISTRATIVO

Dra. Rosaura Ruiz Gutiérrez  
SECRETARIA DE DESARROLLO INSTITUCIONAL

M. C. Ramiro Jesús Sandoval  
SECRETARIO DE SERVICIOS A LA COMUNIDAD

Lic. Luis Raúl González Pérez  
ABOGADO GENERAL

Mtra. María de Lourdes Sánchez Obregón  
DIRECTORA GENERAL DE LA ESCUELA NACIONAL PREPARATORIA

Mtro. Rito Terán Olgún  
DIRECTOR GENERAL DEL COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES

Mtra. Lidia Guadalupe Ortega González  
COORDINADORA DEL CONSEJO ACADÉMICO DEL BACHILLERATO

Dr. Ignacio de Jesús Ania Briseño  
DIRECTOR GENERAL DE SERVICIOS DE CÓMPUTO ACADÉMICO

Dr. Francisco Cervantes Pérez  
COORDINADOR DE UNIVERSIDAD ABIERTA Y EDUCACIÓN A DISTANCIA

Enrique Balp Díaz  
DIRECTOR GENERAL DE COMUNICACIÓN SOCIAL

### **Colección Conocimientos Fundamentales**

Esta colección es parte de un programa de la UNAM orientado a la producción de libros y materiales digitales para el bachillerato.

Colección Conocimientos Fundamentales

# Conocimientos Fundamentales de Computación

Sergio Rajsbaum  
(Coordinador)

Ernesto Bribiesca  
José Galaviz  
Francisco Solsona

Luis A. Martínez  
(Asistente de Coordinación)



Universidad Nacional Autónoma de México  
México 2009

México • Argentina • Brasil • Colombia • Costa Rica • Ecuador  
España • Guatemala • Panamá • Perú • Puerto Rico • Uruguay • Venezuela

Datos de catalogación bibliográfica

|  |
|--|
|  |
|--|

### **Programa Conocimientos Fundamentales para la Enseñanza Media Superior**

Coordinación general: Dra. Rosaura Ruiz Gutiérrez  
Coordinación operativa: Dr. Alfredo Arnaud Bobadilla  
Coordinación editorial: Rosanela Álvarez Ruiz

La coordinación general agradece la colaboración de la Escuela Nacional Preparatoria, el Colegio de Ciencias y Humanidades, el Consejo Académico del Bachillerato, la Facultad de Filosofía y Letras, la Facultad de Ciencias, la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, la Facultad de Economía, la Facultad de Derecho, la Facultad de Medicina, la Facultad de Química, el Instituto de Ecología, el Instituto de Geografía, el Instituto de Investigaciones Filosóficas, el Instituto de Matemáticas, el Instituto de Física, el Instituto de Investigaciones en Materiales, el Centro de Ciencias Físicas, la Dirección General de Servicios de Cómputo Académico, la Coordinación de Universidad Abierta y Educación a Distancia, la Dirección General de Actividades Cinematográficas, el Centro Universitario de Estudios Cinematográficos, la Dirección General de Divulgación de la Ciencia, la Dirección General de Televisión Universitaria, la Dirección de Literatura y el Centro de Enseñanza de Lenguas Extranjeras. Se agradece también a la Academia Mexicana de Ciencias.

Portada: Cuarto estado de la curva de Hilbert, representado usando el código de cadenas 3D y generado por Ernesto Bribiesca.

Diseño y formación: Miguel Marín / Elizabeth García

Colección Conocimientos Fundamentales

*Conocimientos Fundamentales de Computación*

1ª edición, 2009

© D. R. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Secretaría de Desarrollo Institucional/

Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial

Ciudad Universitaria, 04510, México, D. F.

ISBN: 978-970-32-4950-3

Impreso y hecho en México



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

# Presentación

Los estudiantes son la razón de ser de nuestra Universidad. Cada año ingresan al bachillerato de la UNAM miles de jóvenes que depositan su confianza en la institución. Saben que los conocimientos y la experiencia que adquieran en nuestras aulas serán fundamentales en su proyecto de vida. Por ello, nuestra casa de estudios observa un profundo compromiso con sus estudiantes de nivel medio superior.

A partir del establecimiento de la Universidad Nacional, la preparatoria ha constituido una de las tres etapas de formación que ofrece la institución. En los albores del siglo XXI, nuestro bachillerato demanda una atención especial que asegure su fortalecimiento y su articulación, tanto en los dos subsistemas que lo conforman, como en los niveles de licenciatura y posgrado.

La adecuación de planes y programas de estudio a las exigencias contemporáneas, la actualización docente y la formación integral de los estudiantes, son prioridades que asumimos con absoluta responsabilidad.

Así, a través del Programa de Fortalecimiento del Bachillerato, la UNAM invierte su enorme potencial de inteligencia y creatividad en transformaciones que emanan de la reflexión y la reelaboración de los procesos de enseñanza, en función de los cambios y exigencias de nuestra sociedad dentro de un contexto global.

Uno de los productos tangibles de este Programa es la Colección Conocimientos Fundamentales para la Educación Media Superior, de cuya segunda etapa forma parte este libro.

A los volúmenes primeros se suman ahora nuevas disciplinas, con títulos como Español, Historia, Ciencias de la Salud, Ciencias Sociales, Computación y Comprensión de Lectura en Inglés, con los que cubrimos el espectro de asignaturas que se imparten en nuestro bachillerato.

La preparación en las distintas áreas y especialidades del saber resultaría trunca si no contemplara la sensibilidad y la necesidad expresiva de los jóvenes. Por ello hemos incluido en esta etapa el libro de Formación Artística, al que otorgamos particular importancia. En la UNAM sabemos que la identificación de las distintas ramas del arte y la adquisición de herramientas para su apreciación y ejercicio, son determinantes en la formación integral de una ciudadanía capaz de concebir, comprender y transformar su entorno.

Joven estudiante: con estos materiales queremos brindarte las herramientas para ensanchar tus horizontes y contribuir a tu realización personal con el más preciado de los bienes con que cuenta la humanidad: el conocimiento.

