



## Science in Computational Sciences

### Ciencia en las Ciencias Computacionales

Jameson Cerrosen<sup>1</sup>, Jia Pong<sup>2</sup>

Fundación Nacional de Ciencia. <sup>1</sup>[jcerrosen\(AT\)nsf.gov](mailto:jcerrosen(AT)nsf.gov), <sup>2</sup>[jpong\(AT\)nsf.gov](mailto:jpong(AT)nsf.gov)

#### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

*Tipo de artículo:* Reflexión.

*Historia del artículo*

Recibido: 10-08-2012

Correcciones: 27-09-2012

Aceptado: 15-10-2012

*Categories and Subject Descriptors*

K.3.2 [Computers and Education]:  
Computer and Information Science  
Education – Computer science  
education.

*General Terms*

Computer Science.

*Keywords*

Science, Computer Science,  
Computational Science, scientific  
method, theory, experimentation

*Palabras clave*

Ciencia, Informática, Ciencias  
Computacionales, método científico,  
teoría, experimentación.

#### ABSTRACT

The existing theory in relation to science presents the physics as an ideal, although many sciences not approach the same, so that the current philosophy of science-Theory of Science- is not much help when it comes to analyze the computer science, an emerging field of knowledge that aims investigation of computers, which are included in the materialization of the ideas that try to structure the knowledge and information about the world. Computer Science is based on logic and mathematics, but both theoretical research methods and experimental follow patterns of classical scientific fields. Modeling and computer simulation, as a method, are specific to the discipline and will be further developed in the near future, not only applied to computers but also to other scientific fields. In this article it is analyze the aspects of science in computer science, is presenting an approach to the definition of science and the scientific method in general and describes the relationships between science, research, development and technology.

#### RESUMEN

La teoría existente en relación con la ciencia presenta a la física como un ideal, aunque muchas ciencias no se acercan al mismo, por lo que la actual Filosofía de la Ciencia –Teoría de la Ciencia– no es de mucha ayuda cuando se trata de analizar a las Ciencias Computacionales, un campo emergente del conocimiento que tiene como objeto de investigación a los computadores, los cuales están incluidos en la materialización de las ideas que tratan de estructurar el conocimiento y la información acerca del mundo. Las Ciencias Computacionales tienen su base en la lógica y en las matemáticas, pero tanto sus métodos de investigación teóricos como los experimentales siguen los patrones de los campos científicos clásicos. El modelado y la simulación por computador, como método, son específicos para la disciplina y se desarrollarán aún más en el futuro próximo, no sólo aplicados a los computadores sino también a otros campos científicos. En este artículo se hace un análisis a los aspectos de ciencia en las Ciencias Computacionales, se presenta un acercamiento a la definición de ciencia y del método científico en general y se describen las relaciones entre ciencia, investigación, desarrollo y tecnología.

© 2012 IAI. All rights reserved.

#### 1. INTRODUCCIÓN

No es tan obvio, como su nombre podría sugerir, que las Ciencias Computacionales califiquen como *ciencia* en el sentido en el que la teoría tradicional de la ciencia define el término [1-4]. Las Ciencias Computacionales –CS por sus siglas en inglés– es una disciplina joven y necesariamente tiene su origen en los diversos principios de las matemáticas, la física y ciencias *clásicas* similares, que a su vez tienen sus orígenes en la filosofía de la antigua Grecia.

Al emerger en los tiempos modernos –el primer computador electrónico digital fue construido en 1940–, las CS tienen necesariamente en el fondo a otras ciencias ya existentes; además, sus fundamentos se basan en una amplia variedad de disciplinas [5-7] y consecuentemente su estudio requiere la utilización de conceptos de diversos campos del conocimiento. Estas ciencias

integran a la teoría, la práctica, la abstracción y al diseño. Emergen en medio de un desarrollo histórico que ha conducido a la aparición y difusión de diversas *ciencias*, no sólo porque los medios se han hecho más convenientes y eficaces sino también por un incremento en la necesidad de lograr una visión global del mundo, actualmente dominada por el reduccionismo.

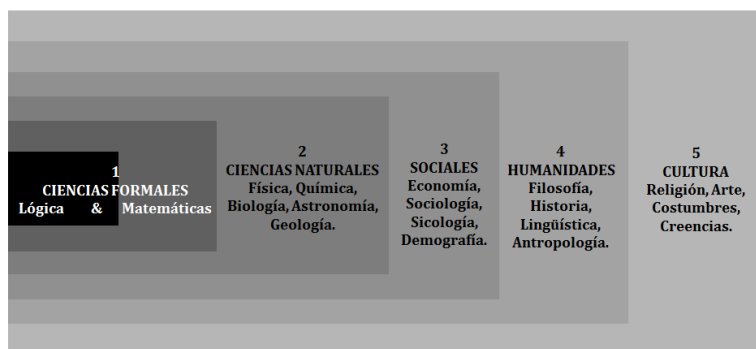
#### 2. QUÉ ES CIENCIA

Según Aristóteles el conjunto es más que la suma de sus partes, pero hablando de *ciencia* esto en realidad significa pluralidad de diferentes ciencias, aunque existen diferencias entre las ciencias. En [8] y [9] se encuentra algunas clasificaciones a la ciencia, pero definirla no es ni simple ni ambiguo. Por ejemplo, la historia, la lingüística y la pedagogía a menudo son catalogadas como ciencias, pero no existe una aceptación general.

