

Rodrigo Quian Quiroga



Qué es la memoria

Ariel

1.ª edición: junio de 2018

© 2015, Rodrigo Quian Quiroga

Derechos exclusivos de edición en español
reservados para todo el mundo
y propiedad de la traducción:
© 2018: Editorial Planeta, S. A.
Avda. Diagonal, 662-664 - 08034 Barcelona
Editorial Ariel es un sello editorial de Planeta, S. A.
www.ariel.es

ISBN 978-84-344-2786-0
Depósito legal: B. 7.996 - 2018

Impreso en España

El papel utilizado para la impresión de este libro
es cien por cien libre de cloro y está calificado como papel ecológico.

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal).

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos)
si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.
Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com
o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

Índice



Capítulo 1.	
¿Cómo guardamos los recuerdos?	11
Capítulo 2.	
¿Cuánto vemos?	31
Capítulo 3.	
¿Puede el ojo realmente ver?	47
Capítulo 4.	
¿Cuánto recordamos?	63
Capítulo 5.	
¿Podemos recordar más?	85
Capítulo 6.	
¿Podemos ser más inteligentes?	103

Capítulo 7.

¿Es lo mismo recordar la capital de Francia que
cómo atarnos los zapatos? 123

Capítulo 8.

¿Cómo representamos conceptos? 133

Capítulo 9.

¿Sienten los androides?. 151

Capítulo 1

¿Cómo guardamos los recuerdos?

En la terraza de un edificio abandonado, bajo la torrencial lluvia de una posmoderna Los Ángeles, termina la persecución. Rick Deckard (Harrison Ford), el cazador de androides, apenas puede arrastrarse en el piso tratando de escapar de su inexorable destino a manos de Roy Batty (Rutger Hauer), un androide Nexus 6, líder de los “replicantes”. El replicante observa cómo, ya vencido, Deckard aún pelea por su vida y, a punto él mismo de morir, toma una paloma entre sus manos, se sienta a su lado y le dice:¹

He visto cosas que ustedes, humanos, no creerían. Naves de ataque en llamas en la constelación de Orión. Vi rayos-C brillar en la oscuridad en la Puerta de Tannhäuser. Todos estos momentos se perderán

1. Todas las traducciones fueron hechas por el autor.

en el tiempo como lágrimas en la lluvia. Tiempo de morir.²

Los recuerdos de Roy Batty son lo que lo diferencia de otros replicantes, lo que lo lleva a ser distinto. Estos recuerdos son, de hecho, lo que lo hacen sentirse persona a pesar de no ser humano y que justifican su afán de aferrarse a una corta vida (predeterminada por quien lo fabricó) y finalmente tratar de prolongarla. Quiero así comenzar este libro, con la escena final de *Blade Runner*, un clásico de ciencia ficción, basado en otro clásico de la literatura del género (*¿Sueñan los androides con ovejas eléctricas?*), escrito por Philip Dick.³ Pero el título de este libro –*Qué es la memoria*– impone una pregunta y de alguna manera apremia al menos una breve respuesta.

La *Enciclopedia británica* define a la memoria como “la codificación, el almacenamiento y la evocación en la mente humana de experiencias pasadas”. Este tipo de definiciones enciclopédicas, sin embargo, dista mucho de dar siquiera una mínima idea de la magnitud del problema y el interés que despierta. Y, dentro de este grupo de definiciones, la provista por la *Enciclopedia británica* es algo restrictiva pero, por otro lado, más que interesante porque da lugar

.....

2. “*I’ve seen things you people wouldn’t believe. Attack ships on fire off the shoulder of Orion. I watched C-beams glitter in the darkness at Tannhäuser Gate. All those moments will be lost in time like tears in rain. Time to die.*”

3. Curiosamente, las palabras de Roy Batty, citadas una y otra vez por fanáticos del cine de ciencia ficción, no están ni en el libro de Philip Dick, ni se corresponden con las del guion original de la película, ya que estas fueron reescritas por Rutger Hauer el día anterior a la filmación de la escena.

a una serie de preguntas. Por ejemplo, la definición refiere a la mente humana. Pero ¿qué decir de los animales, de un androide Nexus 6 o, sin ir más lejos, de una computadora? ¿Tienen memorias como los humanos? ¿Son, a partir de sus memorias, conscientes de su propia existencia? ¿Y cómo podríamos saber si lo son? Hurgando aún más en la definición, podríamos también preguntarnos qué es la mente. ¿Es simplemente la actividad del cerebro en funcionamiento? ¿Es el resultado de la actividad de billones de neuronas, o algo más? Y si fuese la actividad de neuronas, ¿cómo hacen estas para guardar y evocar tanta información? Más aún, en el momento de la muerte, de la extinción de nuestro cerebro, ¿se perderán nuestras memorias como lágrimas en la lluvia?

