

Rob DeSalle y Ian Tattersall

# El cerebro

Big Bangs, comportamientos y creencias

Galaxia Gutenberg



© Denis Finin

**Rob DeSalle**, es conservador e investigador del Instituto para la Genómica Comparada del Museo Americano de Historia Natural, donde ha sido comisario de varias exposiciones, entre ellas «El cerebro: Una historia desde dentro».



© American Museum of Natural History

**Ilan Tattersall** es conservador emérito de la División de Antropología del Museo Americano de Historia Natural, y en este museo ha sido comisario, junto a DeSalle de la exposición «La antesala de los orígenes humanos».



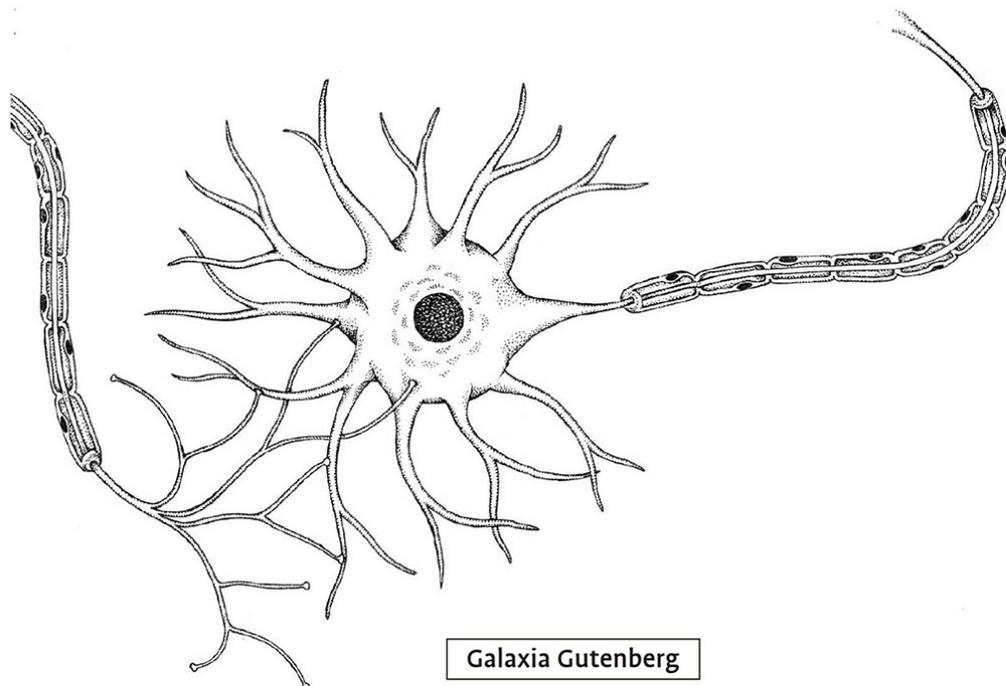
ROB DESALLE Y IAN TATTERSALL

# El cerebro

Big Bangs, comportamientos y creencias

Ilustrado por  
Patricia J. Wayne

Traducción de  
Irene Cifuentes y Beatriz García Ríos



Título de la edición original: *The Brain. Big Bangs, Behaviours, and Beliefs*  
Traducción del inglés: Irene Cifuentes de Castro y Beatriz García Ríos

Edición al cuidado de María Cifuentes

Publicado por:  
Galaxia Gutenberg, S.L.  
Av. Diagonal, 361, 2.º 1.ª  
08037-Barcelona  
info@galaxiagutenberg.com  
[www.galaxiagutenberg.com](http://www.galaxiagutenberg.com)

Edición en formato digital: febrero 2017

© Rob DeSalle y Ian Tattersall, 2012  
© de las ilustraciones: Patricia J. Wynne  
© de la traducción: Irene Cifuentes y Beatriz García, 2017  
© Galaxia Gutenberg, S.L., 2017  
Imagen de portada: © American Museum of Natural History

Conversión a formato digital: María García  
ISBN Galaxia Gutenberg: 978-84-16734-70-2

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede realizarse con la autorización de sus titulares, a parte las excepciones previstas por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra ([www.conlicencia.com](http://www.conlicencia.com); 91 702 19 70 / 93 272 04 45)

*Para Erin, Jeanne y Maceo*

# Índice

Prólogo

Agradecimientos

1. La naturaleza de la ciencia. *El funcionamiento de nuestro cerebro*
  - Un desorden evolutivo poco elegante pero bastante eficaz
  - Pensar en el pensamiento
  - Compartidos, derivados. Derivados, compartidos. Eso es todo lo que sabéis de la Tierra y todo lo que necesitáis saber
  - ¿Podría ser el Árbol de la Vida una tabla periódica de la evolución?
  - La historia de una ciencia histórica
  - Mantener al médico alejado
  - El zigzag evolutivo
2. Los pormenores del sistema nervioso
  - Todo empezó con una explosión
  - Iones, las herramientas de trabajo del sistema nervioso
  - El origen de la vida
  - Un baile eléctrico
  - La evolución de los tipos de células
  - Se abre la caja de Pandora
  - ¡Cuidado con los espacios! El conectoma está a punto de llegar
3. El lugar de nuestro cerebro en el Árbol de la Vida
  - ¿Aún tenemos *quorum*?
  - ¿Tiene Dicty criterio?
  - ¿Tienen cerebro las plantas?

Esponjas que estornudan, ¿realidad o ficción?

¿Una red neural es un sistema nervioso?

¿Cerebridad?

El cerebro de la mosca del vinagre visto de cerca

Dibujos al revés

Seguimiento de los cerebros en «cuasi» vertebrados

Ciclóstomos

Cuando las apariencias engañan

#### 4. Dar sentido a los sentidos

Evolución sensorial

Hágase la luz: en el principio eran los GPCR

Las ondas sonoras se transforman en impulsos nerviosos

Un caníbal le dice a otro mientras se comen a un humorista: «Éste no sabe tan gracioso como yo pensaba»

Olor

Tacto

Mantener la orientación

El camino hacia el cerebro es muy largo

#### 5. El procesamiento de la información

La respuesta de los organismos unicelulares a la percepción puede ser compleja

Percepción y redes cneurales en cnidarios

Complejidad cerebral y sentidos en los insectos

Cerebros de peces, cerebros de peces, cerebros de peces regordetes.

El que algo quiere, algo le cuesta

«Límbico» y «Triuno» también son palabrotas

Cómete las natillas, cómetelas, cómetelas

La limpieza del pasillo sináptico

Lo bueno, lo malo y lo feo de los neurotransmisores

#### 6. Emociones y memoria

Estoy un poco *Verklemt* (Mike Myers)

Para que pudiéramos tener rosas en diciembre

No es tan guapa como Heidi Klum, pero hay que ver qué buena modelo

Aquí Phineas Gage, aquí Henry Molaison (H.M.)

¿LTP? OMG CRS

Cuando era más joven era capaz de recordarlo todo, incluso aunque no hubiera ocurrido (Mark Twain)

#### 7. La evo-devo del cerebro

Fotos subidas de tono

Cómo consigue el cerebro sus rayas

Hace como los monos, que cuanto más alto trepa, más enseña el trasero  
(Francis Bacon)

Regreso al mundo del ARN

El tamaño importa (¿o no?)

Microcefalia

#### 8. Letra y música de...

Las áreas de lenguaje y el área del lenguaje

FOXP2

Tirar la red para pescar un árbol de idiomas

Todo el mundo me habla (Harry Nilson)

Acestros cantores y la escuela del rock

#### 9. Decisiones, conductas y creencias

Cuando llegues a la bifurcación... tómala (Yogi Berra)

¿Casos divinos, abducciones alienígenas y el blues?

Y luego están los adolescentes

#### 10. El cerebro humano y la evolución cognitiva

El punto de partida

Los primeros homínidos

«Simios bípedos»

La fabricación de herramientas de piedra

La presentación en sociedad

La apropiación del viejo mundo

El primer homínido cosmopolita

Neandertales y cromañones

La aparición de la conducta moderna

¿Cómo ocurrió?

Epílogo

Cronología

Glosario

Bibliografía citada y otras lecturas

## Prólogo

No es necesario escudriñar minuciosamente los confines del cosmos para encontrar el misterio más profundo del universo. No tenemos más que buscar entre nuestras orejas. No hay mayor desafío para la mente humana que el empeño por comprender el funcionamiento del cerebro que la produce. Sin embargo, a pesar de unas enormes dificultades de orden práctico, el esfuerzo por comprender cómo produce el cerebro la mente es tal vez más fascinante intrínsecamente que cualquier otra búsqueda científica. Los otros muchos órganos que forman nuestro cuerpo se entienden bastante bien como máquinas cuyas funciones, aunque complejas, están definidas con bastante claridad. El desafío especial que plantea la máquina cerebral es que en su interior también habita un fantasma: nuestra conciencia naciente, cuyas propiedades exceden con mucho la suma de las conexiones internas y las descargas electromagnéticas que la originan.

Lo mismo ocurre, al menos hasta cierto punto, en el caso del «cerebro» de todas las demás criaturas que poseen uno: al fin y al cabo, cada una tiene algún tipo de conciencia, aunque sólo sea la capacidad rudimentaria de distinguir entre «uno mismo» y «otro». Pero, no obstante, el cerebro humano tiene algo muy especial. Hasta donde podemos decir, es único no sólo por su capacidad para responder a los estímulos del mundo que lo rodea, sino también para recrear literalmente ese mundo en la imaginación. Nadie sabe con exactitud cómo lo consigue, pero no sólo se comprende ya en gran medida su estructura y funcionamiento, sino los contextos zoológicos y evolutivos globales en los que han de incluirse el increíble y moderno cerebro humano y sus propiedades únicas. Estos son los temas de este libro y de la exposición del Museo

Americano de Historia Natural (*El cerebro: la verdadera historia*) que lo inspiró.

Nuestro cerebro lleva en su estructura la marca de una ascendencia larga y tortuosa. Esta extraña máquina es algo que jamás habría diseñado un ingeniero humano; y si no comprendemos su compleja y progresiva historia de quinientos millones de años, no sabremos explicar su aparente desorden. Por lo tanto, es necesario analizarlo desde el punto de vista evolutivo. Pero si un enfoque evolutivo para comprender el cerebro humano pudiera llegar a tener algún sentido, necesitamos saber también dónde encajamos nosotros dentro del gran orden de la vida. La razón es que el mundo vivo que nos rodea, y la manera en que está organizado, ofrece una serie de pistas sobre cómo logramos nuestra insólita excelencia intelectual. Sin embargo, ni siquiera la combinación de conocer nuestro lugar en la naturaleza y cómo llegamos hasta ahí es suficiente. También tenemos que comprender los mecanismos evolutivos que subyacen.

La mayoría de nosotros aprendimos en el colegio –si es que alguna vez lo mencionaron– que en esencia la evolución supone una mejora constante a lo largo de los tiempos. Pero durante nuestra propia vida académica llegamos a apreciar que la evolución es mucho más que esto. Y una vez que nos damos cuenta de que la evolución no es siempre el mecanismo de precisión que pensábamos muchos de nosotros, podemos empezar a valorar más plenamente los datos de nuestra historia biológica como seres humanos.

Nuestro registro fósil, los restos físicos que se conservan de nuestros antepasados, proporciona estos datos básicos. Entre otras cosas, los fósiles revelan el aumento espectacular que ha experimentado el tamaño del cerebro humano durante los últimos dos millones de años. Y en el caso humano hay algo más que es casi exclusivo. Porque, debido a los dos millones y medio de años, o más, transcurridos desde la invención de las herramientas de piedra, tenemos también el registro arqueológico, un historial directo de las conductas de nuestros predecesores homínidos. Comparando nuestros registros físicos y conductuales podemos comprender mejor los patrones de innovación del pasado en la evolución humana, y podemos empezar a reconstruir el marco dentro del cual afloró el extraordinario espíritu humano.

Aun así, no podemos hacerlo sin comprender primero los demás tipos de cerebros que existen en la tierra, y cómo es que algunos seres vivos se las arreglan a las mil maravillas sin ninguna clase de cerebro. Y también tenemos que saber cómo funciona hoy nuestro cerebro. Por ahora sigue siendo un misterio cómo se genera exactamente nuestra conciencia humana única. Pero ya se conoce mucho acerca de los procesos cerebrales a nivel molecular, anatómico y funcional; y las nuevas técnicas de obtención de imágenes nos han ofrecido un conocimiento sin precedentes del funcionamiento de nuestro cerebro. Esta tecnología nos permite ver en tiempo real qué ocurre de verdad en el cerebro humano cuando está sometido a estímulos específicos o desempeña unas tareas en particular. Hemos desarrollado también una apreciación avanzada de la estructura «laminar» del cerebro y de cómo se relaciona esto con las funciones cada vez más complejas que han adquirido los cerebros de los vertebrados a lo largo de los tiempos.

En este libro examinaremos todos los factores que llevaron a nuestra capacidad para «pensar en el pensamiento», y veremos cuán única es nuestra forma moderna de procesar la información. Gracias a algunos avances notables, llegaremos a comprender bien la auténtica complejidad (y la impenetrabilidad) de los procesos de toma de decisiones que tienen lugar en nuestro cerebro, y estudiaremos cómo el desorden (y la creatividad) de nuestros procesos mentales son el resultado de la larga y ajetreada historia evolutiva del cerebro. Veremos cómo las cualidades de nuestra mente que más valoramos son «emergentes», y no productos perfeccionados de la inexorable selección natural.

También miraremos hacia el futuro de nuestro cerebro. Somos los últimos en llegar y los únicos herederos homínidos de la tierra. Sin embargo, en nuestra corta ocupación hemos producido un mayor impacto en el planeta que cualquier otra especie. Gran parte de los efectos negativos de la actividad humana son productos secundarios: consecuencias involuntarias de una actitud temeraria. ¿Es posible que la evolución haga que administremos mejor nuestro entorno? ¿Podemos esperar que la ingeniería genética nos haga más responsables o más eficaces o sencillamente mejores? ¿O vamos a tener que aprender a vivir con nosotros mismos tal como somos? Esperamos demostrar

que somos capaces de comprender estas importantes cuestiones siempre que nos mantengamos en un contexto evolutivo; y de hecho puede que incluso seamos capaces de lidiar con las consecuencias de nuestras actividades sólo si admitimos y compensamos el desorden de nuestros procesos mentales.

## Agradecimientos

Damos las gracias a Lauri Halderman y a sus coautores, Martin Schwabacher, Margaret Dornfeld y Sasha Nemecek por la inteligente y cuidada elaboración de los rótulos de la exposición *El cerebro: la verdadera historia*. Citamos sus textos varias veces en este libro, y esos pasajes muestran claramente cómo pueden hacer comprensibles unos temas difíciles. También queremos dar las gracias a David Harvey por el espléndido diseño de la exposición y por llevarla con tanto éxito hasta su finalización. Entre los otros muchos que contribuyeron a la exposición, Helene Alonso merece un reconocimiento especial por sus creativas actividades interactivas, las cuales mencionamos varias veces. En el plano científico, nuestra gratitud es para los dos colaboradores científicos de Rob, Joy Hirsch y Maggie Zellner, que compartieron el comisariado de la exposición. Sin su aportación, nuestro conocimiento de gran parte de la neurociencia de la que hablamos en este libro hubiera sido mucho menor de lo deseable. Agradecemos también a Vivian Schwartz, voluntaria del museo y guía de la exposición *El cerebro*, que leyó el manuscrito y nos hizo unos primeros comentarios estupendos, y a Ashley Emmell, asistente del programa de Rob «Trae a tus hijas al trabajo», cuya experta capacidad organizativa nos ayudaron enormemente con los dibujos de este libro. Y naturalmente, nuestro agradecimiento a los miles de patronos del museo que vieron la exposición durante su permanencia en el Museo Americano de Historia Natural. Fue su entusiasmo y su interés por esta exposición lo que realmente estimuló la redacción de este libro.

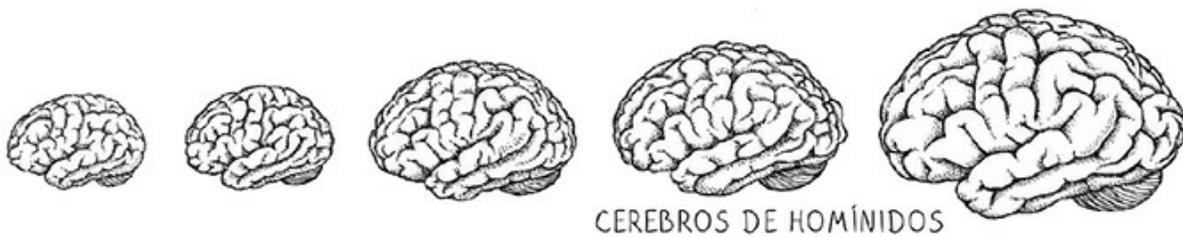
En Yale University Press, estamos enormemente agradecidos a nuestra editora, Jean Thomson Black, cuyo entusiasmo puso en marcha el proyecto y

sus sugerencias editoriales mejoraron muchísimo el producto final; a Laura Jones Dooley, por su impecable labor de corrección; a Jesse Hernandez, por su esmero; y a Sara Hoover, que se ocupó de los detalles con una amabilidad y eficacia a toda prueba. Damos las gracias a Don McGranaghan, Diana Salles, Jennifer Steffey, Willard Whitson y Gisselle Garcia por su ayuda con las ilustraciones del capítulo 10. Y finalmente quisiéramos mencionar el placer que ha supuesto trabajar una vez más con la principal ilustradora de este libro, Patricia J. Wynne. Sus ilustraciones son atractivas, y su aportación va siempre mucho más allá de lo visual.

# EL CEREBRO

## La naturaleza de la ciencia

*El funcionamiento de nuestro cerebro*



¿Qué significa pensar en el pensamiento? Sólo los miembros de nuestra especie pueden hacer esta pregunta. Ningún otro organismo de este planeta posee la estructura física y neuronal para poder llegar siquiera a plantearla. Y la respuesta supone a veces un viaje intelectual intrincado, si bien uno cuyo destino es el cerebro humano. Comprender cómo adquirimos nuestro particular carácter cognitivo humano moderno requiere examinar muchos tipos de pruebas, gran parte de ellas recogidas del estudio de una enorme variedad de organismos vivos, pero siempre en un contexto evolutivo. El enfoque evolutivo culmina en la historia más intensa y espectacular de todas: cómo, después de varios millones de años peleando contra muchas otras especies de homínidos por un espacio ecológico, una única estirpe de nuestra familia zoológica logró eliminar toda competencia hasta que no quedó más que un actor en el escenario evolutivo humano: nosotros.

Nuestro cerebro gobierna casi todas las acciones que emprendemos. Desde el punto de vista conductual, es el que hace que cada uno de nosotros sea un individuo único. Y en conjunto, el cerebro humano, extraordinario y sin precedentes, es el que hace posible que nuestra especie sea la entidad psicológicamente compleja, sumamente característica y en ocasiones extraña,

que es. Este libro trata de esta masa delicada, complicada en su configuración, y sin embargo muy adaptable, que reside en el interior de nuestra inusualmente grande bóveda craneal y que nos permite a cada uno de nosotros experimentar el mundo del modo en que sólo los humanos lo hacen. Trata de los orígenes sencillos del cerebro y de su larga historia evolutiva: de cómo está estructurado, cómo funciona y cambia a lo largo de la vida, y de cómo hemos llegado a saber lo que sabemos –tanto y sin embargo tan poco– sobre el más misterioso de los órganos.

#### UN DESORDEN EVOLUTIVO POCO ELEGANTE PERO BASTANTE EFICAZ

Por mucho que queramos jactarnos de que nuestro cerebro actual ha permitido a nuestra especie conseguir tanto, el psicólogo cognitivo de la Universidad de Nueva York Gary Marcus lo ha equiparado a un «apaño»: las típicas soluciones poco elegantes pero eficaces que aporta un manitas de la mecánica a los problemas. Como veremos más adelante, esto es así porque, cuando se examina, resulta ser una solución improvisada a una larga sucesión de problemas evolutivos. El cerebro humano no es el único en esto, ya que el órgano «desordenado» que habita en nuestra cabeza es sólo un ejemplo del tipo de historia embrollada que acumula la mayor parte de las estructuras de los organismos vivos; pero puede que sea el más maravilloso de los ejemplos.

Si tuviéramos que diseñar un cerebro empezando desde cero, sin duda no se parecería al nuestro ni funcionaría como él. Puede que se pareciera mucho a un ordenador moderno, o algo aún más elegante, pero con toda seguridad no sería el aparato enrevesado de Rube Goldberg que tenemos dentro de la cabeza. Como ejemplo de lo poco eficaz que resulta el diseño de nuestro cerebro, baste observar cómo almacenamos los recuerdos. La forma más fácil de almacenar algo es darle una signatura, ponerlo donde le corresponda almacenarse según esa signatura y llevar un registro de todas las signaturas. Los bibliotecarios lo hacen, también los científicos de museos, y gran parte de la vida moderna cotidiana de los hombres consiste en dar signaturas a las cosas de modo que podamos almacenarlas con lógica para recuperarlas con

facilidad, ya sea en tarjetas, notas adhesivas, hojas de cálculo Excel o en carpetas de ordenador. En efecto, nuestros ordenadores son probablemente el epítome de cómo *debería* el cerebro humano almacenar cosas. Pero aunque nuestro cerebro tenga los conocimientos suficientes para diseñar ordenadores que sean sistemas eficaces de almacenaje y recuperación de informaciones –y de hecho ha ideado métodos muy eficientes y casi perfectos en este ámbito–, los recuerdos que habitan dentro de nuestro cerebro no están almacenados de una manera eficaz en absoluto. Por esta razón olvidamos tantas cosas y tan a menudo nuestros recuerdos son confusos. Si las últimas estimaciones sobre la poca fiabilidad de los testimonios de testigos en procesos criminales son exactas, entonces nuestro cerebro es un desastre en cuestiones de almacenamiento y recuperación.

Además, la memoria es sólo un ejemplo de nuestras incompetencias mentales: otros muchos aspectos de nuestro cerebro están creados con menos lógica todavía. ¿Por qué? La razón es sencilla y es histórica. Los seres humanos sólo somos una especie de un gran Árbol de la Vida que se ha ido separando y ramificando a partir de un único antepasado común que vivió hace más de tres mil quinientos millones de años. Como consecuencia de este experimento de tres mil quinientos millones de años, nuestro genoma –y los genomas de todos los organismos que han vivido alguna vez en este planeta– transporta datos de nuestro pasado, nuestro presente y aún nuestro posible futuro. Como veremos, la evolución no es el proceso de optimización que muchas veces se cree que es, sino que con frecuencia es rehén de la historia y el azar. Y esta es la razón por la que nuestro cerebro está tan desordenado.

## PENSAR EN EL PENSAMIENTO

Empecemos este libro planteando la cuestión de cómo hacemos para tratar de comprender el cerebro humano y sus propiedades, ya que es fundamental para entender todo lo que viene a continuación. Todas las especialidades que contribuyen a nuestro conocimiento del cerebro como entidad evolutiva y funcional son disciplinas científicas. Y muchos de los frutos del cerebro –por

ejemplo, la ficción, la poesía y las ideas espirituales— apenas son susceptibles de un análisis científico, porque la ciencia trata únicamente de lo que podemos observar acerca del mundo material. Pero en la medida en que el cerebro humano es un objeto material en funcionamiento sobre el que es posible realizar observaciones reiteradas, es también un objeto apropiado —tal vez *definitivo*— para aplicarle el método científico de comprensión del mundo que las propiedades únicas del cerebro humano hacen posible.

La interpretación científica se diferencia de todos los demás tipos de conocimiento en que es explícitamente *provisional*. Tal vez uno de los mayores mitos de la edad moderna es que la ciencia es un sistema autoritario que acumula montones de hechos objetivos inmutables. La realidad es todo lo contrario. Porque aunque depende de la creatividad y la intuición humanas como cualquier otro empeño intelectual, la ciencia se basa en la duda y las preguntas que conlleva, y eso es lo que la distingue. De hecho, la frase «científicamente demostrado» es uno de los tópicos más engañosos que oímos. La ciencia no trata realmente de probar nada. En cambio, los científicos se acercan poco a poco a una descripción más precisa y exacta de la naturaleza proponiendo ideas sobre ella (que es donde entra la creatividad) y luego descartando aquellas que no resisten un examen riguroso (que es donde la duda entra en escena). Naturalmente, para que los futuros científicos hagan lo mismo, esas ideas se han de poder comprobar explícitamente, de modo que para que una idea sea científica tiene que formularse teniendo en cuenta que se puede refutar. Si una idea no se puede comprobar de alguna manera en el mundo observable, entonces no es una idea estrictamente científica (aunque en su trama más amplia la ciencia puede intercalar nociones que en la práctica no se pueden comprobar directamente, al menos con las herramientas que tenemos a mano en la actualidad).

Algunas ideas científicas han resistido el análisis de generaciones de científicos durante décadas o incluso siglos; otras puede que sean falsificadas en el futuro. Si se rebaten, tendrán entonces que desestimarse, por muy ingeniosas que sean o muy apegados a ellas que estén sus autores. Este proceso de proponer y probar hipótesis hace de la ciencia la actividad colectiva suprema. Es mucho más difícil imaginar un mundo con un solo

científico que imaginarlo sin ninguno en absoluto. Al fin y al cabo, la ciencia es un sistema autocorrector que depende de su propio régimen de vigilancia interno, un régimen que se mantiene gracias a una pluralidad de ideas que es esencial. En realidad, esta es una de las cosas que hace que un científico sea tan sosegado: a diferencia de un ingeniero o un médico, cuyas decisiones han de ser correctas o las consecuencias pueden ser desastrosas, un científico se puede equivocar y seguir pensando que está realizando una valiosa aportación a un proceso en marcha, un proceso que es mucho más importante que cualquier individuo. Los resultados de no saber nunca con certeza que se tiene razón y tener que admitirlo de inmediato cuando resulta que se está equivocado, son pequeños precios que hay que pagar por esta clase de satisfacción.

Así pues, el conocimiento científico es un blanco en constante movimiento. Es un proceso, no un producto permanente, ya que el producto propiamente dicho está siempre cambiando; lo cual, después de todo, es de lo que trata la literatura científica, inmensa y creciendo a un ritmo cada vez más rápido. Es más, en contra de la creencia habitual, el proceso propiamente dicho no está siquiera unificado por el «método científico» del que oímos hablar constantemente. El gran biólogo Peter Medawar, tal vez el mejor escritor científico de todos los tiempos, hizo nuestro comentario favorito sobre este tema en 1969: «Pregunta a un científico qué considera él que es el método científico y adoptará una expresión que es al mismo tiempo solemne y esquiva: solemne, porque cree que debe manifestar una opinión; esquiva, porque no sabe cómo ocultar el hecho de que no tiene una opinión que manifestar». La realidad es que no hay un método científico sino muchos, cada uno de ellos diseñado específicamente para adecuarse al fenómeno que se está investigando. Más que una fórmula rígida que dicta cómo se debe proceder, la ciencia es sencillamente una aproximación al saber.

Sin embargo, a pesar de que el gran proceso científico es amorfo, es de toda justicia concluir que, como resultado de su funcionamiento, la imagen que hoy tenemos del universo y su contenido es más precisa de la que teníamos ayer, aunque casi con toda seguridad es menos exacta de la que tendremos mañana. Y la suma total del conocimiento científico en cualquier momento nos

ofrece, sin duda, una plataforma lo bastante firme como para que podamos avanzar, con constancia y seguridad, hacia el conocimiento del mañana. De hecho, algunas ideas y observaciones científicas de la naturaleza han demostrado ser tan duraderas y resistentes a la falsificación que las podemos considerar el equivalente científico de la realidad, aunque la comprobación continuará siempre.

COMPARTIDOS, DERIVADOS. DERIVADOS, COMPARTIDOS. ESO ES TODO LO QUE SABÉIS DE LA TIERRA Y TODO LO QUE NECESITÁIS SABER

Una de esas hipótesis sólidas sobre el mundo es el concepto de evolución. Un siglo y medio después de que fuera propuesta, la evolución sigue siendo la única hipótesis científica que tenemos que realmente *predice* la organización que observamos en el mundo vivo, a saber, que los organismos se encuadran claramente en un sistema de grupos dentro de grupos que se puede representar mediante un diagrama ramificado (un «árbol») en el que las bifurcaciones se repiten. Este modelo se ha corroborado una y otra vez a medida que nuestro conocimiento de la biosfera ha ido creciendo a pasos agigantados.

