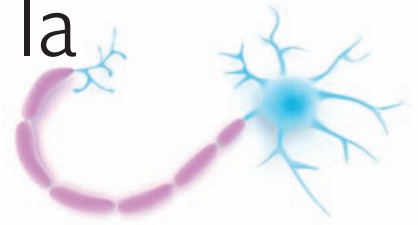
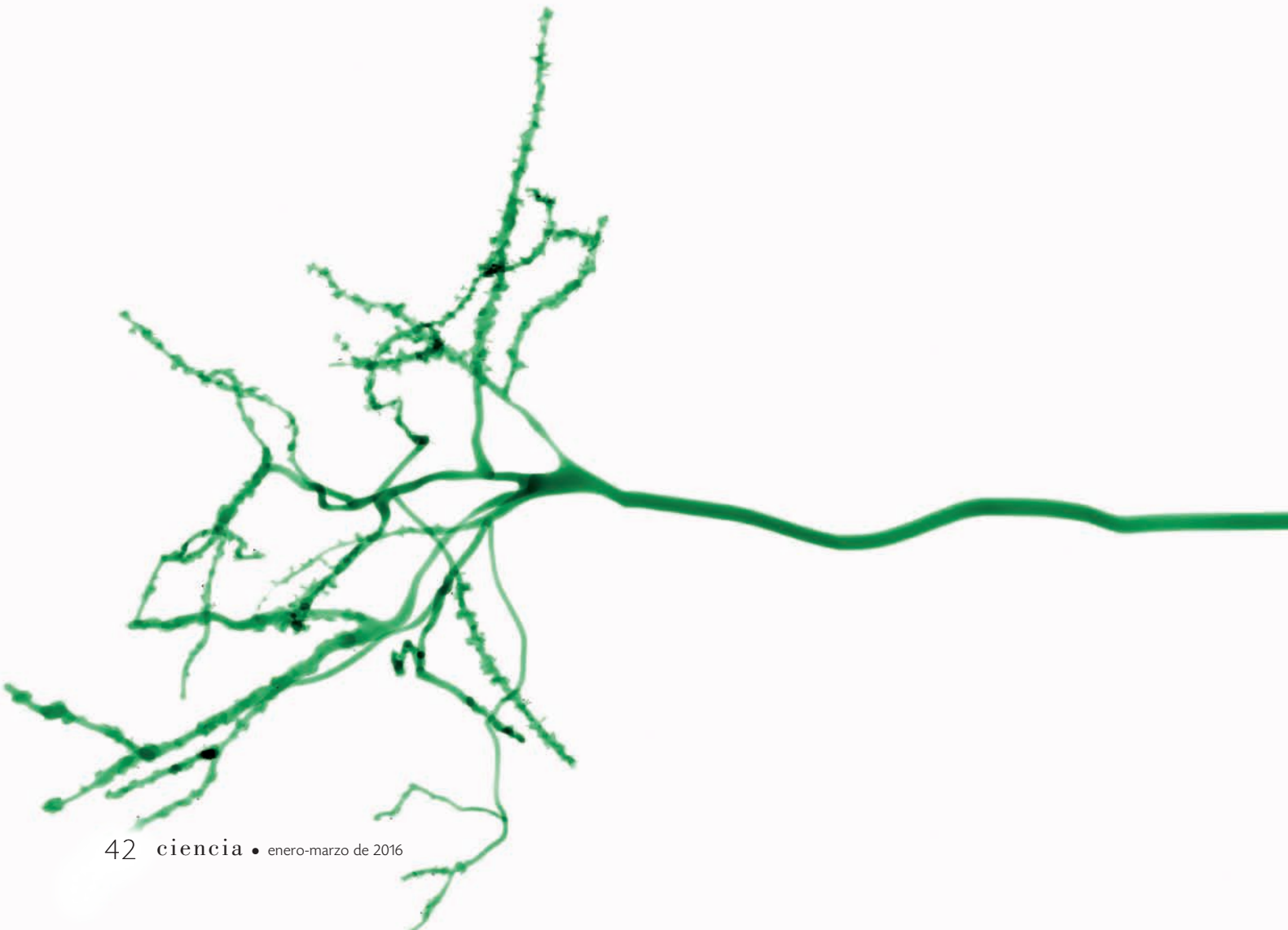