## 2.1 Las Ciencias Clásicas

La [Figura 1](#) sugiere que las ciencias tienen áreas específicas de validez. Las ciencias formales —las más abstractas y al mismo tiempo las más exactas— conforman un componente con diversos grados de importancia para las demás ciencias. Aunque son esenciales para la física, son menos importantes para la química y la biología y su importancia sigue disminuyendo hacia las regiones exteriores de este sistema. Naturalmente, el razonamiento lógico como base de todo el conocimiento humano está presente en cada componente, con mayor énfasis en la filosofía. La estructura propuesta se puede ver analógicamente como una vista a través de un microscopio. Con la más alta resolución se puede llegar a la región más interna; la

lógica no sólo es la herramienta que se utiliza para llegar a conclusiones, es al mismo tiempo el objeto de investigación. A pesar de que buena parte de las matemáticas se puede reducir a la lógica —Frege, Russell y Whitehead— no es posible la reducción completa. Al alejarse del núcleo, las regiones interiores se ven como requisitos para las exteriores. Las ciencias naturales utilizan a las formales como herramientas, sin cuestionar su estructura interna. De esta manera la información sobre la estructura más profunda de las matemáticas y de la lógica está oculta desde el exterior. De la misma manera, la física es un requisito previo para la química, que es un nivel oculto en el interior de la biología, y así sucesivamente.



**Fig. 1** Acercamiento a la definición de ciencia

**Tabla 1** Ciencias, objetos y métodos

CIENCIAS	Objetos	Métodos dominantes
	<i>Simple</i>	<i>Reduccionismo</i>
Ciencias Formales	Objetos abstractos: Proposiciones, números,...	Deductivo
Ciencias Naturales	Objetos naturales: Cuerpos físicos, campos e interacciones, organismos vivos,...	Deductivo-hipotético
Ciencias Sociales	Objetos sociales: Personas, grupos, sociedad,...	Deductivo-hipotético + Hermenéutico
Humanidades	Objetos culturales: Ideas humanas, acciones y relaciones, lenguajes, artefactos,...	Hermenéutico
	<i>Complejo</i>	<i>Holístico</i>

La idea básica de la [Tabla 1](#) es mostrar de forma esquemática la relación entre los tres grupos principales de las ciencias: Formales, Naturales y Sociales, así como las conexiones con los sistemas de pensamiento representados por las Humanidades. Además, el cuerpo del conocimiento humano, científico y especulativo se encuentra inmerso e impregnado por el entorno cultural.

## 2.2 Ciencias pertenecientes a diversos campos

El desarrollo del pensamiento humano paralelo al desarrollo de la sociedad humana ha propiciado el surgimiento de ciencias que no pertenecen a ninguno de los tipos clásicos, sino más bien que comparten partes comunes con algunas de ellas. Algunas ciencias modernas son interdisciplinarias, de tipo *ecléctico*. Se trata de una tendencia para buscar sus métodos y preguntas incluso en zonas bastante amplias. Esto puede ser el resultado de que las comunicaciones a través de las fronteras de los diferentes campos científicos actualmente son más fáciles y más intensas que antes. Las Ciencias Computacionales,

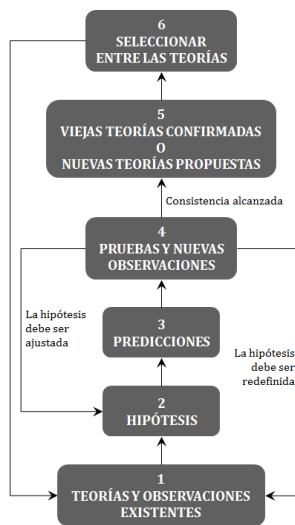
por ejemplo, incluyen el campo de la Inteligencia Artificial, que tiene sus raíces en las Ciencias Formales, pero utiliza a la física, la química y la biología, e incluso tiene partes donde la medicina y la psicología son muy importantes.

Al parecer, este es un cambio de paradigma que prepara transformaciones radicales y sorprendentes en la estructura de las disciplinas científicas, la tecnología incluida, y en la forma como las impregna el tratamiento de la información. En particular, a medida que la humanidad sea más consciente de los procesos de la información, que ocurren al hacer ciencia, ésta se encontrará cada vez más en una meta-posición en la que observar, experimentar, teorizar, probar y archivar, implicará comprender estos procesos para crear los sistemas que requiere la ciencia a nivel de objetos. Entonces las fronteras entre la empresa de la ciencia en su conjunto —la adquisición y organización de conocimientos acerca del mundo— y la IA —la

comprensión de cómo se adquiere y organiza el conocimiento— serán cada vez más borrosas. Pero será en esas fronteras donde el hombre podrá encontrar la nueva visión sintética —holística— del mundo que está a punto de surgir en el futuro.

### 3. EL MÉTODO CIENTÍFICO

El método científico es el esquema lógico utilizado por los científicos que buscan respuestas a las preguntas formuladas en la ciencia. Se utiliza para producir teorías científicas, incluyendo las meta-teorías científicas —teorías sobre teorías— y a las teorías utilizadas para el diseño de las herramientas para producir teorías —instrumentos, algoritmos, etc.—. La versión simple del método científico se observa en la [Figura 2](#).