Hoy sabemos que los orígenes de la biología evolutiva moderna se remontan al año 1858, cuando los naturalistas británicos Charles Darwin y Alfred Russel Wallace presentaron sus teorías de la evolución en una reunión de la Sociedad Linneana de Londres. Este acontecimiento histórico apenas fue valorado en aquel momento por el giro decisivo que suponía, pero la publicación un año después de la obra magistral de Darwin *El origen de las especies mediante la selección natural* cautivó al mundo. El propio Darwin calificaba la evolución de «descendencia con modificaciones», una forma muy nítida de expresar que todos los organismos vivos, por muy dispares que sean, están relacionados por ascendencia. Esto es lo que da lugar al modelo de naturaleza que acabamos de señalar.

Empezando por la base del árbol que describe este modelo, un único antepasado común da lugar a las tres ramas principales o dominios de vida: Bacteria, Archaea y Eukarya. Cada uno de estos grandes grupos se diversificó

reiteradamente del mismo modo para producir la enorme profusión de subgrupos que vemos en la actualidad. El Eukarya (los eucariotas), por ejemplo, consta de numerosos grupos de organismos, a veces de aspecto muy distinto, que sin embargo están unidos por poseer células complejas con núcleos envueltos por una membrana. El núcleo era, desde luego, un rasgo que estaba presente en el antepasado común del grupo. Los eucariotas comprenden, entre otros organismos, todos los animales y plantas, desde las simples criaturas unicelulares pasando por los musgos, plantas verdes, hongos, esponjas, platelmintos, estrellas de mar, tiburones, ranas, serpientes y cocodrilos hasta los ornitorrincos y los seres humanos. A su vez, cada uno de estos y otros grandes subgrupos de eucariotas se subdividen una y otra vez hasta encontrarnos literalmente con millones de especies.

Reconocemos la secuencia de las escisiones evolutivas que dieron lugar a esta diversidad casi inimaginable al buscar rasgos «derivados» (como el núcleo envuelto por una membrana en el caso de los eucariotas) cuya posesión vincula a los diversos grupos y subgrupos. Cualquier aspecto que compartan todos los miembros de un grupo concreto, excluidos todos los demás, deberá su presencia en principio a la herencia de su antepasado común, y será la prueba fehaciente de la unidad genealógica del grupo. Además del núcleo celular, otra característica derivada clásica la constituyen las plumas de las aves, cuyo descubrimiento en ciertos fósiles de dinosaurio en un estado de conservación increíble, nos ha permitido corroborar hace poco la idea de que estos dos grupos están íntimamente relacionados. Características como ésta nos permiten reconocer los límites de cada grupo excluyendo de él las especies que no las tienen o que al menos no descienden de antepasados que la poseían; sirven también para admitir en el grupo a nuevos miembros potenciales a medida que se vayan descubriendo.

En cambio, los muchos rasgos «primitivos» del antepasado común que no eran exclusivos suyos se encontrarán más extendidos de lo que es únicamente el grupo descendiente. De este modo, no se pueden utilizar para determinar la pertenencia a ese grupo, aun cuando todos los miembros del grupo los posean. Así que, si bien una inspección somera de la forma de sus cuerpos nos indicaría casi seguro que un salmón y un pez pulmonado estaban más

estrechamente relacionados entre ellos de lo que cada uno lo está con una vaca, del examen resulta que el pez pulmonado y la vaca pertenecen a un único grupo que comparte un antepasado común mucho más reciente del que tiene cada uno con el salmón. El pez pulmonado y el salmón tienen un parecido superficial porque siguen compartiendo el hábitat acuático que ocupaba el ancestro aún más lejano de los tres. La vaca ha llegado a ser tan peculiar en virtud de la adaptación a un entorno completamente nuevo, mientras que el salmón y el pez pulmonado, que se encuentran en ramas independientes del árbol, se mantuvieron relativamente sin cambios. Otros factores que vienen a complicar la comprensión de la geometría del gran Árbol de la Vida se encuentran cuando los organismos han cambiado tanto durante largos periodos de tiempo que quedan pocos caracteres reconocibles que los unan, o en casos de «convergencia» en los que criaturas con un parentesco remoto han desarrollado adaptaciones muy similares.

Los organismos, pues, poseen rasgos que nos pueden confundir y hacernos pensar que son iguales. Son los que Darwin llamaba «analogías». Hoy día los llamamos «convergencias» o, en la jerga de la genealogía, «homoplasias». Estos rasgos aparecen de manera independiente en linajes no relacionados. A modo de ejemplo, pensemos en las alas. Existen muchos tipos de alas entre los animales. De hecho, incluso algunos gametos de plantas pueden planear, flotar en el aire y revolotear. Pero observemos tres tipos de alas de animales: el de las aves, los murciélagos y las moscas.



Analogía de las alas de los animales. Un ala de murciélago, un ala de ave y un ala de insecto. Si bien estas estructuras tienen todas la misma función (transporte del animal que las posee por el aire), no derivan de la misma estructura ancestral. De ahí que sean convergencias, u homoplasias, las unas con respecto a las otras.

Es muy fácil ver que el ala de la mosca no es «igual» que el ala del murciélago o del ave. No tiene huesos que sostengan el alerón de tejido que se

usa como dispositivo de vuelo, y su musculatura no deriva de las mismas células precursoras que las de los vertebrados (el ave y el murciélago). De modo que podemos decir perfectamente que las alas de la mosca (y desde luego todas las alas de los insectos) no son iguales que las alas de los vertebrados.

Las alas de los murciélagos y de las aves son un poco más difíciles de interpretar, pero es bastante fácil ver que no son equivalentes salvo en la función, ya que la disposición de los huesos del ala y su origen a partir de células precursoras son completamente diferentes. De modo que de la observación minuciosa de la estructura de los rasgos podemos hacernos una idea de lo que es «igual» y lo que no lo es.

La manera más fácil de proceder a determinar el carácter de «igualdad» es examinar las relaciones de las especies en cuestión e interpretar la evolución del rasgo que llamamos «alas» en el contexto de esas relaciones. Está claro que entre las moscas, las aves y los murciélagos, la relación entre aves y murciélagos es más estrecha, quedando las moscas como «las excluidas». Cuando nos fijamos sólo en estos tres tipos de organismos, vemos que tener alas es una buena característica definitoria. Pero la verdad es que existen millones de especies, insectos la mayoría, que deberíamos añadir a este árbol más pequeño. Y si lo hacemos, nos damos cuenta de que el simple hecho de tener alas ya no define nuestro grupo mosca-ave-murciélago. Esto se debe a que existen muchas criaturas que están más estrechamente relacionadas con los vertebrados que no tienen alas (como los erizos de mar o las estrellas de mar). En consecuencia, lo que mejor explica las alas de los insectos es que aparecieron de forma independiente en el antepasado común de los insectos alados. Luego, podemos observar el modelo de las alas de las aves y los murciélagos. Las aves son un subgrupo de dinosaurios que casualmente tenían alas. Los murciélagos, en cambio, son mamíferos, y lo más seguro es que el antepasado común de los dinosaurios y los mamíferos no tuviera alas. Sólo tenemos que mirar los marsupiales y los mamíferos primitivos para darnos cuenta de que estas especies no tienen alas, y así la cadena del antepasado común se rompe, lo que significa que la aparición de las alas en las aves fue independiente de aquello que definimos como «alas» en los murciélagos.

## ¿PODRÍA SER EL ÁRBOL DE LA VIDA UNA TABLA PERIÓDICA DE LA EVOLUCIÓN?

En todos estos casos, la ciencia de la sistemática molecular («molecular» hace referencia a la molécula hereditaria ADN que es el centro de esta rama de la ciencia –más adelante oiremos hablar mucho del ADN– en tanto que «sistemática» es el nombre que se le da al estudio de la diversidad de los organismos y de sus mutuas relaciones), de reciente desarrollo, proporciona un potente instrumento para resolver la incertidumbre. De manera fortuita, y más bien inesperada, se ha visto que determinadas partes del filamento de ADN son muy conservadoras y resisten los cambios durante largos periodos de tiempo, de modo que los organismos con un parentesco remoto cuyo aspecto físico haya cambiado mucho desde que tuvieron un antepasado común, es posible que compartan genes muy similares y comparables directamente. Por otra parte, donde se produce la convergencia es probable que la estructura de los genes que son responsables de las semejanzas superficiales revele la historia subyacente que encierra.

La unidad más pequeña en que se divide la naturaleza es el organismo particular, que vive y muere con independencia de todo lo demás. Pero desde el punto de vista de alguien que trata de reconstruir historias evolutivas, la unidad más importante es la especie. Los científicos nunca han acordado una definición de lo que son las especies (en la actualidad existen casi treinta definiciones para elegir), pero el modo más útil de considerarlas es como grandes poblaciones de individuos que se entrecruzan libremente. Por ejemplo, nosotros, que pertenecemos a la especie *Homo sapiens*, no intercambiamos nuestros genes con ningún otro organismo (aunque en el pasado pudo haber algún intercambio biológicamente insignificante con parientes cercanos que ahora se han extinguido). Hoy día somos una entidad independiente, un actor bien diferenciado en la escena evolutiva. Podríamos extinguirnos compitiendo con otros organismos, pero ninguno de ellos nos aplastará nunca. A su vez, los géneros son agrupaciones compuestas de especies estrechamente relacionadas que han descendido de una única especie antepasada mediante lo que se conoce como «especiación». A lo largo de los

tiempos, la escisión de los linajes distó mucho de ser un hecho excepcional: existe, por ejemplo, una cantidad sorprendentemente grande de especies de nuestro género *Homo* ya extintas y conocidas en el registro fósil de los últimos dos millones de años.

Los fósiles son restos de animales pretéritos (en la mayoría de los casos sólo dientes, caparazones y huesos) que se han conservado en rocas sedimentarias depositadas en el mar o en la tierra, principalmente en la orilla de ríos y lagos. Estas rocas se forman por acumulación de partículas procedentes de la erosión de rocas ya existentes y transportadas por el agua o el viento a nuevos lugares donde se depositan y puede que cubran y protejan restos de organismos muertos expuestos a la intemperie. De este modo, se crea un registro de vida a medida que los sedimentos que contienen fósiles se asientan, los más recientes encima de los más antiguos. Los fósiles terrestres proporcionan por lo general un registro esporádico de vida pasada, pero las series marinas son a menudo bastante continuas a lo largo de periodos de tiempo prolongados. El resultado final es un registro verdaderamente incompleto de las primeras etapas de vida; pero, no obstante, el registro fósil es inmenso, y es la única prueba directa que tenemos de la historia de la vida. Podemos averiguar las relaciones genealógicas de los organismos vivos a partir de sus semejanzas físicas y moleculares, y a partir de sus características moleculares podemos incluso hacer conjeturas acerca de cuánto tiempo ha pasado desde que diferentes organismos compartieron un antepasado común. Pero sólo el registro fósil nos ofrece una constatación material de los actores y acontecimientos reales de la larga escena evolutiva que se ha desarrollado durante los pasados tres mil quinientos millones de años. Los registros fósiles y los comparativos nos ofrecen una herramienta muy potente para corroborar la idea de la evolución propiamente dicha y también para recrear la espectacular historia evolutiva que ha originado el mundo vivo, maravilloso y variado, que hoy en día vemos a nuestro alrededor.

Utilizando los instrumentos físicos y moleculares que tenemos a nuestra disposición, podemos construir un Árbol de la Vida que exprese las relaciones genealógicas entre los millones de especies que existen ahora en el mundo. Empezando por las puntas del árbol, podemos agrupar las especies en los

géneros a los que pertenecen. Luego podemos aunar los géneros en grupos cada vez más completos hasta que todos los seres vivos estén incluidos en un gran sistema único. Tradicionalmente, este esquema se representaba por un diagrama vertical con bifurcaciones que bien parece un árbol verdadero, con un tronco en la base que produce ramas que a su vez producen ramitas y, por último, ramillas. Pero cuando se trata de tantos grupos como los que existen en el Árbol de la Vida, a menudo es más conveniente representarlos en un diagrama circular en el que las divergencias más recientes se producen más lejos del centro.

El método científico actual que utilizamos para clasificar los organismos vivos lo inventó el naturalista sueco Carolus Linnaeus (Carlos Linneo) un siglo antes de que Darwin y Wallace propusieran el concepto de evolución. Basándose simplemente en las similitudes físicas, Linneo pudo idear un sistema mediante el cual todas las especies se agrupaban con otras en un género, los géneros se agrupaban en órdenes, los órdenes en clases, y las clases en reinos. En contraposición al estilo de la jerarquía «militar», en la que un individuo puede pertenecer a un solo rango, en el tipo de jerarquía «inclusiva» que estableció Linneo cada especie pertenece a todos los rangos mencionados más arriba. De modo que, según esta clasificación, el *Homo sapiens* no sólo pertenece al género *Homo* sino también al orden Primates, a la clase Mamíferos y al reino Animalia. Desde los tiempos de Linneo se han añadido muchos otros de estos «rangos taxonómicos» para ayudarnos a expresar la apabullante diversidad de vida en la Tierra; sin embargo, es grato comprobar que esta ordenación básica preevolutiva encaja todavía perfectamente con el patrón de semejanza que podríamos esperar que produjera el proceso evolutivo, en el cual una antigua especie precursora da lugar a varias especies descendientes, cada una de las cuales se diversifica del mismo modo en una cadena interminable.

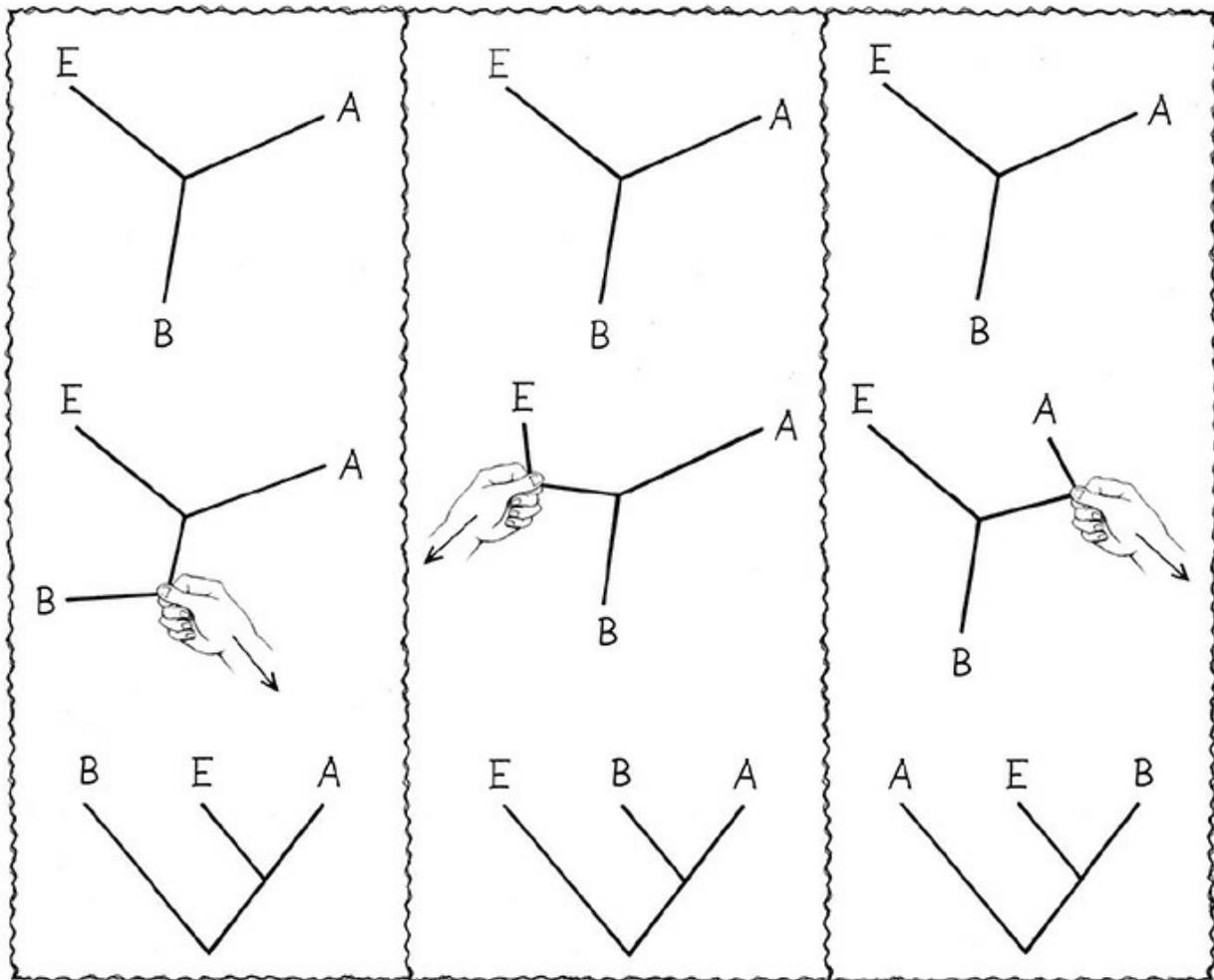
Proponemos que el simple proceso de catalogar y dar nombre a los objetos que nos rodean y que son importantes para nuestra existencia es en sí mismo ciencia; y así, en cierto sentido, los científicos debieron de haber existido desde los inicios del lenguaje. El proceso mental lógico que interviene en la determinación de que un objeto de la naturaleza tiene esencia, y por lo tanto es

posible darle un nombre, es un proceso científico importante que utiliza la taxonomía como vehículo de expresión. La periodista Carol Yoon ha recuperado hace poco el término *umwelt* para describir la necesidad básica que tienen los hombres de darle nombre a las cosas. El *umwelt* alude a un entendimiento de que los seres humanos formamos parte del mundo natural; y esta comprensión es tan básica para nuestra existencia que para situarnos en el mundo natural *necesitamos* que las cosas tengan nombre. De lo contrario, nada tendría sentido para nosotros. El *umwelt* es como una mosca muy molesta zumbando sobre nuestras cabezas y que siempre nos recuerda que formamos parte de un sistema natural que *requiere* una explicación. El único modo de lidiar con ello es dando un nombre a las cosas y utilizar esos nombres para ayudar a proporcionar entendimiento.

La base científica que hay detrás de dar un nombre a las cosas es bastante sencilla, y siempre hemos razonado y pensado en el mundo natural centrándonos en sus fundamentos filosóficos. Pongamos que eres un ser humano que vive en África hace veinte mil años. Ves un organismo. El aspecto de este organismo se transmite a tu cerebro y se procesa para ofrecerte una «imagen» suya. Sirviéndote de lo que sabes o recuerdas de tus experiencias, diseccionas sus componentes en tu mente. Evalúas si algunas de las partes son únicas o las comparte con otros organismos. En tu mente te planteas si algunos aspectos del organismo son lo bastante importantes para ti como para ponerles nombres. Si algunos de esos aspectos se hallan en muchos otros organismos, te dicen que éste pertenece a un grupo mayor de cosas. De modo que si tiene cuatro patas irá con los demás animales tetrápodos. Pero mientras en ciertos aspectos podrías decirte: «Creo que se parece a algo que he visto antes», otros de sus rasgos podrían provocar la respuesta: «Creo que no se parece a nada que haya visto antes». A la vista de estas hipótesis alternativas, realizas más observaciones y al final te convences de que es algo a lo que merece la pena dar un nombre, más que nada después de verificar la hipótesis de que has descubierto un organismo nuevo. Aun así, resulta que el nombre que le has puesto es otra hipótesis y objeto de una nueva comprobación. De modo que aún siendo un ser humano primitivo estás haciendo ciencia: formulando hipótesis sobre la naturaleza que son coherentes y verificables.

Por supuesto, la cantidad de espacio en el mundo es finita, así que simultáneamente al proceso de diversificación ha habido también una intensa poda de ramas a medida que gran cantidad de especies han sucumbido a la extinción en la escena ecológica. Pero en general, es increíble cómo la secuencia básica de los acontecimientos históricos se ha conservado en la diversidad del mundo vivo. En la actualidad podemos encontrar a nuestro alrededor especies que, en líneas generales, corresponden a la mayoría de las principales etapas evolutivas por las que ha transcurrido la vida durante los últimos miles de millones de años. Esto no sólo nos da una idea sorprendente del proceso histórico por el que llegamos a convertirnos en lo que somos hoy día, sino que nos permite interpretar los fósiles que tenemos con todo lujo de detalles.

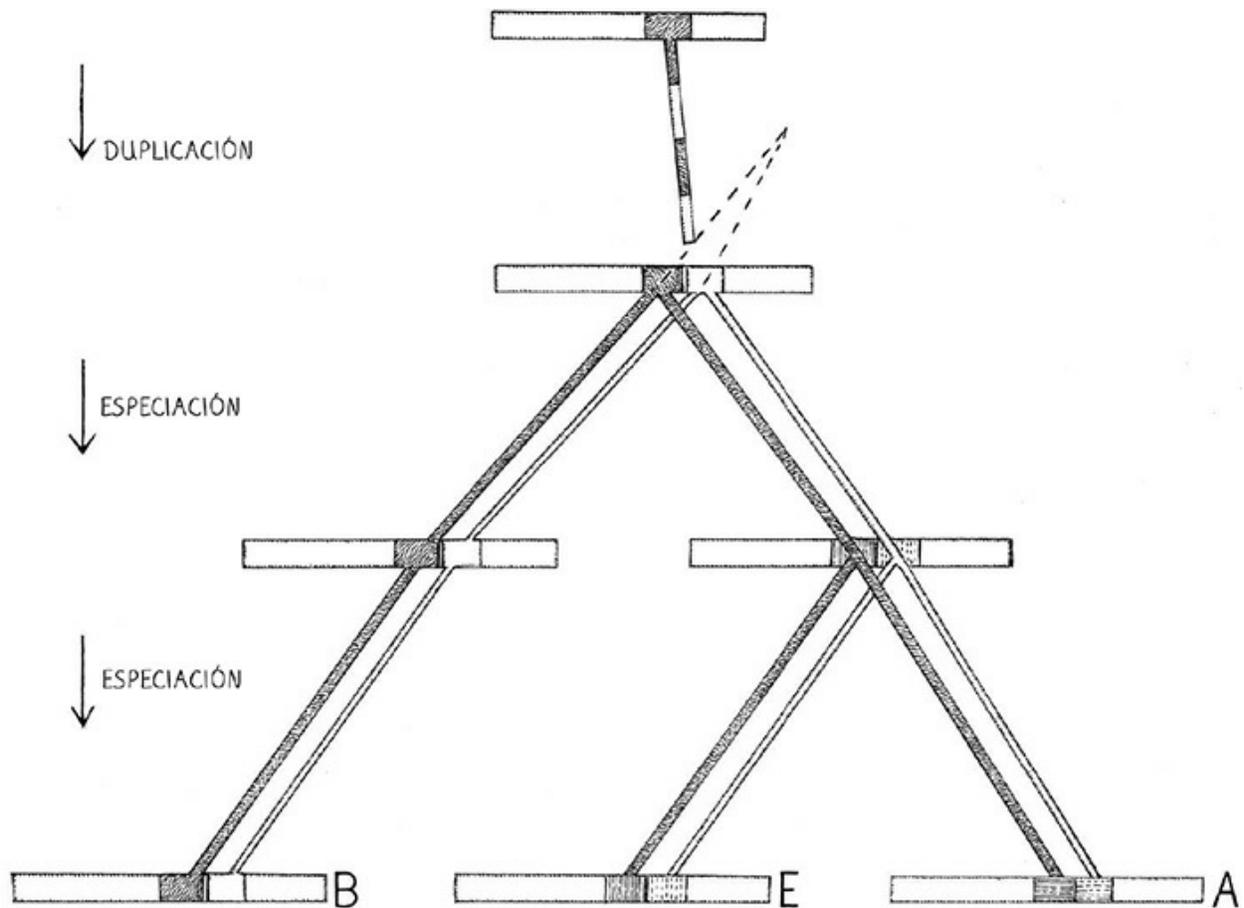
Sin embargo, esto no significa que construir el Árbol de la Vida sea fácil o que no haya campos en los que aún persistan importantes interrogantes. De hecho, en la base del árbol hay un gran signo de interrogación. Los científicos tardaron mucho tiempo en decidirse por la división básica de los seres vivos en Bacteria, Archaea y Eukarya que utilizamos en la actualidad, y aún hoy sigue sin estar clara la relación exacta entre estos tres grupos principales. De una manera intuitiva podríamos pensar que de ellos las bacterias y las arqueas serían los que están más estrechamente relacionados por una ascendencia común, ya que, como criaturas unicelulares carentes de núcleo, los componentes de ambos grupos se ven muy similares al microscopio. Pero ¿y si este es un parecido puramente primitivo y debiéramos conceder más importancia al hecho de que las bacterias y los eucariotas participan de una estructura análoga de la membrana celular? ¿O al hecho de que las arqueas y los eucariotas tienen fragmentos de ADN en sus genes que no tienen las bacterias? Se trata de un verdadero enigma, y en gran parte es porque carecemos de lo que se conoce como un «exogrupo».



Cambio de árboles cambiando la raíz. Las manos tiran de la rama que quedará más cerca de la raíz. Con un poco de imaginación, el lector debería poder ver el cambio de las topologías de los árboles a medida que se tira de la raíz.

Como hemos visto, la principal manera de decir qué caracteres de los que estamos examinando son primitivos, cuáles son derivados (y por lo tanto nos informan de la ascendencia) y cuáles son convergentes, es a través de su distribución en organismos de interés. La mejor forma de probar que un rasgo es primitivo es mostrar que también está presente *fuera* del grupo que estamos examinando. En cambio, es probable que los rasgos únicos sean derivados. Los exogrupos, pues, nos permiten polarizar o «arraigar» las relaciones de estos grandes grupos. Pero a no ser que encontremos un exogrupo en Marte o agazapado en algún lugar ignoto de nuestro planeta, al arraigar el Árbol de la Vida nos vemos limitados a usar otro medio menos satisfactorio. Una

posibilidad es utilizar secuencias de genes de ADN que se han duplicado en el genoma. Cuando los genes se repiten, se dan historias paralelas para cada uno de los genes resultantes; pero puesto que los dos tipos de genes duplicados están relacionados entre sí, podemos ponerlos en el mismo árbol y observar dónde arraiga cada uno. Cuando se utiliza este método se demuestra que la relación de las Archaea con nosotros los Eukarya es más estrecha que con las Bacteria. Este extraño resultado revela que la falta de membrana nuclear que define al grupo Procariota, que abarca las Archaea y las Bacteria, no es un carácter derivado, y tal vez deberíamos dejar de usar el término «Procariotas» para definir un «verdadero» grupo de organismos.



Las duplicaciones de los genes es una parte omnipresente en la evolución de los genomas. El diagrama muestra un único cromosoma en la parte superior. Este cromosoma se duplica (representado por una casilla blanca y otra gris) en el antepasado común de las tres especies A, B y E. Luego el antepasado común se separa en dos linajes, y luego el linaje que no es B se separa en dos linajes (A y E). El resultado son dos filogenias genéticas, una para el gen oscuro y una para el gen claro. La línea de puntos muestra dónde conectan las dos filogenias genéticas a través de un ancestro común. En estos casos, los científicos

han de ser conscientes de la existencia de múltiples familias genéticas. Por ejemplo, un estudio que utilice el gen oscuro de B y E y el gen claro de A podría inducir a error.

## LA HISTORIA DE UNA CIENCIA HISTÓRICA

Una de las actividades realmente interesantes de la biología es el análisis de la distribución de los rasgos entre los organismos que nos interesan con el fin de reconstruir cómo eran las especies antepasadas en todos los diversos puntos de ramificación del árbol. De esa manera, podemos comparar los fósiles conocidos de dichas especies reconstruidas para ver cómo podrían encajar en el esquema de las relaciones. Pero seguimos padeciendo el inconveniente de que todo rasgo nuevo deriva sólo en un nivel del árbol. Un carácter derivado en un antepasado será primitivo en cada uno de sus descendientes, independientemente de cuánto se diversifique después. Por lo general, esto no dejará demasiados rasgos derivados a la consideración del pobre taxónomo, y en el caso que acabamos de comentar, ya que en principio cada antepasado debe ser primitivo con respecto a todos sus descendientes y no existen exogrupos a los que recurrir, puede que no haya forma –incluso en principio– de reconstruir la naturaleza exacta de la especie antepasada que dio origen a la vida en la Tierra. Tales son las realidades de la ciencia: tenemos que estar preparados para reconocer cuándo no tenemos nada más que decir y aceptarlo sin más.

Por suerte, todavía hay mucho que decir sobre la evolución, y también mucho que discutir, como lo ha habido desde el principio. Cuando Darwin publicó *El origen de las especies* en 1859 se levantó un clamor inmediato en contra, ya que sus consecuencias para los orígenes del hombre (que Darwin omitió expresamente) cayeron en una opinión pública sumida en el mito de la creación cristiana. Pero posteriormente, la idea de un lugar de la humanidad integrado en el resto de la naturaleza llegó a aceptarse con notable rapidez. Y dentro de la ciencia sigue siendo indiscutible, aun cuando los detalles hayan sido objeto de un debate cada vez más acalorado. Sin embargo, las ideas de Darwin encontraron a la larga una mayor oposición, no por parte del público en general sino dentro del propio ámbito científico; no se cuestionaba la

proposición básica de la descendencia con modificación sino el mecanismo de cambio que había propuesto.