La memoria ocupa un rol protagónico al plantearse este tipo de inquietudes, porque de alguna manera define quiénes somos. Si perdiera la capacidad de escuchar y comenzara a usar un implante de cóclea, no hay duda de que seguiría siendo la misma persona. Si debido a una grave deficiencia cardíaca se me implantara un corazón artificial, también seguiría siendo el mismo. Si a partir de un accidente perdiera un brazo y lo reemplazara con un miembro biónico, aún sería yo. Llevando el argumento al extremo, mientras mi cerebro y mis recuerdos queden intactos, aun cambiando cada parte de mi cuerpo seguiré siendo la misma persona.⁴ Pensemos ahora en el argumento opuesto. Si un conocido

.....

4. Argumentos parecidos ya fueron popularizados por Raymond Kurzweil (el inventor del primer escáner de lectura para ciegos y famoso por sus predicciones del futuro) en defensa de la idea de un hombre cibernético, "transhumano", que pudiera suplantar distintas carencias de nuestro cuerpo y, aparentemente, también de nuestro cerebro.

sufre Alzheimer y sus memorias comienzan a distorsionarse, decimos que “ya no es el mismo”, a pesar de que su cuerpo sea idéntico al que tenía antes de la enfermedad. He aquí, entonces, la importancia de la memoria para definir quiénes somos, para entender cómo está constituida y plantearnos si hay algo que nos diferencia de los animales, de procesos que puede realizar un robot, una computadora o sistemas complejos como Internet.

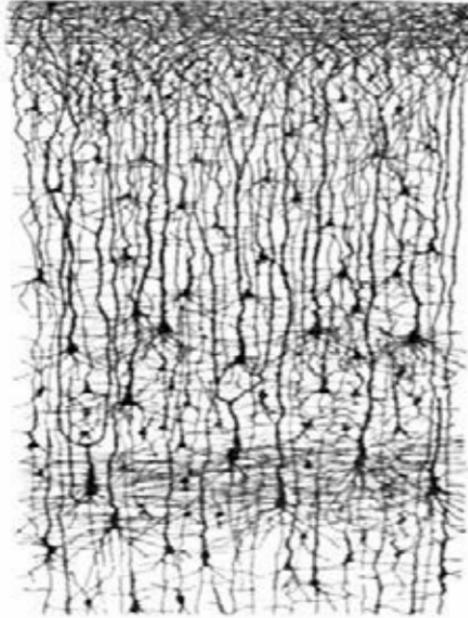
La ciencia se dispara a través de preguntas y las preguntas son justamente el alimento del científico, lo que nos atrapa casi obsesivamente hasta quitarnos el sueño. Si pudiera elegir un mensaje de este libro, uno solo, sería intentar transmitir la magnitud del problema, la fascinación de tratar de entender cómo nuestro cerebro logra cosas tan increíbles como recordar detalles de la escena de *Blade Runner*, los compases de una partitura de Beethoven o distintos momentos de nuestra infancia.

Podemos, en principio, considerar el cerebro como una caja negra, un órgano extremadamente complejo que genera la mente y los pensamientos, y que es capaz de atesorar recuerdos y traerlos al nivel consciente. Quizás sea para muchos suficiente, pero la postura del científico va más allá; es la del chico que ve una radio y saca cuatro tornillos para comprobar qué hay dentro y que, con la radio ya desguazada, mueve el dial y los distintos botones para tratar de entender sus funciones. La pregunta inicial generará más preguntas y siempre, inevitablemente, la impresión de qué poco entendemos. Pero lo importante es generar esa cascada de preguntas y la fascinación por tratar de entender. Digo esto porque probablemente varios interrogantes quedarán