**Fig. 2** Naturaleza iterativa del método hipotético-deductivo

1. Plantear la cuestión en el contexto del conocimiento existente. Puede ser un asunto nuevo que las viejas teorías pueden responder —generalmente es el caso—, o cuestiones que exigen la formulación de una nueva teoría.
2. Formular una hipótesis como respuesta tentativa.
3. Deducir consecuencias y hacer predicciones.
4. Probar la hipótesis en un campo teórico/experimental específico. La nueva hipótesis se debe demostrar para que ocupe un lugar en la actual visión del mundo —1, *ciencia normal*, según Kuhn—. Las hipótesis que conducen a contradicciones y que exigen un cambio radical en el marco teórico existente se deben probar con cuidado. Con el fin de sustituir al paradigma científico existente, la nueva hipótesis debe ser fructífera y ofrecer considerables ventajas. De acuerdo con Kuhn esto se llama *revolución científica* y ocurre raras veces. Como regla general, el ciclo 2-3-4 se repite con modificaciones de la hipótesis hasta que se obtiene un consenso, lo que conduce a 5. Si se encuentran discrepancias importantes el proceso debe comenzar desde el principio, 1.
5. Cuando la hipótesis es consistente se convierte en teoría y proporciona un conjunto coherente de

proposiciones que define una nueva clase de fenómeno o un nuevo concepto teórico. Los resultados se deben publicar. En ese momento, la teoría es objeto de los procesos de *selección natural* entre teorías en competencia —6—. Entonces, la teoría se convierte en un marco en el que se explican las observaciones y hechos teóricos y se hacen predicciones. El proceso puede comenzar desde el principio, pero el estado 1 ha cambiado para incluir a la nueva teoría/mejoramiento de la vieja teoría.

La [Figura 2](#) describe de forma general la estructura lógica del método científico utilizado en el desarrollo de nuevas teorías. Como sugiere este diagrama de flujo, la ciencia está en un estado de cambio y desarrollo permanente y una de las cualidades importantes es su carácter provisional: está sujeta a continua re-examinación y auto-corrección, lo que es necesario para comprender que la lógica de la ciencia es recursiva. Antes de cada observación/experimentación/prueba-teórica existe una hipótesis que tiene sus orígenes en el cuerpo de conocimiento existente. Todo resultado experimental/observacional tiene cierta visión del mundo integrada, como lo indica Feyerabend [10] al expresar que todos los datos experimentales son *teoría contaminada*. Aquí también es interesante mencionar que el diseño de un nuevo equipo o procedimiento experimental debe coincidir con el esquema: (1) comenzar desde el marco teórico/experimental existente, (2) formular el problema, (3) deducir las consecuencias, (4) probar si funciona de acuerdo con lo esperado y (5-6) aceptar. Tan pronto como un equipo o método está diseñado y se utiliza como herramienta para probar nuevas hipótesis, se supone que funciona de acuerdo con las especificaciones de diseño; por lo tanto, la información acerca de su estructura interna está oculta. Lo mismo es cierto para el contexto teórico existente alrededor de una teoría en desarrollo, el cual se da por sentado.

El esquema del método científico de la [Figura 2](#) es una abstracción y una simplificación. Los críticos del método hipotético-deductivo dirían que, de hecho, no existe tal cosa como el método científico. Para ellos, el término significa un conjunto concreto de normas que define la forma de proceder en el planteamiento de nuevas preguntas pertinentes y para formular hipótesis exitosas. Por supuesto, no se ha encontrado esta mágica receta. Aun así, una importante ventaja del método científico es que es imparcial, porque no se le tiene que creer a un investigador en particular; en principio, se puede repetir el experimento y determinar si ciertos resultados son válidos o no. La cuestión de la imparcialidad está estrechamente relacionada con la apertura y la universalidad de la ciencia, que son sus cualidades fundamentales. Una teoría se acepta con base en los resultados obtenidos a través del razonamiento lógico, las observaciones y/o experimentos. Los resultados obtenidos utilizando el método científico tienen que ser reproducibles. Si las reivindicaciones originales no se verifican, las causas de estas discrepancias se deben estudiar exhaustivamente.

Todas las verdades científicas son provisionales, pero para que una hipótesis logre el estado de teoría es necesario que se gane la confianza de la comunidad científica. En los campos donde no existen teorías aceptadas comúnmente —como por ejemplo, la explicación del proceso de la creación del universo, donde la hipótesis del *big bang* es la más popular— el número de hipótesis alternativas puede constituir el cuerpo de conocimiento científico.

#### 4. CIENCIA, INVESTIGACIÓN, TECNOLOGÍA

En sus reflexiones acerca de la ciencia y la tecnología Aristóteles identifica algunas diferencias clave que aún se citan e incluso utilizan frecuentemente para analizar ambas áreas. Según él, existen importantes diferencias entre la ciencia —*episteme*— y tecnología —*techne*— en sus objetos, principios de cambio, fines, objetivos y actividades. Las recientes distinciones agregan métodos, formas de innovación, tipos de resultado y la perspectiva del tiempo. En la [Tabla 2](#) se relacionan estas distinciones.