La **MENTE** en la máquina

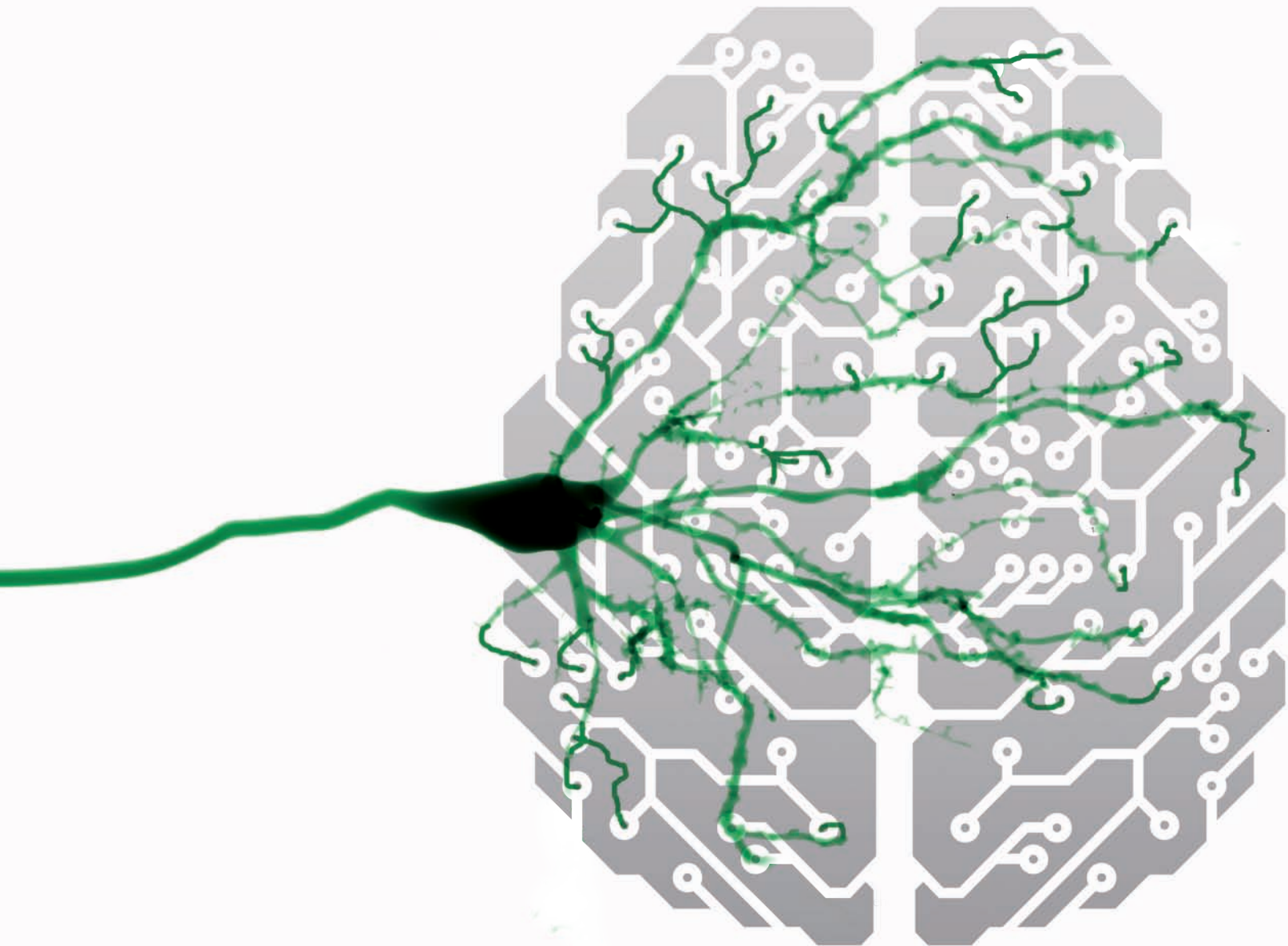


Al principio de la década de los cuarenta del siglo xx, un conjunto de ideas surgidas de ámbitos muy diferentes convergió en el concepto que Norbert Wiener bautizó como *cibernética*. Algunas de estas ideas pretendían explicar, desde el punto de vista de la lógica, el funcionamiento del cerebro humano con base en el de sus componentes fundamentales: las neuronas. Surgieron así las redes neuronales, que hoy son uno de los modelos más útiles en el área de la inteligencia artificial.



El problema de McCulloch

13 de mayo de 1942. En algún salón del hotel Beekman en la ciudad de Nueva York, Warren Sturgis McCulloch escucha, sorprendido y extático, la conferencia inicial de la reunión convocada por la Fundación Macy para que un heterogéneo grupo de académicos discorra acerca del funcionamiento del cerebro. El que habla es un médico mexicano: Arturo Rosenblueth. Es un exalumno de Walter Cannon, con quien trabajó en Harvard en el problema de la transmisión química de impulsos nerviosos. Arturo habla en inglés no sólo con soltura, sino con vehemencia; en la mente de la audiencia sus palabras evocan conceptos filosóficos que habían sido desterrados del contexto científico desde hacía mucho tiempo, pero que en labios de Rosenblueth adquieren un nuevo sentido. Arturo ha trabajado recientemente con Norbert Wiener y Julian Bigelow sentando las bases de lo que será bautizado como *cibernética*, y es de eso de lo que habla. El público está conformado por un grupo de estudiosos de muy diversas disciplinas: antropólogos, economistas, psicólogos y médicos. Todos escuchan con avidez a Arturo; en las mentes de todos ellos quedará una huella indeleble de la reunión y de la revelación que experimentaron.



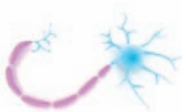


Figura 1. Arturo Rosenblueth.

Warren McCulloch ha estado trabajando en su problema, el que ha marcado la directriz de su trabajo desde hace más de 20 años, cuando estudiaba psicología y filosofía en Yale. Warren lo sintetiza con un par de preguntas: “¿Qué clase de cosa es un número, que un ser humano puede saber lo que significa?, y ¿qué clase de cosa es un ser humano, que puede saber lo que un número significa?” En términos más generales: ¿cómo es que los seres humanos llegamos a la abstracción?, ¿cuál es la estructura lógica de la mente humana? En vano agotó Warren bibliotecas enteras buscando respuestas. Ni la psicología ni la filosofía fueron capaces de contestar cabalmente; la matemática, sin embargo, en algo ayudó. En los tres volúmenes de los *Principia Mathematica* (obra a la que llamaremos *Principia*, en lo sucesivo), escritos por Bertrand Russell y Alfred Whitehead entre 1910 y 1913, los malabares formales de la lógica matemática atenuaron las preocupaciones de Warren.