sin contestar del todo. Es que simplemente no sabemos. En las últimas décadas la neurociencia ha avanzado más que en toda la historia de la humanidad, pero muchas de las dudas más profundas, quizás aquellas que más nos fascinan, aún siguen en pie. Lo interesante es que estos cuestionamientos trascienden el ámbito puramente científico. Justamente, tratar de entender cómo la actividad de las neuronas codifica los recuerdos de nuestras experiencias nos lleva de narices a preguntarnos por la conciencia de nosotros mismos, aquello que nos hace sentir que somos una persona. De allí, pasando por la distinción entre mente y materia, nos topamos con las dudas más antiguas de la filosofía; temas que entre muchos otros trataron Platón, Aristóteles, Descartes y que siguen aún preguntándose los filósofos del siglo XXI; temas que son recurrentes en la literatura y el cine de ciencia ficción y que están presentes tanto en foros de inteligencia artificial o neurociencia como en debates sobre religión.

Así como la base de un circuito electrónico es el transistor, la del cerebro son las neuronas, agrupadas en distintas áreas, conectadas las unas a las otras, produciendo con su actividad la capacidad de ver, escuchar, sentir, recordar, escribir, correr o ser conscientes de nuestra propia existencia. Pero ¿cómo pueden las neuronas generar las diversas funciones del cerebro? Esta es una pregunta que, con distintos matices, nos hacemos día a día los neurocientíficos, y a pesar de que aún no llegamos a contestarla del todo, hay principios elementales que son relativamente fáciles de entender.

Figura 1.1
Red de neuronas



Fuente: Imagen adaptada del dibujo original de Santiago Ramón y Cajal.

Las neuronas tienen básicamente dos estados: están en reposo o emitiendo los llamados *potenciales de acción*.⁵ Así como un transistor transmite corriente a otras partes del circuito, las neuronas transmiten sus descargas a otras neuronas a través de los *axones* y reciben la actividad de otras tantas a través de las *dendritas*. Pero partiendo de la

.....

5. Para simplificar, estoy dejando de lado procesos más complejos que ocurren mientras las neuronas no disparan, lo que se conoce como *actividad subumbral*.

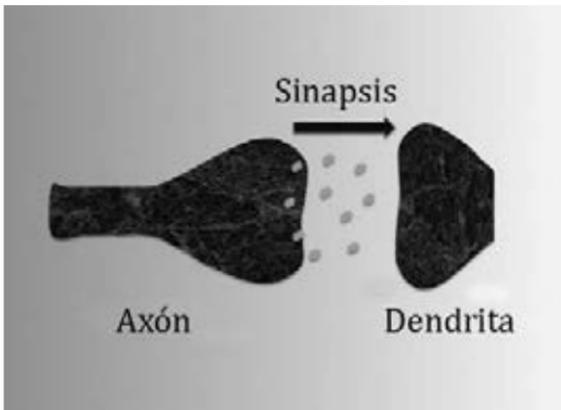
analogía con un circuito electrónico, el contacto entre neuronas no es eléctrico, sino químico. Al activarse, las neuronas generan descargas en las terminales de sus axones que liberan compuestos químicos llamados *neurotransmisores*. En un proceso denominado *sinapsis*, los neurotransmisores son recibidos por receptores en las dendritas de las neuronas con las cuales conectan, generando pequeñas descargas eléctricas en estas. A fin de cuentas, parecería que la diferencia con el circuito eléctrico no es tan grande, ya que las descargas eléctricas de las neuronas se terminan transmitiendo a las neuronas con las que se conectan. Pero esta interfaz química es justamente la base del funcionamiento de distintos fármacos (un analgésico, un calmante o una droga alucinógena no hacen más que cambiar el balance de neurotransmisores en el cerebro y la capacidad de las neuronas de recibir y transmitir información) y es clave para ciertos procesos cognitivos, como es el caso de mecanismos de recompensa (e incluso de adicción) que vienen dados por descargas de dopamina. El rol de neurotransmisores como el glutamato es también fundamental para reforzar o debilitar conexiones específicas entre neuronas, lo cual es precisamente la base de la formación de memorias.