**Tabla 2** Distinciones entre ciencia y tecnología

Características	Ciencia	Tecnología
Objetos	Estáticos	Modificables
Principios de cambio	Interno	Externo
Fines	Generales	Concretos
Actividades	Teoría: El fin en sí mismo	Poiesis: El fin en alguna parte o en un modelo concreto
Método	Abstracción	Complejo
Procesos	Conceptualizado	Optimizado
Formas de innovación	Descubrimiento	Innovación
Tipos de resultado	Leyes	Reglas
Perspectiva del tiempo	A largo plazo	A corto plazo

Estas distinciones binarias tradicionales parecen, sin embargo, fallar cuando se aplican a la ciencia contemporánea, porque los conceptos fundamentales de ciencia son obsoletos. La ciencia de hoy es mucho más compleja y heterogénea que en la época de Aristóteles, un hecho que la teoría moderna de la ciencia debe tener en cuenta. Es por ello que la filosofía de la ciencia necesita alcanzar rápidamente una comprensión más profunda y realista de las ciencias contemporáneas. Es el momento de un cambio de paradigma en la filosofía de la ciencia.

#### 5. LAS CIENCIAS COMPUTACIONALES

De acuerdo con el actual punto de vista, las Ciencias Computacionales se pueden situar en un contexto más amplio de la Informática [11], que además también abarca a la Ingeniería Informática, a la Ingeniería de Software y a los Sistemas de Información. Mientras que la Informática se define como el estudio sistemático de procesos algorítmicos que describen y transforman información, es decir, su teoría, análisis, diseño, eficiencia, implementación y aplicación [12], las Ciencias Computacionales son:

1. El estudio de los fenómenos relacionados con los computadores, Newell, Simon y Perlis, 1967.
2. El estudio de las estructuras de la información, Wegner, 1968, Curriculum 68.
3. El estudio y la gestión de la complejidad, Dijkstra, 1969 [13].
4. La mecanización de la abstracción, Aho y Ullman 1992 [12, 14].
5. Un campo de estudio que se ocupa de las disciplinas teóricas y aplicadas en el desarrollo y uso de los computadores para el almacenamiento y procesamiento de la información, las matemáticas, la lógica, la ciencia y muchas otras áreas [5].

La primera definición refleja una tradición empírica, porque afirma que las Ciencias Computacionales tienen

que ver con el estudio de una clase de fenómenos. La segunda y la tercera reflejan una tradición matemática, debido que los algoritmos y las estructuras de datos son dos abstracciones de los fenómenos de estas Ciencias. La segunda definición fue utilizada por Wegner como abstracción unificadora. Este punto de vista tiene sus raíces históricas en la teoría de la información e influyó el desarrollo del Curriculum 68, un documento utilizado en el posterior desarrollo de programas de pregrado en Ciencias Computacionales. Además, está implícito en el uso de los términos respectivos en alemán y francés de Informatik e Informatique para referirse a esta disciplina. El término británico Computer Science tiene una orientación *empírica* y en alemán y francés es *abstracta*.

Esta diferencia parece apoyar la idea de que aún persisten características del empirismo británico del siglo XIX y de la abstracción continental. La visión de que la información es la idea central de las Ciencias Computacionales es a la vez científica y sociológicamente indicativa. Científicamente, sugiere una visión de estas ciencias como una generalización de la teoría de la información, que tiene que ver no sólo con su transmisión sino también con su transformación e interpretación. Sociológicamente, sugiere una analogía entre la revolución industrial, que se refiere a la utilización de la energía y la revolución informática que se refiere a la utilización de la información. La cuarta definición refleja el nivel de complejidad de los problemas ingenieriles en los actuales sistemas de hardware y software.

De acuerdo con Hartmanis [15], en la década de 1950 las Ciencias Computacionales estaban dominadas por los paradigmas de investigación empírica, en la década de 1960 por los de investigación matemática y en los 70 por los orientados a la ingeniería. La diversidad de estos paradigmas de investigación puede ser responsable de las divergencias de opinión acerca de la naturaleza de la investigación en estas Ciencias. La cuestión central que

subyace a toda la computación es: Qué se puede automatizar eficientemente. La lógica es importante para la computación no sólo porque es la base de los lenguajes de programación, o porque su investigación se presenta en los límites del cálculo automático, sino también porque se centra en las cadenas de símbolos —también codificadas como números— para ser interpretadas como datos y como programas.

### 5.1 Sub-áreas de las Ciencias Computacionales

Dijkstra opinaba que denominar *Ciencias Computacionales* a este campo era como denominar *Ciencia Bisturí* al campo de la cirugía, además, que los departamentos de Ciencias Computacionales están expuestos a una presión permanente para enfatizar en la *Computación* y subestimar la *Ciencia*. Esta apreciación coincide con la inclinación a considerar la importancia de los computadores exclusivamente por su capacidad como herramientas. De acuerdo con [11] las sub-áreas de estas Ciencias son:

- Matemática discreta
- Fundamentos de programación
- Complejidad computacional
- Lenguajes de programación
- Análisis algorítmico
- Arquitectura y organización
- Sistemas operativos
- Computación centrada en la red
- Interacción humano-computador
- Computación gráfica y visual
- Sistemas inteligentes
- Gestión de la información
- Métodos formales
- Ingeniería de software
- Aspectos sociales y profesionales
- Métodos numéricos

Esta lista no es definitiva y se actualiza continuamente en la medida que se presentan los desarrollos. Los nuevos aportes surgen debido a las variaciones en estos campos y a que cada vez surgen nuevas formas y necesidades de gestionar la información. Las Ciencias Computacionales se ocupan del uso de los computadores, la tecnología y el software, y también abarcan al pensamiento matemático abstracto e incluyen elementos ingenieriles. El componente matemático se representa en la búsqueda de soluciones a los problemas, o para demostrar que no existen soluciones, mientras que el elemento ingenieril exige habilidades de diseño.