Para lograr que se aceptara la idea de que la vida había cambiado con el tiempo, Darwin tuvo que explicar cómo pudo producirse semejante cambio. Su ingeniosa solución fue la teoría de la «selección natural». Se fundaba en la observación de que todas las especies varían físicamente. Cada individuo presenta unas características que ha heredado de sus padres y que son ligeramente distintas respecto a los demás miembros de su especie. Es más, en cada generación esos padres producen más descendencia de la que puede sobrevivir para llegar a la edad adulta y reproducirse. Este hecho indiscutible conduce sin remedio a un proceso constante de selección entre los individuos de cada generación, y Darwin propuso que aquellos individuos que logren mayores índices reproductivos son los que están mejor «adaptados» a las condiciones imperantes.

Puesto que los individuos mejor adaptados dejan más descendencia comparados con los peor adaptados que son descartados del equipo reproductor, esta competencia por la vida y la reproducción produce, generación a generación, un cambio de apariencia en cada población, ya que las malas adaptaciones desaparecen para ser sustituidas por innovaciones más ventajosas. De este modo, el cambio se produce muy despacio por medio de la acumulación gradual de pequeñas diferencias a lo largo de las generaciones. Al final, éstas se suman a las modificaciones importantes de los linajes en proceso de evolución. Es una historia maravillosa y está claro que hay algo de verdad en ella: sin duda la suficiente como para que uno de los colegas de Darwin, al leer *El origen*, exclamara en tono de reproche: «¡Qué estúpido no haber pensado en ello!». Además, a mediados del siglo XIX el proceso en cuestión, espantosamente lento, se volvió por completo verosímil a juzgar por la larguísima historia que los geólogos atribuían con tanto afán a nuestro planeta. Para cuando Darwin estuvo preparado para presentar sus ideas al público, pocos científicos creían ya que hubieran transcurrido seis mil años desde la Creación, lo que se había calculado a partir del recuento del gran número de veces que aparece «engendró» en el libro del Génesis.

No obstante, con la consolidación de la ciencia de la genética a comienzos

del siglo XX se empezaron a proponer mecanismos alternativos para el cambio evolutivo. Los primeros genetistas señalaron, por ejemplo, que a veces se observaba que las principales innovaciones en los organismos aparecían de repente, *de novo*, y no a resultas de la lenta adición de pequeños cambios, y que esto hizo pensar a algunos de aquellos investigadores que ciertas especies nuevas podrían ser consecuencia de sucesos genéticos más o menos instantáneos y no de un cambio gradual. El debate se encarnizó durante décadas hasta que, al despuntar el segundo cuarto del siglo XX, unos modelos matemáticos y la aplicación de una inteligencia poderosa convergieron en lo que llegó a conocerse como síntesis evolutiva.

En pocas palabras, la Síntesis enseñaba que casi todos los fenómenos evolutivos, incluso las modificaciones radicales, podrían tener su origen en la lenta acumulación de pequeños cambios genéticos durante largos periodos de tiempo. Incluso la separación de los linajes fue un proceso gradual, ya que poblaciones de la misma especie aisladas por barreras geográficas poco a poco divergieron por sus propios canales evolutivos, lo mismo que un río podría bifurcarse si encuentra en medio de su curso un afloramiento rocoso especialmente duro.

Esta es una idea muy atractiva para nuestras mentes humanas reduccionistas, con toda la elegancia de la simplicidad. Pero tras un periodo de varias décadas durante el cual apenas se cuestionó, la Síntesis empezó a tropezarse con el desorden inherente de la naturaleza. El primer gran ataque a los fundamentos de la Síntesis llegó a comienzos de la década de 1970 de parte de los paleontólogos, lo que tal vez no resultara sorprendente. La Síntesis había marginado a los estudiosos del registro fósil; porque si bien los genetistas tenían la clave de los mecanismos evolutivos y los taxónomos eran esenciales para ordenar los grandes patrones surgidos del proceso evolutivo, los paleontólogos habían sido relegados a un papel de oficinista bastante modesto consistente en documentar los detalles de la historia de la vida. Sin embargo –y el propio Darwin tuvo plena consciencia de ello–, el registro fósil revela muchísimas discontinuidades en esa historia, y de hecho la paleontología se había adaptado a la Síntesis mediante un ardid: la afirmación de que todas estas discontinuidades no eran más que artefactos debidos al

carácter incompleto del registro. Entonces los paleontólogos disidentes afirmaron a su vez que, de hecho, las continuas lagunas del registro fósil en constante expansión podrían dar información. Señalaron que la aparición de las especies en el registro fósil era más bien brusca y que luego se quedaban durante periodos de tiempo que podían ser prolongados (en ocasiones nada menos que decenas de millones de años) antes de ser sustituidas de golpe por otras especies.

Esto inició el camino hacia un segundo examen crítico del proceso evolutivo que llevó a algunas conclusiones reveladoras. Entre ellas, tal vez la más importante fue que el cambio evolutivo pudo deberse muy a menudo a sucesos fortuitos más que al ajuste genético que implica la modificación de los linajes a largo plazo mediante la selección natural.

#### MANTENER AL MÉDICO ALEJADO

En la década de 1970, los biólogos evolutivos Stephen Jay Gould y Richard Lewontin señalaron que en aquella época la percepción de la evolución por parte de sus contemporáneos tenía tendencia a buscar y (lamentablemente) a encontrar siempre adaptación. La adaptación es el fruto de la selección natural que constituía el elemento esencial de Darwin para explicar el mundo natural. Y puesto que la selección natural se aceptaba como el gran factor explicativo en biología, reconfortaba pensar que casi todo lo que los científicos veían en el mundo natural era producto de este importante proceso. Al fin y al cabo, cuando vemos algo extraño como el cuello de la jirafa, el pulgar del panda, o los cascos del caballo, ayuda a creer que sabemos la razón por la que existen. Sin embargo, esta tendencia era desafortunada porque reflejaba un enfoque poco científico del estudio de la evolución: una forma narrativa de explicar el mundo natural que Lewontin y Gould denominaron cuentos de «así fue como», en honor al gran escritor Rudyard Kipling. Señalaron que esta línea de ataque dejaba poco espacio para comprobar las hipótesis y, lo que es peor, para su rechazo. Y, como indicó el filósofo Karl Popper, la ciencia moderna se basa en el proceso «hipotético-deductivo» según el cual se proponen hipótesis y

posteriormente se rechazan las falsas.

Además, como señalaron Gould y Lewontin, el enfoque narrativo era problemático no sólo porque era poco científico, sino también porque se había vuelto paradigmático. Y pensaban que esto era perjudicial tanto para la expansión de la teoría evolutiva como para perfeccionar las explicaciones del mundo natural. Utilizaron el personaje del dr. Pangloss de la obra de Voltaire *Cándido* para ilustrar los problemas que veían con los cuentos de «así fue como». Pangloss pensaba que absolutamente todo tenía una razón de ser, desde el terremoto de Lisboa a las gafas y los pantalones: tenemos piernas, así que llevamos pantalones, y tenemos nariz, así que llevamos gafas. Gould y Lewontin calificaron de «paradigma panglossiano» las narrativas adaptacionistas y sugirieron que existen cuatro razones por las que los organismos no alcanzan la perfección mediante la selección natural.

En primer lugar, las formas novedosas de hacer frente al entorno no aparecen *de novo* a resultas del proceso evolutivo, como los nuevos diseños de máquinas y edificios. No son las estructuras existentes las que limitan la imaginación de los inventores y arquitectos sino el propósito, y por eso la solución a un problema arquitectónico o técnico puede venir de cualquier lado y en cualquiera forma o diseño. Lo cierto es que muchos avances técnicos están fundados en adelantos científicos y tecnológicos básicos y que gran parte del diseño arquitectónico funcional está basado en una temática general (protección contra los elementos), pero los saltos que la invención humana puede dar hacia la perfección técnica o arquitectónica superan con mucho lo que la evolución puede hacer por los organismos. La invención humana y la tecnología pueden «salirse de los esquemas» y atacar un problema desde cero sin preocuparse de lo que había antes, pero la evolución está limitada por las cartas que se reparten: por el esquema corporal, la fisiología y la química de los organismos existentes. Debido a la índole de los procesos que la hacen posible, la evolución no puede alejarse de las organizaciones y las condiciones químicas existentes. Lo importante es que estas limitaciones incluyen la forma en que se transmite la información de generación en generación por medio de los genes y los genomas.

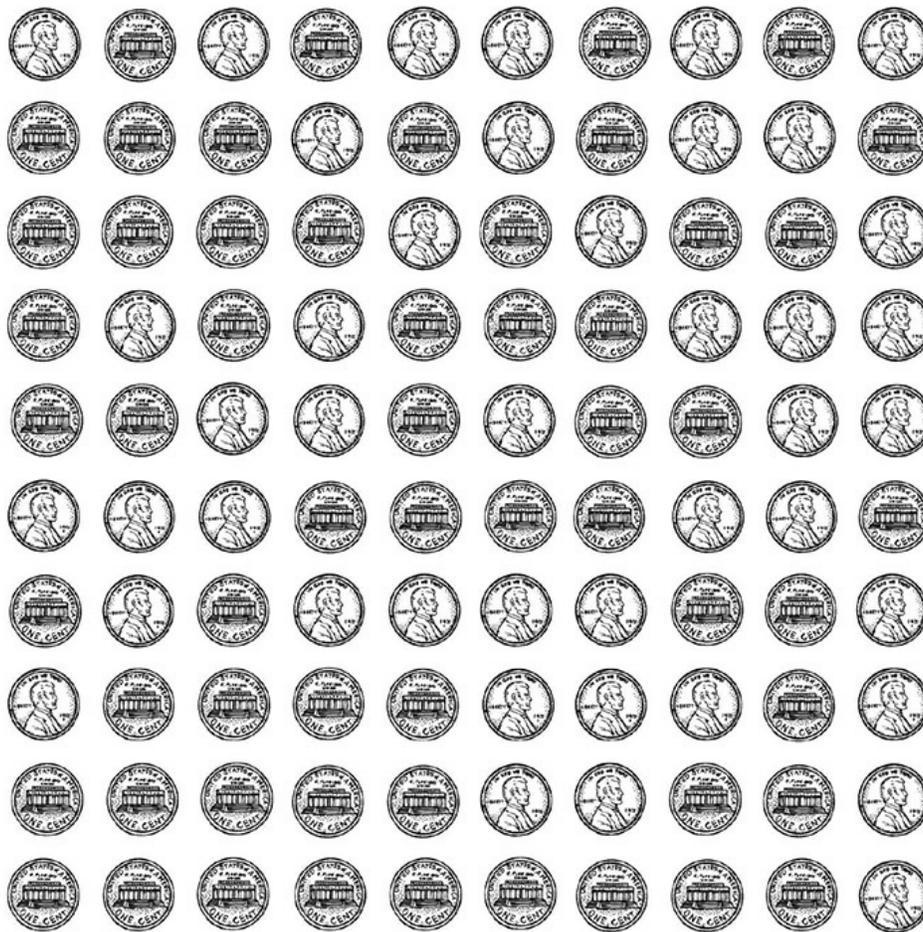
En segundo lugar, la evolución no siempre conlleva adaptación. Parte de la

evolución es sencillamente pura buena (o mala) suerte. Resulta interesante señalar que, más o menos al mismo tiempo que Gould y Lewontin escribían su famoso artículo, se explicaba la importancia de los procesos evolutivos «neutrales» o no seleccionados tanto desde un punto de vista teórico como empírico. El propio Lewontin desempeñó uno de los principales papeles en esta escena, sobre todo después de que él y su colega Jack Hubby estudiaran los productos génicos en una gran cantidad de humildes moscas de la fruta. Su objetivo era determinar el nivel de variación genética en la naturaleza, y tenían la esperanza de encontrar una cantidad concreta porque las versiones de la teoría de la selección natural que dominaban sugerían que las variantes con menos «aptitudes» que las demás serían eliminadas de las poblaciones. Pero cuando hicieron el experimento en la década de 1960 descubrieron en sus moscas una gran variación genética que carecía de sentido en el contexto de la selección natural dominante. Por consiguiente propusieron, junto con otros científicos, que el azar, o la «deriva», está muy presente en el mundo natural. La selección natural no era el único matón del barrio.

Una vez señalado esto, muchos científicos empezaron a darse cuenta de que los sucesos fortuitos explicaban muchas de las cosas que vemos en la naturaleza. Y si todas esas anatomías, conductas y condiciones químicas estaban ahí por azar, entonces a duras penas la perfección podría ser el objetivo —o siquiera el resultado— de la evolución. Esta forma de evolucionar inducida por el azar pudiera parecer extraña, pero realmente es una parte importante de cómo funciona el proceso. Y se produce sobre todo en poblaciones pequeñas, porque los sucesos fortuitos acontecen más a menudo cuando las muestras son pequeñas. El sosias de la selección natural, si se quiere, es el proceso denominado deriva genética. La deriva se produce en poblaciones pequeñas debido a un fenómeno llamado error de muestreo. Puede considerarse de la siguiente manera. Coge 400 monedas y lánzalas al aire. Aunque es posible que salgan 400 caras en una tirada, estarías loco si apostararas por ello (la probabilidad de obtener 400 caras en una tirada es  $\frac{1}{2}$  elevado a 400). La realidad es que en una tirada de 400 monedas verías muchas caras y muchas cruces (un promedio de 200 de cada). Pero ahora coge cuatro monedas. Una buena apuesta sería que pudieran salir cuatro caras y no

ver ninguna cruz (la probabilidad de obtener cuatro caras de una vez es  $\frac{1}{2}$  elevado a la cuarta potencia, es decir, acertarías una de cada 16 veces que lo intentarás). Este principio del error de muestreo también funciona en el caso de organismos de poblaciones naturales. Y funciona sea cual sea el tipo de organismo de que se trate. Lo que significa la deriva con respecto a nuestro cerebro y su adaptación, es que mucho de lo que observamos está ahí simplemente por casualidad. Lo que vemos es el resultado de sucesos aleatorios, añadidos a otros, con un toque de selección natural. No es una forma muy eficaz de crear un cerebro, ni en realidad producto alguno. Pero lo fundamental es que funciona.

Una tercera razón por la cual la selección natural no da lugar a organismos perfectos es que, mientras que algunas estructuras se consideran respuestas bastante buenas, si no perfectas, a los desafíos medioambientales, puede que tengan un coste. Su posesión podría verse penalizada por efectos adversos en otros caracteres. Tomemos, por ejemplo, el extraño caso de una pequeña mosca hawaiana, la *Drosophila heteroneura*. El nombre específico de esta mosca supone que algo le ocurre a su cabeza; en efecto, la cabeza de los machos de esta especie tiene forma de cabeza de martillo, en la que los ojos están en los extremos gruesos. ¿Por qué? Bueno, resulta que los machos que tienen cabezas muy anchas se reproducen mucho mejor. Pero, ¿por qué? Por dos razones. La primera es que, al parecer, las hembras prefieren a los machos con cabezas muy, muy anchas. Dicho de otro modo, las hembras encuentran que los machos con grandes cabezas martillo son más «sexis» que los demás. La segunda razón es que los machos con cabezas martillo más grandes pueden pelear mejor por las hembras, lo que da al macho un doble revés sexual. Pero las cosas no son tan sencillas. Probablemente, los machos con las cabezas más anchas están en desventaja, ya que su visión es defectuosa debido a la mayor separación de sus ojos. Semejante disposición anatómica podría crear un sistema visual con grandes «puntos ciegos» que hace que, probablemente, los machos con cabezas más anchas no vean venir a los depredadores y que, por lo tanto, no puedan escapar a ellos. Si te devoran, no importa lo sexi que seas.



LANZAMIENTO DE 100 PENIQUES  
57 CARAS 43 CRUCES



LANZAMIENTO DE 4 PENIQUES  
TODO CRUCES

Si se lanzan al aire 100 monedas, el resultado más probable se acercará a 50 caras y 50 cruces, como se muestra en la parte superior de la ilustración. La probabilidad de que al lanzar esa cantidad de monedas se obtenga todo caras o todo cruces es de 1 entre 1.125.900.000.000.000. Si lanzamos una cantidad de monedas más pequeña (cuatro monedas), la probabilidad de obtener todo cruces o todo caras es bastante alta (1 de cada 16 tiradas).

La última razón por la que la selección natural no crea organismos perfectos es que, como hemos señalado, aprovecha las variaciones que ya existen. Los genomas de los organismos no pueden «invocar» nuevas variantes que pudieran resultar buenas respuestas a los desafíos medioambientales. Por

muy bien que algunos organismos y virus se puedan adaptar a los retos, esta adaptación no es el resultado de la creación consciente y el uso de una nueva variación. Por ejemplo, aunque el VIH tiene uno de los índices de respuesta más rápidos al reto de los antivirales de todos los virus, ello no es porque el propio virus pueda sentir el tipo de cambios que necesita hacer en su genoma, sino que muta muy deprisa porque su componente básico es el ARN, el cual se amolda con facilidad a las mutaciones a medida que se replica. La mutación rápida genera una variabilidad genética aleatoria sobre la que después actúa la selección natural. Muchas bacterias también se adaptan muy rápida y eficazmente a desafíos medioambientales como los antibióticos. De nuevo, esto no se debe a que las bacterias «sienten» la necesidad de un cambio que las ayude a crear resistencia a los fármacos, sino a que los plásmidos que puedan ser portadores de dicha resistencia están más extendidos en el mundo de las bacterias.

En resumen, las innovaciones aparecen por cambios espontáneos en el material genético que no tienen relación alguna con las dificultades y tribulaciones ecológicas que pueda padecer una especie concreta en un momento determinado. Y aunque no cabe duda de que la selección natural trabaja sin descanso en el seno de las poblaciones, no por ello las empuja en una dirección adaptativa específica. En cambio, puede servir lo mismo para mantener su equilibrio funcional sin relativos cambios reduciendo las variaciones más descabelladas. Además, la selección natural no puede impulsar la aparición de innovaciones por muy ventajosas que sean en teoría. Las innovaciones genéticas surgen al azar; y en caso de no ser muy desfavorables pueden sobrevivir sólo porque no interfieren o porque, en ocasiones, están vinculadas genéticamente a algo más que es beneficioso. En realidad, muchas veces los nuevos rasgos merodean en las poblaciones durante mucho tiempo antes de que, de vez en cuando, les den un nuevo papel, como en el caso de las plumas que tuvieron los antepasados de las aves durante millones de años antes de que las utilizaran para volar.

Los avances en biología molecular han puesto de manifiesto que los cambios genéticos aleatorios sin importancia pueden tener grandes consecuencias en la apariencia física de sus dueños. Y sobre todo es este

fenómeno el que puede explicar las muchas discrepancias entre fósiles que por lo general reconocemos como «brechas» en el registro fósil. Por último, cabe señalar que la actividad observada de la selección natural está intrínsecamente limitada a las características que tienen consecuencias importantes para la supervivencia o la reproducción. Muchos filamentos de ADN realizan múltiples funciones, y grandes cantidades de lo que percibimos como rasgos físicos independientes tienen, en realidad, una estrecha vinculación genética. Así, aunque es inevitable que tengamos la tentación de pensar en la selección natural en términos de características físicas cuyas historias podemos rastrear en el registro fósil, la selección sólo puede, de hecho, favorecer o perjudicar la supervivencia y el éxito reproductivo de los individuos. En la mayoría de los casos, lo que determinará nuestro éxito será cómo nos comportemos en tanto que conjunto integrado, y no algunos rasgos clave que pudiéramos tener.

A mayor escala, no cabe duda de que los grandes patrones históricos que vemos en el registro fósil no pueden deberse sólo a los cambios dentro de las poblaciones. Esos cambios, aleatorios o no, aportan sin duda las materias primas en las que se basan las historias evolutivas, pero la magnitud del drama evolutivo lo proporciona la diferencia de supervivencia de las especies en su conjunto, en función de si dan lugar o no a especies descendientes o de si esas especies han prosperado. El éxito o el fracaso en el ámbito ecológico dependerá muchas veces de factores que son totalmente externos a los agentes afectados. Si seremos o no capaces de lidiar con el cambio de hábitat no sólo depende de nosotros mismos sino de la magnitud y la naturaleza del cambio, así como de quién ande por ahí cazándonos o compitiendo con nosotros por los recursos. Factores como este están totalmente fuera de nuestro control y no tienen en cuenta lo magníficamente bien que nos hayamos adaptado a las circunstancias anteriores. Si se produce el impacto de un asteroide en nuestras inmediaciones, sencillamente se nos acabó la suerte: si la fortuna nos sonrío, puede que sólo necesitemos ser lo bastante buenos para salir del paso.

## EL ZIGZAG EVOLUTIVO

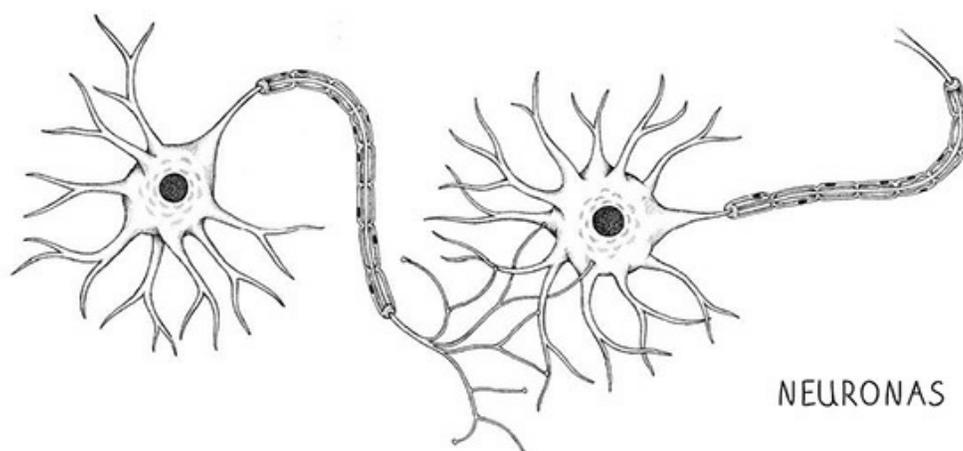
Como hemos visto, la evolución no puede ser siempre el proceso de optimización que implica el modelo de cambio gradual en el que la adaptación de las especies a sus entornos es cada vez más perfecta. En primer lugar, los entornos tienden a cambiar bruscamente en muy poco tiempo, a lo cual la selección natural no tiene posibilidad de responder. Y si nuestro entorno cambia de súbito, tenemos más probabilidades de trasladarnos a otro lugar más conveniente, o si esto resulta imposible, de extinguirnos, que de permanecer inmóviles y cambiar sobre el terreno. De hecho, cuanto menos firme sea nuestra adaptación a un medio, más flexibles somos y es menos probable que el medio nos golpee con fuerza al cambiar. La optimización tiene un precio, como vemos en el hecho de que los índices de extinción son mucho mayores entre las especies muy especializadas que entre las generalistas.

Al ser el resultado de un largo proceso evolutivo con muchos zigzags, en el que estaban involucrados antepasados que vivían en condiciones muy distintas a las nuestras, el cerebro humano es una afrenta a los principios a los que se atendería cualquier ingeniero que se precie. Y en esto radica su secreto. Porque en gran medida, el mero hecho de que su historia *no* lo haya optimizado por nada es lo que explica que el cerebro humano sea el órgano enormemente creativo y al mismo tiempo lógico e irracional que es.

Desde el punto de vista intelectual, todos somos conscientes de que a veces las conductas humanas son extrañas; de hecho, la especialidad de «psicología evolutiva» ha prosperado por haber elaborado una serie de explicaciones lógicas y atractivas de nuestros defectos de conducta. La idea básica, nacida del concepto simplista de que la evolución es un proceso de ajuste, es que nuestro cerebro no está en armonía con el mundo moderno porque se formó expresamente mediante selección natural para hacer frente a un «entorno de adaptabilidad evolutiva» que ya no existe. En opinión de los psicólogos evolutivos, una desconexión entre el mundo en el que vivimos y el mundo al que nos adaptamos para ocuparlo explica lo extraño que a veces es nuestro comportamiento. Esta es una historia estupenda y con un fuerte atractivo innato para los miembros de lo que en realidad es una especie cuentacientos. Pero lamentablemente —o más bien afortunadamente— es un simple error. Sin duda, los psicólogos evolutivos han desempeñado un valioso

papel documentando nuestros patrones de conducta recurrentes, patrones que desde luego reflejan la estructura común del material neuronal que reside en la cabeza de todos los seres humanos cognitivamente normales. Pero culpar de nuestras debilidades a los cerebros actuales mal ajustados es no entender en absoluto lo esencial. Nuestro cerebro y las conductas extrañas que en ocasiones produce son fruto de una larga historia de desorden supremo: una historia que casualmente dio lugar a un producto maravillosamente excéntrico y creativo. Por fortuna, las muy diversas fases de esta saga se reflejan en una gran variedad de habitantes vivos del mundo natural a cuyo estudio han dedicado más de un siglo los neurocientíficos y otros. El resto de este libro es un relato de las cosas fascinantes que ellos y sus colegas paleontólogos han aprendido.

## Los pormenores del sistema nervioso



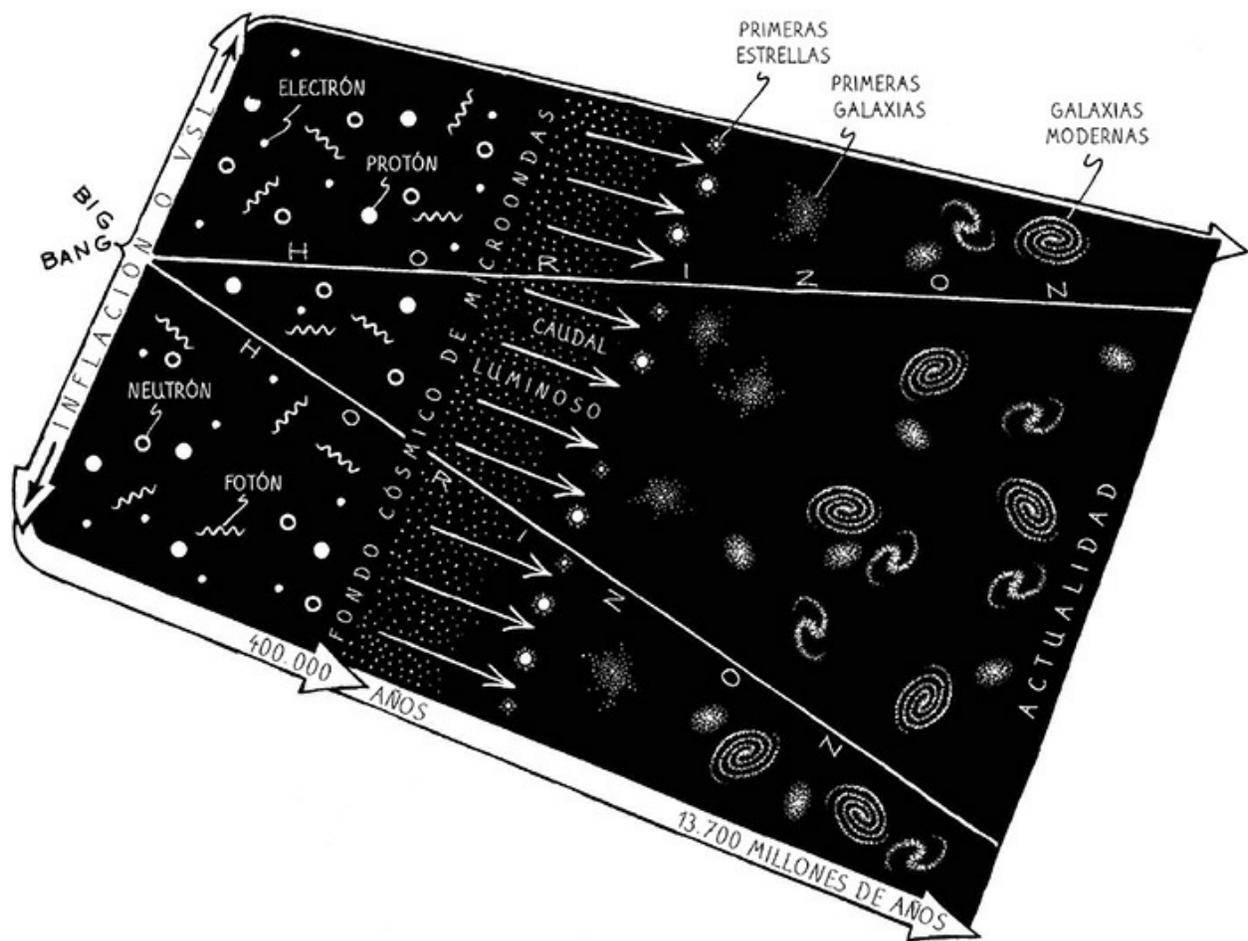
En *La búsqueda científica del alma*, sir Francis Crick proponía: «Tú, tus alegrías y tus pesares, tus recuerdos y tus ambiciones, tu sentido de identidad personal y libre albedrío, no son más que el comportamiento de una gran agrupación de neuronas y sus moléculas asociadas». En realidad, podría pensarse con razón que esta hipótesis no es tan sorprendente,<sup>1</sup> pues no hay duda de que nuestro cerebro y nuestro sistema nervioso están formados por células, y que los átomos y los iones son las infatigables herramientas de trabajo del cerebro. Al mismo tiempo, es extraordinario que un conjunto de señales electroquímicas en el interior de ese órgano increíble que reside dentro de nuestra cabeza pueda constituir la conciencia de nosotros mismos. Es indudable que nosotros somos algo más que individuos que sienten y piensan como podría dar a entender esta explicación reduccionista. ¿No es esta visión de algún modo degradante? Estas dos perspectivas no han coexistido fácilmente desde que los seres humanos empezaron a preguntarse

sobre la relación entre el cuerpo y el yo, la dicotomía entre cerebro y mente. Y para comprender mejor esta dicotomía, tenemos que examinar detenidamente la hipótesis «sorprendente» de Crick y cómo funciona realmente nuestro cerebro. Tal vez lo mejor es empezar estudiando cómo se transmite la información a través de nuestro sistema nervioso, una tarea que exige que discutamos los pormenores del universo mismo.