¿Y cuándo disparan las neuronas? Cuando la actividad que reciben de otras tantas supera un cierto umbral. Este mecanismo da lugar a una variedad de comportamientos y respuestas a distinto tipo de estímulos. Por ejemplo, una cierta neurona, llamémosla *N*, podrá disparar en algún momento debido a la actividad de las neuronas que se conectan a ella y transmitir esta descarga a otras tantas. Alguna de estas últimas neuronas, a la vez, transmitirá la descarga al primer grupo, el cual hará nuevamente disparar a la neurona *N*. Es

Qué es la memoria

así que pueden generarse fácilmente diversos patrones de descarga, determinados entre otras cosas por la conectividad entre neuronas. Para darle aún más riqueza al comportamiento de la red, estos patrones de activación también dependen del tipo de neuronas, excitadoras o inhibitoras, las cuales descargan dos tipos de compuestos químicos distintos: en el primer caso, neurotransmisores como la dopamina o el glutamato que, en general, fomentan la actividad de las neuronas a las que se conectan, y en el segundo caso, neurotransmisores como el ácido gamma-aminobutírico (abreviado GABA), que la inhiben.

Figura 1.2
Sinapsis



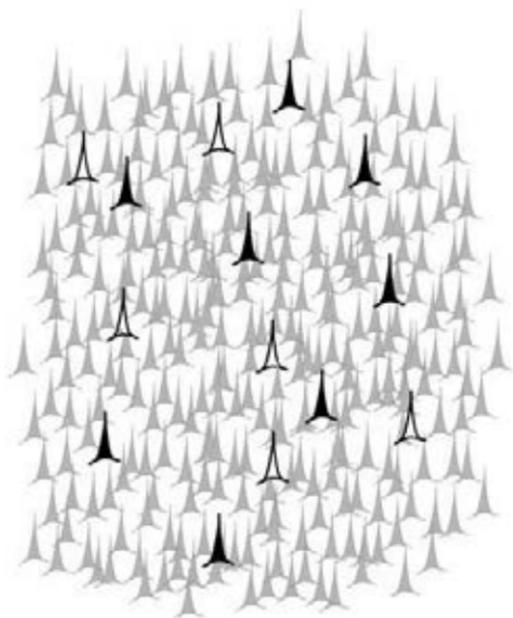
La descarga eléctrica de una neurona se transmite (desde las terminales de su axón hasta las terminales de las dendritas de las neuronas con las que se conecta) mediante la liberación de neurotransmisores en un proceso llamado *sinapsis*.

En neurociencia hay una sorprendente cantidad de físicos que en algún momento de su carrera científica decidieron dar el salto y dedicarse de lleno a estudiar el cerebro (el autor es uno de ellos). El estudio de la actividad de las neuronas y las redes neuronales, y de cómo estas pueden generar distintos tipos de patrones de disparos y replicar funciones cerebrales, es justamente uno de los temas favoritos de los físicos devenidos en neurocientíficos, protagonistas de lo que en nuestros días se conoce como *neurociencia computacional*. Uno de los pioneros en este campo ha sido John Hopfield, un físico estadounidense que actualmente trabaja en la Universidad de Princeton, quien desarrollaría las llamadas *redes de Hopfield*.⁶ Básicamente, las redes de Hopfield muestran cómo la actividad caótica de una red de neuronas puede converger a configuraciones estables y así representar distintas memorias. Imaginemos una red de neuronas interconectadas que están ya sea disparando o calladas. Una dada “memoria A” se corresponderá con una cierta configuración de esta red, por ejemplo: callada, activa, activa, callada, callada... (o en lenguaje binario: 0, 1, 1, 0, 0...). Otra, la “memoria B”, se corresponderá con otra configuración distinta, por ejemplo: callada, callada, activa, activa, activa... (0, 0, 1, 1, 1...), y así sucesivamente.

.....

6. El artículo original de Hopfield, publicado a principios de los ochenta, abrió una importante línea de investigación en neurociencia. Para dar una idea del impacto de este trabajo, mientras la mayoría de los artículos científicos son citados solo unas pocas veces, el artículo de Hopfield tiene, a la fecha, más de seis mil quinientas citas. J. Hopfield (1982): “Neural networks and physical systems with emergent collective computational properties”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 79, pp. 2554-2558.