La cábala de los *Principia*

La intención de los *Principia* fue mostrar que la matemática era un mecanismo perfecto. A lo largo de los miles de años en los que la humanidad la ha construido, la matemática ha acumulado un enorme acervo de conceptos. Algunos son piezas elementales indispensables que subyacen en el centro de casi toda teoría, como los engranes de una maquinaria, y hay, también, maneras bien definidas de tomar esos conceptos, combinarlos y transformarlos para generar nuevos, como las diferentes combinaciones de movimientos en el engranaje de un reloj. A los elementos esenciales se les suele llamar *axiomas* y las operaciones que permiten transformarlos y combinarlos son las reglas de la lógica matemática. Russell y Whitehead pretendían mostrar cuáles eran esos engranes fundamentales y los movimientos que permitían combinarlos de tal forma que, suponiendo a la matemática como un enorme y complejo mecanismo de relojería, se pudiera probar su perfecta coordinación, sin errores ni contradicciones. De lograr algo así, todo problema matemático sería soluble con sólo determinar si podía expresarse de tal forma que fuera posible encajarlo en el mecanismo y encontrar la combinación de engranes y de movimientos necesarios para representar el enunciado del problema como parte de la máquina; es decir, mediante el conjunto de axiomas y la secuencia de reglas por aplicar para llegar a la sentencia que, en el lenguaje de los símbolos de los *Principia*, formulara el problema por resolver. Resolver un problema matemático cualquiera equivaldría, entonces, a encontrar, de entre el inmenso pero finito número de permutaciones y combinaciones de símbolos, aquella que nos permitiera construirlo como una “frase” válida en el lenguaje de los *Principia*: una *fórmula*.

Afanes similares ocuparon a los cabalistas de la Edad Media y a quienes los siguieron: encontrar las palabras con las que Dios creó el mundo, los nombres verdaderos de las cosas, las combinaciones correctas de símbolos. La cábala buscaba desentrañar el misterioso lenguaje con el que la mente divina creó el cosmos; los *Principia*, develar el que la mente humana usa para crear la matemática. Si la lógica no es, a fin de cuentas, más que la representación del razonamiento humano, de la manera en que funciona nuestro cerebro, entonces las

respuestas que Warren buscaba podrían encontrarse si se lograba determinar cómo es que las operaciones de la lógica, el lenguaje de los *Principia*, son ejecutadas por nuestro cerebro.

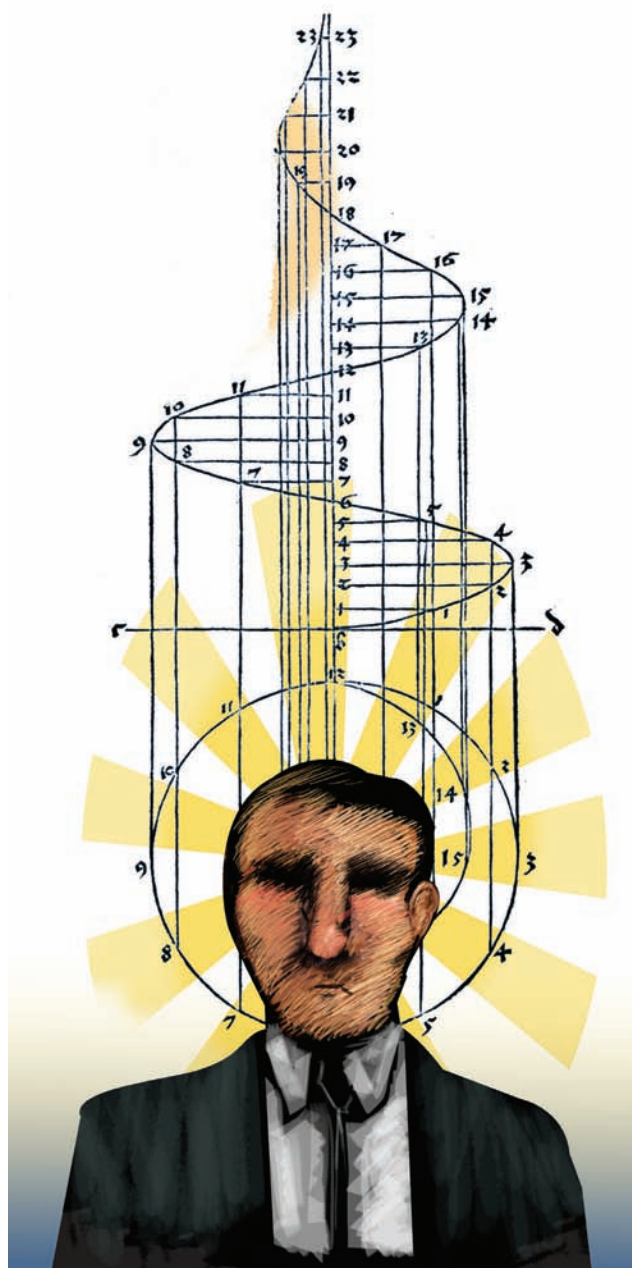
Con el tiempo, los cabalistas desistieron de su soberbio afán. El estudio denodado o la pureza de espíritu y el estricto apego a las leyes divinas probaron no ser suficientes para desentrañar el lenguaje de la Creación. Durante la década de los treinta del siglo XX, los *Principia* de Russell y Whitehead probaron ser también un ejercicio pueril. Los desarrollos de la lógica hechos en ese tiempo terminaron mostrando sus limitaciones y las de cualquier sistema que pretendiera alcanzar lo que los *Principia* se habían propuesto. Dos descubrimientos fueron cruciales:

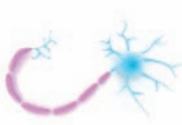
- En 1931 Kurt Gödel demostró que no es posible construir un sistema de reglas y axiomas que sea capaz de contener toda la matemática; no si aspiramos a que sea consistente, esto es, si queremos que no sea posible que en su interior se escondan contradicciones.
- En 1936 Alan Turing demostró que dada una fórmula cualquiera en el lenguaje de la lógica de los *Principia*, no necesariamente existe una cadena de operaciones que lleven desde los axiomas hasta la fórmula dada.