*Dr. José Narro Robles*  
*Rector de la Universidad Nacional Autónoma de México*

---

# Prefacio

La Secretaría de Desarrollo Institucional, en colaboración con la Escuela Nacional Preparatoria, el Colegio de Ciencias y Humanidades y el Consejo Académico del Bachillerato de la UNAM, emprendió la tarea de reflexionar sobre los contenidos temáticos de las disciplinas que se imparten en el bachillerato, bajo la premisa de que la enseñanza media superior tiene como objetivos principales la formación de estudiantes que continúen sus estudios en la licenciatura y el posgrado, con posibilidades reales de incorporarse a la vida laboral, con un claro compromiso social.

Las disciplinas elegidas para trabajar en una primera etapa fueron: biología, filosofía, física, geografía, matemáticas, literatura y química. En la segunda etapa se trabajaron español, historia, ciencias sociales, ciencias de la salud, formación artística, computación y comprensión de lectura en inglés. Se formaron grupos de trabajo integrados por profesores del bachillerato, la licenciatura y el posgrado, que definieron los conocimientos fundamentales de cada disciplina, en función de su desarrollo reciente, de su pertinencia en el marco de la enseñanza media superior y del impulso a la interdisciplina.

La definición de los conocimientos fundamentales tiene como fin determinar los saberes básicos e imprescindibles con que los estudiantes deben contar al término del ciclo del bachillerato y proporcionar a los alumnos una cultura general de la disciplina, que les permita estar preparados para incursionar en nuevos espacios del saber.

Una vez establecidos tales conocimientos, se integraron grupos de trabajo más amplios para elaborar los contenidos de los libros, de los discos compactos y de la página web, que son los tres materiales de apoyo a tu formación que incluye este programa. Éstos se insertan en el marco de la Colección Conocimientos Fundamentales para que puedas usarlos con la orientación y apoyo de tus profesores.

La definición y la producción de los materiales de esta colección contó con la amplia participación de la Escuela Nacional Preparatoria, el Colegio de Ciencias y Humanidades, el Consejo Académico del Bachillerato, la Facultad de Filosofía y Letras, la Facultad de Ciencias, la Facultad de Química, la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, la Facultad de Derecho, la Facultad de Economía, la Facultad de Medicina, el Instituto de Ecología, el Instituto de Geografía, el Instituto de Investigaciones Filosóficas, el Instituto de Matemáticas, el Instituto de Física, el Instituto de Investigaciones en Materiales, la Dirección General de Servicios de Cómputo Académico, la Coordinación de Universidad Abierta y Educación a Distancia, la Dirección General de Actividades Cinematográficas, el Centro Universitario de Estudios Cinematográficos, la Dirección General de Divulgación de la Ciencia, la Dirección General de Televisión Universitaria, la Dirección de Literatura y el Centro de Enseñanza de

Lenguas Extranjeras. También contribuyó en la tarea un selecto grupo de miembros de la Academia Mexicana de Ciencias, quienes hicieron sugerencias para mejorar los materiales. A todos ellos, nuestro reconocimiento y gratitud.

El Programa de Fortalecimiento del Bachillerato, del que forma parte la Colección Conocimientos Fundamentales, es una iniciativa de la UNAM destinada a apoyar y fortalecer los estudios de bachillerato en lengua española.

Con esta serie de libros y materiales, dirigidos a los maestros y estudiantes del nivel medio superior, nuestra Universidad ofrece esta colección que habrá de enriquecerse con más títulos, realizados con la calidad y el profesionalismo propios de nuestra casa de estudios.

*Dra. Rosaura Ruiz Gutiérrez*  
*Secretaria de Desarrollo Institucional*

**Francisco Solsona** estudió Ciencias de la Computación en la Facultad de Ciencias de la UNAM, obteniendo el promedio más alto de su generación. Actualmente es coordinador de Servicios de Cómputo de la Facultad de Ciencias y coautor y editor del libro en línea: *Scheme Cookbook*. Desde 2002 es editor de los *Scheme Request for Implementation* (SRFI) y coordinador del libro *Manual de supervivencia Linux*, publicado por las Prensas de Ciencias en 2007. Desde 2005 ha liderado diversos proyectos de vinculación: auditorías de riesgo tecnológico y capacitación para programadores, entre otros.

---

## Acerca de los autores

**Sergio Rajsbaum** obtuvo el grado de Ingeniero en Computación en la UNAM y el grado de doctor en Ciencias de la Computación por el Instituto Tecnológico de Israel. Desde 1991 es investigador del Instituto de Matemáticas de la UNAM. Ha tenido varias estancias de investigación en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), los Laboratorios de Investigación de HP y de IBM, y otras universidades. Su área principal de investigación es el Cómputo Distribuido, especialmente problemas relacionados con coordinación, sincronización, tiempo y tolerancia a fallas, muchos de los cuales tienen que ver con internet y la web. También trabaja en algoritmos y otros problemas matemáticos relacionados con la computación y sus fundamentos. Ha publicado más de 70 trabajos de investigación, en colaboración con investigadores de EUA, Francia e Israel, principalmente.

**Ernesto Bribiesca Correa** tiene la licenciatura en Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica del IPN y obtuvo el grado de doctor en Ciencias en el Departamento de Matemáticas en la UAM-I (donde le otorgaron la Medalla al Mérito Universitario). Ha trabajado en diferentes lugares, principalmente en centros de investigación, entre los que se destacan: Centro Científico IBM, INEGI e IIMAS-UNAM; pertenece al Sistema Nacional de Investigadores. Entre sus estancias de investigación se distinguen dos: laboratorio de Inteligencia Artificial del Massachusetts Institute of Technology (MIT) y el Earth Resources Laboratory de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

**José Galaviz Casas** nació en 1968 en la ciudad de México. Obtuvo el título de matemático, el grado de maestro y el de doctor en Ciencias de la Computación en la UNAM (este último con mención honorífica). Es profesor de la Facultad de Ciencias de la misma Universidad desde 1998. Ha escrito, previos a su colaboración en éste, dos libros: uno de texto a nivel licenciatura y otro de divulgación acerca de la historia de la computación. En 2007 obtuvo la *Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos* en el área de docencia en Ciencias Exactas y es bastante más informal de lo que se puede apreciar en esta síntesis curricular.