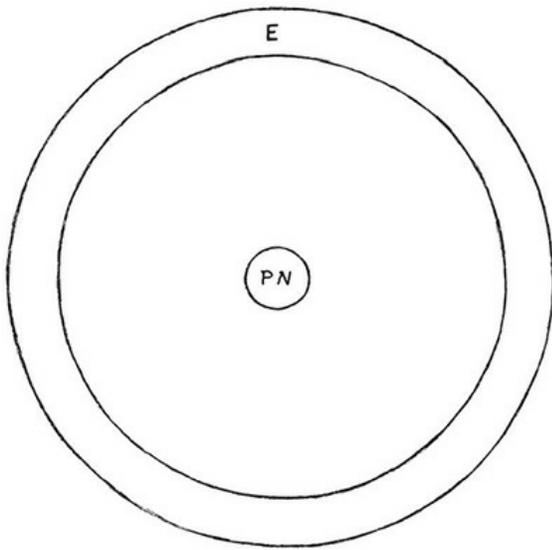
### TODO EMPEZÓ CON UNA EXPLOSIÓN

¡Y cómo! El Big Bang, que tuvo lugar en el origen de nuestro universo hace 13.700 millones de años, ha sido objeto de mucha investigación y especulación. Lo que sí sabemos es que sucedió muy rápido y provocó la reorganización drástica de partículas antiguas en los átomos y elementos que vemos en la actualidad. Y rápido quiere decir rápido: los teóricos del Big Bang sugieren que algunos de los sucesos más básicos que dieron lugar a los átomos y núcleos actuales ocurrieron en un intervalo entre el segundo  $10^{-46}$  y el segundo  $10^{-11}$  después de la expansión inicial. Durante este periodo increíblemente corto de tiempo el calor era inimaginable, así que es fácil que las partículas elementales que hoy día los científicos buscan con tanto ahínco pudieran haber existido. Pero durante este fragmento de tiempo la masa del universo también se expandía, lo que hizo que la temperatura se enfriara. Lo que ocurrió en realidad en ese momento tan agitado sigue siendo materia de mucho debate, pero los acontecimientos se aclararon más o menos en el segundo  $10^{-11}$ , cuando la energía de las partículas disminuyó y se redujo la velocidad de su movimiento. Al poco tiempo (en el segundo  $10^{-6}$ ) se formaron los protones y los neutrones, componentes básicos de los núcleos de los átomos. Aproximadamente en el segundo 1 se formaron los electrones y los positrones, aunque las condiciones de temperatura seguían siendo increíblemente elevadas. Incluso unos minutos después del Big Bang, algunos cálculos sitúan la temperatura en mil millones de grados Kelvin ( $10^9$  grados centígrados). Las partículas que dominaban el universo en ese instante eran los fotones: hacía todavía demasiado calor para que los protones, neutrones y

electrones interaccionaran mutuamente. Entre un minuto y 379.000 años después del Big Bang, el universo siguió expandiéndose y enfriándose. Se formaron núcleos sencillos de hidrógeno que constaban de un protón y un neutrón. Al final, la energía procedente de la radiación fotónica se vio superada por la gravedad y se impusieron las demás fuerzas que dominan el universo en la actualidad: las fuerzas nucleares débiles e intensas y la fuerza electromagnética. Debido al dominio de estas fuerzas que formaron los átomos y a que la densidad del universo disminuyó de manera significativa a causa de la expansión, los electrones pudieron combinarse con los núcleos de hidrógeno para producir átomos de hidrógeno. Tal vez existieron otras combinaciones de partículas y condiciones reactivas, pero la estabilidad del átomo de hidrógeno se impuso. En ese momento, el universo estaba formado sobre todo por átomos de hidrógeno; y en cierto sentido, nuestro sistema nervioso nació en aquellos primeros tiempos.



Simplificando en exceso podemos decir que, una vez que existió el átomo de hidrógeno, el universo empezó a desarrollarse no sólo en el contexto de la formación y la evolución estelares sino también en el contexto de la evolución química. Aquí queremos centrarnos en el tren galopante de la evolución química, porque esta es la que dio lugar a otros átomos, moléculas y células. La evolución química también condujo a la estructura física de los átomos, permitiendo que unos átomos alterados llamados iones porten cargas eléctricas. Sin los iones, la electroquímica que impulsa nuestro sistema nervioso no podría haber evolucionado, y esta es la razón por la que debemos nuestra existencia al Big Bang y a la evolución química que tuvo lugar durante el medio millón de años siguientes. Como dijo una vez Carl Sagan, somos «materia de estrellas». Nuestro colega Neil deGrasse Tyson lo dijo de otra manera: «Con los elementos químicos que se forjaron durante 14.000 millones de años en los hornos de estrellas de gran masa que estallaron en el espacio, y con estos elementos que enriquecieron las generaciones posteriores de estrellas con carbono, oxígeno, nitrógeno y otros ingredientes fundamentales de la vida misma, estamos hechos de polvo de estrellas, no sólo en sentido figurado sino literal». Además, no sólo estamos hechos de polvo de estrellas, sino que este polvo estelar permite que la vida en este planeta avance, exprese emociones, y –en cuanto a nosotros los seres humanos– pensemos y tengamos conciencia. Tanto nuestra existencia como nuestra comprensión de la misma deriva del cambio que ha experimentado el polvo de estrellas durante los últimos 14.000 millones de años.



El Big Bang. La mayor parte de las cosas interesantes para el sistema nervioso ocurrieron en el lado izquierdo del diagrama unos cuatrocientos mil años después del Big Bang.

## IONES, LAS HERRAMIENTAS DE TRABAJO DEL SISTEMA NERVIOSO

La evolución química es el producto de unas reacciones que tuvieron lugar alrededor de medio millón de años después del Big Bang. En estas reacciones participaron los átomos de hidrógeno formados a resultas de la expansión y el enfriamiento del universo y son consecuencia de la estructura de dichos átomos. Existen muchas descripciones de la composición de los átomos, pero una en particular se nos quedó grabada en la memoria. Procede de un programa de televisión muy popular llamado *WKRP in Cincinnati* que se emitió en la década de 1970. Se trataba del personaje de un *disc-jockey* afroamericano llamado Venus Flytrap, un tipo orgulloso y muy inteligente, pero fuera de lugar en la emisora de radio. En un episodio, Venus se enfrentaba a un chaval miembro de una pandilla para convencerle de que volviera al colegio. El trato era que, si Venus podía enseñarle los fundamentos del átomo en dos minutos, el chaval iría a la escuela. He aquí una transcripción:

Hay tres pandillas en la calle, ¿vale? Y esto (Venus señala una pared blanca), esto de ahí es el territorio. Y aquí está el barrio (dibuja un gran círculo en la pared). ¿Lo pillas? Y justo en el centro de este barrio hay una pandilla llamada los Nuevos Muchachos (dibuja una N mayúscula pequeña en el centro del círculo [véase la ilustración]). Aquí, fuera del

barrio, en la linde, hay otra banda. Sabes que estos son unos tíos negativos de verdad, muy negativos. ¿Vale? Ahora se llaman los Elegidos (dibuja una E mayúscula pequeña en el círculo). ¿Lo tienes? Muy negativos. Nada les gusta. Están todo el tiempo dando vueltas por el barrio, sólo dando vueltas, controlando a los Nuevos Muchachos. Estos lo ven y hacen un trato con otra banda. Una banda de tipos muy despreocupados. Se llaman los Pros. Los Pros (dibuja una P en el centro al lado de la N) son unos tipos muy positivos. Tienen a todas las mujeres guapas, ¿vale? Ahora bien, los Pros y los Elegidos se odian. Tanto es así que tienen el mismo número de componentes. Por si acaso. ¿Entiendes? ¿Lo ves? (y señala la P y la N). Los Pros y los Nuevos Muchachos llaman núcleo a su garito (dibuja un círculo pequeño alrededor de la P y la N). Sí. Esta sí que es una palabra difícil de verdad. Es latina y significa centro. Muy bien. Te doy otra palabra. Tronco. Significa colega. A estas bandas les gusta tanto este nombre que todas deciden usarlo. Los Pros de aquí en medio empezaron a llamarse protones. Y los Nuevos Muchachos, bueno, empezaron a llamarse neutrones. Y aquí en la linde, los Elegidos comenzaron a llamarse electrones. Y todo esto de aquí es el barrio (señala la zona vacía entre el centro y los círculos exteriores). Una manzana tras otra sin nada. Esto de una manzana tras otra sin nada lo entiendes ¿no?

Ni que decir tiene que el chaval lo entendió. Lo que aprenderá cuando regrese a la escuela es que esta estructura atómica es en realidad mucho más complicada; pero para comprender cómo la estructura de los átomos permite las reacciones químicas, es una descripción perfecta. Como señala Venus, todos los átomos estables tienen una cantidad igual de protones y electrones. El número de electrones y protones determina qué elemento representa un átomo. Recordemos que el universo comenzó sólo con hidrógeno: un protón en el núcleo y un electrón girando a toda velocidad alrededor del núcleo. ¿Cómo se formó el átomo que Venus describe antes, ése con dos electrones, dos neutrones y dos protones? Es el átomo de helio, y su formación hace miles de millones de años es un ejemplo de cómo se forman los átomos. Los átomos de helio empezaron a crearse en grandes cantidades cuando se formaron estrellas como nuestro sol. Puesto que la temperatura de tales estrellas es muy elevada (15.000.000 de grados Kelvin), los átomos de hidrógeno se destruyen para producir un núcleo con un protón, y un electrón suelto. Así que si el núcleo del átomo de helio tiene dos protones, ¿cómo los obtuvo? Parece sencillo: sólo

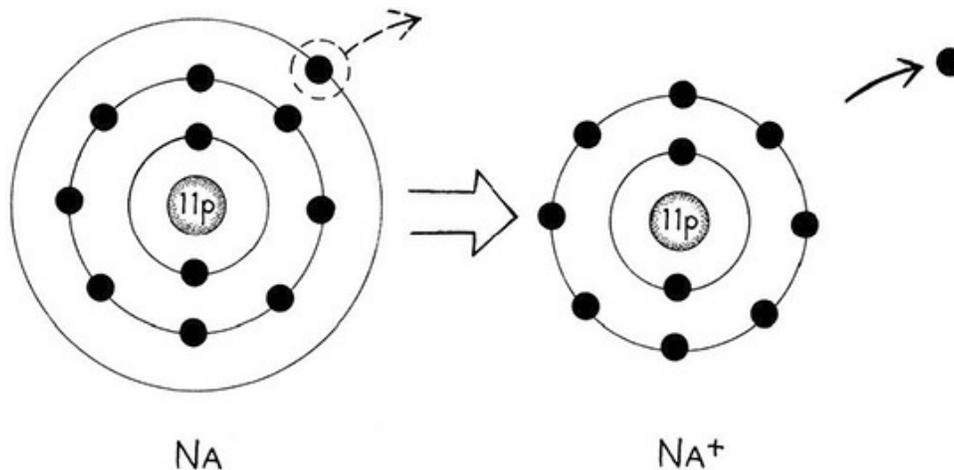
hay que fusionar dos núcleos de hidrógeno sueltos y obtendremos un núcleo de helio. Bueno, en parte, porque todavía tenemos que explicar de dónde proceden los Nuevos Muchachos de Venus, los neutrones. Cuando dos protones se fusionan, no producen simplemente un núcleo con dos protones, sino que crean lo que se denomina un deuterón y un par de partículas más pequeñas. La reacción de fusión requiere mucha energía, que viene proporcionada por la elevadísima temperatura del sol, donde todo eso ocurre. Pero el deuterón producido por la fusión está compuesto de un único protón y un único neutrón, por lo que no estamos ahí todavía ya que necesitamos dos de cada para formar el núcleo de helio. Entonces, lo que sucede a continuación es que un deuterón se fusiona con un núcleo de hidrógeno suelto (un protón) para formar otro intermediario, un núcleo de Helio-3. Este núcleo tiene dos protones y un neutrón, aún insuficientes para constituir el átomo de Venus con dos Nuevos Muchachos, dos Pros y dos Elegidos. Pero como consecuencia de las altísimas temperaturas a las que ocurre todo esto, dos núcleos de Helio-3 se fusionan para formar un núcleo de helio auténtico, más dos protones sueltos. Si este núcleo de helio auténtico atrae dos electrones, se convierte entonces en un átomo de helio. Si no, estos núcleos siguen colisionando y fusionándose para formar otros cada vez mayores que también pueden atraer electrones para formar átomos o elementos más grandes.

Hay cuatro elementos básicos que, debido al modo en que evolucionó el universo, participaron en la creación de vida en el planeta Tierra. Estos son el oxígeno, el carbono, el hidrógeno y el nitrógeno, ordenados según su concentración en la mayor parte de los seres vivos. Hay también algunos otros elementos que se encuentran en cantidades entre 0,01 % y 0,1 % de la masa corporal total. Algunos de estos, como el azufre y el fósforo, han evolucionado para formar parte de moléculas orgánicas como las proteínas (azufre) y el ácido desoxirribonucleico o ADN (fósforo). Otros, como el magnesio, el cloro, el sodio y el potasio, han encontrado un papel en el sistema nervioso.

Algunas veces los electrones pueden transferirse de un átomo a otro adyacente y seguir siendo estables. Dicha transferencia reduce el número de electrones en el átomo donante y lo incrementa en el receptor. Cuando esto ocurre, las cargas eléctricas de ambos átomos cambian. El donante se vuelve

positivo (el estado despreocupado que Venus describía más arriba) y el receptor se vuelve negativo (ese estado desagradable). Cuando estas transferencias se producen, el donante y el receptor se convierten en los llamados «iones». Los iones pueden ser muy estables; cuando lo son, llevan lo que se denomina carga.

Uno de los tipos de reacción más importantes que evolucionó en relación con el cerebro fue el intercambio de electrones entre elementos tales como magnesio, potasio, sodio y calcio, que componen mucho menos del 1 % de los átomos de nuestras células. A la larga, estos iones se convirtieron en algunos de los elementos más importantes de nuestro sistema nervioso. Ello se debe a que pueden perder o ganar electrones con facilidad y son lo bastante abundantes como para influir en cómo funcionan nuestras células. En su estado iónico, estos elementos se disuelven fácilmente en agua, que es el componente mayoritario de nuestro cuerpo y sus células, y se han convertido en la moneda básica de nuestro sistema nervioso. En su estado iónico pueden cambiar electrones de lugar, y dichos electrones producir corrientes eléctricas del mismo tipo que las que circulan por la instalación eléctrica de nuestra casa o que emana de la batería de un teléfono móvil. Las únicas diferencias están en la magnitud y el medio en particular por el que discurre la corriente. Para que una corriente suponga una gran diferencia, el medio por el que se mueven los iones ha de tener un «interior» y un «exterior». En los organismos vivos, son las membranas las que determinan el «interior» y el «exterior», y esto nos lleva a un gran, gran interrogante: el origen de la vida celular en nuestro planeta.



La estructura de los átomos y los iones depende de los electrones en los diversos niveles orbitales de los átomos. A la izquierda se muestra un átomo de sodio con 11 protones (11p) en el núcleo y 11 electrones (puntos negros) orbitando alrededor del núcleo en tres órbitas diferentes (líneas finas). La pérdida (flecha) de un electrón (punto rodeado de un círculo en el diagrama de la izquierda) da como resultado un ion de sodio positivo. La ganancia de un electrón (no se muestra) por parte de algunos átomos daría como resultado un ion negativo de dicho átomo.

La evolución de los átomos y sus propiedades únicas es también importante para comprender otros aspectos de la célula. Los distintos elementos pueden combinarse con otros según sus estructuras únicas. Esta unión se produce de muchas maneras, pero a menudo por medio del llamado enlace iónico, que tiene lugar cuando los dos átomos que se unen comparten un electrón. Otros tipos de enlaces requieren el aporte de otro elemento como el hidrógeno. Lo esencial es que la estructura de cada átomo estimula determinadas interacciones con el mundo exterior, en particular con otros átomos. El resultado es que los átomos se combinan formando moléculas. Luego, las moléculas pequeñas se unen formando otras moléculas mayores y más largas, lo que en última instancia acarrea la complejidad de las biomoléculas que observamos en las células. Y ahora que hemos simplificado en exceso y por completo la física y la química, podemos pasar a la biología.

#### EL ORIGEN DE LA VIDA

En estos momentos no hay una respuesta categórica al Gran Interrogante: cómo

se originó la vida en la tierra. De hecho, probablemente nunca la habrá. Dennis Bray, bioquímico y biólogo celular de la Universidad de Cambridge, lo expresó de esta manera: «Nuestra descripción de los orígenes de la vida es producto de la imaginación. Tiene que serlo; no podemos volver atrás en el tiempo para presenciar los sucesos moleculares decisivos que acaecieron en la senda de la evolución. Lo único que podemos hacer es construir escenarios verosímiles de lo que pudo haber ocurrido basándonos en los procesos que sabemos que ocurren hoy día». Por muy negativo que esto pueda parecer desde el punto de vista científico, apunta al principal objetivo de la ciencia: la explicación. No siempre hemos de tener razón acerca de un fenómeno natural, por mucho que encontremos la mejor explicación posible. Como hemos dicho, la «verdad» no es una finalidad en la ciencia. De hecho, muchos filósofos piensan que la verdad es inalcanzable porque sencillamente no la reconoceríamos aunque estuviéramos sentados a su lado. Sin embargo, analizando escenarios y nociones sobre el mundo natural, *podemos* tener una idea mejor de cómo explicarlo. El asunto del origen de la vida es un ejemplo perfecto de este proceso científico. Porque si bien no tenemos forma de saber si alguna de las ideas que ofrecemos como explicación es realmente cierta, podemos eliminar muchas de ellas deduciendo que son falsas. Lo que tenemos al final es un grupo de ideas que han sobrevivido al proceso de prueba. Y los escenarios del origen de la vida en la Tierra que han sobrevivido al proceso de prueba constituyen, después de todo lo que se ha dicho y hecho, unas explicaciones bastante buenas.

Para que la vida evolucionara en este planeta tuvieron que suceder varias cosas que dieran origen a unos fenómenos biológicos tan complejos como las membranas celulares, los ácidos nucleicos, el ácido ribonucleico (ARN) y el ácido desoxirribonucleico (ADN), las cadenas de aminoácidos, el mecanismo de replicación, las membranas nucleares, los intrones, el ciclo de Krebs, las mitocondrias, los cloroplastos, y muchos más: la lista podría seguir y seguir. Son muchas las cosas que han ocurrido, si bien pocos científicos dudan de que las estructuras básicas y los procesos que tienen lugar en la célula puedan evolucionar. Gran parte de la discusión ha sido sobre la cronología: pero lo que es sorprendente es cómo se unen las piezas para formar el conjunto y la

secuencia en la que se produce este ensamblaje.

Establecer esto ha sido tan desalentador que algunos científicos muy respetados han preferido buscar el origen del problema «fuera del planeta». El concepto de «panspermia» propone que la vida en la Tierra no empezó aquí de cero, sino que hace miles de millones de años la trajo un cometa o un meteorito desde otras partes del universo. En este escenario, la creencia más común es que un microbio interestelar o interplanetario entró en la atmósfera terrestre y sembró toda la vida posterior en el planeta.

Otros científicos prefieren partir de cero y proponen un mundo en el que los componentes básicos de la vida existen como consecuencia de una reacción química sencilla en un «caldo primigenio». Luego las moléculas se organizaron a partir de los átomos, y muchos «experimentos» evolutivos dieron lugar a moléculas como los aminoácidos y los ácidos nucleicos. La formación constante de moléculas mayores condujo a la relación entre los ácidos nucleicos y los aminoácidos, y finalmente a un mundo de ARN que existía antes que la vida celular. ¿Por qué el ARN y no otra molécula? Bueno, el ARN es una molécula «todoterreno». Se compone de cuatro elementos básicos ordenados en línea, como las cuentas de un collar. Un aspecto muy importante del ARN es que esos elementos básicos (llamados guanina, adenina, citosina y uracilo) se emparejan de un modo específico. Una adenina siempre formará pareja con un uracilo, y una guanina con una citosina. Estas normas de emparejamiento significan que si tenemos una secuencia de ácidos nucleicos, podemos replicarla con facilidad. Puesto que el ARN se puede copiar, puede transmitir información hereditaria. El ARN también se puede usar de andamio para estructuras celulares grandes y complejas tales como los ribosomas. Y por si esto fuera poco, el ARN puede catalizar reacciones químicas porque se puede plegar y adoptar diversas formas debido a su composición química.

Con el tiempo, el mundo de ARN evolucionó hacia un mundo basado en el ADN, en el que éste se convirtió en el proveedor principal de información. El ADN está compuesto por el mismo tipo de elementos básicos alineados del mismo modo que en el ARN (aunque en lugar de uracilo utiliza timina), así que no hubo necesidad de desarrollar un nuevo lenguaje para transmitir la información. El ADN es también un poco más estable que el ARN, y debido a la

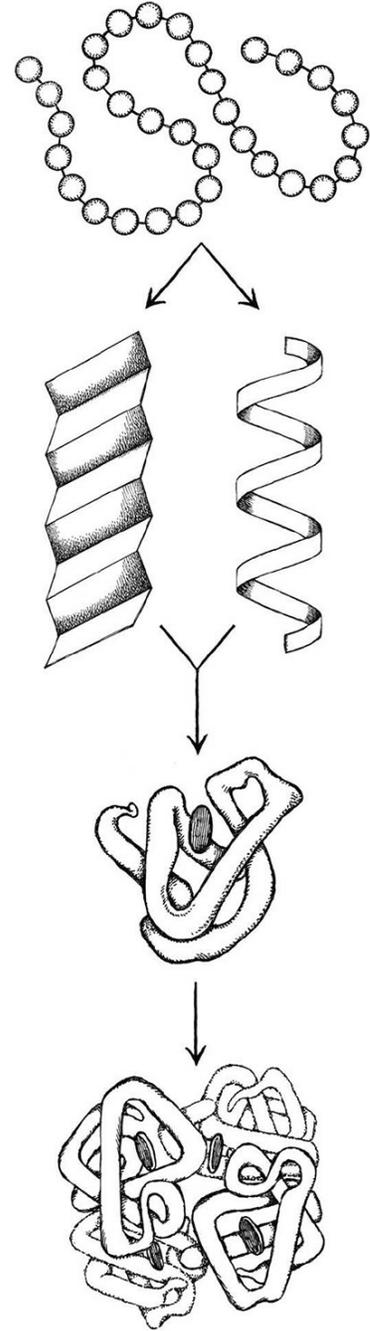
mayor estabilidad de su configuración bicatenaria resultó ser una forma eficacísima de copiar y transmitir información. Lo siguiente en la sucesión de acontecimientos es que las proteínas se convierten en la herramienta de trabajo de las células debido a su gran plasticidad y eficiencia funcional. Las proteínas están compuestas de aminoácidos, ordenados también como las cuentas de un collar; y ya que se utilizan 20 aminoácidos en la formación de las proteínas, las posibilidades de diversidad entre ellas es mucho mayor que entre los ácidos nucleicos. Además, las largas cadenas de proteínas (al igual que los ácidos nucleicos) pueden plegarse para producir múltiples formas tridimensionales.

El eje central del código genético es cómo pasan las células del código de cuatro letras de los ácidos nucleicos al código de 20 letras de los aminoácidos. El ARN sigue siendo importante y esencial en el mundo del ADN, con muchas funciones en la célula. Pero en el mundo post-ARN la fuerza impulsora es la selección natural. La autoorganización y la colaboración de las diminutas máquinas moleculares es una característica muy ventajosa para la replicación y también para la supervivencia. Pero para que los componentes químicos de las células se autoorganicen y colaboren, es necesario que estén en estrecho contacto unos con otros y que les impidan colaborar con otras máquinas. Aquí es donde entran las membranas. Que las membranas aparecieran antes o después que las máquinas moleculares sencillas como el ARN no es tan importante para nuestra comprensión del sistema nervioso, pero el mero hecho de que las membranas se formaran en primer lugar es fundamental para la historia.

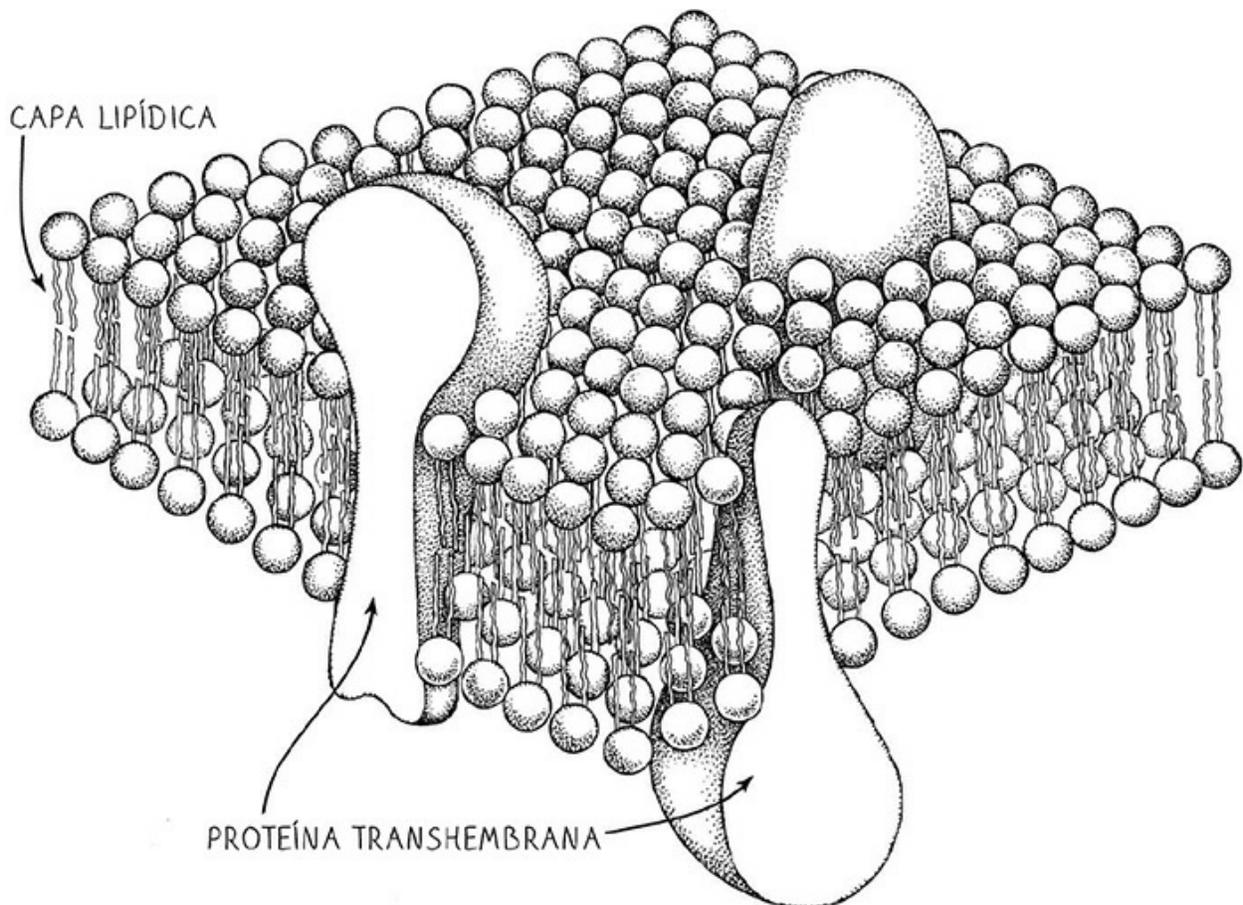
Los cuatro niveles de complejidad de las proteínas. El nivel primario (parte superior) es simplemente la secuencia lineal de los componentes básicos de las proteínas llamados aminoácidos. El nivel secundario (segundo desde arriba) es la transformación de la formación lineal de aminoácidos en una estructura no lineal, por lo general una hélice o una lámina. El nivel terciario (tercero desde arriba) resulta cuando las hélices y las láminas se pliegan formando una estructura tridimensional. El nivel cuaternario (parte inferior) es la estructura que resulta de la asociación de subunidades en agrupaciones más complejas.

