

**COGNITIVE BIOLOGY. DEALING WITH INFORMATION FROM BACTERIA TO MINDS,**

por Gennaro Auletta. Oxford University Press; Oxford, 2011.

## **Biología cognitiva**

*Fundamentación en la mecánica cuántica y en la teoría de la información*

Igual que aconteció con las fronteras de la física, en particular con la cuántica, las fronteras de la biología buscan planteamientos unificadores y tender puentes entre orillas que se creían irreconciliables. Así ocurre con el campo orgánico y el dominio de la cognición. El marco de esa aproximación lo pergeña la biología de sistemas. A través de la cognición, el organismo se muestra capacitado para habérselas con su entorno. Una actividad que, se supone, depende de la teoría de la información basada en probabilidades bayesianas.

El organismo se considera un sistema cibernético, un regulador de su propia homeostasis (el sistema metabólico) y un sistema selectivo que separa el yo del no-yo (la membrana en los organismos unicelulares). Todo organismo es un sistema complejo que puede sobrevivir solo si es capaz de mantener su orden interno frente a la tendencia espontánea hacia la disgregación. Por tanto, se ve obligado a seguir y controlar su entorno y, de ese modo, establecer circuitos de realimentación que resultan en una coadaptación. Los procesos cognitivos y los biológicos son inseparables. En la nueva disciplina, la neurociencia cognitiva se sitúa en su sustrato biológico. Mas, para buscar las bases biológicas de la cognición, hay que remitirse a la física y a la teoría de la información, ambos puntales profundamente conectados en la mecánica cuántica.

Detallada la naturaleza, adquisición y meditación de la información, se explicita esta en los principios generales de autoorganización y dinámica de los sistemas biológicos. Compete al lenguaje y la consciencia interpretar la información. Al cerebro se le considera soporte orgánico de la creación de inferencias a

partir de la información de los sentidos, generador de predicciones y comprobador de hipótesis a través de su interacción con el mundo.

Se han realizado avances significativos en bioquímica y biología molecular. Pese a ello, parece cada vez más cierto que las metodologías reduccionistas tradicionales resultan insuficientes para abordar la complejidad de sistemas y problemas que van ocupando el centro de investigación. La exposición biológica y su lenguaje se han espejado en las explicaciones de la química y, en última instancia, de la física. Lo observamos en la búsqueda de una causalidad de los procesos. A los conceptos de masa, energía y fuerza, que a escala molecular y química implican fuerzas moleculares, concentración de determinadas sustancias químicas, velocidad de reacción, etcétera, hemos de añadir, cuando abordamos niveles superiores de organización biológica, los de fenómenos disipativos, temporización diferencial, procesos degenerativos y otros.

Por su lado, la ciencia cognitiva, joven disciplina creada con aportaciones de la psicología, neurología, teoría de redes neurales e inteligencia artificial, ha dado también pasos importantes en la conceptualización y el diseño de experimentos. El problema principal que atañe a la biología cognitiva es el de encontrar una mediación oportuna entre la teoría de la complejidad, importante para la biología, y el tratamiento mecánico-cuántico de la información, importante para la cognición. Ese nexo puede descubrirse en la noción de control de la información que tiende puentes entre procesos metabólicos y aspectos relativos a la información.

Cuando se abordan las relaciones entre física y biología, caben tres caminos

posibles: apoyarse en la física clásica y la metodología reduccionista tradicional (buscar los fundamentos de la biología en conceptos y leyes de la física); rechazar cualquier nexo con la física para garantizar un fundamento autónomo para la biología; mostrar que la teoría física más revolucionaria, la mecánica cuántica, permite a la biología una conexión con la física que le faculta un fundamento autónomo sin violar las leyes de la física. Auletta sigue la tercera vía. Al afirmar que las ciencias biológicas, neurológicas o psicológicas deben reducirse a la física, se piensa en un reduccionismo ontológico a la física clásica (o la química clásica), como si estas constituyeran el paradigma definitivo de la ciencia. Pero el alcance de la física clásica (y la química clásica) ha quedado limitado a la resolución de determinados problemas. Ha ocupado su lugar, como explicación física del mundo, la mecánica cuántica.