Al inicio, el hombre operaba en un mundo mayoritariamente físico, apenas lograba una comunicación rudimentaria mediante algunas señas o sonidos. A lo largo de los años, el hombre ha desarrollado sus habilidades mentales, en una lucha constante por dejarle las tareas físicas a máquinas, para concentrarse él en tareas mentales. Quizás el momento decisivo fue llegar a la cima que representó la Revolución Industrial, en la cual el hombre alcanzó grandes éxitos con las máquinas. Hoy vivimos la Era de la Información. La ubicuidad de los sistemas de cómputo es la característica principal del mundo moderno, y abarcan casi todos los ámbitos de nuestra vida. Nuestros medios de transporte y comunicación son controlados a través de tales sistemas; la exploración de otros planetas es realizada por robots; sistemas que involucran satélites predicen el clima cada vez con mayor exactitud; la investigación científica, la operación de los sistemas financieros y nuestras transacciones comerciales son inconcebibles sin el uso de computadoras; el acceso a bibliotecas digitales y acervos de información se simplifica y extiende constantemente, etcétera.

La omnipresencia de los sistemas de cómputo en el mundo moderno hace indispensable que se eduque a nuestros niños y jóvenes de tal forma que sean capaces de adaptarse al entorno tecnológico que los rodea. No sólo en el sentido evidente de ser capaces de operar e interactuar con la tecnología –algo que por sí mismos logran sin mucha ayuda de los adultos– sino también en el de comprender las ideas detrás de aquélla. Es ésta una labor que va mucho más allá de enseñar al estudiante a operar con diversas plataformas y programas de cómputo. Es comparable a la labor realizada en otras áreas científicas y de humanidades: mostrarle al estudiante el mundo a la luz de principios fundamentales. Al igual que en otras disciplinas, el objetivo final es llegar a un mejor entendimiento de nosotros mismos y de nuestro entorno por medio de una perspectiva particular, en nuestro caso, la del computólogo. Sólo que, en el caso de la computación, se trata de un mundo que nos involucra de una manera especialmente cercana: ¡es un mundo del cual nuestras mentes forman parte! De una manera u otra, nuestros procesos mentales, la manera en que almacenamos recuerdos y los utilizamos mediante asociaciones y otras búsquedas, resolvemos problemas, entendemos lo que otra persona nos dice, escribimos y leemos, jugamos ajedrez, son todos procesos de cómputo, en el sentido amplio de la palabra al que antes nos referimos. El objetivo de este libro es presentar al mundo desde esta perspectiva, la de la computación. Cuando nos referimos a “cómputo”, lo hacemos en este sentido amplio y, por tanto, el computólogo es una persona que estudia el cómputo, ya sea natural, artificial o imaginario.

Nuestra propuesta evidencia que la computación es ciencia e ingeniería: pretende entender y explicar el mundo que nos rodea por un lado y, por el otro, demostrar que los conocimientos adquiridos pueden derivar en la construcción de mecanismos útiles que permitan expandir las capacidades del ser humano. Impulsamos al estudiante a desarrollar habilidades, adquirir conocimientos de cómputo, y razonar a diversos niveles de abstracción, desde lo cotidiano del tráfico vehicular hasta lo abstracto de las matemáticas, pasando por la programación, el funcionamiento de una computadora, internet y la web. ¡Bienvenidos al viaje!

*Los autores*

---

# Introducción

El ser humano tiene dos modos de interactuar con el mundo. Con su cuerpo puede empujar, cortar, construir, hacer hoyos y diques. Usando este modo de interacción, logró defenderse de las inclemencias de la naturaleza, y procurarse de alimentos en los albores de la historia. Pero los animales lo superan por mucho en habilidades físicas. Siempre hemos soñado con volar como un pájaro, correr con la gracia y velocidad de una gacela, tener la fuerza de un elefante, el olfato de un perro, la vista de un águila. Es otro tipo de habilidades, sin embargo, en las que el hombre es el rey de la naturaleza; no se pueden ver, ni tocar, ni oler, ni oír, pero éstas permiten al hombre, con su pequeñez y debilidad, hacer grandes proezas. En este mundo al hombre no le sirve de nada ser muy fuerte. En este mundo un médico puede hacer una operación quirúrgica en un paciente que se encuentra a cientos de kilómetros de distancia, sin mover un solo dedo. El médico recibe imágenes y otros datos del paciente, y emite instrucciones que indican la manera en que distintos instrumentos deben moverse. Lo esencial no es la manera en que el médico expresa estas instrucciones, podría ser mediante movimientos de sus dedos sobre una palanca o pulsando teclas, pero también hablando. Lo esencial es la *información* que produce el médico a partir de lo que observa o escucha, y la cual se envía al quirófano. La habilidad del médico a la que nos referimos es la de procesar información. Para comunicar esta información el médico requiere de *lenguajes*, ya sea para hablar con otros médicos, o para interactuar con instrumentos médicos. Y su herramienta principal es su cerebro, no sus músculos.

El médico utiliza su cerebro para procesar la información, ayudándose del *conocimiento* acerca de la medicina, *aprende* asimilando la experiencia de cada operación realizada, ejecuta *algoritmos*, métodos mediante los cuales estima la presión sanguínea del paciente, evalúa las implicaciones de distintas posibilidades a través de *razonamientos lógicos*. El médico resuelve los distintos *problemas* que se presentan durante la operación, algunos relacionados con *redes* de trabajo en equipo, por ejemplo para *coordinar* la ejecución de varias tareas *simultáneamente*. Éste es el mundo de la computación: información, conocimiento, lenguajes, problemas, algoritmos, abstracción, lógica, redes. Así como el mundo de la medicina no son los bisturíes, ni el de los astrónomos los telescopios, el de la computación no son las computadoras. En cada mundo el hombre crea instrumentos para ampliar sus capacidades y poderes. En el de la computación, estos instrumentos son las computadoras, y las capacidades que aumenta son las de almacenar información y conocimiento, las de procesar números y otros datos a enormes velocidades, las de comunicarse e interactuar con el mundo y otros hombres.