La formación de las membranas fue, al parecer, un proceso bastante sencillo una vez que se formaron los lípidos. Los lípidos son largas cadenas de átomos compuestas sobre todo de carbono e hidrógeno, y constituyen alrededor del 40 % de toda la materia orgánica de nuestro cuerpo (es decir, dejando aparte el agua y las sales). Las cadenas de lípidos pueden ser muy largas y odian el agua. Esto hace que sean insolubles en agua y perfectas para obstaculizarle el paso. Las membranas contienen una clase específica de lípidos que difiere de otros, como los ácidos grasos saturados e insaturados, porque incorpora un «grupo fosfato», dando como resultado una cadena de «fosfolípidos».

Al contrario de los lípidos que lo rodean, el grupo fosfato adora el agua. En su defecto, las moléculas de lípidos flotarán de un lado a otro, chocando unas con otras y dedicándose a ser átomos de carbono e hidrógeno unidos entre sí. Pero si ponemos muchos fosfolípidos en agua, se organizarán según sus filias y sus fobias. Puesto que los extremos lipídicos de los fosfolípidos detestan tantísimo el agua, se ordenarán alejándose de ella. Pero la única forma en que pueden protegerse del agua es intentando situarse al lado de otra cadena de fosfolípidos, «besándola» allá donde se encuentren las partes lipídicas y empujando la parte fosfato hacia el agua. Como al extremo fosfato del



fosfolípido le gusta el agua, le trae sin cuidado. Y la serie de interacciones produce lo que se denomina una bicapa lipídica, con dos cadenas de fosfolípidos estrechamente unidas por sus extremos lipídicos y sus extremos fosfatos apuntando hacia el agua, de modo que los extremos lipídicos puedan ocultarse de ella. A partir de esta propensión es fácil comprender cómo, con una cantidad suficiente de fosfolípidos, podríamos producir sin dificultad un globo revestido de una bicapa lipídica que más o menos aislara el interior del exterior. Y esto es lo único que hace falta para contener los iones y las máquinas moleculares que son importantes para la vida en el interior de las células, y para acelerar el proceso evolutivo de la vida celular y el sistema nervioso. Además, una vez logrado, la disposición de los lípidos es importante para establecer los gradientes iónicos o químicos entre el exterior y el interior.



Bicapa lipídica que muestra proteínas transmembrana. Las bolas de la capa lipídica son las cabezas hidrófilas de los fosfolípidos con las colas en horquilla colgando fuera. Las colas de los fosfolípidos son

hidrófobas.

Hay un último aspecto de las membranas que necesitamos discutir antes de pasar al tema eléctrico. Las membranas son estructuras bastante fluidas. Son como un tejido de trama floja en el que es fácil pegar objetos. En este caso los objetos son las «proteínas de membrana». estas proteínas encajan con facilidad dentro de la matriz de la membrana y realizan muchas tareas importantes para mantener los gradientes iónicos y químicos dentro y fuera de la célula. También llevan a cabo muchas otras funciones celulares, entre ellas tareas inmunológicas, la comunicación entre células y el transporte de nutrientes a través de la membrana celular. Y constituyen una parte fundamental de la historia de cómo funciona el sistema nervioso.

## UN BAILE ELÉCTRICO

Un modo de considerar las corrientes eléctricas de tu cuerpo es pensar en cómo funciona la electricidad en nuestras casas. Los cables están hechos de metal, el cual tiene una gran cantidad de electrones libres pululando por ahí; y la electricidad que circula por esos cables no es más que un flujo de electrones libres. Pero está claro que los flujos de electrones no surgen de la nada. Si no se aplica algo al cable de metal, los electrones vagarán sin rumbo. Para lograr que los electrones se muevan en una dirección concreta es necesario aplicar una carga negativa a uno de los extremos del cable y una carga positiva al otro. Cuando se hace esto, los electrones que pululan por el metal del cable empiezan a moverse, concretamente hacia el extremo en el que se aplicó la carga positiva. Hay una gran dispersión de los electrones que se mueven por el cable, y por esta razón la mayoría de los cables de nuestra casa están envueltos en plástico. El plástico no conduce la electricidad, así que cuando un cable se recubre de plástico y se aplican fuerzas eléctricas a sus extremos, los electrones se moverán sin dificultad por todas partes hacia el extremo positivo del cable. Por eso el plástico tiene una función aislante; este concepto será importante un poco más adelante, cuando hablemos de que una

sustancia llamada mielina aísla las proyecciones nerviosas que denominamos axones.

Algunos metales conducen la electricidad mejor que otros, y el avance de la corriente puede verse frenado por un fenómeno que se conoce como resistencia. Básicamente, cuanto mayor sea el número de electrones libres presentes, menor será la resistencia. La corriente eléctrica se mide calculando la fuerza eléctrica absoluta en voltios y dividiéndola por la resistencia. Este cálculo, sencillo pero excelente, nos da la cantidad de electrones que circulará por un cable de una determinada resistencia tras la aplicación de una fuerza eléctrica dada. La corriente se mide en unidades llamadas amperios.

Según parece, la corriente eléctrica mínima que detecta el cuerpo humano es de unos 0,001 amperios (A). Esto significa que para nuestro cerebro una corriente mayor que ésta será extraña y a veces dolorosa. Una corriente de 0,1 A puede ser letal para los seres humanos si pasa por una parte sensible del cuerpo como el corazón o el cerebro. Se sabe que una corriente de 0,01 A causa fibrilación (alteración grave del ritmo cardíaco). Esto ocurre porque cuando la corriente eléctrica empieza a circular por el cuerpo, el flujo de electrones confunde y falsea los movimientos normales de los electrones entre las células, lo que hace que nuestros músculos se comporten de un modo exagerado. Si la corriente exterior pasa por el músculo del corazón, entonces ¡bum!, allá va el corazón. ¿Cuánto voltaje se requiere para sufrir una descarga? Una vez más, eso depende de la resistencia, y cuando estamos expuestos a fuerzas eléctricas en forma de voltios nuestra piel actúa de resistencia. Sufrimos una grave descarga cuando el voltaje es superior a 200 V, el punto en el que la piel ya no puede impedir (resistir) el paso de la corriente eléctrica.

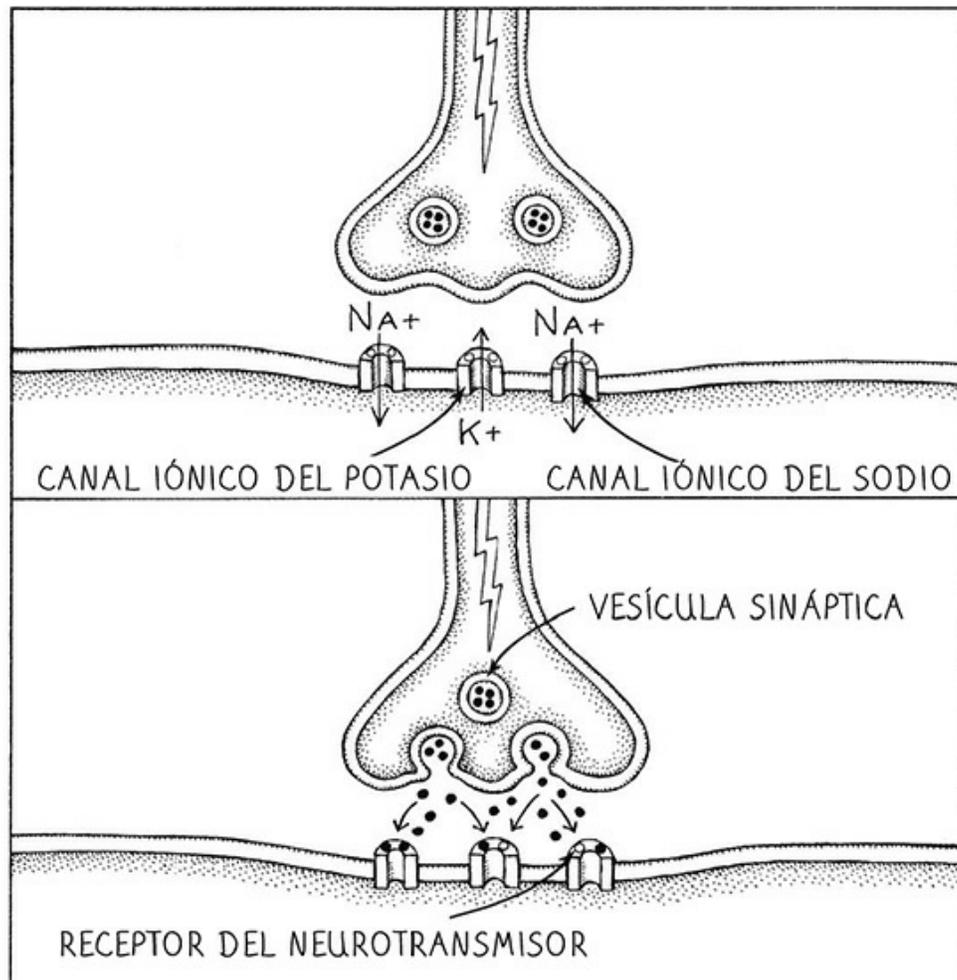
Da la casualidad de que nuestras neuronas se comunican con electricidad exactamente igual que los cables que van por las paredes de nuestra casa. Así que ¿por qué no estamos pitando todo el tiempo? La respuesta es que en realidad *estamos* pitando todo el tiempo, no sólo cuando la corriente eléctrica es lo bastante fuerte como para que se registre una señal de dolor o malestar en nuestro cerebro. En cambio, las corrientes que circulan por nuestras células proporcionan informaciones importantes al cerebro sin que nosotros

advirtamos su paso. Pero cuando se aplica una corriente lo bastante fuerte a nuestros cuerpos, el flujo normal de electrones por nuestras células resulta inoperante.

Un impulso eléctrico normal en nuestro sistema nervioso es minúsculo incluso en comparación con la pequeña energía que circula por un teléfono móvil. Estos impulsos reciben el nombre de «potenciales» por parte de los científicos que estudian la acción de las fuerzas eléctricas en el cerebro. En lugar de medir los potenciales en amperios, lo hacen en voltios. Una célula actúa igual que una pila, con polos positivos y negativos que corresponden al interior y el exterior de la célula, dependiendo del estado en que esté. Cuando una célula se encuentra sin corriente se dice que está en reposo. Pero aunque la célula esté en reposo, sigue existiendo una diferencia de concentración de electrones a un lado y a otro de la pared celular. La causa de esta diferencia es la dispar concentración de los diversos iones que existen dentro y fuera de la célula. Por ejemplo, la concentración extracelular de sodio (que es un ion positivo y por lo tanto carece de electrones) es unas diez veces mayor que la intracelular. Esto significa que, con respecto al sodio, el espacio extracelular de una neurona es positivo, mientras que la región intracelular en estado de reposo es negativa. Por otra parte, las concentraciones de potasio, que también es un ion positivo, son más elevadas en el interior celular que en el exterior. Y el cloro, un ion negativo, sigue la misma pauta que el sodio, más elevado fuera que dentro. Aquí lo importante es que el voltaje de una célula en reposo es de -70 milivoltios (mV). Esto es pequeñísimo teniendo en cuenta que por los enchufes de nuestras paredes corren 120.000 mV, y que incluso la típica pila AA puede generar 1.500 mV cuando está conectada.

Las señales eléctricas que se mueven de un lado a otro de nuestras neuronas se producen cuando el potencial en reposo cambia debido a una alteración de la concentración de electrones en el interior y el exterior de la neurona. El cambio de carga que tiene lugar cuando esto ocurre va de -70 mV a +30 mV, y se lleva a cabo cuando los iones cargados se desplazan de un lado a otro de la membrana celular. Los neurobiólogos llaman a este cambio «potencial de acción». Puesto que la célula desea ardientemente encontrarse en su estado natural de reposo, volverá a -70 mV. Este movimiento de iones a

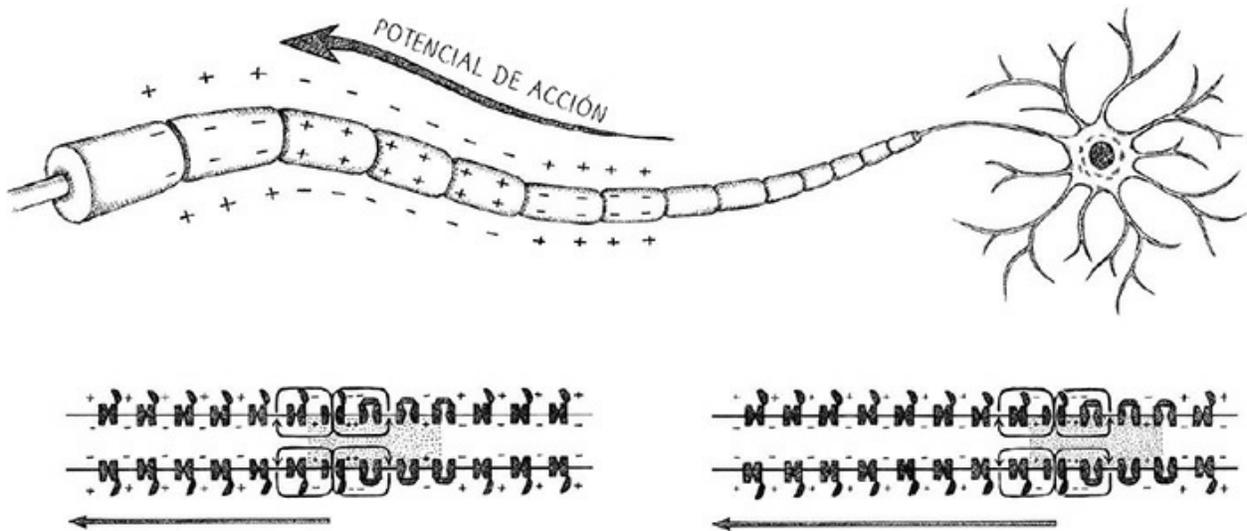
través de la membrana celular se logra utilizando unas proteínas llamadas «canales» que tienen propiedades de compuertas batientes. Más adelante hablaremos de cómo las proteínas pueden comportarse como máquinas; por ahora, consideremos un canal iónico como un tipo de compuerta batiente. Puesto que se trata de iones sodio y potasio, y al sodio le gusta entrar en la parte interna de la membrana mientras que al potasio le gusta salir al exterior de la misma, estos canales son direccionales. Un canal de sodio sólo permite que el sodio atraviese la compuerta hacia el interior de la membrana, y un canal de potasio sólo deja al potasio atravesar la compuerta hacia el exterior de la membrana.



Una sinapsis. Este diagrama muestra cómo un potencial de acción se convierte en una señal molecular en la sinapsis (panel superior) por los neurotransmisores que liberan las vesículas sinápticas (panel inferior). El potencial de acción provoca la fusión de la vesícula con la membrana presináptica y se produce la liberación del neurotransmisor. Los neurotransmisores se unen a los receptores del canal iónico (círculos

abiertos en la figura inferior) y esto provoca la apertura y cierre del canal iónico.

He aquí cómo se produce un potencial de acción a través de una membrana ideal (los voltajes para las diferentes clases de membranas varían). En la fase de reposo, los dos tipos de canales iónicos (canales iónicos de sodio y de potasio) de la membrana están cerrados. Como consecuencia de una carga en la membrana producida, digamos, por la comunicación con otra célula, el canal iónico del sodio se abrirá cuando el voltaje en el interior de la membrana sea de  $-50$  mV. Cuando el canal iónico del sodio se abre, deja entrar al sodio hasta que el voltaje de la membrana asciende a  $+30$  mV, momento en el que la membrana tiene un potencial de acción. Recordemos que el sodio es un ion positivo, de modo que el voltaje subirá desde el valor de reposo de  $-70$  mV. Cuando el potencial próximo a la región localizada de la membrana donde todo esto ocurre alcanza  $+30$  mV, el canal del sodio se cierra y el canal iónico del potasio se abre. Cuando la compuerta del potasio se abre, el potasio –también un ion positivo– se precipita hacia el exterior de la membrana celular. Esto reduce el voltaje de la membrana hasta alcanzar  $-70$  mV, momento en el que la célula vuelve a su estado normal o potencial de reposo. Todo esto sucede en aproximadamente 1,5 milisegundos, o 0,0015 segundos.



Neurona que muestra el movimiento de un potencial de acción a través de un axón. Debajo de la neurona, los diagramas muestran los canales iónicos activados por ligandos abriéndose y cerrándose, lo que hace que el potencial de acción se mueva a lo largo del axón. El diagrama de la izquierda tiene lugar antes que

el de la derecha. El símbolo + indica una carga positiva y – indica una carga negativa. Los cuadrillos alrededor de los canales de la parte inferior es donde los canales iónicos provistos de compuertas cambian para producir el potencial de acción.

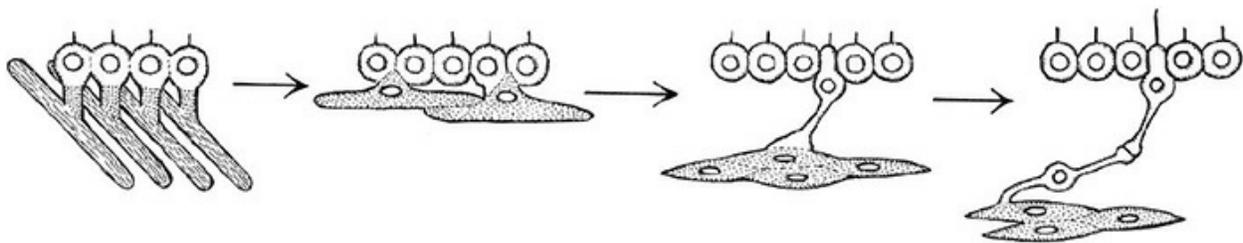
Ya que la membrana celular está revestida de estos canales iónicos provistos de compuertas, se puede iniciar una reacción en cadena y mantenerse a lo largo de dicha membrana. Si la célula es redonda y globular, el potencial de acción se propagará como una onda por la membrana del glóbulo. Pero si la célula tiene forma lineal o de alambre, la reacción en cadena hará que el potencial de acción se desplace en línea. Resulta que la estructura de una neurona puede ser tanto globular (el soma o cuerpo celular) como de alambre (el axón). Pero no será exactamente como el alambre. Al igual que los cables eléctricos que van por las paredes de nuestras casas están aislados por plástico o caucho, nuestro sistema nervioso desarrolló células especializadas que actúan como aislantes. Estas son las células gliales, y forman un curioso patrón alternante a lo largo del axón que incrementa la eficacia del movimiento de los potenciales de acción por las puntas de la neurona. Y llegados a este punto, antes de hablar de la estructura básica de las células nerviosas con más detalle, hay que relatar cómo un único genoma puede dar origen a la gran cantidad de tipos de células que existen en los organismos de este planeta.

## LA EVOLUCIÓN DE LOS TIPOS DE CÉLULAS

La variada funcionalidad de los cuerpos animales se debe sobre todo a los cientos de tipos diferentes de células que se han desarrollado en ellos. Como veremos, algunos animales como las esponjas tienen muy pocos tipos de células, y por lo tanto una funcionalidad muy limitada, comparados con primates como nosotros que tenemos cientos de tipos. Lo que hace que una célula sea de uno u otro tipo es sencillamente las proteínas que contiene. Son ellas las que forman las diferentes estructuras del interior de la célula, o las que llevan a cabo las distintas funciones celulares; y están codificadas por los genes de los genomas de las células. Si hablamos de un único organismo,

entonces todas las células contendrán el mismo genoma que produce los muchos tipos de células diferentes que existen en aquél. Hace poco que los científicos que estudian las células madre han empezado a comprender los mecanismos genéticos que determinan los tipos celulares, pero la manera en que se desarrolló la diversidad celular sigue siendo un misterio. Como dijo Detlev Arendt, investigador del Laboratorio Europeo de Biología Molecular: «Los tipos de células son unidades fundamentales de la vida pluricelular, pero su evolución es incierta». No obstante, Arendt ha dedicado un gran esfuerzo a intentar comprender la evolución de los tipos celulares con el fin de definir unos «principios básicos de la diversificación de los tipos de células».

Qué genes y cómo se regulan en una célula forma parte de lo que se denomina «huella molecular». Estas huellas moleculares son las principales herramientas que se emplean para comprender el origen de los diferentes tipos de células animales. En la mayoría de los casos es posible determinar qué gen o genes son los responsables de los tipos principales de diferenciación celular; estos genes son muy importantes para establecer una huella molecular. Además, existen unas moléculas de ARN verdaderamente pequeñas que participan en el control de la expresión génica. Se puede realizar un seguimiento de estos microARNs, o miARNs, en las células, y sus tipos y cantidades son indicativos del tipo de célula. Una vez establecida una base de datos de huellas moleculares, descubrir cómo se relacionan unos tipos celulares con otros es sencillamente una historia de detectives muy similar a *CSI*.



Dos casos de segregación celular llevan al desarrollo de una neurona. Las células del extremo izquierdo son células mioepiteliales que se separan en los dos tipos de células intermedias (las dos figuras del medio) que finalmente llevan a la disposición de neuronas del extremo derecho.

La pregunta ¿de dónde proceden las neuronas? es esencial para entender el

cerebro. Arendt propone que surgieron de unos tipos de células multifuncionales antiguos. Cuando examinamos animales muy sencillos (capítulo 3) que poseen un número limitado de tipos celulares, podemos observar que las células que se especializaron en animales más complejos (con más tipos de células) cumplen múltiples funciones. Por ejemplo, en las células de algunos animales simples, las estructuras de los músculos epiteliales, miofibrillas, cilios, vesículas secretoras y funciones glandulares constan de un único tipo celular. La diversificación e implantación de múltiples tipos de células en las especies más complejas habría supuesto necesariamente la formación de células hermanas, cada una con una función distinta. Las células hermanas pueden diferenciarse de varias maneras. Una es dividiendo la función: una célula se especializa en una parte de la función original y la célula hermana en otra. Otra es separándose en células hermanas con funciones similares pero ligeramente distintas. Una tercera es que una de las células hermanas adquiera una función completamente nueva. Parece ser que dicha segregación de funciones es la principal vía mediante la cual tipos de células ancestrales con múltiples funciones derivaron en neuronas. Hechos como éstos ayudan a explicar cómo nuestro sistema nervioso llegó a diversificarse tanto y cómo los sistemas nerviosos más simples pueden dar lugar a otros cada vez más complejos.

#### SE ABRE LA CAJADE PANDORA

En la película de enorme éxito *Avatar*, el escritor y director James Cameron creó Pandora, un mundo en el que la comunicación entre las especies es clave para la supervivencia de la vida. El argumento de Cameron es interesante y está bien documentado; según parece, consultó a la botánica de la Universidad de California en Riverside Judie Holt acerca de la clase de plantas que podrían existir en un mundo semejante y de cómo podrían estas «comportarse». Cameron llegó al extremo de consultar qué nombres latinos podrían llevar ciertas plantas de Pandora. Pero tal vez el aspecto más interesante de la vida en Pandora atañe a cómo se comunican las plantas y

otros organismos entre sí. La científica Grace Augustine, interpretada por Sigourney Weaver, afirma que las plantas se comunican mediante una especie de «transducción de señales». No está mal: como veremos en el capítulo 3, si bien las plantas no utilizan necesariamente el mismo sistema electroquímico que los animales en la comunicación entre células, sí producen corrientes eléctricas. Y, en efecto, utilizan la transducción de señales.

Si James Cameron hubiera realizado *Avatar* en la década de 1970, con toda probabilidad no habría utilizado el término transducción de señales para describir la comunicación entre los organismos de Pandora, ya que en 1975 sólo dos o tres artículos científicos habían utilizado la frase en relación con las células. En efecto, es un término vinculado con más frecuencia a la física y la electrónica. Pero comparemos la situación de 1975 con los más de diez mil artículos científicos que para 2005 habían hecho referencia a la transducción de señales en un contexto celular. Este aumento coincidió con la revolución en genética, biología celular y biología molecular que tuvo lugar en las dos últimas décadas del siglo xx. Y coincidiendo con el desarrollo de la tecnología genómica de finales de siglo se publicó una cantidad aún mayor de artículos sobre la transducción de señales celulares. Cuanta más información obtenemos de la genómica y la biología celular, más aprendemos sobre cómo se comunican las células entre sí. No es que el proceso de la transducción de señales sea nuevo; los científicos sabían que existía. Pero como en el caso de *Avatar*, necesitaba un nombre sugerente para que se aceptara como proceso celular fundamental.

Existen varios componentes en la transducción de señales. Se inicia con la reacción de una molécula receptora, por lo general anclada en la membrana de la célula, ante una molécula o estímulo extracelular. Esto *transduce* entonces una respuesta de la célula. Estas respuestas van de leves a extremas, y a veces son espectaculares. Las moléculas o proteínas receptoras suelen ser moléculas mucho más complejas que aquellas que las estimulan desde fuera. De hecho, la mayor parte de las moléculas que inician la transducción de señales son muy pequeñas. Estas moléculas diminutas también se denominan ligandos, y básicamente flotan de un lado a otro entre las células. Pero cuando entran en contacto con una membrana celular, se topan con los receptores que los

reconocen. Los ligandos encajan como un guante en los bolsillos moleculares de los receptores, lo cual es posible gracias a que las proteínas receptoras poseen una estructura tridimensional. Pueden formar largas cadenas o grandes estructuras similares a glóbulos y todas las formas intermedias.

Las moléculas del interior de la célula pueden actuar también como máquinas complejas: los actuales modelos de cómo funcionan las proteínas revelan que hay diferentes marcas y modelos de máquinas moleculares en nuestras células. Por ejemplo, una molécula llamada ATP sintasa actúa como una turbina para cambiar la conformación de otras proteínas a lo largo de su «eje» que, a su vez, realizan la conversión de una molécula llamada ADP en ATP. La conversión de ADP en ATP es una reacción fundamental de la célula y es esencial para muchas funciones celulares. Una molécula llamada quinesina transporta grandes moléculas de un lado a otro de la célula y acompaña a otras llamadas microtúbulos para llevar su carga a otras partes distintas y específicas de la célula. Otra máquina molecular es el ribosoma, un conjunto de muchos componentes proteicos y ácido nucleico. El ribosoma toma un ácido nucleico, lo manipula, lo lee y fabrica proteínas utilizándolo de guion. Las moléculas como estas tienen muchas de las propiedades de nuestras máquinas artificiales, pero lo más importante es que la mayoría tiene propiedades de máquinas de las que nunca hemos oído hablar, y que ni siquiera se nos hubiera ocurrido que pudiéramos necesitar. Las moléculas similares a máquinas pueden doblar y romper estructuras, pueden moverse de un lado a otro y pueden cambiar componentes moleculares de sitio. Se pueden asociar a otras moléculas, y cuando lo hacen cambian de forma. Esto es muy importante ya que en muchos casos la forma de una molécula determina su función, así que si una molécula pequeña choca con una grande y como consecuencia de ello cambia de forma, su función podría cambiar. Las moléculas también pueden trabarse, y cuando les ocurre a dos moléculas pueden convertirse en una y adquirir una nueva función que no existiría si no estuvieran unidas. Las moléculas también pueden verse afectadas por fuerzas externas como las ondas electromagnéticas o sonoras, una propiedad que nos procura los sentidos de la vista y el oído, de los que hablaremos en el capítulo 4.