Para lograr este último resultado, Turing tuvo que formalizar y definir con toda precisión lo que significaba esa “cadena de operaciones”. Hoy le llamamos *algoritmo* y es la esencia de lo *computable*. Cualquier programa de computadora, cualquier aplicación que se ejecuta en nuestros teléfonos inteligentes o en nuestras tabletas, es un algoritmo.

Para Warren, sin embargo, esto significaba que había una muy clara analogía entre los entonces incipientes dispositivos electrónicos de cómputo y el cerebro humano. Si nuestras computadoras y nuestros cerebros tenían un lenguaje común: el de la lógica, entonces, ¿qué podríamos averiguar de nuestros cerebros a través de los estudios acerca de cómo construir computadoras? Y, aún más interesante, ¿qué tanta de nuestra inteligencia les podríamos conceder a las computadoras, dado que, en apariencia, eran esencialmente lo mismo?

En la lógica simbólica usual, las proposiciones pueden ser calificadas como falsas o verdaderas; toda proposición tiene uno y sólo uno de estos llamados *valores de verdad*, y cualquier otra posibilidad está excluida. Esta característica de la lógica posee un más que aparente sustento en el comportamiento de las células que constituyen nuestro sistema nervioso, particularmente nuestro cerebro: las neuronas. En términos generales, una neurona recibe un conjunto de estímulos del exterior a través de sus conexiones con otras neuronas, en





lo que se conoce como *sinapsis*. Los estímulos recibidos pueden o no desatar a su vez la respuesta de la neurona que los recibe, dependiendo de si se sobrepasa cierto umbral de estímulo o no. Así, nuestras neuronas poseen, al igual que las proposiciones de la lógica, dos posibles respuestas. Esto es lo que señaló la dirección del trabajo de Warren: determinar los circuitos neuronales que calculan las operaciones elementales de la lógica; probar que nuestro cerebro es la maquinaria hecha para la lógica.

Retroalimentación y propósito

En la conferencia, Rosenblueth pone un ejemplo para ilustrar un par de conceptos. Uno de ellos proviene del trabajo real que Wiener y Bigelow comenzaron a hacer como parte del esfuerzo científico asociado a la guerra. Arturo tiene cuidado de no develar nada secreto, sólo usa lo necesario. Pide a la audiencia que imagine un proyectil de fuego antiaéreo, como los que usaron asiduamente los británicos hace un par de años en la Batalla de Inglaterra, y les pide que imaginen que el proyectil persigue a un avión que es su objetivo. Para hacerlo, debe dirigirse no a la posición donde está el avión, sino a aquella en la que estará cuando se encuentren las trayectorias del proyectil y

de su objetivo. Eso significa que este artefacto, el proyectil, es una entidad con un propósito, una finalidad que debe alcanzarse modificando su trayectoria con base en lo observado. Esto evoca uno de los conceptos que fueron desterrados del ámbito científico desde que el mundo occidental resurgió dificultosamente de la Edad Media: la finalidad de un sistema.

Para la escolástica era aceptable pensar que una entidad inteligente, un diseñador supremo, dirigía las cosas de acuerdo con un plan trazado: las rocas caen porque fueron hechas para estar con la tierra, que es su sustancia elemental; la finalidad de la semilla es ser árbol; la del Sol, dar calor a las criaturas de Dios. En el caso del proyectil, el hombre es quien le impone su finalidad, pero el concepto expuesto por Arturo abarca igualmente sistemas vivos. En este contexto, el sistema regulador de temperatura de los seres humanos también tiene un propósito: cuando la temperatura corporal excede cierto umbral, comenzamos a sudar; la finalidad es bajar la temperatura. Visto así, es un sistema con un propósito. Para llevar a cabo su labor, el proyectil debe percibir al objetivo; el cuerpo, su temperatura. Con base en estas lecturas se toman “decisiones” (cambiar la trayectoria y sudar, respectivamente); esto modifica las condiciones del entorno, lo que potencialmente amerita tomar acciones en consecuencia (nueva modificación de la trayectoria, incrementar la cantidad de sudor); finalmente, el sistema necesita retroalimentación, de alguna manera debe saber corregir sus acciones en un ciclo permanente de acción-retroalimentación.

Ciclo, esa palabra iluminó el rostro de Warren. Durante años había tropezado con el hecho de que las redes de neuronas frecuentemente presentan conexiones cíclicas. Si las redes neuronales estuvieran siempre calculando operaciones de la lógica de los *Principia*, no tendría por qué haber conexiones hacia “atrás”, hacia neuronas por las que ya había pasado el estímulo nervioso. Al principio Warren creyó que esto era exclusivo de las redes neuronales de individuos con alguna afección. Supuso, por ejemplo, que ésa era la causa de los temblores presentes en el mal de Parkinson: una especie de reverberación ocasionada por el estímulo que regresa. Pero ahora todo parecía más claro: los ciclos permiten retroalimentación, permiten tomar una ac-