---

# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Presentación</b>   | <b>5</b>  |
| <b>Prefacio</b>   | <b>7</b>  |
| <b>Acerca de los autores</b>  | <b>9</b>  |
| <b>Introducción</b>   | <b>11</b> |
| <br>  |           |
| <b>Módulo 1. Computación</b>  | <b>21</b> |
| <b>Introducción: entre el polvo y la divinidad</b>                              | <b>22</b> |
| <b>1. Problemas</b>   | <b>27</b> |
| 1.1. El problema de los regalos de Arcadio                                      | 27        |
| 1.2. Problemas de la vida cotidiana   | 30        |
| 1.3. El significado de resolver un problema                                     | 30        |
| <br>  |           |
| <b>2. Algoritmos: resolviendo el problema</b>                                   | <b>31</b> |
| 2.1. Una solución: búsqueda exhaustiva  | 31        |
| 2.2. Análisis de la solución de una búsqueda exhaustiva                         | 33        |
| 2.3. Análisis del caso general de la búsqueda exhaustiva                        | 33        |
| <br>  |           |
| <b>3. Crecimiento exponencial</b>   | <b>36</b> |
| 3.1. Crecimiento exponencial en computación                                     | 36        |
| 3.2. Crecimiento exponencial en la sociedad y en la naturaleza                  | 37        |
| 3.3. Ejemplos de crecimiento exponencial  | 38        |
| 3.4. Árboles  | 40        |
| 3.5. ¿Qué tan rápida es una computadora?  | 40        |
| 3.6. Ejemplos de crecimiento exponencial benéficos                              | 42        |
| <br>  |           |
| <b>4. Problemas probablemente difíciles, seguramente difíciles y aún peores</b> | <b>43</b> |
| 4.1. Problemas exponenciales  | 43        |
| 4.2. Problemas NP-completos   | 45        |
| 4.3. Problemas peores que exponenciales   | 45        |
| <b>Resumen</b>  | <b>45</b> |
| <br>  |           |
| <b>Módulo 2. Algorítmica</b>  | <b>47</b> |
| <b>1. Introducción a la algorítmica</b>   | <b>47</b> |
| 1.1. Cocinar galletas   | 49        |
| 1.2. Recetas de cocina <i>versus</i> algoritmos                                 | 50        |
| 1.3. Tipos de algoritmos  | 52        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>2. Inducción y gráficas</b>                             | <b>54</b>  |
| 2.1. El método de inducción                                | 54         |
| 2.2. Colorear mapas  | 56         |
| 2.3. Gráficas  | 58         |
| 2.4. Acertijo de los tróminos                              | 61         |
| 2.5. Probando funciones por inducción                      | 62         |
| <b>3. Recursividad</b>                                     | <b>66</b>  |
| 3.1. Algoritmo para colorear mapas con seis colores        | 66         |
| 3.2. Un problema y un algoritmo. Las torres de Hanoi       | 67         |
| <b>4. Búsqueda exhaustiva</b>                              | <b>79</b>  |
| 4.1. Coloración de gráficas                                | 79         |
| 4.2. El problema de ordenamiento                           | 80         |
| 4.3. La pareja de puntos más cercanos                      | 81         |
| <b>5. Reduce y vencerás</b>                                | <b>82</b>  |
| 5.1. Ordenamiento por inserción                            | 82         |
| 5.2. Ordenamiento de burbuja                               | 86         |
| <b>6. Divide y vencerás</b>                                | <b>87</b>  |
| 6.1. Búsqueda binaria                                      | 87         |
| 6.2. Ordenamiento por combinación                          | 88         |
| 6.3. Ordenamiento rápido                                   | 89         |
| 6.4. Parejas de puntos                                     | 90         |
| <b>7. Órdenes de crecimiento</b>                           | <b>91</b>  |
| <b>Resumen</b>   | <b>93</b>  |
| <br>   |            |
| <b>Módulo 3. Programación</b>                              | <b>95</b>  |
| <b>1. Introducción</b>                                     | <b>96</b>  |
| 1.1. La programación y su importancia                      | 96         |
| 1.2. Lenguajes de programación                             | 98         |
| 1.3. Notas acerca de programación y el lenguaje presentado | 99         |
| 1.4. Un primer ejemplo: Las torres de Hanoi                | 100        |
| <b>2. Nociones básicas de Scheme</b>                       | <b>102</b> |
| 2.1. El lenguaje de programación Scheme                    | 103        |
| 2.2. El ambiente de programación DrScheme                  | 103        |
| 2.3. Metodología de diseño                                 | 104        |
| 2.4. Expresiones primitivas y datos simples                | 104        |
| 2.5. Recursividad  | 114        |
| 2.6. Ciclos  | 115        |
| 2.7. Asignación  | 116        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>3. Abstracción con datos</b>                           | <b>120</b> |
| 3.1. Definición de estructuras                            | 120        |
| 3.2. Constructores y selectores                           | 122        |
| 3.3. Operaciones con listas                               | 125        |
| 3.4. Datos simbólicos                                     | 130        |
| 3.5. Vectores, gráficas y laberintos                      | 133        |
| 3.6. Construcción de laberintos perfectos                 | 137        |
| <b>Resumen</b>  | <b>142</b> |
| <br>  |            |
| <b>Módulo 4. Información</b>                              | <b>143</b> |
| <b>1. Símbolos</b>  | <b>144</b> |
| 1.1. Símbolos, palabras, mensajes                         | 145        |
| 1.2. Bits   | 147        |
| <br>  |            |
| <b>2. Representando el mundo mediante bits</b>            | <b>149</b> |
| 2.1. Representando números                                | 149        |
| 2.2. Representando imágenes                               | 151        |
| 2.3. Codificación y el mundo                              | 151        |
| 2.4. Compresión en la computadora                         | 154        |
| 2.5. Compresión en la naturaleza                          | 155        |
| 2.6. Expansión en computadoras                            | 157        |
| 2.7. Códigos detectores y correctores de errores          | 158        |
| <br>  |            |
| <b>3. Midiendo información</b>                            | <b>162</b> |
| 3.1. El juego de las preguntas                            | 162        |
| 3.2. Cantidad de información y entropía                   | 164        |
| 3.3. Codificación eficiente                               | 167        |
| 3.4. Criptografía básica                                  | 170        |
| 3.5. Protocolos criptográficos                            | 172        |
| <br>  |            |
| <b>Conclusiones</b>                                       | <b>177</b> |
| <b>Resumen</b>  | <b>179</b> |
| <br>  |            |
| <b>Módulo 5. Abstracción</b>                              | <b>181</b> |
| <b>1. La abstracción</b>                                  | <b>183</b> |
| 1.1. Los inicios: sentido de número y contar              | 183        |
| 1.2. Abstracción: el camino del conocimiento              | 184        |
| 1.3. Abstracción en computación                           | 186        |
| <br>  |            |
| <b>2. Modelos de cómputo</b>                              | <b>189</b> |
| 2.1. Máquinas de estados finitos                          | 190        |
| 2.2. La geometría plana, un modelo de cómputo restringido | 194        |
| 2.3. Modelos de computadoras                              | 195        |
| 2.4. Tesis de Church-Turing                               | 200        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>3. Lógica</b>  | <b>201</b> |
| 3.1. El sueño de Leibniz                                  | 201        |
| 3.2. Un problema fundamental                              | 202        |
| 3.3. La limitación inherente de las matemáticas           | 203        |
| 3.4. Álgebra booleana                                     | 203        |
| 3.5. Lógica de primer orden                               | 204        |
| 3.6. Lógica y conocimiento                                | 209        |
| <b>4. Análisis de problemas</b>                           | <b>213</b> |
| 4.1. En el banco  | 213        |
| 4.2. La visión del computólogo                            | 213        |
| 4.3. Abstracción en programación                          | 214        |
| <b>Resumen</b>  | <b>216</b> |
| <br>  |            |
| <b>Módulo 6. Computadoras</b>                             | <b>217</b> |
| <b>1. Sótano: transistores y funciones de conmutación</b> | <b>219</b> |
| <b>2. Planta baja: compuertas y circuitos integrados</b>  | <b>223</b> |
| 2.1. Compuertas elementales                               | 223        |
| 2.2. Diseño lógico  | 225        |
| 2.3. Transistores y compuertas NAND                       | 228        |
| <b>3. Primer piso: arquitectura de computadoras</b>       | <b>229</b> |
| 3.1. Arquitectura de Von Neumann                          | 229        |
| 3.2. Frecuencia de operación                              | 232        |
| 3.3. La jerarquía de memoria: la idea del caché           | 232        |
| <b>4. Segundo piso: lenguajes de bajo nivel</b>           | <b>235</b> |
| 4.1. Lenguaje de máquina                                  | 235        |
| 4.2. Ejecución con cauce segmentado                       | 237        |
| 4.3. Lenguaje ensamblador                                 | 240        |
| <b>5. Tercer piso: sistemas operativos</b>                | <b>241</b> |
| 5.1. Manejo de procesos: planificadores                   | 241        |
| 5.2. Manejo de memoria                                    | 243        |
| 5.3. Sistemas de archivo (otra abstracción)               | 243        |
| 5.4. Interfaz de texto o gráfica                          | 244        |
| <b>6. Penthouse: software de aplicación</b>               | <b>246</b> |
| <b>Resumen</b>  | <b>246</b> |
| <br>  |            |
| <b>Módulo 7. Redes</b>                                    | <b>247</b> |
| <b>I. Cómputo distribuido</b>                             | <b>248</b> |
| I.1. Introducción   | 248        |