### 5.2 El método científicos en las Ciencias Computacionales

En estas Ciencias básicamente se encuentran rasgos característicos de los métodos científicos clásicos y el esquema de la Figura 2 también es aplicable para ellas. Las Ciencias Computacionales contienen elementos de diferentes áreas científicas de la Figura 1, principal focalizadas en los componentes 1 y 2. Lo que es específico para ellas es que su objeto de investigación son artefactos —fenómenos relacionados con computadores— que cambian *paralelamente* con el desarrollo de las teorías

que los describen y *simultáneamente* con la creciente experiencia práctica de su uso. Un computador de la década de 1940 no es lo mismo que uno de 1970, que a su vez es diferente de uno del 2010. Incluso definir qué es un computador actualmente es una tarea que está lejos de ser trivial. Las Ciencias Computacionales se pueden dividir en teóricas, experimentales y de simulación, que son tres áreas metodológicamente diferentes. Sin embargo, estas áreas tienen un método común: el modelado.

El modelado es un proceso que ocurre en la ciencia, en el sentido de que los fenómenos de interés se deben simplificar para poderlos estudiar. Este es el primer paso de la abstracción. Un modelo debe tener en cuenta las características relevantes del fenómeno en cuestión, lo que quiere decir, obviamente, que se debe conocer cuáles características son relevantes. Esto es posible porque siempre existe un terreno teórico recorrido del que se parte cuando se hace ciencia. Un modelo simplificado de un fenómeno significa que se tiene una corta descripción en un lenguaje simbólico, que permite predecir las consecuencias observables/medibles de los cambios propuestos en el sistema. La teoría, el experimento y la simulación son modelos de fenómenos más o menos detallados. Las cuestiones que se deben responder durante el proceso de modelado son:

- ¿Cómo modelar? Es decir, qué se debe tener en cuenta, qué es secundario, si es necesario describir indirectamente las características desatendidas y qué formalismo utilizar.
- ¿El modelo es apropiado? Sirve para su propósito, posee la resolución adecuada, tiene el nivel de abstracción necesario.
- ¿En qué aspectos de sus características/comportamientos difiere el modelo de lo que se esperaba?
- ¿De qué manera difiere de la *realidad* o de otros modelos existentes o resultados experimentales?
- ¿Se puede validar? ¿Los resultados son válidos para el propósito previsto?
- A veces existen algunas restricciones especiales que el modelo debe respetar, como por ejemplo la conservación necesaria. Los modelos conservativos se construyen para los sistemas relacionados con la seguridad. Esto significa que hay que suponer que los parámetros no controlables —los que no están modelados explícitamente, o los que están por fuera del sistema modelado— tienen los peores valores posibles.

Los nuevos modelos se deben contrastar con los modelos previos conocidos en casos específicos y analizar sus puntos fuertes y débiles.

### 5.3 Ciencia Computacional Teórica

Esta ciencia se adhiere a las tradiciones de la lógica y las matemáticas y se puede concluir que sigue la misma metodología clásica de las teorías de construcción, como sistemas lógicos con definiciones estrictas de objetos —axiomas— y operaciones —reglas— para

derivar/demostrar teoremas. Las ideas recurrentes clave fundamentales para la computación son [12]: (1) los modelos conceptuales y formales —incluyendo los modelos de datos, los algoritmos y la complejidad—, (2) diferentes niveles de abstracción y (3) la eficiencia. Los modelos de datos [14] se utilizan para formular diferentes conceptos matemáticos. En las Ciencias Computacionales un modelo de datos tiene dos aspectos: (1) los valores que pueden tomar los datos y (2) las operaciones sobre los datos. Algunos típicos modelos de datos son:

- **Árbol.** La abstracción que estructuran los modelos de datos jerárquicos.
- **Listas.** Se pueden ver como un caso especial de árbol pero con algunas operaciones adicionales, como *push* y *pop*. Las cadenas de caracteres son un tipo de lista.
- **Conjuntos.** Es el modelo de datos más importante de las matemáticas. Cada concepto en matemáticas, desde los árboles hasta los números reales, se puede expresar como un tipo especial de conjunto.
- **Relacional.** Es la organización de datos en colecciones de tablas de dos dimensiones.
- **Grafos.** Es una generalización del modelo de datos de árbol: direccionado, no direccionado y etiquetado.
- **Patrones, autómatas y expresiones regulares.** Un patrón es un conjunto de objetos con cierta propiedad reconocible. El autómata es un grafo basado en patrones de especificación. La expresión regular es álgebra para describir el mismo tipo de patrones que pueden describir los autómatas.