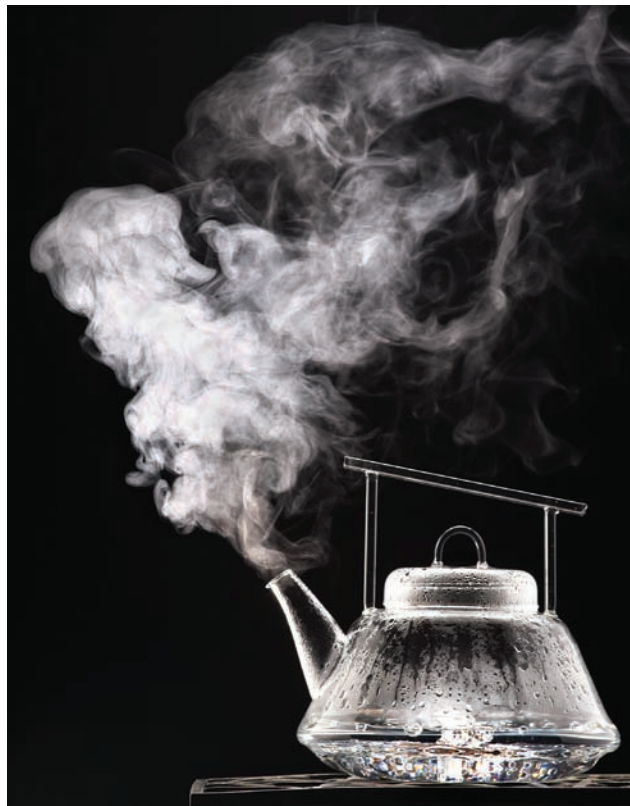


ción con base en la previa y en el resultado que se ha obtenido hasta ahora; permiten no olvidar el acierto o el error previo. Tenía que decirle esto a Pitts, juntos podrían incorporar la idea en el modelo lógico-neuronal que estaban construyendo.

Neuronas naturales y artificiales

Walter Pitts era un genio, no poseía educación formal, no había transitado nunca por el bachillerato. Él, como Warren, había devorado los *Principia* años atrás. Circunstancias azarosas los habían reunido y, a la fecha, Pitts vivía en la casa de los McCulloch, donde por las noches trabajaba con Warren desarrollando el modelo de redes neuronales basadas en la lógica.

El modelo que diseñaron corresponde bastante bien con nuestra experiencia cotidiana de la transmisión de estímulos nerviosos. Imaginemos un recipiente de metal que contiene agua caliente, por ejemplo, una tetera. Si el agua no está tan caliente, entonces podemos sostener la tetera con nuestras manos sin que nos cause una molestia significativa; no reaccionamos soltándola y quejándonos de dolor, cosa que haríamos si la tetera estuviera muy caliente. Las respuestas posibles al tocar la tetera son dos: soltarla o no. La que realmente tendrá lugar dependerá de si la temperatura a la que está excede cierto límite de tolerancia. Este límite, al que también podemos llamar *umbral*, es diferente para cada persona en general y, más aún, depende también



de la sensibilidad del área de la piel que toca la tetera: no es lo mismo usar las manos que los antebrazos, por ejemplo, pues las primeras soportan mayor temperatura que los segundos.

Podríamos pensar ahora en una neurona a medio camino entre nuestras extremidades superiores y el cerebro; esta neurona recibe estímulos provenientes de otras, posiblemente algunas de ellas en las manos y algunas otras en los antebrazos. Esta neurona debe transmitir al cerebro una señal de alarma si el estímulo recibido rebasa cierto umbral, para prevenir el daño a los tejidos expuestos al calor. Pero como la sensibilidad de las áreas expuestas es diferente, debe asignar una cierta prioridad a cada una: dado que el antebrazo es más sensible, recibe una prioridad mayor que las manos, que soportan mejor el calor. La neurona entonces *pondera* los estímulos de entrada recibidos y decide, con base en el estímulo total, si debe o no emitir una señal de alarma.

El modelo diseñado por McCulloch y Pitts se podría esquematizar como se muestra en la Figura 3. Una neurona en este modelo es una entidad que, como las

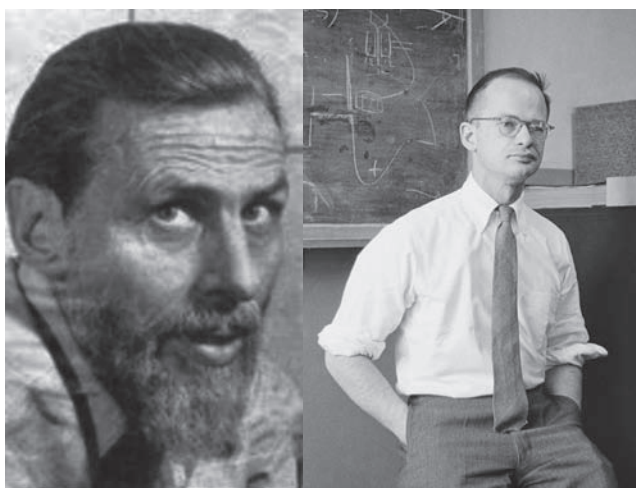


Figura 2. Warren Sturgis McCulloch, a la izquierda, y Walter Pitts, a la derecha.