|   |            |
|---|------------|
| 1.2. Exclusión mutua                                  | 248        |
| 1.3. Propiedades de la exclusión mutua                | 249        |
| <b>2. Comunicación</b>                                | <b>250</b> |
| 2.1. El problema de la vida real                      | 250        |
| 2.2. Comunicación                                     | 251        |
| 2.3. Protocolo  | 251        |
| 2.4. Consenso   | 253        |
| 2.5. Comunicación uno a uno                           | 255        |
| 2.6. Comunicación transitoria y persistente           | 257        |
| <b>3. Redes</b>                                       | <b>257</b> |
| 3.1. Correo terrestre                                 | 257        |
| 3.2. Redes de computadoras                            | 259        |
| 3.3. Conmutación de paquetes                          | 260        |
| 3.4. Comunicación entre homólogos y abstracción       | 261        |
| 3.5. Enrutamiento                                     | 262        |
| 3.6. Congestión                                       | 262        |
| 3.7. Transmisión                                      | 262        |
| <b>4. Internet: red de redes</b>                      | <b>263</b> |
| 4.1. Infraestructura                                  | 264        |
| 4.2. Direccionamiento                                 | 266        |
| 4.3. Idioma   | 267        |
| <b>5. Aplicaciones</b>                                | <b>267</b> |
| 5.1. Web  | 267        |
| 5.2. Memoria inmediata o caché                        | 269        |
| 5.3. Estándares                                       | 269        |
| 5.4. La revolución web                                | 270        |
| 5.5. La web semántica: llevar la web a nuevos niveles | 270        |
| 5.6. Motores de búsqueda o buscadores                 | 271        |
| 5.7. E-mail   | 272        |
| 5.8. Formato  | 273        |
| 5.9. SPAM, phishing y virus                           | 274        |
| 5.10. Mensajería instantánea                          | 275        |
| 5.11. Acceso remoto                                   | 276        |
| 5.12. Colaboración y software libre                   | 276        |
| 5.13. Producción por comunes                          | 276        |
| <b>Resumen</b>  | <b>277</b> |
| <br>  |            |
| <b>Módulo 8. Multimedia</b>                           | <b>279</b> |
| <b>Introducción</b>                                   | <b>280</b> |
| <b>I. Texto</b>                                       | <b>280</b> |
| 1.1. Diseño de tipos                                  | 281        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>2. Sonido</b>                                       | <b>282</b> |
| 2.1. Almacenar bits                                    | 282        |
| <b>3. Imágenes y video</b>                             | <b>283</b> |
| 3.1. Imágenes digitales                                | 283        |
| 3.2. Adquisición de imágenes                           | 286        |
| 3.3. Algunas características de las imágenes digitales | 287        |
| 3.4. Segmentación de imágenes                          | 289        |
| 3.5. Representaciones y descripciones de objetos       | 290        |
| 3.6. Reconocimiento de objetos                         | 304        |
| <b>4. Animación</b>                                    | <b>305</b> |
| 4.1. Realidad virtual inmersiva                        | 311        |
| 4.2. La animación en el cine                           | 315        |
| 4.3. Generación de imágenes para la pantalla azul      | 315        |
| <b>Resumen</b>   | <b>316</b> |
| <br>   |            |
| <b>Módulo 9. Aplicaciones</b>                          | <b>317</b> |
| <b>Introducción</b>                                    | <b>318</b> |
| <b>1. Ciencias de la Tierra</b>                        | <b>319</b> |
| 1.1. Cartografía automatizada                          | 319        |
| 1.2. Geomorfología                                     | 321        |
| 1.3. Climatología                                      | 321        |
| 1.4. Meteorología                                      | 323        |
| <b>2. Robótica</b>                                     | <b>324</b> |
| 2.1. Robots de servicio                                | 324        |
| 2.2. Los robots en la literatura                       | 328        |
| <b>3. Juegos</b>                                       | <b>329</b> |
| 3.1. Ajedrez, un juego difícil                         | 330        |
| 3.2. Go, un juego imposible                            | 332        |
| 3.3. Hacia una solución                                | 333        |
| 3.4. Generación de sólidos con voxels                  | 334        |
| <b>4. Bioinformática</b>                               | <b>336</b> |
| <b>5. La computación en los negocios</b>               | <b>339</b> |
| <b>6. La computación y el arte</b>                     | <b>343</b> |
| <b>Resumen</b>   | <b>344</b> |
| <br>   |            |
| <b>Bibliografía</b>                                    | <b>345</b> |
| <b>Créditos fotográficos</b>                           | <b>350</b> |
| <b>Agradecimientos</b>                                 | <b>351</b> |