Figura 1.3
Representación neuronal de dos memorias distintas

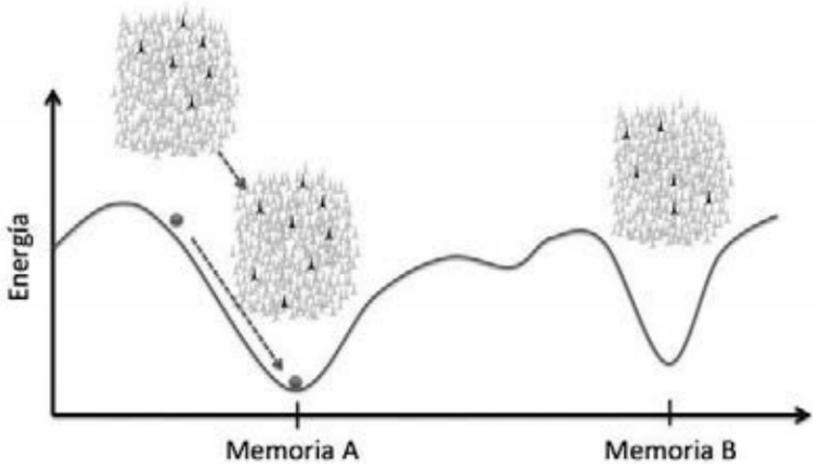


La memoria A se corresponde con la activación de las neuronas resaltadas en negro y la memoria B, con aquellas en blanco.

Entonces, a partir de un cierto estado inicial, la red convergerá a la memoria más cercana. Por ejemplo, la configuración inicial $(1, 1, 1, 0, 0\dots)$ es similar a la de la memoria A y la red dará este resultado; por otro lado, la configuración $(0, 0, 1, 1, 0\dots)$ es más parecida a la memoria B y la red convergerá a la segunda memoria. El proceso de evolución de la red de Hopfield, que a partir de una configuración inicial dada converge a aquella de la memoria más cercana, se da a través de métodos importados de la física, específicamente de la mecánica estadística. Sin entrar en detalles, la idea

general es que se define una energía total de la red (dada por su configuración) y, sobre la base de alteraciones en su conectividad, se asignan las memorias a distintos mínimos de energía. Luego, a partir de una configuración inicial, la red evoluciona reduciendo paulatinamente su energía (cambiando paso a paso la configuración inicial) hasta dar con un mínimo que se corresponderá con la memoria más cercana. La configuración inicial podrá estar determinada por variaciones espontáneas, como cuando evocamos un recuerdo aparentemente de la nada, o por la activación desencadenada a partir de un estímulo determinado, por ejemplo, al ver la cara de Rick Deckard. Esta percepción visual hará disparar un grupo específico de neuronas. Estas, a su vez, harán disparar otras tantas, y así sucesivamente hasta terminar activando una representación parecida a la del recuerdo de Deckard. Dado que la visión que tenemos de Deckard cambia constantemente (podrá estar mirando de frente o de perfil, podrá estar afeitado, vistiendo distinta ropa, etc.), la representación que nos llega no es exactamente la misma que la que guardamos en la memoria, pero mientras sea parecida, la red de neuronas en nuestro cerebro evolucionará hasta dar con la configuración correspondiente a la memoria adecuada. Más de una vez habremos tardado en reconocer a algún conocido, por ejemplo, si cambió su corte de pelo, si se afeitó tras mucho tiempo de usar barba o si lo reencontramos tras muchos años. Esta mayor dificultad de reconocer a la persona en cuestión se debe a que hay una diferencia considerable entre la activación que se genera a partir de ver a la persona y el patrón de activación con el que “guardamos” a esta persona en nuestra memoria.

Figura 1.4
Evolución de una red de Hopfield



A partir de una configuración inicial (a la izquierda), la red evoluciona reduciendo su energía (cambiando gradualmente su patrón de activación) hasta dar con la memoria más cercana (en este caso, "memoria A").

El modelo de Hopfield nos ofrece entonces un mecanismo plausible de cómo el cerebro puede almacenar memorias. Mientras que la definición de la *Enciclopedia británica* describía a la memoria como un fenómeno de comportamiento, ahora también vemos a la memoria como el producto de la actividad de neuronas. En otras palabras, estamos trazando un puente entre la psicología y la neurociencia.