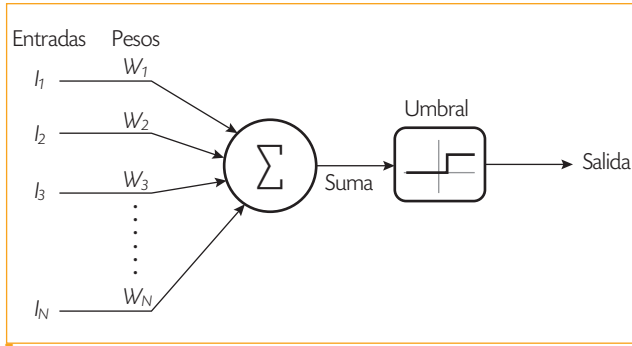
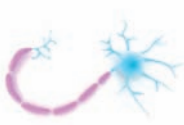


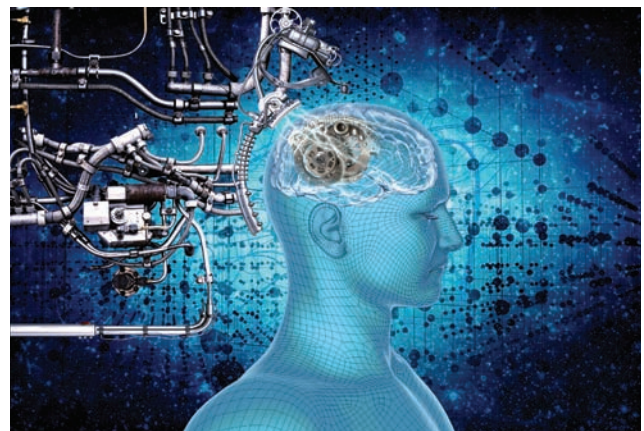
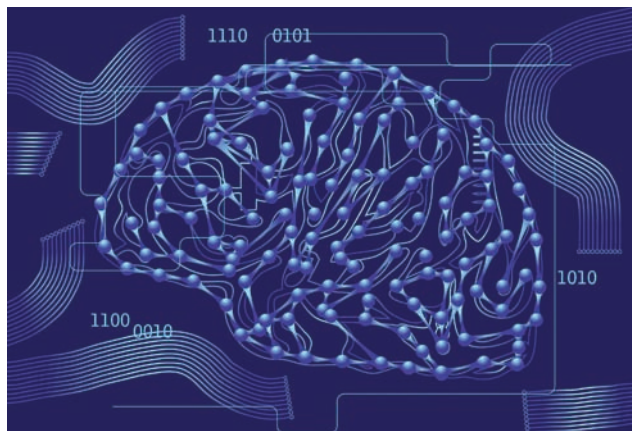
Figura 3. Esquema de una neurona en el modelo de McCulloch y Pitts.

neuronas naturales a través de las sinapsis, recibe estímulos del exterior y entrega como salida una respuesta a éstos. Tanto los estímulos recibidos como la respuesta son binarios: hay o no hay respuesta, 0 o 1, verdadero o falso, como se prefiera. La neurona asigna luego a cada una de sus sinapsis de entrada un cierto factor de importancia: 0 si hay que ignorarla, 1 si es muy relevante, y algún número entre esos dos en cualquier otro caso (así que un factor de importancia de 0.5 significa que el estímulo recibido por esa sinapsis es, digamos, medianamente importante). Para decidir si su salida será 0 o 1, la neurona calcula la suma ponderada de sus entradas y verifica si el resultado excede el valor de un cierto umbral (u). Es decir, calcula la suma de cada una de sus entradas luego de ser ponderadas por el factor de importancia. Si I_j es la j -ésima de estas entradas y ésta tiene asignado un factor de importancia W_j , la neurona calculará el producto de I_j y W_j , es decir: $I_j \times W_j$. Para cada entrada diferente, o sea, para cada valor distinto de j , existe un producto similar. Final-

mente, la neurona calcula la suma de estos productos y si el resultado excede el umbral predefinido u , entonces la neurona entrega un 1 como respuesta; de otro modo, entrega un 0. Por supuesto, esta salida producida por la neurona puede pasar a otras conectadas con ella, en lo que se denomina entonces una *red neuronal*. Si existe un cierto orden en las neuronas de una red, de tal forma que la respuesta producida por una neurona no pueda nunca regresar como entrada a neuronas previas, se dice que la red tiene alimentación hacia adelante; de otro modo, se dice que tiene *retroalimentación*, el concepto que explicó Rosenblueth en la reunión y que llamó tanto la atención de McCulloch.

● Inteligencia artificial y Golem

En su trabajo de 1936, Alan Turing definió el conjunto de todos los números que pueden ser calculados por medio de un algoritmo. En el artículo escrito por McCulloch y Pitts, publicado en 1943 (al año siguiente de la reunión Macy), se muestra que cualquier número calculable en el sentido de Turing es también calculable por una red neuronal en el modelo de McCulloch y Pitts. Desde la perspectiva de los autores y, de hecho, de todos aquellos involucrados en el tema en esa época, esto tiene una enorme importancia tanto técnica como filosófica: si las redes neuronales no son más que modelos simples de cómo es que la lógica se encuentra inherentemente construida en el cerebro humano; y si, por otra parte, resulta que las redes neuronales no son otra cosa que ejecutoras de algoritmos, es decir, computadoras, entonces ciertamente no se ve lejano el



día en que nuestras computadoras puedan pensar como nosotros.

En su artículo de 1943, “Un cálculo lógico de las ideas inmanentes a la actividad nerviosa”, McCulloch y Pitts expusieron su modelo de redes neuronales. Ese mismo año también se publicó el primer artículo que exponía los conceptos que se llamarían cibernética: “Mecanismos teleológicos, causalidad circular y retroalimentación”, escrito por Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener y Julian Bigelow. Más tarde, en 1948, Wiener sintetizaría todos estos conceptos en una obra mayor, en la que también prestó atención al modelo neuronal. El libro se tituló *Cibernética: o el control y la comunicación en el animal y la máquina*.