---

## Módulo 1

# Computación

Mantén dos verdades en tu bolsa y sácalas de acuerdo  
a la necesidad del momento.  
Por mí el mundo fue creado. Soy polvo y cenizas.  
*Simcha Bunam, siglo XVIII*

¡Oh Dios! Podría estar encerrado en una cáscara de nuez  
y tenerme por rey del espacio infinito.  
*Hamlet, II, 2, 1600 aprox.*

Las criaturas que habitan el mundo de la computación son los datos. Éstos se manipulan para resolver problemas mediante algoritmos. De todos los problemas, algunos se pueden resolver eficientemente, otros se cree que no —aunque no se sabe a ciencia cierta—, y la gran mayoría o no se pueden resolver en un tiempo razonable, o simplemente no se pueden resolver, punto.



> **Nicolás Copérnico**

(1473–1543)

**Golpe 1 (astronomía)**

La Tierra no es el centro del universo. A pesar de que siglos antes que él, sabios hindúes, griegos y musulmanes ya lo habían deducido, fue Copérnico quien sentó uno de los pilares más de la ciencia: el Sol es el centro del Sistema Solar, no la Tierra.



> **Charles Darwin**

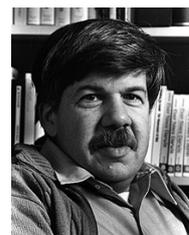
(1809–1882)

**Golpe 2 (biología)**

La teoría de la evolución formulada por Darwin nos dice que todas las especies evolucionaron de unos cuantos ancestros comunes, mediante un proceso de selección natural.

## Introducción: entre el polvo y la divinidad

Hasta la Edad Media, el hombre estaba cómodamente sentado en un trono en el centro del universo, desde el cual creía reinar sobre todas las criaturas, creía haberlo hecho desde el inicio de los tiempos, lo que suponía había sucedido unos 5 000 años atrás. Fue a partir del Medioevo, como narra Stephen Jay Gould en *Time's Arrow Time's Cycle*, cuando el hombre inició un doloroso proceso, en el cual, golpe tras golpe, se derrumbarían sus ilusiones de ocupar un lugar trascendente en el universo. Este gran paleontólogo cita a Sigmund Freud, y señala que las principales disciplinas científicas han contribuido a la reconstrucción del pensamiento humano:



Stephen Jay Gould  
(1941–2002)

La humanidad ha tenido que soportar dos fuertes golpes de la ciencia a su inocente autoestima. El primero sucedió cuando reparó que nuestra Tierra no es el centro del universo, sino sólo un granito de polvo en un universo de magnitud inimaginable. El segundo fue despertar del sueño de sentirse privilegiado, creado de forma especial, y percatarse de que también pertenece al reino animal.

Freud asevera, en una de las afirmaciones menos modestas que se han pronunciado, que su propio trabajo constituye un tercer golpe que posiblemente derribará el último pedestal de la confianza del ser humano en sí mismo: el consuelo de que, a pesar de haber evolucionado del mono, por lo menos posee una mente racional.

El desplome de la confianza que el hombre tenía sobre su supremacía fue provocado por el avance de ciencias como la física, la biología y la psicología, nos dice Gould; habría que agregar a la lista la contribución de la geología y el descubrimiento del tiempo geológico denominado “tiempo profundo”, que privó al hombre de la confortable situación de pertenecer a una Tierra joven, dominada por él. Quedó desamparado en la inmensidad del tiempo, donde la existencia de la humanidad se condensa en una fracción de segundo del último instante. Como bien lo ilustró Mark Twain:

El hombre ha estado aquí unos 32 000 años. El que haya invertido cien millones de años en preparar al mundo para él, es prueba de que para eso fue hecho el mundo. Supongo, no estoy seguro. Si la torre Eiffel representara la edad del mundo, la capa de pintura de la esfera en su punta representaría la parte del tiempo en la que el hombre ha existido; cualquiera percibiría que esa capa fue para la cual la torre fue construida. Supongo, no estoy seguro.

Una interesante metáfora acerca del tiempo profundo aparece en el libro *Basin and Range* de John McPhee: la historia de la Tierra equivale a la distancia de la nariz del rey a la punta de su brazo extendido, como



» La Tierra vista desde el espacio.