Algunos de los componentes de la transducción de señales más conocidos son las hormonas. Todo el mundo ha oído hablar de estas moléculas: son esos mensajeros enloquecidos que andan por nuestro cuerpo y a los que culpamos de cosas tales como la tensión sexual y el mal comportamiento de los adolescentes. Las hormonas son moléculas pequeñas que segregan distintos grupos de células, órganos o glándulas de nuestro cuerpo y que viajan por el torrente sanguíneo. Una de las más importantes en cuanto a su supervivencia es la hormona denominada adrenalina (epinefrina) que pasa al torrente sanguíneo como consecuencia de una lesión física, el ejercicio, el frío y la conmoción emocional. Casi cualquier cosa que nos trastorne de forma inesperada –o en realidad a cualquier vertebrado– producirá un aumento repentino de adrenalina en el torrente sanguíneo para advertir al resto del cuerpo que hay que actuar. Algunas hormonas, como los estrógenos y la testosterona, pertenecen a un grupo de moléculas llamadas esteroides, y las moléculas con las que interaccionan se denominan receptores de esteroides. Los esteroides corren por el torrente sanguíneo, chocando con células hasta que pasan al interior de una, donde encontrarán los receptores de esteroides y se unirán a ellos. La parte de la molécula receptora de esteroides que reconoce al esteroide se llama dominio de unión al ligando. Otra parte de la proteína, llamada dominio de unión al ADN, envía la señal a la célula después de que el esteroide se haya unido a la proteína receptora. La unión al esteroide activa el transporte del receptor al núcleo, donde interacciona con el genoma de la célula.

Llegados a este punto, el dominio de unión al ADN del receptor de esteroides activado no ve el momento de hacer lo que su propio nombre indica: unirse al ADN en el núcleo. Y al hacerlo, el receptor de esteroides nuclear afecta al modo en que las regiones de ADN a las que se une se expresan en otras proteínas. En esencia, la hormona envía una señal al receptor nuclear de esteroides para que regule la expresión de otros genes que entonces responden a la presencia inicial de la hormona esteroidea.

Otra categoría de proteínas receptoras importante en la transducción de señales, y aún más importante para nuestra comprensión del cerebro, es la de los receptores de neurotransmisores. Al igual que las hormonas, los

neurotransmisores son moléculas pequeñas. En realidad, muchas hormonas también se consideran neurotransmisoras. Uno de los neurotransmisores más pequeños y más importantes es un aminoácido (sí, el mismo tipo de molécula pequeña que forma parte de las proteínas) llamado glutamato. Este neurotransmisor es importantísimo para el sistema nervioso porque cuando se presenta en exceso provoca determinadas respuestas neurológicas. A diferencia de los receptores nucleares que interaccionan con esteroides una vez que penetran en la célula, la mayor parte de los receptores de neurotransmisores están anclados en la membrana celular a la espera de que un neurotransmisor como el glutamato se tope con ellos. Esto ocurre en la «sinapsis», en la que dos neuronas «se besan sin tocarse». Cuando el neurotransmisor y el receptor chocan, el neurotransmisor se une a lo que se denomina un sitio activo del receptor y cambia la conformación de este último. En la mayoría de los casos esto hace que se abra una compuerta hacia el interior de la célula. Existe más de un centenar de neurotransmisores distintos con el que se las ven nuestras neuronas, y existen aún más receptores de neurotransmisores que efectúan la unión de estas moléculas intracelulares con las células de la sinapsis.

Con todos estos ligandos, hormonas, neurotransmisores, receptores y demás moléculas yendo de un lado a otro, ¿cómo saben nuestro cerebro y el resto de nuestro cuerpo lo que tienen que hacer? Resulta que no todo es tan caótico como pudiera parecer. Sólo ciertas glándulas, o grupos de células, producirán una hormona o un neurotransmisor específicos. En el otro extremo, muchas áreas del cerebro se especializan en uno solo o unos cuantos tipos de receptores; y algunos neurotransmisores interaccionarán con más de un receptor, lo que aumenta las clases de señales que pueden ser transducidas por la neurotransmisión de un solo tipo de molécula. Una mayor especialización de los tejidos y las partes del cerebro confiere un cierto orden a este sistema más bien complejo. Por ejemplo, el neurotransmisor conocido como ácido gamma-aminobutírico, o GABA,<sup>2</sup> interacciona con dos tipos principales de receptores. El primero se denomina canal iónico activado por un ligando, en el que interviene el tipo de proteína que lleva a cabo el movimiento de iones a través de la membrana de las neuronas y de la que hemos hablado

anteriormente. Estos son receptores de acción rápida que, tras la unión del GABA, activan la apertura del canal. Estos receptores también se conocen como receptores ionotrópicos. Los receptores GABA de acción rápida inhiben la propagación de un potencial de acción, de modo que el GABA actúa como una especie de calmante de acción rápida.

El segundo tipo de receptor GABA se denomina receptor metabotrópico. Actúa de un modo muy diferente, y utiliza una proteína que los neurobiólogos llaman segundo mensajero. Estos receptores llevan a cabo una respuesta lenta y emplean una clase de proteínas intracelulares llamadas proteínas G. El GABA se une al receptor GABA metabotrópico que se encuentra en la membrana celular. Esta interacción cambia la forma del receptor GABA, el cual se desplaza después al interior de la célula. Una vez allí, interacciona con una proteína G que efectúa una respuesta de acción lenta en la neurona.

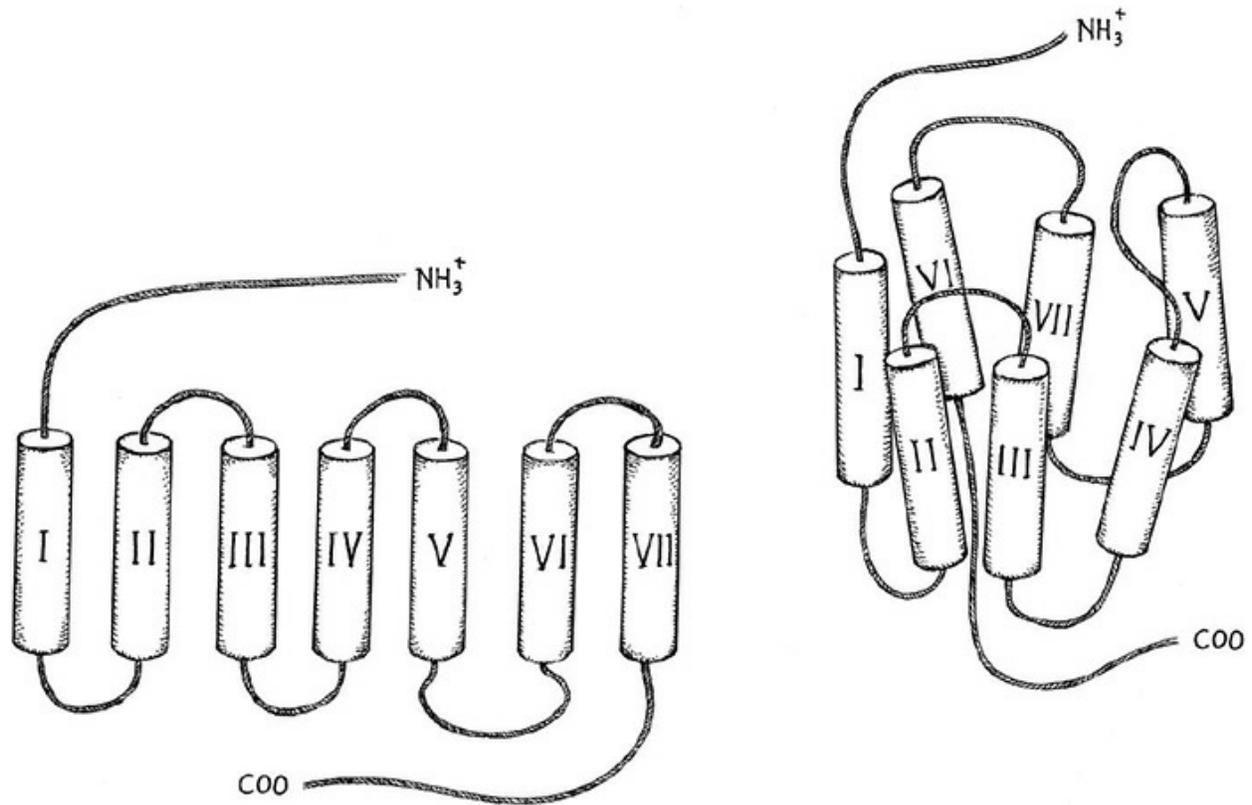
La transducción de señales puede inducir también interacciones complejas en la célula que se traducen en un control muy específico y complicado sobre la función celular. Una clase de proteínas receptoras de neurotransmisores que transporta información a la célula desde el exterior se conoce como receptores acoplados a proteínas G, o GPCR (según las siglas inglesas del término). Las proteínas G hacen referencia a las proteínas intracelulares que actúan como interruptores moleculares; están compuestas de distintas subunidades, cada una de las cuales tiene su propia función y otra más aparte e igualmente importante cuando están unidas formando complejo en la proteína G.

El GPCR tiene una estructura única. Recordemos que las proteínas son elementos lineales, con un extremo inicial y un extremo final, y pueden plegarse dando lugar a formas y configuraciones interesantes. La proteína GPCR se pliega sobre sí misma de tal manera que consta de siete varillas más bien rígidas de aminoácidos llamadas hélices, con seis bucles cortos que las conectan. En la membrana las hélices están dispuestas en paralelo, pero los bucles conectores son tan pequeños que las hélices deben adoptar una disposición cabeza-cola, en la que la cabeza es la parte de la hélice más próxima al extremo inicial de la proteína y la cola es la más cercana al extremo final. Si observamos la proteína de izquierda a derecha tal como está anclada en la membrana, vemos también que el inicio de la proteína cuelga de

la primera hélice, mientras que de la séptima y última hélice cuelga una pequeña cola de aminoácidos. Esto hace un total de ocho pequeños elementos de GPCR que hay que guardar en alguna parte. Y como resultado, los GPCR se integran en la membrana celular de modo que cuatro de estos pequeños elementos caen hacia fuera y cuatro caen hacia dentro de la membrana celular. Los GPCR constituyen un conjunto variado de proteínas relacionadas por esta estructura característica de siete hélices. Hay casi mil genes GPCR en el genoma humano, y hasta la fecha sólo se conoce la función de alrededor de un 20 % de ellos.

Estas proteínas llevan a cabo la comunicación de la célula con el mundo exterior de muchas maneras. Los GPCR lo hacen por dos métodos principales: las vías del «AMP cíclico» y de la «señal fosfatidilinositol». Éstas operan de una manera increíblemente mecánica. Para abreviar, un estímulo externo como una hormona o un neurotransmisor se une al GPCR anclado en la membrana. Esta unión produce un cambio en la conformación del GPCR, y las posiciones de esos cuatro elementos en bucle que sobresalen hacia el interior de la célula cambian levemente. Pero hasta los cambios leves como éste son muy atractivos para otras proteínas celulares; en efecto, una proteína G interaccionará con el GPCR que ha sufrido la leve alteración y se unirá entonces a una molécula llamada guanosina trifosfato (GTP). La unión del GTP a una proteína G hace que se disocien sus subunidades. Hasta aquí todo va bien. Pero estas subunidades por sí solas apenas tendrán impacto en la propia célula, aun cuando la razón por la cual el GPCR se une al neurotransmisor en primer lugar es la de efectuar un cambio en el estado de la célula. Pero si bien el mero hecho de causar la disociación de la proteína G no hace gran cosa por sí misma, una de las subunidades se une luego a otra proteína llamada adenil ciclasa, y esta unión hace que la ciclasa interaccione con ATP (primo del GTP) y produzca AMP cíclico, que es una molécula pequeña e importante que regula un tipo de proteína llamada proteína quinasa. Cuando se activan, las proteínas quinasas «fosforilan» otras proteínas, un proceso que desactiva o retrasa seriamente la actividad de la proteína que está siendo fosforilada. De este modo, la reacción en cadena que hemos descrito puede regular la actividad de varias proteínas celulares. Además, todo el proceso es enteramente reversible.

Esto se debe a que todas las proteínas implicadas recuperan rápidamente su conformación inicial cuando el estímulo desaparece, después de lo cual la «máquina» se reiniciará.



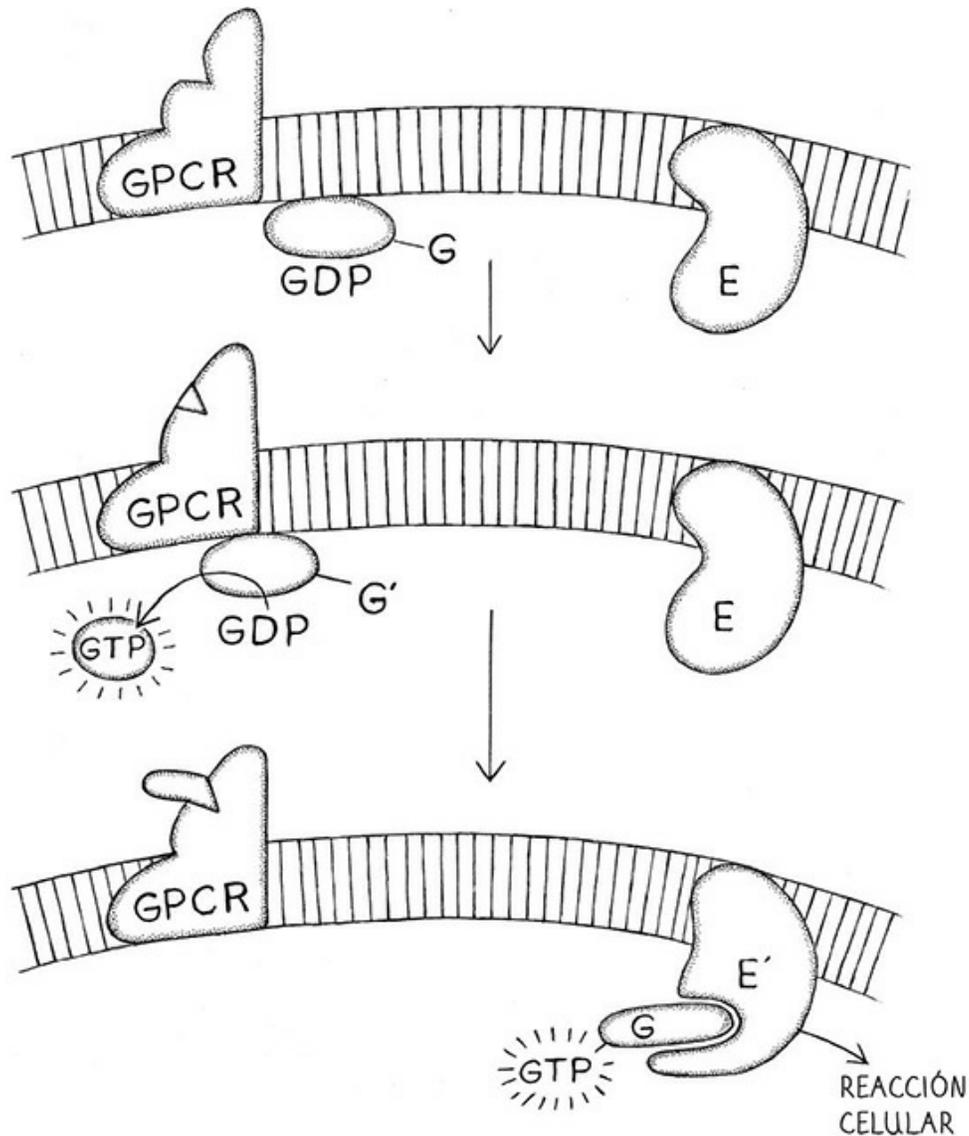
Un receptor acoplado a proteína G típico. Los siete cilindros representan los siete dominios de la proteína que residen en la membrana celular. Las líneas representan aquellas porciones de la proteína que se encuentra en el exterior (parte superior) y en el interior de la célula (parte inferior). El extremo amino terminal de la proteína lleva la marca  $\text{NH}_3^+$ , y el extremo carboxilo terminal  $\text{COO}$ . El diagrama de la izquierda muestra un GPCR desplegado, mientras que el de la derecha muestra cómo se ordenan los dominios intramembrana en la membrana.

El sistema AMP cíclico, o AMPc, se denomina «sistema de segundo mensajero» porque el proceso consta de dos etapas principales: la activación de la proteína G y la activación de la proteína quinasa A, o PKA. Pero ¿por qué hay dos etapas? ¿No sería más fácil un «sistema de primer mensajero» para regular, realizar un seguimiento y reparar si algo iba mal? Al fin y al cabo, todos los ingenieros saben que cuantas más piezas móviles tiene un dispositivo, más probable es que algo se rompa. Bueno, existen dos respuestas para esta pregunta. En primer lugar, como todo en la naturaleza, la vía del

GPCR no fue diseñada, sino que evolucionó, y por ello no se optimizó. En segundo lugar, sin embargo, tal vez no sea tan ineficaz después de todo. Concretamente, la utilización del segundo mensajero AMPc tiene dos enormes ventajas: amplificación y velocidad. El AMP cíclico se obtiene con mucha facilidad mediante el proceso que hemos descrito. Su producción gasta poca energía, lo que hace que sea una forma barata y eficaz de aumentar la cantidad de segundos mensajeros que luego ponen en marcha la activación de la PKA responsable de la regulación celular. Y es veloz porque el AMPc es una molécula pequeña de fácil difusión por la célula y producción rápida.

¡CUIDADO CON LOS ESPACIOS! EL CONECTOMA ESTÁ A PUNTO DE LLEGAR

Hasta ahora todo va bien, pero ¿cómo funciona la comunicación entre células? ¿Cómo «salta» la señal de un potencial de acción de una célula a otra? Para comprender esta forma importante de comunicación entre células tenemos que ahondar un poco más en la microestructura de las neuronas y en cómo se «besan sin tocarse».



Sistema del segundo mensajero. Un receptor acoplado a proteína G (GPCR) anclado en la membrana se acopla a una proteína G (marcada G) que lleva unida una molécula de guanosina difosfato (GDP). El GPCR interacciona con un ligando (pequeño triángulo que en este caso es una hormona), lo que conlleva varias reacciones en la célula. En primer lugar, el GPCR se convierte en guanosina trifosfato (GTP) que entonces provoca la liberación de una de las subunidades (alfa) de la proteína G. La proteína G así alterada se une a la adenil ciclasa (E), lo que provoca que se desencadenen nuevas reacciones en la célula.

El camino hacia la comprensión de las neuronas y su estructura fue muy pedregoso. En él se implicaron dos histólogos que analizaron con gran minuciosidad el trabajo del otro. Si bien discrepaban muchísimo, lo irónico es que los dos científicos en liza, Camillo Golgi y Santiago Ramón y Cajal, al final compartieron el premio Nobel de 1906 por sus trabajos sobre el sistema

nervioso. La investigación ganadora del premio pudo realizarse gracias a que Golgi inventó la tincura que lleva su nombre y que permitió a los investigadores observar sólo las neuronas. Aunque los científicos que les precedieron habían comprendido que el cerebro y el sistema nervioso estaban compuestos de células, la tincura de Golgi les permitió visualizarlas por primera vez.

La discrepancia surgió a partir de aquí. Golgi pensó que había demostrado la teoría reticular, una vieja idea que sostenía que todo el sistema nervioso estaba compuesto de una única red sólida de fibras producida por la fusión de neuronas. Cajal mejoró la técnica de tinción de Golgi y llegó a una conclusión completamente distinta. Mediante el examen de las preparaciones histológicas realizadas en su laboratorio, Cajal concluyó que el sistema nervioso de los organismos estaba formado por una gran cantidad de células individuales y no por una única red de fibras. Esto se conoció como la «doctrina de la neurona», y Cajal propuso que las puntas de las neuronas (que Golgi había pasado por alto) mantenían algún tipo de contacto mutuo pero que cada célula conservaba su autonomía. Cuando fueron a Estocolmo a recibir su premio Nobel compartido, Golgi omitió por completo el trabajo de Cajal en su discurso de aceptación. ¡Muy incómodo! Como dijo Cajal: «Qué cruel ironía del destino, emparejar como gemelos siameses unidos por los hombros a adversarios científicos de caracteres tan opuestos». Ahora sabemos que las ideas de Cajal sobre que las células del sistema nervioso se comunican por medio de algún tipo de contacto es correcta y que la hipótesis reticular era errónea. Pero a Cajal le costó mucho tiempo convencer a la comunidad científica de la veracidad de su interpretación.

Lo que en realidad veía Cajal en las puntas de las células eran las «sinapsis», la clave de cómo se comunican las neuronas. Una célula nerviosa elemental tiene cuatro componentes. La parte principal, donde se encuentra el núcleo y el genoma, se denomina cuerpo celular o «soma». Las «dendritas» son prolongaciones ramificadas que salen del cuerpo celular y donde se recibe la mayor parte de las señales procedentes de otras células. El tercer componente de la célula nerviosa es el «axón», una larga prolongación que sale del cuerpo celular y se extiende hacia otras neuronas. Está revestido de

células «gliales» a fin de aislarlo. La última parte de la célula nerviosa es el «terminal axónico», donde la célula forma sinapsis con otras células. Las neuronas se presentan en una gran variedad de tamaños y formas dependiendo de su localización y función en el sistema nervioso. También se clasifican según su función y dirección de la comunicación. Las neuronas «aférentes» o «sensoriales» son las que transmiten información desde el mundo exterior al cerebro. Hablaremos largo y tendido de los sentidos en el capítulo 4. Están también las neuronas «eferentes» o «motoras» que transmiten información desde el cerebro a las partes del cuerpo, e inducen a los órganos o los músculos a realizar un trabajo. Y luego está todo lo demás, que se agrupa formando las «interneuronas». Éstas se comunican con otras neuronas del sistema nervioso.

La neurona más larga que se ha documentado se encuentra en el calamar gigante. Las neuronas de estos animales pueden medir hasta 12 metros de largo. Es posible que la ballena azul, el vertebrado vivo más grande, tenga neuronas aún más largas, pero no se sabe con certeza. Mientras citamos cifras increíbles, hay que señalar que el cerebro de un ser humano tiene unos 100.000 millones de células al nacer. Otros organismos como los perros tienen menos (1.000 millones) porque sus cerebros son más pequeños. Los ratones sólo tienen 75 millones. Algunos de los organismos de los que hablaremos enseguida en relación con la evolución de los sentidos tienen todavía muchas menos neuronas. Por ejemplo, la mosca del vinagre *Drosophila melanogaster* tiene 100.000. La babosa marina de California, *Aplysia californica*, que se ha utilizado en estudios de neurobiología de la memoria, tiene 20.000. Y por último, el nematodo *Caenorhabditis elegans*, constituido por algo más de 1.000 células en total, tiene 302 células nerviosas.

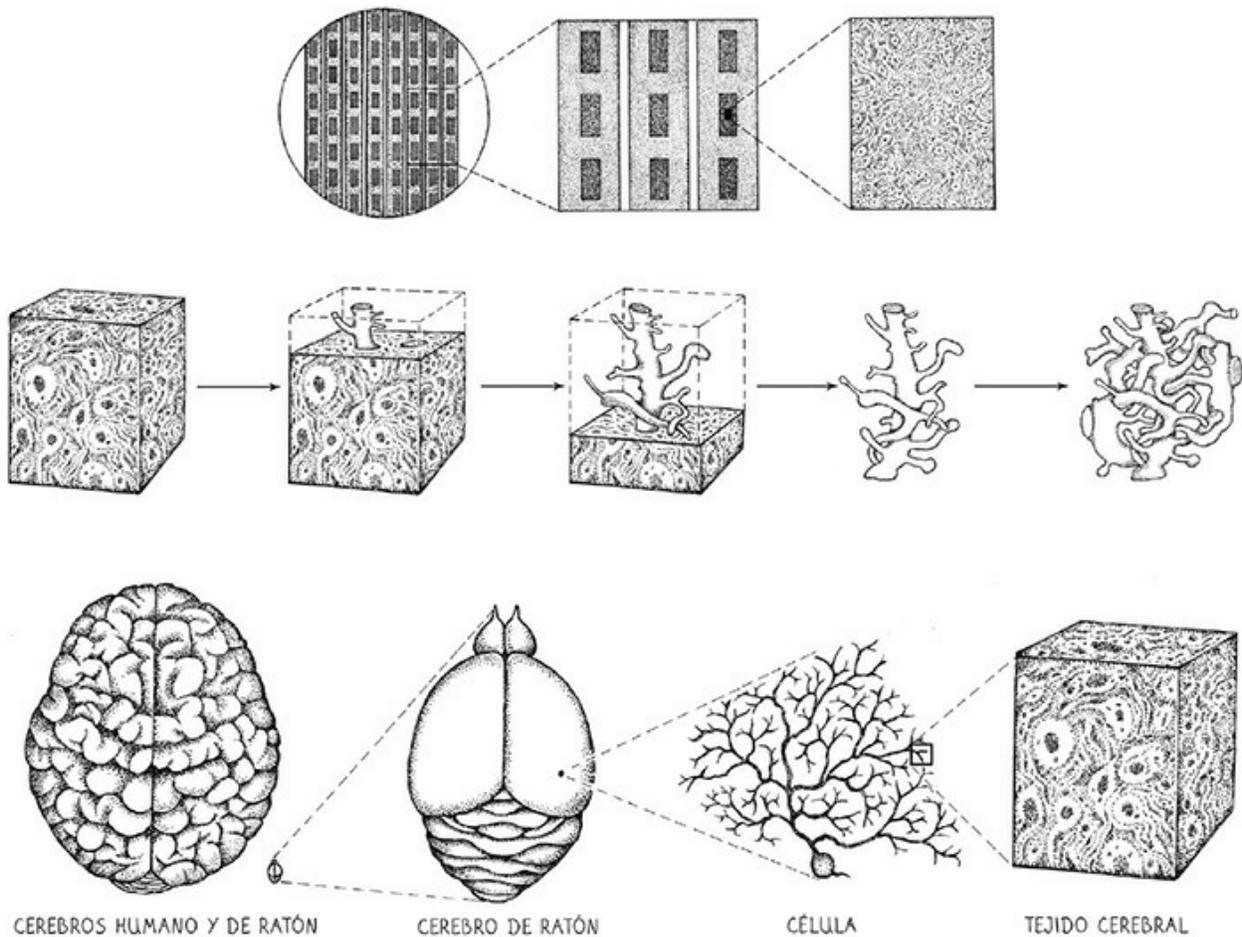
La cantidad de conexiones de una neurona típica es de 1.000. Esto significa que nuestro cerebro tiene un promedio de  $1.000 \times 100.000.000.000$  o  $100.000.000.000.000$  (100 billones) de conexiones. Y de hecho, ya que lo único que se necesita para crear una conexión es una pequeña parte del edificio dendrítico, la cantidad de espacios que pueden formar las sinapsis es en teoría mucho mayor que esos 100 billones. Utilizando el área de los axones como orientación, se ha calculado que la cantidad de conexiones posibles en

un cerebro humano es superior a  $10^{76}$ . Esto es un 1 seguido de 76 ceros, un número del mismo orden que el número de partículas del universo conocido. Estas conexiones entre neuronas constituyen lo que el neurólogo Charles Scott Sherrington denominó sinapsis, y es su particular biología lo que hace que nuestro sistema nervioso sea tan flexible. Como hemos indicado, gran parte de la actividad del sistema nervioso es eléctrica, percibiéndose a través de la actividad del potencial de acción. Pero existe también una gran comunicación química que tiene lugar entre proteínas y neurotransmisores y receptores. Y el funcionamiento de esta comunicación química es también esencial para nuestra comprensión del sistema nervioso.

¿Cómo están dispuestas estas neuronas y sinapsis en el cerebro? El científico del MIT<sup>3</sup> Sebastian Seung y sus colegas han iniciado un gran proyecto para entender cómo se relacionan las neuronas entre sí y dónde interconectan. Con el espíritu de los proyectos a gran escala tales como el Proyecto Genoma Humano (todos los genes de la célula humana) y el Proteoma Humano (todas las proteínas producidas por la célula humana), Seung y sus colegas han acuñado otro «oma», en esta ocasión el conectoma, para designar el proyecto de descifrar las conexiones en el seno del cerebro. Como primer paso, Seung y su equipo han elaborado una forma original, fascinante e informativa de observar el cerebro. Su planteamiento fue empezar con un trozo de cerebro de ratón en forma de cubo de 1 mm x 1 mm (más o menos el tamaño de una cabeza de alfiler) y lo fijaron en productos químicos que detienen las actividades de las células pero conservan su estructura. Después hicieron miles de cortes diminutos del cubo y los colocaron en un microscopio electrónico para observarlos. Ahora bien, debido a que la mayoría de las neuronas son más largas que anchas, lo que se observa en un típico cubo son las prolongaciones axónicas de las células que atraviesan el cubo. Siguiendo los contornos de cada célula en cada corte y tiñendo cada una de un color, Seung y sus colaboradores obtienen una imagen de un cuadrado con los contornos de cada célula de un color particular. Cuando se hace lo mismo al cubo entero, quedan cientos de cuadrados pequeños que van en orden desde la parte inferior del cubo a la superior. Mediante el uso de algoritmos informáticos masivos, reúnen todos los cuadrados en tres

dimensiones y visualizan los axones y los cuerpos celulares que atraviesan el pequeño cubo de cerebro de ratón.