Queda aún por explicar un mecanismo crucial. Argumentamos que el modelo de Hopfield asigna memorias a distintos mínimos de energía a partir de cambios de conectividad en la red. Pero ¿cómo hace el cerebro para cambiar la conectividad entre las neuronas? Cada neurona se conecta con aproxima-

damente otras diez mil, pero no todas estas conexiones están activas. Algunas de ellas estarán muy reforzadas, como una autopista transitada que ofrece una comunicación fluida entre dos lugares, y otras serán como una calle desierta que potencialmente podría conectar dos lugares pero en la práctica no lo hace. Siguiendo la analogía, cambiar la conectividad sería como redireccionar el tránsito; bloquear algunas calles y hacer que otras tantas comiencen a ser transitadas. Este cambio de conectividad conlleva modificaciones en los patrones de disparo de las neuronas, que eventualmente implican cambios en lo que codifican. Esta es la clave de cómo el cerebro puede generar y almacenar distintas memorias; es lo que se conoce como *plasticidad neuronal*.

Hay libros enteros dedicados al estudio de la plasticidad neuronal, la cual ha sido abordada tanto con modelos teóricos como con técnicas experimentales. La idea de que las memorias están dadas por la conectividad entre las neuronas se remonta a los estudios de Santiago Ramón y Cajal, a fines del siglo XIX,⁷ pero la contribución más importante al respecto fue dada por Donald Hebb, en un libro que se convertiría en uno de los clásicos de la neurociencia.⁸ Hebb postuló que la activación simultánea de neuronas refuerza su conexión, lo que suele resumirse en la famosa frase "*Neurons that fire together wire together*" ("Las neuronas que disparan juntas se conectan entre sí"). Esta hipótesis dista mucho de ser una presunción disparatada; si dos neuronas tienden a disparar

.....
7. S. Ramón y Cajal (1894): "The croonian lecture: la fine structure des centres nerveux", *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 55, pp. 444-468.

8. D. Hebb (1949): *The organization of behavior: a neuropsychological theory*, Nueva York, Wiley and Sons.

al mismo tiempo, es muy probable que sea porque codifican algo parecido y entonces tiene sentido que estén conectadas (y que reafirmen su conexión). Análogamente, la conexión entre neuronas que tienden a disparar a distintos tiempos será debilitada. Este proceso da lugar a la formación de lo que se conoce como *Hebbian cell assemblies*, es decir, grupos de neuronas que representan memorias. El postulado de Hebb subyace en el mecanismo de aprendizaje (de actualización de conectividad) implementado en las redes de Hopfield. Fue verificado experimentalmente por Timothy Bliss y Terje Lømo, quienes observaron que la coactivación de neuronas tenía un efecto duradero en la potenciación de sus sinapsis.⁹ Este refuerzo de la conexión entre neuronas, llamado *long term potentiation* (LTP), podía durar al menos varias semanas o meses, si la estimulación era repetida, y daba entonces una clara evidencia experimental del mecanismo en el cerebro que subyace a la formación y el almacenamiento de la memoria. Confirmando esta idea, infinidad de experimentos demostraron que el bloqueo de este mecanismo de potenciación (a través de distintos fármacos) impide la formación de memorias.¹⁰

Parecería entonces que ya tenemos al menos la idea general en respuesta a una de nuestras preguntas: ¿cómo

.....

9. El trabajo original fue publicado en T. Bliss y T. Lømo (1973): "Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path", *Journal of Physiology*, 232(2): 331-356.

10. Entre otros tantos trabajos que demuestran la relación entre LTP y la formación de memorias, véase, por ejemplo, R. Morris, E. Anderson, G. Lynch y M. Baudry (1986): "Selective impairment of learning and blockade of long-term potentiation by an N-methyl-D-aspartate receptor antagonist, AP5", *Nature*, 319(6056): 774-776.

hacen las neuronas para codificar distintas memorias? La visión que ofrece el modelo de Hopfield, junto con la idea de plasticidad neuronal, da una primera noción de cómo las memorias vienen dadas por la activación de distintos grupos de neuronas. Sin embargo, esta respuesta abre otras tantas inquietudes. En particular, cómo hace el cerebro, ese apenas kilo y medio de materia, para almacenar tantas memorias y con tanta riqueza de detalles. O, más explícitamente, ¿tenemos suficientes neuronas para guardar tantos recuerdos?