Las teorías crean metodologías, lógicas y diferentes modelos semánticos para ayudar a diseñar programas, para razonar acerca de ellos, para probar su correctitud y para orientar el diseño de nuevos lenguajes de programación. Sin embargo, las Ciencias Computacionales Teóricas no compiten unas con otras como para explicar mejor la naturaleza fundamental de la información. Tampoco son nuevas teorías desarrolladas para reconciliarse con los resultados experimentales que revelan anomalías inexplicables o nuevos fenómenos inesperados, como en la física. En estas ciencias no se cuenta con antecedentes de experimentos críticos que decidan entre la validez de las diversas teorías, como sí los hay en las ciencias físicas. El modelo matemático básico subyacente a la computación digital no se ve seriamente desafiado por la teoría o la experimentación.

Existe un importante esfuerzo para definir y probar los posibles límites de la computación, pero incluso aquí el modelo básico no se cuestiona. La clave de este esfuerzo es demostrar que ciertos cálculos no se pueden realizar dentro de los límites de los recursos propuestos. La solución de ciertos problemas podría tener amplias implicaciones y podría conducir a una comprensión más profunda de los límites de la capacidad de razonamiento humano-computador. En general, la *separación* es uno de los problemas abiertos más importantes en las Ciencias Computacionales Teóricas [7]. Además, los resultados teóricos son juzgados por las ideas que revelan acerca de la naturaleza matemática de varios modelos

computacionales y/o por su utilidad para la práctica y facilidad de aplicación. Los modelos interesados en conceptualizar y capturar los aspectos de las Ciencias Computacionales para obtener conocimientos en los problemas de diseño tampoco ayudan al razonamiento ni a la comunicación de los problemas relevantes.

El diseño y el análisis de algoritmos es un tema central en las Ciencias Computacionales Teóricas. Los métodos se desarrollan para el diseño de algoritmos, las medidas se definen para varios recursos computacionales, se exploran las compensaciones entre los diferentes recursos y los límites superior e inferior de los recursos se demuestran para las soluciones de diversos problemas. En esta cuestión las medidas de desempeño están bien definidas y los resultados se pueden comparar fácilmente en algunas de ellas —que pueden o no reflejar completamente su rendimiento sobre los problemas típicos—. Los experimentos con algoritmos se utilizan para probar las implementaciones y para comparar su rendimiento *práctico* en los subconjuntos de problemas considerados importantes.

Algunos de los principales temas metodológicos en las Ciencias Computacionales Teóricas, heredados de las matemáticas, son:

- **Iteración.** La forma más sencilla para realizar repetidamente una secuencia de operaciones es utilizar una construcción iterativa, como las declaraciones *for* o *while*.
- **Inducción.** Las definiciones y pruebas inductivas utilizan bases y pasos inductivos para abarcar todos los casos posibles.
- **Recursividad.** Los procedimientos recursivos se invocan a sí mismos ya sea directa o indirectamente. Es una auto-definición en la que un concepto se define en términos de sí mismo. Por ejemplo, una lista se puede definir como una lista vacía o como un elemento seguido de una lista. Esto no involucra circularidad, porque las sub-partes autodefinidas siempre son *más pequeñas* que el objeto que se está definiendo. Además, después de un número finito de pasos se llega al caso base en el que termina la auto-definición.

Las Ciencias Computacionales Teóricas buscan comprender tanto los límites de la computación como el poder de sus paradigmas. Los científicos teóricos también desarrollan enfoques generales para la resolución de problemas. Una de sus funciones más importantes consiste en destilar los conocimientos adquiridos a través de la conceptualización, el modelado y el análisis. En este siglo, el conocimiento se acumula tan rápido que debe ser recogido, condensado y estructurado para lograr la utilidad necesaria.

#### 5.4 Ciencia Computacional Experimental

El centro de la investigación de las Ciencias Computacionales es la información, más que la energía o la materia. Sin embargo, no hace ninguna diferencia en lo

que tiene que ver con la aplicabilidad del método científico tradicional. Para comprender la naturaleza de los procesos de la información, los científicos computacionales observan fenómenos, formulan explicaciones y prueban teorías.

Los experimentos se utilizan para probar y explorar teorías [16-18] y comparar predicciones teóricas contra la realidad. Una comunidad científica acepta gradualmente una teoría si todos los hechos conocidos dentro de su dominio se pueden deducir desde ella, si ha superado las pruebas experimentales y si predice correctamente fenómenos nuevos. La condición *sine qua non* de cualquier experimento es la repetibilidad y la reproducibilidad. La primera garantiza que los resultados se pueden comprobar de forma independiente y por lo tanto aumenta la confianza en los resultados. Sin embargo, siempre existe un elemento de incertidumbre en los experimentos y en las pruebas. Parafraseando a Dijkstra, un experimento sólo puede mostrar la presencia de errores en una teoría, no su ausencia. Los científicos son conscientes de esta incertidumbre y están listos para descalificar una teoría si tienen evidencias de alguna contradicción.

Un ejemplo de la falsificación de teorías en las Ciencias Computacionales es el experimento de Knight y Leveson [19], que analiza las probabilidades de fracaso de los programas multi-versión. La teoría convencional predice que la probabilidad de fallo de uno de estos programas es el producto de las probabilidades de fallo de las versiones individuales. Sin embargo, estos científicos observaron que los programas multi-versión reales tenían significativamente una mayor probabilidad de fallo. De hecho, el experimento desmiente el supuesto básico de la teoría convencional, al demostrar que los fallos en diferentes versiones del programa son estadísticamente independientes.