Poco después, las redes neuronales adquirieron un aspecto muy similar al que poseen hoy: un conjunto de elementos o nodos de entrada cuya función es recibir los estímulos externos que provienen de los datos que se deben procesar y que, de alguna manera, constituyen una interrogante por resolver. En el otro extremo de la red están las neuronas de salida, generalmente menores en número que los sensores de entrada; éstas se encargan de proponer una respuesta a la interrogante formulada en aquéllos. Entre las neuronas de salida y los nodos de entrada hay una red de neuronas interconectadas que, en principio, permanecen ocultas para quien observa la red desde el exterior, y que suelen organizarse en capas. En la Figura 4 se muestra una red neuronal con sólo una capa oculta.

Entre los relatos que engendró la cábala medieval, sin duda el más famoso es el del Golem de Praga, el ser artificial que fue dotado de vida por el poder de las pa-

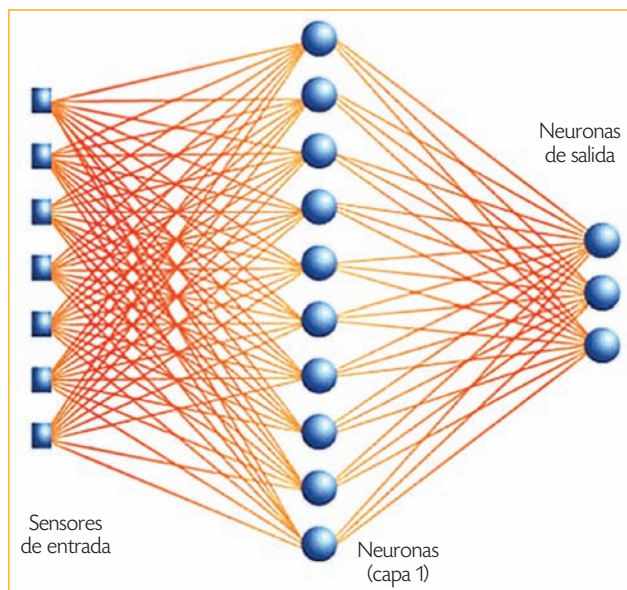
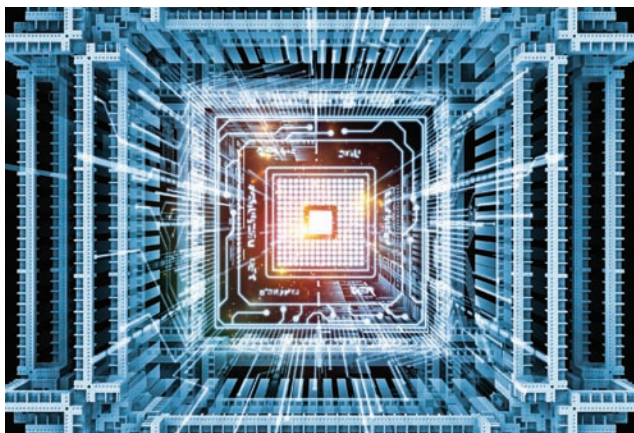
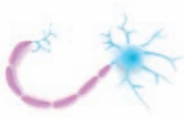


Figura 4. Esquema de una red neuronal artificial con una sola capa de neuronas ocultas.

labras que el rabino Loew supo encontrar en su arduo estudio de la escritura sagrada. Para nuestros estudiosos de los *Principia*, la creación análoga es la de una mente artificial, una máquina capaz de razonar como sólo un ser humano podría hacerlo. En la leyenda de Praga, el sacrilegio de arrogarse los privilegios de Dios trae nefastas consecuencias. Quinientos años después, concretamente en 1948, Alan Turing descrea del castigo divino en un breve artículo que nunca verá la luz, en el que elabora su propia versión de modelo de red neuronal. Un poco después, quizás consciente de que –como el Golem– una mente artificial no deja de ser más que un simulacro, enuncia en 1950 lo que se conoce como “la prueba de Turing”: renuente a responder “¿puede una máquina pensar?”, Turing prefiere reemplazar la pregunta por otra: “¿puede una máquina comportarse como si pensara?”. La influencia y la crítica que genera la propuesta da origen a lo que en 1956 se bautiza como *inteligencia artificial*, o IA.

De lo material a lo simbólico

De entre los rasgos que hacen que algo sea calificado como inteligente, uno fundamental es el *aprendizaje*. Desde el principio, Warren se había percatado de que para aprender, una red neuronal debía modificar



su estructura. En 1949 el psicólogo canadiense Donald Hebb planteó el mecanismo por el que sería posible aprender: cambios perceptibles en la conducta como efecto de cambios en las redes neuronales. Si un estímulo se repite y se transmite siguiendo siempre el mismo camino en la red neuronal, entonces este camino se ve “reforzado”, la red se adapta para facilitar ese camino y no los alternativos, la secuencia de neuronas que se disparan (respuesta 1) y las que se inhiben (respuesta 0) es la misma luego de un tiempo ante el mismo estímulo. Esto significa que la red ha “aprendido” cómo reaccionar ante él. En términos del modelo de McCulloch y Pitts, esto puede traducirse en incrementar el peso de las entradas por las que el estímulo llega a las neuronas que se disparan. Esto tiene utilidad potencial, por ejemplo, para lograr que una red neuronal aprenda a distinguir semejanzas cuando se la expone a diferentes estímulos. ¿Qué tienen en común las banderas de Bélgica, Rumania, Italia y Francia? Las cuatro están divididas verticalmente en tres partes iguales con tres colores diferentes; ése es un patrón bien definido. Si puesta ante el catálogo de las banderas del mundo, una red neuronal fuera capaz de dar exactamente la misma respuesta ante estas cuatro banderas (y las demás que cumplan con el patrón descrito) y esta respuesta fuera diferente de la entregada ante cualquier otra bandera sin el patrón, podríamos decir que la red ha aprendido a reconocer el patrón. Frank Rosenblatt se inspiró en el mecanismo de aprendizaje descrito por Hebb cuando en 1958 creó el llamado *perceptrón*, un modelo neuronal con el propósito de reconocer patrones.