El cerebro posee aproximadamente cien mil millones de neuronas, o sea, un número del orden de 10^{11} , un uno seguido por once ceros.¹¹ En comparación, hay casi tantas neuronas en el cerebro humano como estrellas en la Vía Láctea (entre 2 y 4×10^{11}). Para hacernos una idea de tamaño número, si imaginamos que cada neurona es un granito de arena, la cantidad de neuronas en nuestro cerebro se correspondería con la cantidad de arena que entra en un camión de carga.¹² Otra noción de la cantidad de neuronas en nuestro cerebro viene dada por su densidad, la cual es de aproximadamente cincuenta mil por milímetro cúbico en la corteza cerebral, o sea, cincuenta

.....

11. Para ser más precisos, un cerebro humano tiene ochenta y seis mil millones de neuronas, según estimaciones recientes. Véase S. Herculano-Houzel (2009): "The human brain in numbers: a linearly scaled-up primate brain", *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 3, art. 31.

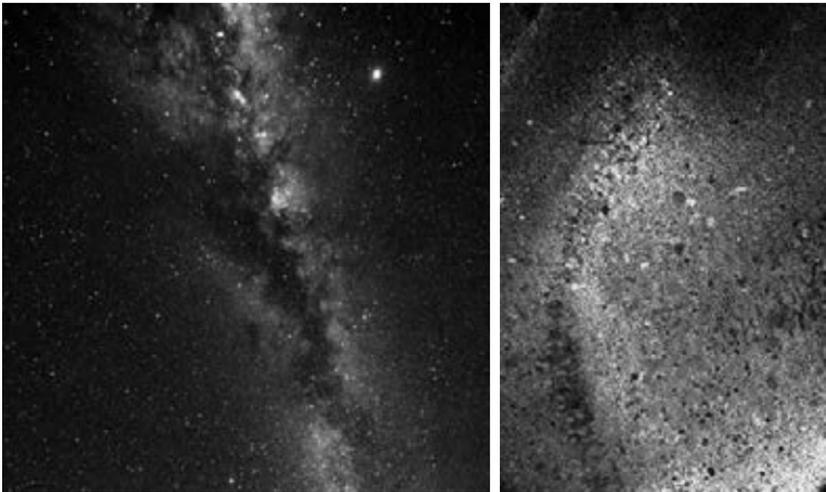
12. Por supuesto, este número depende del tipo de arena y de la capacidad del camión. Considerando que el tamaño de un grano de arena puede ir de los 0,02 mm a los 2 mm de diámetro, tomemos un tamaño medio, digamos de 0,5 mm. En un centímetro entrarán 20 granos de arena, uno al lado del otro, y en un volumen de 1 cm^3 entrarán aproximadamente $20 \times 20 \times 20 = 8.000$ granos de arena. La capacidad de la caja de un camión de carga es de aproximadamente $5 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$, lo cual da un volumen de $15.000.000 \text{ cm}^3$. A 8.000 granos de arena por cm^3 , en un camión de carga entran entonces $15.000.000 \times 8.000 \approx 10^{11}$ granos de arena, que es aproximadamente el número de neuronas en el cerebro.

Qué es la memoria

mil neuronas en el tamaño de la cabeza de un alfiler. También vimos que cada neurona conecta con otras diez mil, con lo cual el número de conexiones en el cerebro es del orden de $10.000 \times 10^{11} = 10^{15}$; siguiendo la analogía anterior, aproximadamente el número de granos de arena en una playa de 100 metros de largo.¹³

Figura 1.5

El número de neuronas del cerebro humano es del mismo orden que el de las estrellas de la Vía Láctea



A la izquierda, imagen de la Vía Láctea. A la derecha, imagen de neuronas.

Fuente: Izquierda, fotografía tomada por el European Southern Observatory. Derecha, Fotografía tomada por Julieta Campi en mi laboratorio.

.....