Los experimentos también se utilizan en áreas que no abarcan la teoría y el análisis deductivos, prueban la influencia de las hipótesis, eliminan otras explicaciones de los fenómenos y descubren nuevos fenómenos que requieren explicación. De este modo, los experimentos con ayuda de la inducción derivan teorías desde la observación. Las Redes Neuronales Artificiales —ANN por sus siglas en inglés— son un ejemplo del modo exploratorio de la experimentación. Después que las ANN fueron descartadas como puntos de vista teóricos, los experimentos demostraron mejores propiedades que las predicciones teóricas. Los investigadores están desarrollando hoy mejores teorías de ANN con el fin de tener en cuenta estas propiedades [18].

Los experimentos se realizan en muchos y diferentes campos de las Ciencias Computacionales, como la búsqueda, la demostración automática de teoremas, la planificación, los problemas NP-completos, el lenguaje natural, la visión, los juegos, las redes neuronales y el aprendizaje automático. Por otra parte, el análisis de comportamiento del rendimiento en entornos de red en presencia de contención de recursos desde muchos

usuarios es un nuevo y complejo campo experimental. En este contexto es importante mencionar Internet. Sin embargo, existen teorías de las Ciencias Computacionales que no han sido probadas, por ejemplo, la programación funcional, la Programación Orientada por Objetos y los métodos formales, que están pensadas para mejorar la productividad del desarrollador y la calidad del programa, o para ambos. Sin embargo, ninguna de estas afirmaciones se ha probado de manera sistemática, a pesar de tener más de 30 años y que se ha dedicado mucho esfuerzo en las áreas de desarrollo de lenguajes de programación y de técnicas formales [19].

Algunos campos de la computación, como la interacción humano-computador y la Ingeniería de Software, deben tener en cuenta a los seres humanos —usuarios, desarrolladores, integradores, arquitectos— en los modelos de fenómenos que investigan. Por lo tanto, corren el riesgo de convertirse en enfoques empíricos *blandos*, más característicos de las áreas humanas y sociales, con herramientas metodológicas como entrevistas y casos de estudio.

### 5.5 Simulación por Computador

En los últimos años el área del modelado y la simulación por computador se ha convertido en la tercera metodología de investigación en las Ciencias Computacionales, complementando a la teoría y la experimentación. Como se observa en la Figura 3 estas Ciencias surgen de la intersección de la informática, las matemáticas aplicadas y las ciencias naturales, y se nutren tanto de la investigación teórica como de la experimentación.

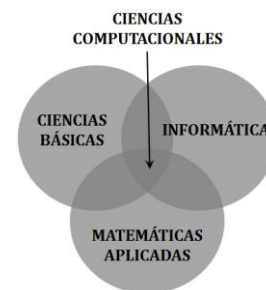


Fig. 3 Surgimiento de las Ciencias Computacionales

Actualmente, el dominio de las herramientas de las Ciencias Computacionales, como el modelado con visualización 3D y la simulación por computador, el manejo eficiente de grandes conjuntos de datos, la capacidad de acceder a una variedad de recursos distribuidos y de colaborar a través de Internet, son competencia de los graduados universitarios y no necesariamente de los científicos computacionales. Estas habilidades se están convirtiendo en parte de la cultura científica. Hoy en día, los entornos informáticos y los métodos para utilizarlos son lo suficientemente potentes como para hacer frente a problemas de gran complejidad. Con los cambios y desarrollos constantes en la computación se hace cada vez más evidente la necesidad de unas Ciencias Computacionales dinámicas y flexibles.

La simulación por computador hace posible investigar contextos que están más allá de las actuales capacidades experimentales y para estudiar fenómenos que no se pueden replicar en laboratorios, como la evolución del universo. En el ámbito de la ciencia estas simulaciones son guiadas por teorías y por resultados experimentales, mientras que los resultados computacionales a menudo sugieren nuevos experimentos y nuevos modelos teóricos. En ingeniería se pueden explorar muchas más opciones de diseño a través de los modelos informáticos que de las construcciones físicas y, por lo general, a una pequeña fracción del costo y del tiempo de los mismos, como en el caso de los estudios de las simulaciones de la formación de galaxias.

La ciencia procede a menudo con explosiones de intensa actividad investigativa y, a pesar de que el término *simulación* es viejo refleja la manera en la que buena parte de la ciencia se llevará a cabo en los próximos años. Los científicos realizarán experimentos en computador además de probar hipótesis científicas a través de experimentos sobre objetos físicos reales. También se puede decir que la simulación representa una disciplina esencial en su propio derecho, independientemente de la aplicación específica que se le dé. Las Ciencias Computacionales implican el uso de los computadores o supercomputadores para visualizar y simular fenómenos complejos a gran escala. Los estudios que involucran a las simulaciones con N cuerpos, la dinámica molecular, la predicción del tiempo y el análisis de elementos finitos se encuentran dentro de sus áreas de investigación. Si la informática tiene su base en la teoría de la computabilidad, entonces estas ciencias tienen su base en la simulación por computador. A continuación se toman algunas de las áreas clave del pasado para arrojar luz sobre el papel potencial o existente que tiene la simulación en cada uno de ellas.