En 1969, con cuatro meses de diferencia, fallecieron Pitts (en mayo) y McCulloch (en septiembre). En ese mismo año aciago, Marvin Minsky, uno de los fundadores y personalidades más influyentes de la IA, quien se había iniciado en 1951 construyendo una red neuronal, escribió junto con Seymour Papert un libro titulado *Perceptrons*, en el que desdeñaban el modelo de Rosenblatt evidenciando algunas limitaciones más bien baladíes. Esto desalentó el estudio acerca de las redes neuronales entre la comunidad de IA en el mundo durante casi dos décadas. Se fortaleció lo que se conoce como *procesamiento simbólico*: sistemas basados en la lógica, la representación de conocimiento y el uso de reglas.



Desencanto y promesas

Durante la década de los ochenta del siglo pasado, el interés se fue recuperando paulatinamente. Se generalizó el concepto de *perceptrón* y se fueron sobrepasando con creces las limitaciones que se le habían señalado. Se retomaron las ideas de Hebb mediante el término *conexionismo*, acuñado por él en los años cuarenta. Los problemas que la IA pretendía resolver resultaron mucho más difíciles de lo que se suponía; en consecuencia, el procesamiento simbólico resultó ingenuo las más de las veces. El punto de vista propuesto por las redes neuronales, que había sido menospreciado, resultó ser, a fin de cuentas, una esperanza. Surgieron nuevos modelos y se propusieron diferentes maneras de lograr que una red neuronal aprenda.

Hoy en día se posee un variado catálogo de diferentes tipos de redes neuronales, todos con características que los hacen adecuados para resolver o al menos aproximar la solución de problemas muy difíciles. Se usan redes neuronales en aplicaciones prácticas: para la clasificación de huellas digitales o reconocimiento de melodías, para identificar patrones en pacientes con riesgo de cáncer o zonas geográficas con peligro de inundación. Las aplicaciones de las redes neuronales crecen constantemente en número y en utilidad.

Pero esto no es todo. Recientemente se ha retomado la utópica pretensión de lograr artificios capaces de emular el cerebro humano. El doctor Massimiliano Di Ventra y sus colaboradores, de la Universidad de Cali-



fornia en San Diego, trabajan actualmente en modelos realizables de computadoras cuyos elementos constitutivos son, como nuestras neuronas, entidades tanto de procesamiento como de memoria, simultáneamente. ¿Qué consecuencias tendrán ésta y otras investigaciones? ¿Cuál será la relación precisa entre estos modelos y el paradigma de cómputo formulado por Turing? Será emocionante averiguar las respuestas.

En el camino habrán de quedarse de lado algunas cosas que creíamos prometedoras; otras insospechadas cobrarán relevancia. Varias veces pecaremos de ingenuos y habremos de desengañarnos más tarde. La ciencia progresa así. McCulloch, que también cultivó la poesía, lo dice mejor en un soneto:

Construimos nuestros castillos en el aire,
y desde el aire se derrumban,
a menos que los llevemos encima
hasta que agrietan la cabeza que coronan.

José Galaviz Casas ingresó como estudiante a la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México en 1987. Se tituló de la licenciatura en Matemáticas en 1993 y realizó sus estudios de posgrado en la misma universidad; en 2006 obtuvo el grado de doctor en Ciencias de la Computación con mención honorífica. En 2007 recibió el Reconocimiento Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos en el Área de Docencia en Ciencias Exactas. Es autor o coautor de cuatro libros de computación. Es profesor de tiempo completo del Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias desde 1998.

galaviz@ciencias.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Conway, F. y J. Siegelman (2006), *Dark hero of information age: In search of Norbert Wiener, the father of cybernetics*, Nueva York, Basic Books.
- Di Ventra, M. y Y. V. Pershin (2015), "Just add memory", *Scientific American*, 312(2):57-61.
- McCulloch, W. S. y W. Pitts (1943), "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5:115-133. (Reproducido en *Embodiments of mind*.)
- McCulloch, W. S. (1988), *Embodiments of mind*, Cambridge, MIT Press.
- Miramontes, P. (2013), "La fábrica de sueños", *Ciencia*, 64(4):72-78.
- NeuralOutlet IE (2013), "Warren McCulloch Interview (1969)" [video]. Disponible en: <<http://youtu.be/MT-mR6X2w8Tg>>, recuperado el 5 de enero de 2015.
- Piccinini, G. (2004), "The First Computational Theory of Mind and Brain: A Close Look at McCulloch and Pitts's: Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity", *Synthese*, 141(2):175-215.
- Rosenblueth, A., N. Wiener y J. Bigelow (1943), "Behavior, Purpose and Teleology", *Philosophy of Science*, 10(1):18-24.
- Rosenblueth, A. (1994), *Mente y cerebro: una filosofía de la ciencia*, México, Siglo XXI Editores, 327 pp.
- Wiener, N. (1998), *Cibernética o el control y comunicación en animales y máquinas*, Barcelona, Tusquets.