Charles Lyell  
(1797–1875)

la antigua medida de la yarda inglesa. Con frotar una vez su dedo medio con una lima de uñas, borra toda la historia de la humanidad.

Valdría la pena recordar que la edad de la Tierra se estima hoy en día en unos 4 570 millones de años, aproximadamente la tercera parte de la edad del universo, estimada en 13 700 millones de años.

En 1830, uno de los padres de la geología, Charles Lyell, querido amigo de Darwin, explicó acertadamente la liga metafórica entre el tiempo profundo y la amplitud del espacio en el cosmos de Newton:

Las visiones sobre la inmensidad del tiempo pasado, desenmascaradas por la filosofía newtoniana respecto al espacio, fueron demasiado vastas como para despertar ideas de lo sublime, sin que éstas se mezclaran con un doloroso sentimiento de nuestra incapacidad para concebir un plan de tan infinito alcance. Mundos que alcanzan a verse más allá de otros y que se encuentran separados por distancias inmedibles, y aún mas allá, otros innumerables sistemas que apenas se alcanzan a vislumbrar en los confines del universo visible.

Para el hombre, cuando observa el macrocosmos, la Luna, el Sol, la Tierra y todo el mundo visible, no es más que un punto insignificante en la enorme cavidad del universo. Y cuando el hombre dirige su mirada hacia abajo, al microcosmos, encuentra otro universo en la infinitud de lo pequeño. En el espesor de un cabello humano cabe un millón de átomos de carbono. Una sola gota de agua puede contener 2 000 trillones de átomos de oxígeno (un 2 seguido de 21 ceros). Más aún, si comparamos un átomo con una catedral, el núcleo no sería más grande que una mosca. Entre estos dos infinitos, el hombre que antes creía dominar el universo, percibe así su insignificancia.



> **Sigmund Freud**  
(1856–1939)

**Golpe 3 (psicología)**

El psicoanálisis de Freud nos habla del subconsciente, los procesos mentales que no se llevan a cabo conscientemente, lo que nos lleva a dudar de nuestros razonamientos.



> **James Hutton**  
(1726–1797)

**Golpe 4 (geología)**

El padre de la geología moderna, Hutton, sintetizó la noción de tiempo geológico con su famosa frase "no encontramos vestigio de un inicio, ni prospecto de un fin".



Max Planck  
(1858–1947)



Werner Heisenberg  
(1901–1976)



Erwin Schrödinger  
(1887–1961)

En 1900, la autoestima de la humanidad recibe otro golpe con las investigaciones de Max Planck, que conducen posteriormente a la formulación de la mecánica cuántica en 1926, por un grupo de científicos, entre los que se encuentran Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger.

La teoría cuántica reveló una limitación fundamental en la capacidad del hombre para predecir el futuro: el universo es probabilístico, no determinístico como se pensaba. Es decir, antes del surgimiento de la mecánica cuántica se creía que cada acción ocasionaba una reacción predecible que era posible determinar en un principio si se conocían todos los detalles de una situación en un momento dado. La mecánica clásica afirma que si se conoce el valor de todas las variables que influyen, por ejemplo, en el movimiento de un automóvil, tales como su velocidad, dirección, peso, volumen, estado de los neumáticos y temperatura ambiente, entre otras, es posible predecir con precisión dónde estará en el futuro y en qué condiciones. El universo no es más que una enorme máquina con un comportamiento complejo, sin duda, pero predecible. La mecánica cuántica, en cambio, postula que los fenómenos observables poseen un comportamiento influido permanentemente por el azar, y que el hecho mismo de pretender medir las variables que influyen sobre ellos los altera irremediabilmente. “Dios no juega a los dados con el universo”, afirmaría Albert Einstein, al pretender refutar la teoría que su propio trabajo contribuyó a fundar.

En la primera mitad del siglo XX, el ego homocéntrico recibe una nueva lección. Ahora son las matemáticas, en especial la lógica, las que hacen su aparición a través del trabajo de Kurt Gödel. Su legado ha tenido un enorme impacto en el pensamiento científico y filosófico. En 1931, a la edad de 25 años, demostró sus “teoremas de incompletitud”, que señalan que ni siquiera en el mundo de las matemáticas es posible que el hombre lo sepa todo. Existen verdades que no se pueden demostrar, y cualquier sistema formal, lo suficientemente poderoso como para hablar de números y operaciones, se verá limitado en algún punto necesariamente.

A los golpes al ego humano asestados por la física, la biología, la psicología, la geología y las matemáticas, se añaden los de la computación. Mientras el hombre empieza a soñar con robots y supercomputadoras, en 1936 otro jovencito de 24 años, Alan Turing, publica el artículo “On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem”, que cuestiona las capacidades omnipotentes del ser humano para resolver problemas. Con este trabajo y otros de Alonzo Church



> **Isaac Newton**  
(1643–1727)  
**Golpe 5 (física)**

Newton es considerado por muchos el mayor científico de todos los tiempos. Entre sus numerosas contribuciones, la mecánica clásica muestra que los cuerpos celestiales y los de la Tierra cumplen las mismas leyes, y abre las puertas para comprender la inmensidad del universo.