- *Teoría del Caos y los Sistemas Complejos.* La idea de que se puede observar la complejidad dentro de un modelo determinista estructuralmente simple es de amplio interés. Las características cualitativas topológicas de la fase espacial de los sistemas lineales se puede determinar estáticamente, pero para los sistemas no-lineales se debe utilizar la simulación.
- *Realidad Virtual.* La realidad virtual significa *sumergir* al analista en un mundo simulado. Aunque, a menudo se ve como sinónimo de interfaces de hardware hombre-máquina, la tecnología debe incorporar métodos para construir mundos dinámicos digitales –virtuales–, lo cual es un problema típico de la simulación por computador.
- *Vida Artificial.* Es un resultado de las Ciencias Computacionales que desafía la definición del término *experimento*. Un experimento en vida artificial es aquel en el que se escribe un programa de computador para simular formas de vida artificial, a menudo llevando a lo largo de metáforas como la reproducción genética y la mutación.

- *Modelado de base física y animación por computador.* Con la aparición de los gráficos por computador se produjo un cambio notable en la dirección del modelado de base física –restricciones basadas en modelos derivados de las leyes físicas–.

La potencia de cálculo de las actuales máquinas permite simular un creciente número de fenómenos y procesos, especialmente los no lineales y las modernas capacidades gráficas hacen que este método sea muy atractivo y fácil de utilizar.

## 6. CONCLUSIONES

A pesar de las características que diferencian a las Ciencias Computacionales de otras ciencias milenarias como las matemáticas, la lógica y las Ciencias Naturales se puede concluir que posee las particularidades científicas necesarias para calificar como Ciencia. Desde un punto de vista general, es importante señalar que todas las ciencias modernas están fuertemente conectadas a la tecnología, como es el caso de la biología, la química y la física y más aún de las Ciencias Computacionales. Lo que es consecuencia natural del hecho de que la mayor parte de la investigación que condujo al desarrollo de los computadores modernos se llevó a cabo al interior de la industria.

Los componentes de ingeniería en las Ciencias Computacionales tienen más o menos estrecha relación con los aspectos del hardware del computador. La Ingeniería de Software se ocupa de los problemas de diseño, construcción y mantenimiento de los sistemas software, a menudo enormes, que son típicos de la industria. Por otro lado, las Ciencias Computacionales Teóricas son científicas en el mismo sentido que las parte teórica de cualquier otra ciencia y se basan en una sólida base lógica y matemática. La diferencia importante es que el computador, el objeto físico que se relaciona directamente con la teoría, no es un foco de investigación –ni siquiera en el sentido de ser la causa de ciertos procedimientos algorítmicos–, es más bien el espacio donde la teoría se materializa y una herramienta capaz de cambiar con el objetivo de adaptar incluso los conceptos teóricos más potentes.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Popper, K.R. (2002). [The Logic of Scientific Discovery](#). Routledge.
- [2] Carnap, R. (1995). [An Introduction to the Philosophy of Science](#). Dover Publications.
- [3] Kuhn, T. (1996). [The Structure of Scientific Revolutions](#). University of Chicago Press.
- [4] Chalmers, A. (1999). [What is This Thing Called Science?](#) Open University Press.
- [5] Michael S.M. (1992). [The Search for the Mathematical Theory](#). In: Echeverría, J.; Ibarra, A. & Mormann, T. (Eds.), *The Space of Mathematics*. Gruyter, pp. 347-61.
- [6] Rheingold, H. (2000). [Tools for Thought: The History and Future of Mind-Expanding Technology](#). The MIT Press.
- [7] Hartmanis, J. (1994). [Turing Award Lecture on Computational Complexity and the Nature of Computer Science](#). ACM Computing Surveys, 37(10), pp. 37-43.
- [8] [Universal Decimal Classification](#).



- [9] [Dewey Decimal Classification](#).
- [10] Feyerabend, P. (2010). [Against Method](#). Verso.
- [11] IEEE & ACM. (2001). [Computing Curricula 2001 - Computer Science](#). National Science Foundation under Grant.
- [12] Comer, D.E. et al. (1989). [Computing as a Discipline](#). Communications of the ACM, 32(1), pp. 9-23.
- [13] Wegner, P. (1976). [Research Paradigms in Computer Science](#). Proceedings 2nd International Conference on Software Engineering, pp. 322-330. San Francisco, California.
- [14] Aho, A. V. & Ullman, J. D. (1994). [Foundations of Computer Science](#). W.H. Freeman.
- [15] Hartmanis, J. (1981). Observations about the Development of Theoretical Computer Science. IEEE Annals of the History of Computing, 3(1), pp. 42-51.
- [16] Committee on Academic Careers for Experimental Computer Scientists, et al. (1994). [Academic Careers for Experimental Computer Scientists and Engineers](#). National Academy Press.
- [17] Denning, P.J. (1981). [ACM president's letter: performance analysis: experimental computer science as its best](#). Communications of the ACM, 24(11), pp. 725-727.
- [18] Tichy, W.F. (1998). [Should Computer Scientists Experiment More?](#) Computer, 31(5), pp. 32-40.
- [19] Knight, J.C. & Leveson, N.G. (1986). [An Experimental Evaluation of the Assumption of Independence in Multiversion Programming](#). IEEE Transactions on Software Engineering, 12(1), pp. 96-109.