13. En este caso, consideramos el ancho de la playa de 50 metros y una profundidad de 25 metros (la mitad del ancho).

Con casi tantas neuronas como estrellas en la Vía Láctea, parecería entonces que el cerebro tiene la capacidad de almacenar todas nuestras memorias. Sin embargo, aún enfrentamos dos problemas. Primero, no todas las neuronas están dedicadas a almacenar memorias. De hecho, estas quizás solo sean una pequeña fracción, ya que una proporción importante deberá estar involucrada en el procesamiento visual y auditivo, el control de movimientos, la toma de decisiones, las emociones, etc. Segundo, cálculos teóricos muestran que la cantidad de memorias que puede guardarse con un cierto número de neuronas es limitada debido a problemas de interferencia: si el número de memorias es muy grande, estas comienzan a confundirse las unas con las otras. Considerando un número N de neuronas, dichos cálculos estiman que con un modelo como el de Hopfield se pueden almacenar alrededor de $0,14 \times N$ memorias sin interferencia.¹⁴ Pues entonces, si de los cien mil millones de neuronas en el cerebro asumimos que, por ejemplo, solo un 1% está involucrado en la codificación de memorias,¹⁵ y si a esto le agregamos que solo alrededor de un 14% de este número da la cantidad de memorias que podemos almacenar, esto nos da del orden de 10^8 , es decir, cien millones de memorias. Por

.....

14. Este valor es para un tipo específico de configuración, pero al menos da un orden de magnitud para las siguientes estimaciones. Para más detalles, véase E. Gardner (1987): "Maximum storage capacity in neural networks", *Europhysics Letters*, 4(4): 481-485.

15. A pesar de que es casi imposible estimar la proporción de neuronas involucradas en la codificación de los recuerdos en general, un trabajo con registros en monos estimó que alrededor de un 1,7% de las neuronas en la corteza inferotemporal estaban involucradas en una tarea de recolección de memoria. Para más detalles, véase K. Sakai y Y. Miyashita (1991): "Neural organization for the long-term memory of paired associates", *Nature*, 354(6349): 152-155.

supuesto, debemos tomar estas estimaciones con cuidado porque puede que el número de neuronas dedicado a almacenar memorias sea aún menor que un 1%, o puede también que el cerebro no almacene memorias usando estrategias como la dada por las redes de Hopfield, lo cual eventualmente podría disminuir aún más la capacidad de memoria. Pero la conclusión importante es que, aunque este número fuera uno o dos órdenes de magnitud más bajo (alrededor del millón), la cantidad de neuronas del cerebro parece suficiente como para almacenar nuestros recuerdos. Sin embargo, aún enfrentamos un problema mucho más grave...

La limitación más importante de los argumentos anteriores es que hay un paso abismal entre entender cómo el cerebro puede usar, por ejemplo, redes de Hopfield para codificar “memoria A”, “memoria B”, etc., y entender el mecanismo con el que guarda un recuerdo como el del replicante frente a Deckard, el de los compases de la quinta sinfonía de Beethoven o los matices y eventos concretos que recordamos de un asado con amigos. En otras palabras, creemos recordar hechos de nuestro pasado como si se tratara de una película que revivimos a partir de nuestra memoria. Pero ¿cómo hace el cerebro para almacenar todas estas “películas” con tanto detalle? ¿Cómo pasamos de explicar el mecanismo para almacenar conceptos específicos (memoria A, memoria B) a algo mucho más complejo como la reconstrucción de una experiencia dada? Más aún, los conceptos específicos aparecen con distintos matices. No es lo mismo mi madre con su vestido rojo de fiesta, con un delantal en la cocina o con una camiseta amarilla en la terraza. Y cada una de estas memorias se desdobra en otras tantas, ya que mi madre con la camiseta amarilla en la terraza podrá estar

amasando pastas, tomando mate o preparando la carne para un asado. Esto es lo que se llama *explosión combinatoria*: cada concepto da lugar a una variedad de conceptos más específicos; cada uno de estos, a su vez, se divide en otros tantos, y así sucesivamente.

¿Cómo hacemos, entonces, para almacenar toda esta información? La respuesta, sorprendente, es que no recordamos casi nada. La idea de que recordamos una gran cantidad de matices y detalles de nuestras experiencias como en una película no es más que una ilusión, una construcción del cerebro. Y este es, quizás, el secreto más importante en el estudio de la memoria: entender que a partir de muy poca información, el cerebro genera una realidad y un pasado que nos lleva a ser quienes somos, más allá de que este pasado, esta colección de memorias, sea extremadamente lábil; más allá de que el solo hecho de traer al consciente un recuerdo inevitablemente implica cambiarlo; más allá, entonces, de que la sensación de ese “yo” único e inmutable, aquello que define quién soy, esté cambiando constantemente. Este es, justamente, el tema de los próximos capítulos, pero antes de discutir qué poco recordamos, nos detendremos a analizar cuánta información del mundo exterior –particularmente cuánta información visual– procesa el cerebro.