En la búsqueda de nexos entre biología y mecánica cuántica se adelantaron Niels Bohr, Ernst Pascual Jordan, Max Delbrück y, sobre todo, Erwin Schrödinger. Andando el tiempo, Roger Penrose negaría que el cerebro funcionase como un ordenador clásico. En su opinión, el cerebro podía realizar cálculos aunque el problema no se hallara bien definido. La mecánica cuántica podría ser la solución de ese tratamiento anómalo de la información, una idea revolucionaria, aun cuando no se requiera que el cerebro se rija por las leyes de la física cuántica (en razón de la inmensa complejidad de su organización). Sabido es que las leyes cuánticas no regulan propiedades concretas de sistemas físicos, sino amplitudes de probabilidad. Del hecho de que la mecánica cuántica no regule sucesos concretos se infieren importantes consecuencias: queda margen para la aparición de nuevos tipos de sistemas físicos (imposible si el mundo estuviera regulado por las leyes de la mecánica clásica) y aporta condiciones necesarias para la aparición de la vida.

La física clásica se basaba en dos supuestos: todos los procesos y parámetros físicos relevantes son continuos (principio de continuidad) y todas las propiedades de un sistema físico están determinadas (principio de la determinación perfecta). Ambos supuestos fundamentales se violan en la mecánica cuántica: el principio de continuidad por el principio de cuantización y el supuesto de la determinación perfecta por el principio

de superposición. Los sistemas mecánico-cuánticos, por elementales que sean, pueden considerarse fuente de información en nuestro mundo y procesadores de la misma.

La mecánica cuántica nos enseña que cada transmisión o adquisición de información será una combinación de un comportamiento discreto, local (selección de información) y de una conducta global, continua y ondulatoria. El cerebro es uno de esos sistemas clásicos que despliega ambos aspectos. Se caracteriza por dos fenómenos: la información se adquiere a modo de espigas, en términos discretos, mientras que la actividad global de procesamiento, en la que intervienen muchas neuronas o diversas áreas, presenta una forma ondulatoria. Durante siglos se pensó que el cerebro representaba el mundo externo de una forma pasiva, a la manera de imagen especular de los objetos y sus características; se reservaba para la mente el procesamiento lógico de la información así adquirida. En

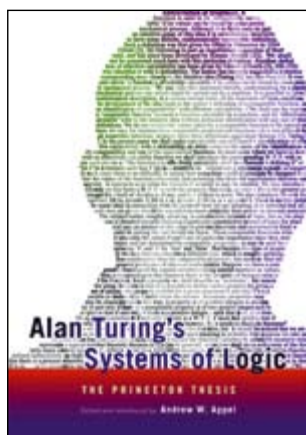
los últimos años ha ido ganando fuerza la tesis de que el cerebro interviene en el propio sesgo de la percepción, en su anticipación. De ese modo, vamos conociendo mejor las raíces biológicas de la cognición. La biología no es irrelevante para la cognición, ni esta, irrelevante para aquella.

Aunque arquetípico para hablar de información, el cerebro no es el único sistema biológico que se ocupa de la información. En los animales superiores encontramos tres sistemas que la tratan: el sistema sensorial periférico, los sistemas reguladores, en particular, el sistema hormonal, y el sistema nervioso central. Entre los vertebrados, compete al sistema sensorial adquirir información, procesarla y transmitirla al sistema nervioso central; el sistema hormonal regula la transmisión e intercambio de información; por fin, la función específica del sistema nervioso central consiste en adquirir información (procedente del sistema sensorial) y, en las áreas sensoriales y motoras, procesarla y

controlar el intercambio de información. El sistema hormonal transmite información a través de las hormonas liberadas por las glándulas. En particular, regula los sistemas circulatorio, digestivo y reproductor, aparte de su influencia sobre el cerebro y el sistema nervioso central. La información del cerebro se transfiere también a través de la difusión local de moléculas neuroquímicas en una forma paracrina.

No existe isomorfismo entre el cerebro y los objetos externos, aun cuando, en un sentido más restringido, podemos hablar de cartografía topográfica y central. De acuerdo con la regla de Hebb, cuando un axón de una neurona participa reiteradamente en la excitación de otra neurona, se produce un proceso de desarrollo o cambio metabólico en una o ambas células, de suerte que pueden excitarse al alimón con alta probabilidad. Esta es la base teórica de la teoría conexionista de las redes neurales.

—Luis Alonso



**ALAN TURING'S SYSTEMS OF LOGIC. THE PRINCETON THESIS.**

Dirigido por Andrew W. Appel. Princeton University Press; Princeton, 2012.

**Turing**

*Su tesis doctoral*

Numerosas han sido las contribuciones realizadas en homenaje a Alan Turing, coincidiendo con el centenario de su nacimiento, en 1912. Al legado de este fundador de la ciencia de la computación y la inteligencia artificial ha dedicado la colección *Temas de Investigación y Ciencia* un número monográfico. De entre sus propios escritos el libro de cabecera es, sin lugar a dudas, la obra más interesante. Allí se avanzaron las ideas que resultaron decisivas para determinar el rumbo de la computación y la matemática.