Lo que queda es una visión tridimensional sin precedentes de neuronas cruzándose, enroscándose unas alrededor de las otras, y «besándose sin tocarse». Las estructuras tridimensionales que han generado hasta ahora son asombrosas y muestran que en algunos de los cubos todo el espacio está lleno de neuronas pasando en todas direcciones. Para situar todo esto en su contexto y tomar conciencia de la enorme cantidad de células y sinapsis que tenemos en el cerebro, la ilustración anterior muestra mediante un aumento de escala lo grande que es ese cubo de 1 mm comparado con una neurona típica de cerebro de ratón. A continuación, mostramos el tamaño de la neurona con respecto al cerebro de ratón, y por último lo grande que es el cerebro de ratón comparado con un cerebro humano.



El «conectoma» de Sebastian Seung y sus colegas. La serie de esquemas de la parte superior muestra el

proceso general mediante el que se consiguen los datos. Se obtienen secciones de un bloque de tejido cerebral de ratón y luego se observan al microscopio electrónico. Estas secciones se ordenan secuencialmente de modo que un ordenador pueda reconocer la misma célula en cada microfotografía secuencial. En medio, la serie de imágenes representa el proceso de reconstrucción de las neuronas. A medida que se analiza cada sección se elimina, y van apareciendo las dendritas y el axón de la neurona resultante. La serie de esquemas de la parte inferior muestra la escala a la que se realiza el análisis. El bloque de tejido se muestra a la derecha. El siguiente esquema a la izquierda es de una célula nerviosa, con su típico aspecto arbóreo. Una célula nerviosa típica de cerebro de ratón (tercer diagrama desde la derecha) ocuparía el espacio marcado en el cerebro de ratón. El esquema más a la izquierda muestra un cerebro de ratón dibujado al lado de un cerebro humano adulto.

En este capítulo hemos ido desde la nada, pasando por el Big Bang, a los electrones, los átomos, los iones, las moléculas, las proteínas y, al final, a las neuronas y las sinapsis. Ha sido un viaje de 13.500 millones de años que empezó mucho antes del origen de la vida, la cual apareció en este planeta hace unos 3.500 millones de años. Muchos de los mecanismos que determinan cómo interaccionan las moléculas entre sí, y con las células, iniciaron su historia de 3.500 millones de años con el origen de organismos diminutos que se parecían vagamente a las bacterias actuales. Posteriormente, muchos de los modos en que trabajan nuestras neuronas empezaron a perfeccionarse con el origen de las células «eucariotas» poseedoras de núcleos rodeados de una membrana. Así que a continuación, al colgar nuestro cerebro del Árbol de la Vida, esperamos descubrir algunas de las complicaciones que entrañó el largo y tortuoso viaje hacia nuestro cerebro humano moderno.

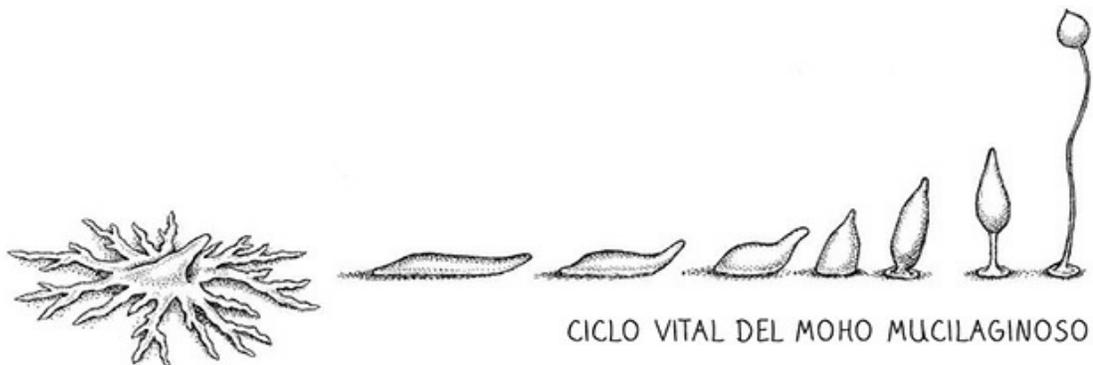
---

1. El título inglés del libro de Crick es *The Astonishing Hypothesis: The Scientific Search for the Soul*. La traducción literal sería *La hipótesis sorprendente: la búsqueda científica del alma*. Pero como puede verse en la bibliografía, el título en español no incluye la expresión «hipótesis sorprendente». De ahí esta nota aclaratoria. (*N. de las T.*)

2. GABA son las siglas del término inglés correspondiente: *gamma aminobutyric acid*. (*N. de las T.*)

3. MIT son las siglas del Massachusetts Institute of Technology, Instituto Tecnológico de Massachusetts, centro universitario de gran prestigio situado en Cambridge, Massachusetts (Estados Unidos). (*N. de las T.*)

## El lugar de nuestro cerebro en el Árbol de la Vida



Para comprender el camino largo y sinuoso que precedió a nuestro cerebro moderno, tenemos que entender cómo funcionan las células de otros organismos. Este no es un requisito insignificante, porque la variedad de organismos de este planeta es abrumadora. Pero los científicos han hecho grandes avances en la clasificación de los animales y, por lo tanto, en hacer posible la comprensión de la historia. Sin embargo, para llegar ahí, debemos examinar el Árbol de la Vida, porque el conservadurismo genético general de los organismos supone que una variedad de organismos hoy vivos están próximos a muchas de las etapas por las que una serie de antepasados pudo haber pasado durante el largo camino hasta aquí. Así que al intentar captar cómo evolucionó nuestro extraordinario cerebro humano, es importante entender los matices de cómo se comunican otros organismos y cómo almacenan y manipulan la información.

Desde la bacteria o arquea más pequeña y aparentemente más insignificante hasta los organismos más grandes y complejos de la tierra como nosotros existe una cadena ininterrumpida de ascendencia y descendencia. Si

sabemos quién, qué, cuándo, dónde y cómo se dispersaron estos antepasados por el Árbol de la Vida, podemos averiguar cómo han evolucionado nuestro cerebro y los de otros organismos: las pautas que descubrimos ayudan a desvelar la historia de la evolución del cerebro. Resolver este rompecabezas es parecido a encarar el cubo de Rubik. Para hacerlo, tenemos que realizar una gran cantidad de movimientos. Sólo existe una solución (todas las caras acaban del mismo color), pero hay muchas, muchas formas de lograrlo. Existe una forma mejor de resolver el problema, concretamente la más rápida; sería la solución perfecta. Pero aunque resolvamos este rompecabezas, sólo podemos hacer una serie de movimientos, si bien la serie de cada uno de nosotros bien podría ser diferente. Si quisiéramos que dos personas lo resolvieran exactamente de la misma manera, la segunda necesitaría pistas sobre lo que hizo la primera. Y lo mismo ocurre con el Árbol de la Vida, en el que reconstruir a nuestros antiguos antepasados extinguidos proporciona las pistas que nos ayudan a averiguar cómo sucedió más probablemente la historia evolutiva. Es muy posible que la solución que descubramos no sea la perfecta, ya que resulta que los caminos que toma la evolución son por lo general complejos.

### ¿AÚN TENEMOS *QUORUM*?

La vida en la tierra está compuesta de tres «dominios» principales de organismos vivos: Bacteria, Archaea y Eucarya (eucariotas). Las bacterias, al menos, deberían ser bastante sencillas. Son unicelulares y pueden hacernos enfermar, aunque la mayor parte del tiempo simplemente coexisten con nosotros. Sin embargo, es sorprendente y da que pensar el darse cuenta de que sólo se ha puesto nombre a 7.000 especies de bacterias (la mayoría de ellas de importancia médica), si bien tal vez existen en el planeta hasta 10 millones (si no más) de especies bacterianas, en todo tipo de medios y nichos ecológicos.

Las arqueas constituyen un grupo de organismos aún más escurridizos. Su propio nombre sugiere un carácter antiguo y místico. Les dieron ese nombre por sus estilos de vida arcaicos que según los científicos podrían imitar los

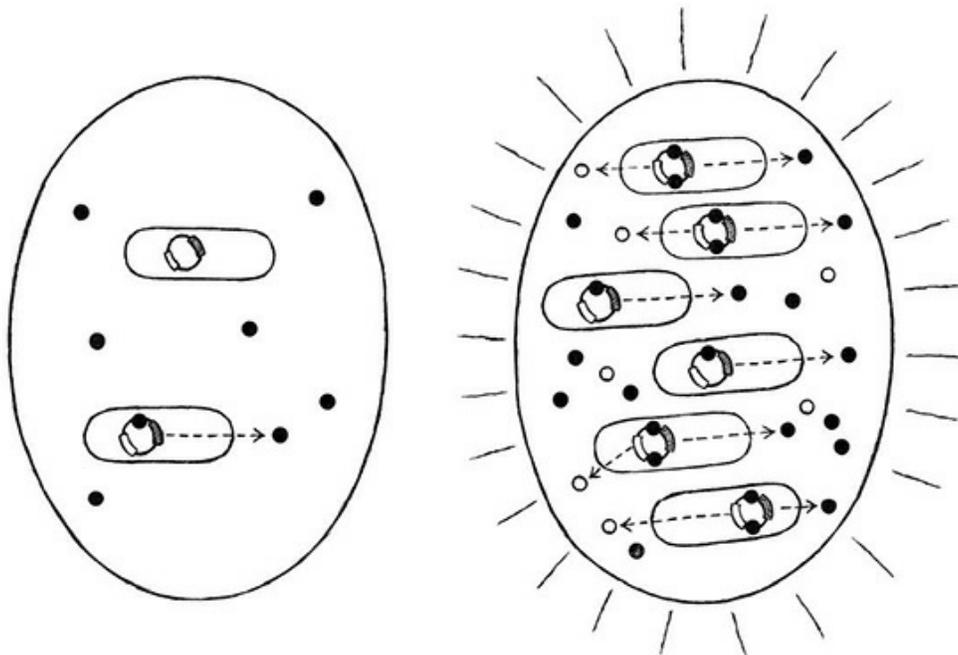
estilos de vida de las especies más antiguas de nuestro planeta. Y en la actualidad son únicas debido a sus hábitos de vida en medios realmente desagradables con elevadas concentraciones de sal, pH extremos (tanto muy ácidos como muy alcalinos), altas presiones o temperaturas cálidas. Por este motivo se les llama «extremófilos». El tercer gran dominio de vida es Eucarya. Estos constituyen un conjunto muy diverso de organismos, y se distinguen del resto de las formas de vida del planeta por la presencia de una membrana nuclear dentro de la célula (que llegará a ser importante cuando ahondemos en la comunicación intra e intercelular). Nosotros somos eucariotas y también lo es la mayor parte de los organismos de este planeta con los que estamos familiarizados. Pero por lo que se refiere a las especies o los individuos, en este planeta existen al menos 10 veces más bacterias y arqueas que eucariotas. Durante la década anterior se secuenciaron los genomas de miles de arqueas y bacterias, y se produjeron algunos descubrimientos asombrosos. Fijar la atención en los microbios ha revelado que existen organismos unicelulares en los tres dominios de vida principales. En los dominios Bacteria y Archaea todos los miembros son unicelulares; en el Eucarya, los únicos miembros que no son unicelulares son los animales y las plantas.

Podemos razonar con fundamentos sólidos que cualquier organismo pluricelular necesita tener un sistema de comunicación entre células. Esta comunicación es útil para casi cualquier propósito: por ejemplo, decir a la célula de al lado que deje de crecer o que crezca de distinta manera o que se suicide. Semejante comunicación exige una transferencia constante de información entre las células. ¿Cómo se logra esto? Bueno, cuando se trata de comunicación, las células operan en monedas de moléculas, átomos y partículas tales como los electrones. Y las tres tienen un gran impacto en las neuronas que componen los sistemas nerviosos animales (capítulo 2).

Tal vez cueste trabajo imaginar que las bacterias, las arqueas y los eucariotas sencillos como las amebas necesiten comunicarse entre sí. En general estos organismos están considerados los lobos solitarios de la vida. Son unicelulares y se suponía que eran solitarios y que así estaban a gusto. De hecho, el estudio de la comunicación entre bacterias era bastante raro antes de

la pasada década, ya que se pensaba que las células bacterianas eran bastante autosuficientes. ¡Qué equivocados estaban! En las últimas investigaciones han aparecido muchos ejemplos de bacterias que se comunican entre sí, y en realidad existen muchas razones funcionales y evolutivas por las que deberían comunicarse. Los individuos no sólo se comunican en el seno de su misma especie, sino que también pueden comunicarse a través de grandes distancias evolutivas. Es evidente que su comunicación no se da por medio del sonido o la vista, como la nuestra, sino mediante moléculas.

Una de las formas de comunicación de las bacterias que mejor se conoce es mediante un proceso llamado «percepción de *quorum*». La elección de la terminología es graciosa pero esclarecedora. El término supone que las células bacterianas perciben la presencia de otras muchas y que reaccionan ante esa gran masa con una cierta respuesta. Ahora bien, es obvio que las bacterias no tienen cerebro, y parecería que la palabra «percepción» es una elección extraña para el fenómeno. ¿Acaso lo es? En realidad, los mecanismos de percepción en las bacterias son todos moleculares, y la percepción en eucariotas complejos también se puede lograr a nivel molecular. Así que, en todo el Árbol de la Vida, las moléculas están en el meollo de los cambios de percepción.



Percepción de *quorum*. Las bacterias de la izquierda producen una señal, pero se encuentran en un número demasiado pequeño para que la señal sea útil. Las bacterias de la derecha producen la misma señal y debido a que han alcanzado un «*quorum*» la señal es eficaz.

La percepción de *quorum* entre bacterias se descubrió por primera vez en especies bioluminiscentes relacionadas con la bacteria del cólera *Vibrio*. Dos especies de *Vibrio* que habitan en el océano emiten luz sólo si están presentes en número suficiente. Una de estas bacterias –*Vibrio fischeri*– se ha estudiado exhaustivamente por el interés de los lugares en los que ejerce su «percepción». Vive en vejigas muy pequeñas que existen en diversos organismos huéspedes. La relación es «mutualista», lo cual significa que ambos organismos –en este caso el huésped y la bacteria– obtienen un beneficio de la interacción. Estas pequeñas vejigas se denominan «órganos luminosos», y sirven de cámaras de cultivo para el *V. fischeri*. Ahora bien, la producción de luz es una operación que consume mucha energía, y la luminiscencia de una sola bacteria no sirve de nada: ningún otro organismo verá la cantidad minúscula de luz que produce, así que el gasto de energía no sería productivo. Por otro lado, si hay suficientes bacterias presentes en un espacio lo bastante pequeño, la generación de luz mediante bioluminiscencia tiene un impacto visual muy grande en cualquier organismo que pudiera estar contemplando el órgano luminoso. De modo que el *V. fischeri* utiliza un mecanismo de percepción de *quorum* para dilucidar si está dentro del órgano luminoso o fuera. Si está dentro, entonces empezará a producir luz mediante luminiscencia. Si está fuera, no, porque no valdrá de nada: la concentración de bacterias ha de ser elevada en un área pequeña para que la luz que produzca cada una llegue a tener un impacto visual. Esta es una treta bastante buena, porque la capacidad de saber si está dentro o fuera sin un cerebro es realmente sorprendente.

¿Cómo lo hace el *V. fischeri*? Cada bacteria produce una hormona que fomenta su propia producción. Si la concentración es suficiente, tiene lugar la respuesta luminiscente y el *Vibrio* expulsa grandes cantidades de hormona. Si se encuentran en un órgano luminoso, la hormona se acumula y su producción aumenta más. Pero si están fuera del órgano luminoso, la hormona se esparcirá, su concentración bajará y no habrá autoinducción. Resulta que el

número de *V. fischeri* necesario para producir luz dentro de un órgano luminoso es de unas cien mil millones de células. El principal sistema de percepción de *quorum* de *Vibrio* se encuentra también en otras bacterias, y existen al menos otros cuatro sistemas independientes del de *V. fischeri* que requieren un número similar de bacterias. Aquí tenemos un sistema en el que la percepción de una posición en el espacio se lleva a cabo mediante un mecanismo molecular, sin la participación de un cerebro; resulta bastante llamativo ver que la mayoría de las funciones neuronales son básicamente iguales. Además, los genomas de las bacterias también responden activamente al potencial de comunicación con otras células: de este modo alrededor del 10 % de todos los genes de la bacteria común *Pseudomonas aeruginosa* está bajo el control de sistemas de comunicación intercelular como el de *V. fischeri*.

Se cree que la percepción de *quorum* también interviene en las interacciones comunitarias de grandes cantidades de especies bacterianas. Como se ha señalado, durante mucho tiempo se pensó que las bacterias eran solitarias. A menudo se observa que nadan libremente y no se asocian; sin embargo, hace poco que la asociación de bacterias en biopelículas ha abierto una nueva forma de pensar acerca de las interacciones comunitarias bacterianas. Además, la percepción de *quorum* puede también traspasar los límites de las especies, e incluso ha habido casos experimentales de percepción de *quorum* que traspasaba reinos de organismos. Melissa Miller y Bonnie Basler de la Universidad de Princeton lo expusieron así: «La percepción de *quorum* permite que una población de individuos coordine la conducta global y de ese modo actúe como una unidad multicelular». Por eso, la evolución de la multicelularidad en los eucariotas es nuestro siguiente paso para entender cómo se comunican las células.

¿TIENE DICTYCRITERIO?

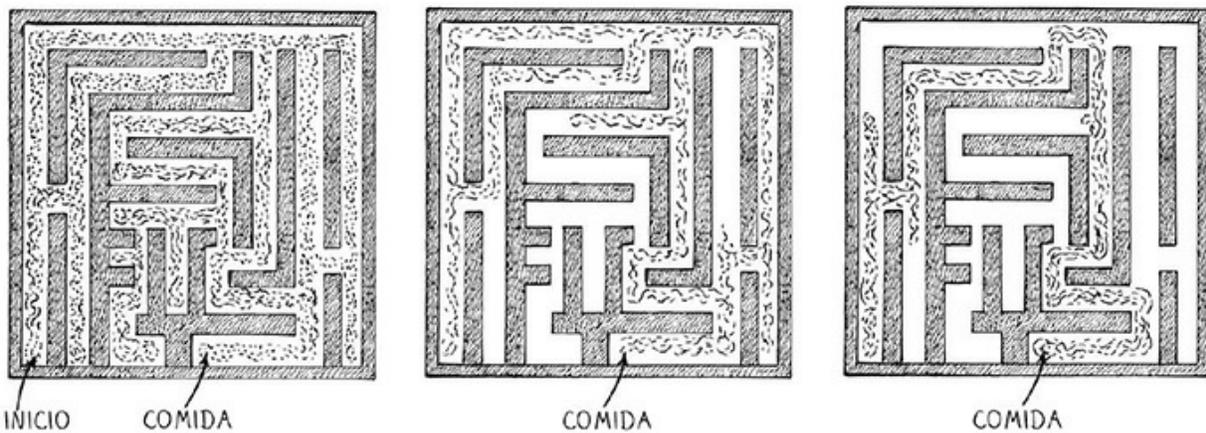
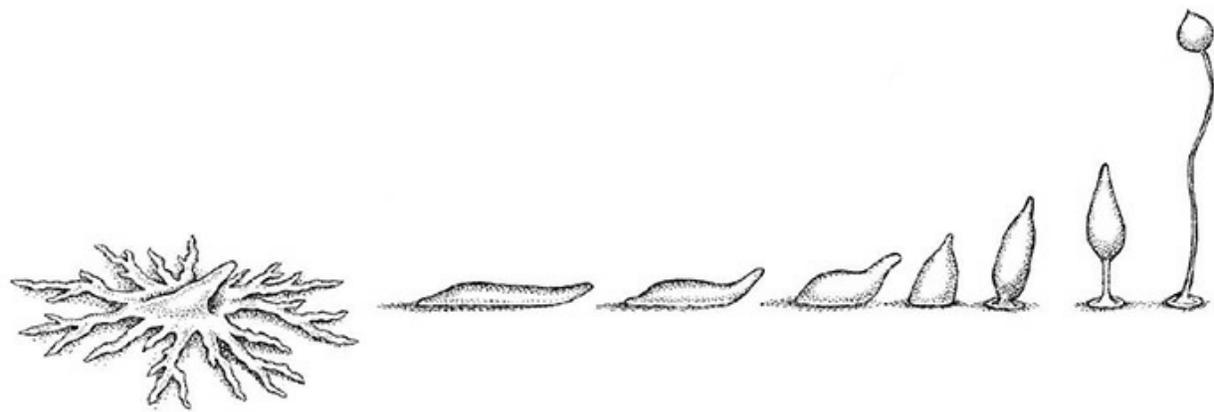
La multicelularidad ha evolucionado en este planeta de forma independiente al menos 20 veces. Si bien esta serie de sucesos evolutivos puede parecer poco,

sí indica que, a la larga, desarrollar un estilo de vida multicelular es relativamente fácil. Para comenzar nuestra discusión son importantes tres clases de eucariotas unicelulares: ciliados, mixomicetos y mohos mucilaginosos. Estos son los eucariotas más modestos, pero como descubriremos en seguida han superado su modestia con una forma muy elegante de hacer las cosas.

Los ciliados constituyen una categoría de eucariotas unicelulares que, como su propio nombre indica, tienen cilios: apéndices diminutos con los que se mueven y se alimentan. Los miembros de algunas especies de ciliados se ponen en contacto mutuo por varias razones, una de las cuales es, como cabía esperar, el sexo. En realidad, la «conversación» que mantienen es estrictamente molecular. Funciona un poco como nuestro sistema inmunitario y de ahí que se denomine «cuasi inmunitario». Nuestro sistema inmunitario se desarrolló para distinguir lo propio de lo ajeno, y los sistemas de comunicación para el apareamiento de los ciliados se desarrollaron para permitir que dos ciliados decidieran si sería apropiado aparearse. El sistema funciona por medio de receptores de membrana que se unen a las proteínas secretadas por una pareja potencial. Si la interacción molecular tiene lugar, entonces el contacto y el apareamiento pueden continuar, un simple «ritual» de apareamiento, con regalos y un «sí» que significa sí. Incluso algunos científicos han llamado «feromonas» a las moléculas que segregan los ciliados que buscan aparearse, señales químicas que constituyen un aspecto importante del reconocimiento de pareja en muchas especies animales. Pero aunque parece razonable decir que estas interacciones moleculares son en cierto modo feromónicas, también debemos tener en cuenta que los ciliados no tienen sistema nervioso, así que su respuesta es muy diferente de la que vemos en los llamados organismos superiores. Sin embargo, muchos de los mecanismos que los ciliados utilizan para reconocerse entre ellos, se han encontrado también en eucariotas pluricelulares.

¿Has estado alguna vez en una cena o un restaurante donde tuvieran manteles individuales para niños que incluyeran juegos? Por lo general proporcionan una cera o un lápiz, y los manteles incluyen varios juegos para mantener entretenidos a los niños. Uno de los mejores y de los que más llaman

la atención es el juego del laberinto, en el que el niño ha de usar el lápiz para trazar la mejor manera de salir del mismo. Lo normal es que no sea tan fácil como parece. Pero existen organismos unicelulares a los que se les dan bien los laberintos. Son los mixomicetos (también llamados «mohos mucilaginosos verdaderos», un nombre no tan atractivo), otra categoría de organismos eucariotas unicelulares que se comunican entre sí a través de las membranas celulares. El moho mucilaginoso tiene una forma ameboide que puede crear estructuras tubulares para conectarse a las fuentes de alimentación. Y se le ha denominado «computadora» porque puede evaluar las pautas de difusión de las moléculas que lo rodean y tomar «decisiones» acerca de hacia dónde lanzar los túbulos para alimentarse. En realidad puede resolver eficazmente problemas de laberintos. ¿Pero podemos llamar «inteligentes» a estos organismos? Si definimos inteligente al hecho de ser capaz de responder con éxito a un desafío que requiera inteligencia para hacer frente a otro organismo, entonces puede decirse que los mohos mucilaginosos verdaderos como el *Physarum polycephalum* son inteligentes. Pero hemos de tener cuidado. Algunos seres humanos son hábiles resolviendo laberintos. Y está claro que nuestra inteligencia para esta tarea emana de una serie de mecanismos completamente distintos de los que usa el moho mucilaginoso verdadero. El enfoque del moho mucilaginoso es estrictamente algorítmico, molecular, químico y maquinal. Pero como veremos, tal vez nuestra manera de hacer las cosas también es algorítmica, molecular y química.



Ciclo vital del moho mucilaginoso *Dictyostelum discoideum*, parte superior, y el moho mucilaginoso *Physarum* «jugando» al juego del laberinto, parte inferior. El laberinto de la izquierda muestra la primera fase de cómo *Physarum* «encuentra» la fuente de alimentación. A medida que avanza el «juego», el *Physarum* solamente crece y se despliega por las partes del laberinto que están conectadas más estrechamente con la fuente de alimentación. El moho mucilaginoso en crecimiento elimina todos los caminos menos el más corto.

Los últimos eucariotas unicelulares que tenemos que examinar aquí son los «mohos mucilaginosos celulares», que sólo de forma marginal suena mejor que mohos mucilaginosos «verdaderos». Son muy interesantes y su representante más notable es un moho mucilaginoso celular fructífero llamado *Dictyostelium discoideum*, o Dicty en diminutivo. Llevan una existencia a lo Dr. Jekyll y Mr. Hyde, ya que la mayoría de ellos, organismos unicelulares ameboides, vive en el suelo en busca de alimento y picoteando en solitario las bacterias del suelo. Pero cuando Dicty está hambriento se congrega en una masa multicelular. Esta congregación se ha equiparado a un club social, y por

eso algunos científicos han sugerido que estos organismos son realmente sociales. En efecto, este modesto moho mucilaginoso también se ha denominado «moho mucilaginoso social» y se ha utilizado de modelo para estudiar la cooperación y demás aspectos de la sociabilidad. Pero he aquí el fenómeno verdaderamente interesante. Dicty configura una «criatura» vermiforme compuesta de miles de células sueltas, capaces de moverse, que puede tomar «decisiones» de ir en diversas direcciones, más o menos como los mohos mucilaginosos verdaderos en los laberintos. De hecho, el moho mucilaginoso social es también muy bueno resolviendo laberintos. Y por si esto no fuera lo bastante interesante, estos organismos unicelulares tienen unos mecanismos complejos de comunicación entre células. En efecto, necesitan comunicarse para adoptar esa forma de gusano. Y es más, una gran cantidad de procesos de señalización en este modesto organismo unicelular se asemeja a los de nuestras propias células. Estas vías de señalización son moleculares y ayudan a los mohos mucilaginosos a comunicarse tanto con otras células como con el medio externo. Y aunque este organismo unicelular no tenga cerebro o siquiera un sistema nervioso, se ha convertido en un modelo importante para comprender los trastornos neurológicos. Esto se debe a que Dicty tiene mitocondrias, las fuentes de energía de la célula. Todas las mitocondrias tienen un pequeño genoma que codifica proteínas, y cuando el ADN mitocondrial de Dicty muta en determinados lugares impide que la fase de gusano se oriente en los laberintos y el pobre se desconcierta. Lo más sorprendente de todo es que los genes mitocondriales de Dicty que se ven afectados y causan este estado de confusión son los mismos que, cuando se trastocan en humanos, causan trastornos neurológicos. ¿Dicty tiene criterio? ¿Piensa?

De nuevo podemos examinar esta cuestión desde varias perspectivas. Puesto que el moho mucilaginoso social no tiene cerebro ni sistema nervioso, está claro que Dicty no juzga de la misma manera que lo hacemos los animales superiores. Pero esto no significa que Dicty no haga algo con los productos génicos, cuyas funciones moleculares y celulares se comportan igual que las de los animales superiores. El 30 % de los genes del genoma de Dicty se encuentran también en el genoma humano, y algunos de ellos tienen una

importancia evidente en la función del sistema nervioso de los animales superiores.