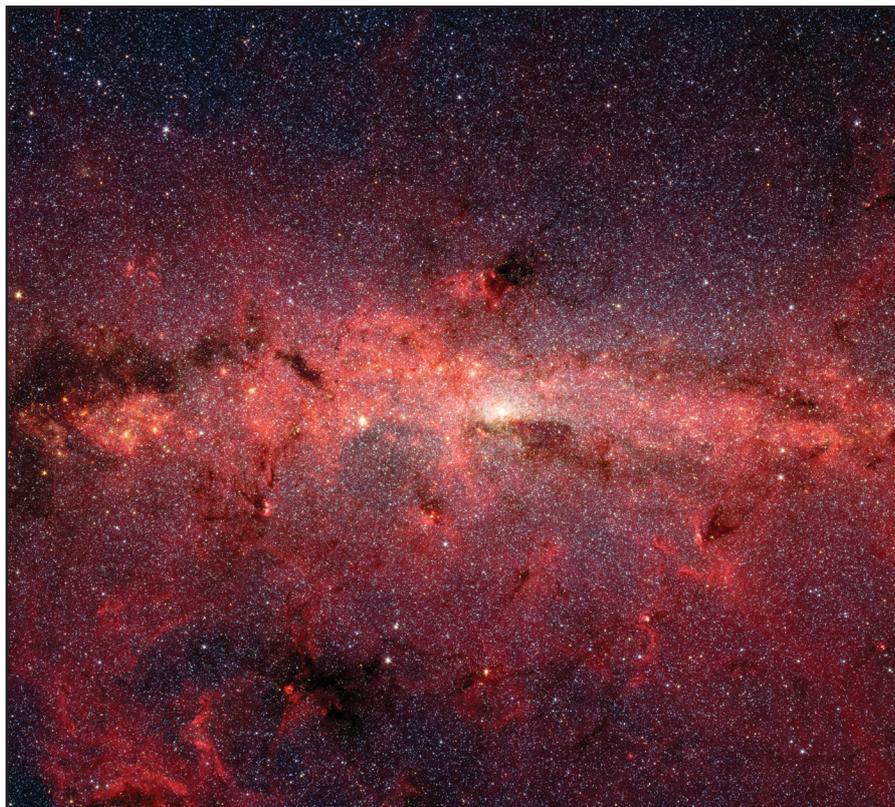
> **Golpe 6 (física cuántica)**

La infinitud de lo pequeño y la imposibilidad de predecir el futuro

y Stephen Kleene se descubre que ni siquiera con la ayuda de estas sorprendentes máquinas, en apariencia invencibles, el hombre volverá a sentir que reina sobre el universo. A pesar de que existen muchos problemas que se pueden resolver con la ayuda de las computadoras, el universo de problemas sin solución es infinitamente más grande, no sólo para las computadoras del presente, sino aun para las que se inventen en el futuro.

En 1965, también en el campo de la computación, un estudio de Hartmanis y Stearns se concentró en cuánto tiempo requiere resolver un problema, independientemente de si éste es computable o no. Es entonces cuando descubrimos que del pequeño mundo de los problemas computables, la gran mayoría está fuera de nuestro alcance, ya que tomaría en resolverse más tiempo que la edad del universo, inclusive con las más veloces computadoras que el ser humano posee y con las mejores que pueda llegar a inventar.

Hoy en día nos encontramos muy lejos de la imagen antropocéntrica del mundo que prevaleció hasta el Medioevo, donde el hombre se situaba a sí mismo en el núcleo del universo, con el suelo firme de la Tierra bajo sus pies y las esferas celestes contemplándolo desde su inmensidad, habitadas por Dios y sus ángeles. Pascal, aterrorizado, decía: “El eterno silencio de estos espacios infinitos me llena de temor”. Pero ésta es justamente la grandeza del hombre: ser capaz de observar estos abismos, de estudiarlos, de temerles y maravillarse con ellos.



> **Kurt Gödel**  
(1906–1978)  
**Golpe 7 (matemáticas)**  
No existe ningún sistema formal suficientemente poderoso, que sea a la vez completo y consistente.



> **Alan Turing**  
(1912–1954)  
**Golpe 8 (computación)**  
Existen límites a lo que podemos computar, y la mayoría de los problemas computables jamás los podremos resolver, debido a su enorme dificultad.

» La Vía Láctea.



## 1. Problemas

---

Hemos mencionado que los datos son las criaturas que habitan el mundo de la computación y que, por lo tanto, los problemas que en él encontramos tienen que ver con el procesamiento y almacenamiento de datos. Comencemos este tema entendiendo lo que es un problema y cómo se presenta en la vida cotidiana.

### 1.1. El problema de los regalos de Arcadio

---

#### 1.1.1. Una situación de la vida cotidiana

Arcadio no tenía aún una idea clara acerca de qué regalo sorpresa debía comprarle a Úrsula, pero pensó que una vez que estuviera en la tienda, algo se le ocurriría. Desde que entró, en efecto, la isla de joyería de fantasía le dio varias ideas. Podía comprarle una pulsera de cristales, un dije de corazón o un par de aretes. De hecho pensó que no necesariamente tenía que ser un solo regalo; podrían ser varios, siempre y cuando no excedieran los mil pesos que le prestó su madre.

Ahora el problema era decidir cuál o cuáles eran los regalos adecuados. Arcadio no tardó en percatarse de la primera dificultad. Había muchas posibilidades: elegir tres y comprar uno (tres posibilidades), comprar dos de ellos (tres posibilidades, dependiendo de cuál elija no comprar), comprar los tres (una posibilidad), e inclusive la salida fácil de no comprar ninguno. Para cada una de estas ocho posibilidades, tendría que calcular si le alcanzaban sus mil pesos.

Mientras reflexionaba cuánto tiempo le tomaría evaluar tantas opciones, le surgió una duda: ¿no le había regalado un par de aretes en su cumpleaños hace un año el ex novio de Úrsula? Fue entonces cuando se dio cuenta de que no tenía mucho caso evaluar cada una de las posibilidades antes de conocer los gustos de Úrsula y estar seguro de qué regalos apreciaría más.

Después de 20 minutos de no saber qué hacer, decidió hablarle a Diana, la mejor amiga de Úrsula, para preguntarle su opinión. En vez de ayudar a Arcadio a decidirse por alguna de las opciones que había considerado, Diana le dio nuevas alternativas: “¿Qué tal un CD de Robbie Williams o el DVD de la última película de Harry Potter?”, sugirió. Bueno, ahora la cosa estaba peor. En efecto, la idea de Diana era buena y Arcadio encontró fácilmente el DVD de la última película de la saga de Harry Potter y los últimos tres discos de Robbie Williams. Ahora el número de opciones era mayor. En el vértigo que comenzó a sentir, se le ocurrió que quizá sería mejor comprarle cosas pequeñas, pero muchas. Y ya totalmente confundido, pensó que, dado que no tenía idea de qué hacer, mejor aprovecharía para comprarse unos audífonos que le hacían falta y, con lo que sobrara, le compraría a Úrsula el regalo más costoso.

« El cometa Hale–Bopp en 1997.