Entró en el King's College de Cambridge en 1931. De 1931 a 1934 se sintió atraído

por diversas partes de la matemática, incluida la lógica matemática. En 1935 fue elegido *fellow* del King's College, tras su disertación sobre teoría de la probabilidad, *On the Gaussian error function*, donde redescubría de forma independiente el teorema central del límite. A comienzos de ese año empezó a interesarse en problemas de lógica, con un curso impartido por M. H. A. Newman.

Uno de tales problemas era el de la decisión (*Entscheidungsproblem*), la cuestión de si existe un método eficaz para decidir, dada cualquier fórmula bien formada del cálculo de predicados de pri-

mer orden, si es o no válida en todas las interpretaciones posibles. Eso se había resuelto en afirmativo para determinadas clases especiales de fórmulas, pero el problema general seguía abierto en esa época. Se hallaba convencido de que la respuesta debía ser negativa, si bien para demostrar la imposibilidad de un procedimiento de decisión tendría que ofrecer una explicación matemática exacta de lo que significa ser computable mediante un proceso estrictamente mecánico.

A ese análisis llegó a mediados de abril de 1936, a través de lo que daría en llamarse máquina de Turing: un mecanismo ideal de computación subsiguiente a un elenco finito de instrucciones (un programa) en etapas discretas efectivas sin limitación de tiempo ni espacio. Plasmó su investigación en el artículo titulado «On computable numbers, with an application to the *Entscheidungsproblem*». Introdujo la idea de que la computación podía actuar sobre estructuras simbólicas generales, no necesariamente aritméticas. En particular, sacó partido del hecho de que un programa sea una de esas estructuras. Newman se mostró en un principio escéptico ante el análisis de Turing, pero luego se convenció y le animó a publicarlo. A los veinticuatro años había, pues, ideado un modelo universal de computación, o má-

quina de Turing, y demostrado su teorema de incompletitud, que hizo públicos en el artículo antes mencionado, con la corrección incorporada en 1937.

Kurt Gödel había formulado en 1931 la tesis de la incompletitud. Sus métodos (la codificación numérica de la sintaxis y el procesamiento numérico de la lógica) sentaron las bases para numerosas técnicas de ciencia de la computación. Estableció la teoría de las funciones recursivas. Se valió de los enteros para idear un lenguaje universal capaz de codificar computaciones arbitrarias y algoritmos generales que podrían demostrar teoremas. Por su parte, Alonzo Church había presentado el cálculo lambda como modelo de computación; de acuerdo con su tesis, las funciones recursivas caracterizan exactamente las funciones efectivamente calculables.

Muestra del genio de Gödel fue sustituir la idea informal de verdad por un concepto que podía formalizarse: la idea de prueba. Aplicando la noción formal de prueba, Gödel mostró que debía existir algún enunciado sobre los números que no podía ser ni demostrado ni contradicho utilizando las reglas de la deducción lógica, aunque podía verse que ese enunciado era cierto traspasando el sistema lógico y contemplando el enunciado desde una perspectiva metalingüística. Con otras palabras, el teorema de incompletitud de Gödel expresaba que existía en matemática un componente semántico irreductible. Turing continuaba la revolución de la lógica iniciada por Gödel. Describió su argumento matemático de manera similar a la empleada por el austriaco. Pero Turing abordó con éxito la cuestión planteada por Hilbert sobre la decidibilidad y lo hizo fundándose en un análisis filosófico enteramente original del concepto de computación.

Por recomendación de Newman, Turing decidió pasar un año estudiando con Church. Solicitó una beca Procter. Se la negaron. Hubo de contentarse con la exigua subvención de su King's College. Llegó a Princeton a finales de septiembre de 1936. Allí, el departamento de matemáticas se había convertido ya en meca de referencia. En el Instituto de Estudios Avanzados estaban Albert Einstein, John von Neumann y Hermann Weyl, en el departamento Lefschetz. Profesores visitantes ese año fueron Courant y Hardy. En lógica esperaba encontrar, además de Church, a Gödel, Bernays, Kleene y Rosser. Gödel visitó el instituto en los años

1933, 1934 y 1935; acertó su última estancia, por enfermedad, y no volvió hasta 1939. Bernays había visitado Princeton en 1935-36; no volvió a Estados Unidos hasta después de la guerra. Kleene y Rosser habían recibido el doctorado por la época en que Turing llegó y habían buscado trabajo en otros sitios. Se vio pues limitado a asistir a las clases de Church que encontraba excesivamente precisas. No parece que intimaran.

Church reconocía en 1937 que en la exposición de Turing había tres nociones diferentes: computabilidad por una máquina de Turing, recursividad general en el sentido de Herbrand-Gödel-Kleene y definibilidad lambda en el sentido de Kleene y Church; de ellas, la primera tiene la ventaja de hacer evidente de inmediato la identificación con la eficacia en el sentido ordinario; la segunda y la tercera presentan la ventaja de la idoneidad para su incorporación en un sistema de lógica simbólica. Así nació lo que dio en llamarse tesis de Church-Turing; de acuerdo con la misma, las funciones efectivamente computables son exactamente las computables por la máquina de Turing.

¿Y la tesis de Princeton? En la primavera de 1937 Turing desarrolló una prueba más detallada sobre la equivalencia de la computabilidad de la máquina con la definibilidad lambda. Publicó también dos artículos sobre teoría de grupos; de ellos, el dedicado a aproximaciones finitas de grupos continuos llamó la atención de Von Neumann. El jefe del departamento de matemáticas, Luther P. Eisenhart, animó a Turing a pasar otro año en Princeton y solicitar de nuevo la beca Procter. En esta ocasión, avalado por Von Neumann, que ponderaba su trabajo sobre funciones casi periódicas y grupos continuos, logró la subvención, que le permitía dedicarse a su tesis doctoral sobre lógicas ordinales, dirigida por Church.

Aprobada en mayo de 1938 y publicada en 1939 con el título *Systems of logic based on ordinals*, la tesis constituía el primer intento sistemático de abordar la idea natural de superar la incompletitud godeliana de sistemas formales mediante la iteración de la agregación de enunciados, tales como la consistencia del sistema. De hecho, esas clases de iteraciones pueden extenderse hasta lo transfinito. Su principal resultado fue que podíamos obviar la incompletitud para una clase importante de enunciados aritméticos, aunque no para todos. Lo adelanta en la

introducción: «El conocido teorema de Gödel revela que todo sistema de lógicas es, en cierto sentido, incompleto, mas al propio tiempo aporta los medios por los que a partir de un sistema  $L$  de lógica puede obtenerse un sistema  $L'$  más completo. Mediante la repetición del proceso, obtenemos la secuencia  $L, L_1 = L', L_2 = L'_1, \dots$  cada vez más completa que la anterior. Podría entonces construirse una lógica  $L_\omega$  en la que los teoremas demostrables fueran la totalidad de teoremas demostrables con la ayuda de las lógicas  $L, L_1, L_2, \dots$ . Procediendo de esta forma podemos asociar un sistema de lógica con cualquier ordinal constructivo. Podríamos preguntarnos si una tal secuencia de lógicas de este tipo es completa en el sentido de que a cualquier problema  $A$  le corresponde allí un ordinal  $a$  tal que  $A$  por medio de la lógica  $L_a$ ». Valiéndose de un ingenioso argumento, Turing obtuvo un resultado de completitud parcial que reclamaba ulterior investigación. Reconocería problemas importantes en su lógica ordinal.

Tras la publicación de la tesis no volvió al tema de la misma. Al poco de su regreso a Inglaterra participó en la Escuela de Códigos y Cifras del Gobierno, que habría de llevarle hasta su trabajo secretísimo en Bletchley Park durante la guerra: abrir el código cifrado de la Marina alemana, empleando mecanismos de computación, aunque no máquinas de Turing. Tras la guerra puso en práctica sus ideas sobre computación al supervisar la construcción del ACE (Automatic Computing Engine) del Laboratorio Nacional de Física; redactó el plan detallado de funcionamiento. Mas su idea de un computador digital electrónico automático con almacenamiento interno de programas no pudo concretarse hasta después de su muerte, cuando el avance de la electrónica lo permitió.

En 1948 inventó el método de descomposición LU en la computación numérica. Dos años más tarde roturó el terreno de lo que sería la futura inteligencia artificial y realizó predicciones notablemente precisas sobre los derroteros que habrían de seguir computación y computadores. En 1952 se dejó atraer por la aparición de formas en las estructuras biológicas (pautas de las flores, simetría de los huesos o manchas de los tigres). Murió a los 42 años. Se cree que se suicidó angustiado por las normas inglesas dictadas contra la homosexualidad.

—Luis Alonso