### ¿TIENEN CEREBRO LAS PLANTAS?

Algunas personas creen que las plantas responden al habla y a otras formas de atención humanas. Y aunque es más que probable que las plantas no procesen el lenguaje humano, no obstante son muy conscientes de su entorno y sus células muy capaces de comunicarse entre sí. Además, algunos científicos piensan que el sistema que participa está muy próximo a lo que con razón podríamos llamar un sistema nervioso. Al fin y al cabo, las mimosas son famosas por retraerse de inmediato cuando las molestan, y las venus atrapamoscas reaccionan con rapidez a la presencia de insectos en sus mecanismos de captura. Charles Darwin hizo observaciones comparables y propuso ideas similares sobre las plantas. En uno de sus trabajos menos conocidos, *The Power of Movement in Plants* (El poder del movimiento en las plantas), escribió sobre la radícula, la raíz embrionaria de una planta: «No exagero al decir que el extremo de la radícula, que tiene el poder de dirigir los movimientos de las partes contiguas, actúa como el *cerebro* de un animal inferior; el *cerebro* se encuentra dentro del extremo anterior del cuerpo, recibe las impresiones de los órganos sensoriales y dirige los diversos movimientos» (el énfasis es nuestro). Darwin decía que no sólo la radícula se comporta como un cerebro dirigiendo las funciones de otras células, sino que también está ubicada en el lugar adecuado de la anatomía de la planta. Los botánicos modernos han propagado esta idea. En 2005 se celebró en Florencia, Italia, la primera reunión internacional sobre neurobiología de las plantas, y en 2006 se lanzó una nueva revista, *Plant Signalling and Behavior*. ¿Qué proponían exactamente los neurobiólogos de las plantas?

La idea de que las plantas tienen sistemas nerviosos proviene de diversas fuentes de información. En primer lugar, las plantas tienen genes que son similares a los que codifican los sistemas nerviosos animales. Entre esos genes figuran los de los receptores de glutamato, activadores de las vías

neurotransmisoras, como las proteínas G-box, y una proteína llamada «14-3-3». Todas estas proteínas se encuentran en las plantas y se observan en los animales, en los que se ha demostrado que tienen distintos roles en la función neuronal. En segundo lugar, aunque no es probable que las funciones de estas proteínas tengan un origen «neuronal» en las plantas, algunas proteínas vegetales se comportan de un modo muy similar al de los neurotransmisores y otras proteínas neuronales. En tercer lugar, algunas plantas muestran regiones intercelulares semejantes a sinapsis, a través de las cuales las moléculas neurotransmisoras facilitan la comunicación entre las células. Para que sean comparables es necesario que dichas regiones tengan las mismas características que las sinapsis animales, como la formación de vesículas. En cuarto lugar, las plantas tienen sistemas vasculares que se comportan como conductos de los «impulsos» que tiene que transmitir al resto de la planta. Por último, en las plantas se dan potenciales de acción al igual que en las neuronas animales.

Examinemos estos diversos tipos de información y lo que pueden suponer para la existencia de funciones similares a las cerebrales en plantas. El primer punto atañe a la presencia en las plantas de unos genes relacionados con genes animales implicados en el sistema nervioso. En realidad no es de extrañar, y la confirmación de este hecho fue uno de los primeros resultados interesantes de los diversos proyectos genoma. La razón por la que no resulta sorprendente es, desde luego, que toda la vida en el planeta está ligada por medio de un antepasado común. Encontrar genes comunes entre organismos muy divergentes es lo que cabría esperar de la descendencia de antepasados comunes. De este modo, resulta que aproximadamente el 7 % de los genes de un genoma bacteriano típico tiene su equivalente en el genoma humano. En el caso de las plantas la cantidad es más o menos un 15 %, y en el de organismos como las moscas y los gusanos asciende al 30 %. En vertebrados, la equivalencia es de un 85 % en el caso de nuestros parientes más lejanos como los peces, de un 98,7 % en el de nuestro pariente vivo más cercano, el chimpancé, y del 99,7 % en el caso de nuestro pariente cercano extinguido, *Homo neanderthalensis*. Sin embargo, lo que no era de esperar es la amplia distribución de las principales clases de genes que están representadas en

plantas así como en animales.

No obstante, el proceso evolutivo puede facilitar algunos procedimientos extraordinarios con genes. Un gen que produce una proteína involucrada en un proceso específico en plantas no tiene por qué producir una que tenga la misma función en un animal o un hongo. Por ejemplo, los receptores de glutamato participan en las sinapsis neuronales de los animales e interaccionan con el neurotransmisor glutamato. En los animales, estos receptores se encuentran ante todo en las regiones sinápticas de las neuronas y llevan a cabo la excitación postsináptica mediada por glutamato de las neuronas, que es una forma elegante de decir que el glutamato interviene en la excitación de la célula a través de una sinapsis. El glutamato es un aminoácido que debe ser transportado al otro lado de la sinapsis para llevar a efecto el impulso postsináptico. Se reconocen dos tipos principales de receptores de glutamato en función de cómo transmiten el impulso postsináptico. El primero es ionotrópico, lo que significa que los receptores de glutamato que revisten el poro del canal iónico en la sinapsis activan el poro tras la unión del receptor al glutamato. Los receptores metabotrópicos activan los canales iónicos de manera indirecta por medio de cascadas de señalización que por lo general están vinculadas a las proteínas G. Para que tenga lugar todo el proceso, los llamados agonistas tienen que unirse a los receptores. Existen tres clases principales de agonistas que interaccionan con los receptores ionotrópicos de glutamato: AMPA (alfa-amino-3-hidroxi-5-metil-4-isoxazol propionato), NMDA (ácido N-metil-D-aspartico) y kainato.

Hay diversas versiones de receptores de glutamato con funciones tanto ionotrópicas como metabotrópicas, y dentro de estas categorías existen varias clases que son específicas para AMPA, NMDA y kainato. De modo que hay múltiples versiones de genes para proteínas en animales (es lo que se llama una familia génica). Por ejemplo, los ratones y los seres humanos tienen cuatro receptores ionotrópicos de glutamato que utilizan AMPA como agonista, siete que utilizan NMDA, y cinco que utilizan kainato. Asimismo, los ratones y los humanos tienen ocho receptores metabotrópicos de glutamato que utilizan diversos agonistas cada uno. Las plantas tienen receptores de glutamato que se asemejan más al tipo ionotrópico. La *Arabidopsis thaliana*, esa excelente

herramienta de trabajo de la genética y la genómica vegetal, posee 20 elementos de esta familia génica. Lo curioso es que en los animales hay un número similar (16) de receptores ionotrópicos de glutamato.

¿Están los receptores ionotrópicos de glutamato en los animales relacionados uno a uno con los de las plantas? Dicho de otro modo, ¿tienen los cuatro receptores de glutamato de los animales que usan AMPA como agonista una relación más estrecha con cualquiera de los cuatro receptores de glutamato de las plantas que con cualquier otro receptor animal o vegetal? Aunque parece que, mediante duplicaciones en los antepasados comunes, todos los animales han desarrollado los mismos genes en esta familia génica y de ahí que estén relacionados uno a uno, los receptores de glutamato de las plantas parecen haber evolucionado a partir de un único antepasado común que existía *antes* de que las plantas y los animales se separaran. Esto significa que los receptores de glutamato específicos de los animales *no* están relacionados uno a uno con los receptores de glutamato de las plantas. La compleja utilización de los receptores de glutamato en el sistema nervioso animal tendría, pues, escasa semejanza con el uso de los receptores en las plantas.

Es cierto que los receptores de glutamato de las plantas pueden interferir con los de los animales, lo que sugiere que los receptores de las plantas siguen teniendo cierta función equivalente en las células nerviosas animales. Por ejemplo, se da el extraño caso de que la ingestión humana de cícadras (plantas ricas en glutamato) produce síntomas parecidos a los del alzhéimer. Y la expresión de los receptores de glutamato de las plantas es específica de la raíz, el lugar que señala la mayoría de los científicos que apoyan la existencia de un sistema nervioso vegetal. Pero si bien se han descubierto tres categorías principales de receptores de glutamato en plantas, que reflejan las tres categorías principales de receptores ionotrópicos de glutamato en animales (AMPA, NMDA y kainato), las tres categorías de receptores de plantas mencionadas no se parecen en absoluto a estas categorías animales. Además, aunque hay tres categorías principales de receptores en plantas, no muestran perfiles de expresión en órganos específicos distintos. Y si bien parece que un pequeño subconjunto tiene importancia en el desarrollo precoz de las raíces de las plantas, la conclusión es que estas proteínas tienen poco parecido

funcional con los receptores de glutamato en los animales. Sin embargo, si los receptores de glutamato no cumplen funciones neurológicas en plantas, ¿por qué están ahí? El argumento más común a favor de su conservación en las plantas es que sirven de proteínas de defensa para protegerse de las especies de insectos invasoras.

Visto lo cual, ¿cómo explicamos la presencia de estructuras vegetales que actúan como sinapsis y de moléculas que se comportan como neurotransmisores activos en la región «sináptica»? Para que esto tenga algún significado se deben constatar algunas características de las plantas. Hay que demostrar la comunicación sináptica realizada mediante neurotransmisores y neuroreceptores del mismo modo que en la neurotransmisión animal: por ejemplo, por medio de vesículas cercanas a la sinapsis. Así que ¿existen moléculas vegetales que podrían actuar como neurotransmisores? Una candidata es la auxina (ácido indol-3-acético), una molécula pequeña que algunos botánicos creen que constituye el mejor argumento en favor de una conducta neurológica en las plantas. También existen transportadores de auxinas que tienen un comportamiento muy parecido al de los receptores. Pero cuando se combinan los dos, ¿actúa este sistema como una reacción neuronal? Algunos científicos sostendrían que sí. Por ejemplo, el botánico Gerd Jürgens, del Instituto Max Planck de Biología del Desarrollo, ha demostrado que el transporte de las auxinas se efectúa por medio de un tráfico de vesículas de características similares a un neurotransmisor animal.

No obstante, la auxina no se encuentra en animales; es una proteína específica de las plantas que regula el crecimiento. Para algunos, las observaciones de Jürgens indican que las estructuras de las vesículas podrían ser lo bastante similares como para constituir un buen argumento, y cuando se examinan los tipos de «sinapsis» en las plantas resulta que dos tipos de conexiones tienen dominios de proteínas de membrana en ellas. En el que acabamos de examinar, el control de la comunicación entre células se ve afectado por la luz y la gravedad y utiliza la auxina como transmisor, actuando del mismo modo que un neurotransmisor. La otra sinapsis se comporta como lo hace la sinapsis de una célula inmunológica con las células patógenas. En animales, este sistema ejecuta la respuesta inmunológica y la destrucción del

patógeno invasor. En las plantas, no sólo permite al individuo enfrentarse a los patógenos sino también estabilizar las interacciones con los simbioses: una función importante. Las plantas establecen interacciones bidireccionales útiles con muchos microbios como bacterias y hongos, y en algunos casos realizan tareas que las plantas no pueden hacer por sí solas. Algunas plantas no pueden procesar el nitrógeno medioambiental, de modo que crean relaciones simbióticas con bacterias del género *Rhizobium* para resolver el problema. En el proceso, los rizobios obtienen el beneficio de ser alimentados por la planta.

¿Qué hay de los impulsos eléctricos en las plantas? Por extraño que parezca, estos impulsos eléctricos se descubrieron 10 años antes de que en la década de 1780 Luigi Galvani hiciera sus horribles experimentos con las ancas de ranas que demostraban los impulsos eléctricos en animales. Así que no hay duda de que las señales eléctricas o los potenciales de acción existen en las plantas. También está bastante claro que, como dijo Eric Davies, de la Universidad Estatal de Carolina del Norte, «la razón fundamental de la existencia de señales eléctricas en las plantas es que permiten una transmisión de la información muy rápida y sistémica, de modo que la información llega a toda la planta casi al instante aunque sólo se haya visto perturbada una región». Sin embargo, las características del potencial de acción son muy distintas en las plantas y en los animales. Mientras que estos últimos producen el potencial de acción por un intercambio de sodio y potasio, en las plantas los potenciales se producen con el transporte de calcio, que el cloro aumenta y el potasio reduce.

Así que ¿cuál es nuestra conclusión? La idea de que en cierto sentido las plantas tienen cerebro es interesante e incita a la reflexión. Tanto que en 2007 investigadores de 33 instituciones publicaron una carta abierta en una revista de ciencias de las plantas de amplia difusión afirmando que «sostienen que la neurobiología vegetal no aumenta nuestros conocimientos de fisiología vegetal, biología celular de las plantas y señalización», y rogando a los defensores de la iniciativa que la eliminen. En resumen, las respuestas de los neurobiólogos vegetales al tema de los «cerebros» de las plantas discrepaban. Anthony Trewavas, de la Universidad de Edimburgo, propuso que «la neurobiología vegetal es una metáfora» y nada más. Fijaba su atención en el

término propiamente dicho. Y sobre todo le interesaba su importancia al estimular a la ciencia a comprender la biología celular de las plantas, así como la trascendencia de las observaciones, interesantes y provocadoras, sobre la señalización y la comunicación entre células. Pero los biólogos europeos František Baluška y Stefano Mancuso abogaban enérgicamente por la existencia en sentido literal de un sistema nervioso en las plantas, y proponían que «la eliminación del viejo cisma aristotélico entre plantas y animales unificará todos los organismos pluricelulares bajo un mismo paraguas conceptual».

Es evidente que ambas perspectivas no pueden estar en lo cierto. Y el argumento a favor de la metáfora nos parece el más razonable, habida cuenta del contexto científico y evolutivo de los fenómenos utilizados para apoyar la existencia de cerebros, o siquiera sólo de sinapsis, en las plantas. Como señalamos en el capítulo 1, la semejanza confusa («convergencia» o, como dice Darwin, «analogía») es un tema omnipresente en el estudio del sistema nervioso. A nosotros nos parece que Trewavas lo llama como lo que es: sólo se trata de debatir semejanzas. Es la propia metáfora la que hace que las afirmaciones sobre la semejanza de los sistemas vegetal y animal sean tan interesantes. Para que resulte útil hay que admitir que es una metáfora. Si unificamos las plantas y los animales bajo un único «paraguas conceptual» cuando en realidad no existe uno, entonces tendremos un auténtico problema. Para empezar, existen pruebas fehacientes de que las plantas y los animales no comparten un antepasado común excluyendo todos los demás organismos del planeta. Los hongos y muchos eucariotas unicelulares se interponen. Y el paraguas unificador lo disimularía y obviaría la utilidad de la metáfora. Cuando una metáfora ya no se admite como tal, la falacia está a la orden del día.

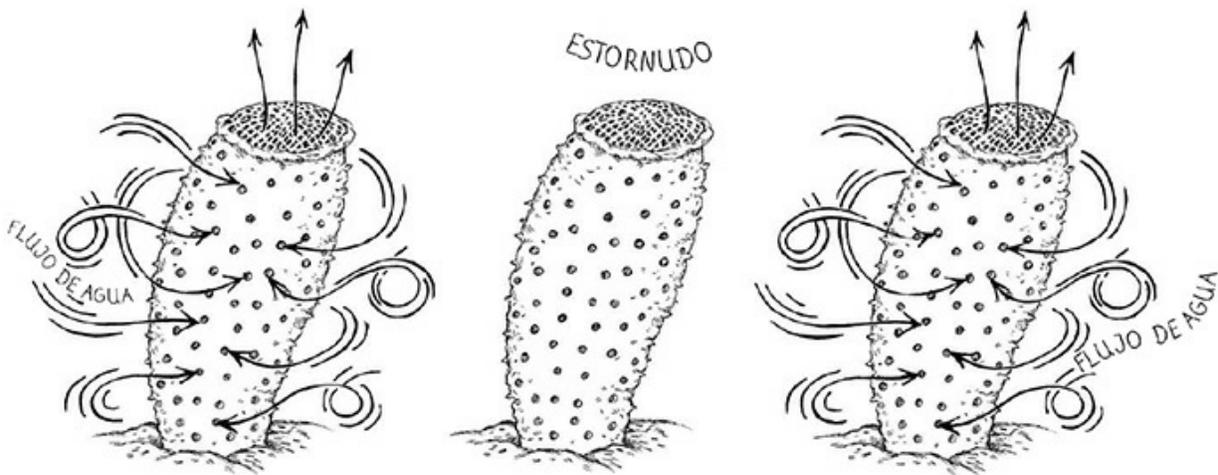
#### ESPONJAS QUE ESTORNUDAN, ¿REALIDAD O FICCIÓN?

Hablando de metáforas, los zoólogos de invertebrados de la Universidad de Alberta, Glen Elliott y Sally Leys, utilizan una metáfora excelente para

insinuar que las esponjas estornudan. Las esponjas se alimentan filtrando el agua a través de las cámaras internas de los coanocitos; éstos están provistos de un flagelo cuyo movimiento, controlado por la esponja, bombea agua al interior de las cámaras. El hecho de que el agua contenga demasiado sedimento o detritos resulta problemático para las esponjas, pero el proceso evolutivo ha facilitado mecanismos para lidiar con la suciedad. Existen tres clases principales de esponjas, cada una con muchas especies, que son las demosponjas, las calcáreas y las hexactinélidas, y los mecanismos para resolver el problema del sedimento han evolucionado de un modo diferente en cada una de ellas. En el caso de las esponjas celulares (demosponjas y calcáreas), la regulación tiene lugar mediante contracciones y compresiones de las cámaras. Las esponjas vítreas (hexactinélidas), que probablemente no puedan contraerse o comprimirse, se libran del sedimento dejando de batir sus flagelos para controlar el flujo de agua, usando potenciales de acción de calcio.

Así pues, las esponjas han desarrollado dos formas muy distintas de controlar una conducta alimentaria importante. Al poner tinta en la zona de ingestión de agua de una esponja celular, Elliott y Leys observaron una reacción de «estornudo» que provocó la expulsión de materiales nocivos o dañinos de la esponja. Los biólogos que estudian las esponjas consideran que este fenómeno constituye una conducta y se preguntan cómo se controla el «estornudo». Si se ejecuta del mismo modo en que los animales superiores median sus conductas –es decir, a través de una respuesta neuronal– entonces podría sostenerse que las esponjas tienen un sistema nervioso. Sin embargo, parece que el estornudo de las esponjas no lo produce un intercambio de impulsos eléctricos, y el neurofisiólogo Robert Meech lo llama «coordinación no neuronal». Además, las contracciones que causan el estornudo están programadas ex profeso y no son inmediatas. En consecuencia, tenemos que concluir que una de las conductas más destacadas de las esponjas carece de una base neuronal. Pero resulta que algunas esponjas utilizan impulsos eléctricos para modular movimientos corporales rítmicos tales como las contracciones y ondulaciones, y más importante aún es que el genoma de la esponja contiene muchos genes que fabrican las mismas proteínas que

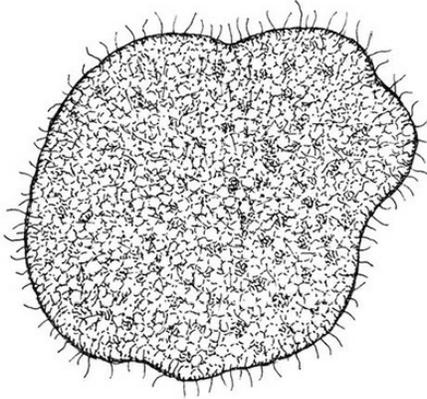
participan activamente en el sistema sináptico de los animales superiores.



Una esponja vítrea se contrae y expulsa tinta de manera coordinada. Para alimentarse, las esponjas filtran agua a través de unas cámaras internas llamadas coanocitos. El batir de los flagelos controlado por las esponjas bombea agua al interior de las cámaras. El hecho de que el agua contenga demasiado sedimento y detritos resulta problemático para las esponjas, y por eso el proceso evolutivo ha facilitado un mecanismo para lidiar con la suciedad: el estornudo, que tarda varios minutos en desarrollarse y ejecutarse.

El otro grupo animal que carece de células nerviosas es uno al que siempre se presta poca atención. Es un animal marino diminuto de un filo (placozoos) compuesto por una única especie llamada *Trichoplax adherens*. En realidad, un trabajo realizado en 2010 indica que existen muchas más especies de este interesante animal, y no sólo una, pero que debido a su gran simplicidad todos se parecen mucho a primera vista y son difíciles de diferenciar. Los placozoos son láminas pequeñas y transparentes de varios miles de células que tienen una parte superior y otra inferior. Dicha simplicidad reside en el hecho de que entre estas miles de células hay solo cuatro tipos, ninguno de ellos neuronal. Como criterio de comparación, las esponjas tienen de diez a veinte tipos celulares, dependiendo de la clase de esponja. Las moscas tienen más de noventa tipos de células y los humanos más de doscientos. Aun así, los placozoos acechan y devoran a sus presas, desplazándose por medio de cilios o movimientos ameboides. Pueden detectar la presencia de alimento, y cuando eso ocurre se produce una conducta peculiar. La diminuta lámina de células que constituye el animal se aplana y apenas se mueve. Si no se detecta comida, la lámina se mueve con rapidez y al

azar. Esto no es exactamente estornudar, pero es una conducta, y de hecho una conducta bastante llamativa para una especie tan simple. Con todo, al igual que en las esponjas, no interviene impulso eléctrico alguno.



El modesto placozoo *Trichoplax adhaerens* es una lámina pequeña de varios miles de células. En este organismo, sólo existen cuatro tipos celulares, ninguno de los cuales es neuronal.

Cómo están relacionados los placozoos con otros animales es objeto de polémica y abordaremos el asunto después de hablar de otros animales al final de este capítulo, porque saber esto es fundamental para comprender qué son un sistema nervioso y una sinapsis. Pero mientras tanto, ¿por qué es tan importante este conocimiento? Y si realmente debemos obtener un Árbol de la Vida riguroso ¿qué podemos utilizar de exogrupo para los animales? Después de todo, prestamos mucha atención a los exogrupos en el capítulo 1, y está claro que lo que se requiere es un exogrupo que esté próximo a los animales pero que en realidad no sea un animal. Podríamos utilizar plantas, pero, francamente, su relación es demasiado lejana como para constituir un buen exogrupo en este caso. Podríamos usar un moho mucilaginoso (podría ser Dicty), pero está más alejado de los animales que los hongos.

Después de buscar un poco por ahí, resulta que el mejor exogrupo para animales serían en realidad dos grupos, los coanoflagelados y los hongos. Aunque parezca mentira, los hongos tienen una relación más estrecha con los animales que con las plantas, por lo que están bien situados para ese papel. Los coanoflagelados son unos organismos unicelulares que forman colonias multicelulares que se alimentan por filtración. Y por lo general se considera que son los organismos conocidos más cercanos a los animales sin ser realmente animales. El uso de ambos grupos de organismos como exogrupos

ayuda a garantizar que podemos interpretar con precisión la información que tenemos sobre las sinapsis y los sistemas nerviosos de los animales. Dicho de otro modo, el uso de hongos y coanoflagelados como puntos de referencia debería aclarar si las semejanzas de las sinapsis y los sistemas nerviosos son derivadas (heredadas de un antepasado común), primitivas o convergentes. Esta interpretación de los sistemas nerviosos de otros organismos nos dice mucho acerca del nuestro.

### ¿UNARED NEURAL ES UN SISTEMA NERVIOSO?

Las esponjas y los placozoos están en la base de la parte animal del Árbol de la Vida. Los siguientes actores de esta historia son animales extraños sea cual sea el criterio que elijamos. Todas son criaturas marinas agrupadas bajo el nombre de cnidarios. De hecho, los cnidarios forman su propio filo, igual que el filo placozoos de una única especie y el otro filo animal que acabamos de ver, las esponjas (poríferos). Los cnidarios tienen alrededor de doce tipos de células, entre los que se encuentra uno interesante llamado cnidocitos. Este curioso nombre procede de la palabra griega *cnida*, que significa ortiga, lo que refleja que los cnidocitos son mecanismos de ataque: actúan como ortigas que pican cuando entran en contacto con otros organismos.

Existen cuatro tipos principales de cnidarios. Tres pueden resultar familiares: las medusas (escifozoos), las hidras (hidrozoos) y las anémonas y corales (antozoos). Pero si estás familiarizado con el cuarto es probable que o bien seas un biólogo marino o bien estés muerto. Este cuarto tipo de cnidarios lo constituyen los cubozoos, o cubomedusas (también llamadas avispas de mar), criaturas con aspecto de caja que poseen los venenos más potentes conocidos entre los animales. Todos estos organismos comparten un programa de desarrollo único y se presentan en dos tipos corporales principales: pólipos y medusas. La morfología de los pólipos es muy característica de los antozoos, los cuales no desarrollan una fase de medusa. Los pólipos pueden formar colonias, ya que se adhieren al suelo marino, en donde llevan una existencia más bien sésil (fija). La forma de medusa, más vivaz, es

característica de los escifozoos, hidrozooos y cubozoos (si bien los tres grupos empiezan como pólipos.) La diferencia entre pólipos y medusas entraña una reorientación radical de la boca. En la forma de pólipo la boca apunta hacia arriba, mientras que en la forma de medusa apunta hacia abajo. El resto de los planos corporales es más o menos similar, y es fácil visualizar cómo se transforma un pólipo en medusa.

Los cnidarios carecen de cerebro. Sin embargo, de la docena aproximada de tipos celulares en los tejidos de estos animales, la mayoría son células nerviosas; éstas forman una interesante estructura llamada red neural, un aspecto de estos animales que se puede observar con facilidad y que a veces puede verse a simple vista. Se extiende todo a lo largo de los organismos y parece un retículo o una telaraña. Está compuesta por muchas células nerviosas que se conectan entre sí. Las conexiones se parecen mucho a las sinapsis y de hecho se han denominado sinapsis. ¿Pero son realmente iguales a nuestras sinapsis? Para que una red neural pueda considerarse una forma precursora de nuestro sistema nervioso, nuestras sinapsis y las suyas deberían derivar de un antepasado común. ¿Es así?

Para estudiar esta cuestión más detenidamente, es preciso preguntarse qué es una sinapsis. ¿Se trata simplemente «del beso al aire» de dos células entre las cuales circulan señales químicas o eléctricas? ¿O es algo más complicado? Examinemos esta interesante cuestión utilizando las reglas que establecimos en el capítulo 1 para decir que algo «es lo mismo» en dos organismos distintos. Si podemos demostrar que los componentes de las sinapsis de los animales que hemos visto hasta ahora son derivados para los distintos grupos de organismos, entonces podemos responder a esta pregunta para esos grupos. Pero existen también varios niveles de comparación que podemos utilizar. En primer lugar está el nivel estructural, que incluiría la estructura anatómica visible de las sinapsis en cuestión. Luego está el nivel genómico, que comprende los tipos de genes implicados en la formación de las sinapsis. Y por último, tenemos el nivel «emergente» de cómo los productos génicos interaccionan en la formación de las sinapsis.

En un estudio de la ultraestructura de las sinapsis en cnidarios, Jane Westfall, de la Universidad Estatal de Kansas, examinó los cuatro tipos

principales de cnidarios y concluyó que sus sinapsis tenían un nivel razonable de similitud microscópica con las de los vertebrados como nosotros. Pero también señaló que existen dos diferencias ultraestructurales básicas entre las sinapsis de los cnidarios y las de otros organismos. La primera se observa en la unión de las células musculares y nerviosas (uniones neuromusculares). En animales superiores, las uniones de estas células presentan pliegues que aparecen después de producirse dicha unión. En los cnidarios no hay pliegues. La segunda atañe a las vesículas que albergan productos químicos como los neurotransmisores (véase el capítulo 2). Los cnidarios tienen muchas menos vesículas, y cuando las tienen son mucho mayores que las vesículas de nuestras sinapsis. Esto sugiere que la verdadera función sináptica de las vesículas en los cnidarios podría ser distinta que en los animales superiores. Así que la ultraestructura es un tanto ambigua cuando se trata del grado de «igualdad» entre las sinapsis de los cnidarios y las de otros organismos. Pero si estudiamos los genes presentes en los organismos inferiores examinados hasta ahora, vemos algo interesante. Tanto los hongos como los coanoflagelados poseen algunas de las funciones básicas de transducción de señales de los organismos pluricelulares, pero carecen de genes para formar sinapsis. Sin embargo, cuando comparamos los genomas de las esponjas, los placozoos y los cnidarios, descubrimos que las esponjas tienen algunos de los genes necesarios para la formación de sinapsis. Se dice que tienen un «entramado presináptico» de genes. Y lo notable es que los placozoos tienen casi la misma dotación de genes que los cnidarios para formar sinapsis. La cosa se complica y volveremos sobre este punto.

### ¿CEREBRIDAD?<sup>1</sup>

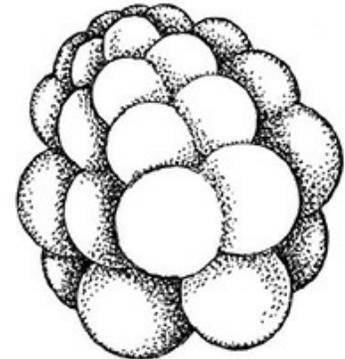
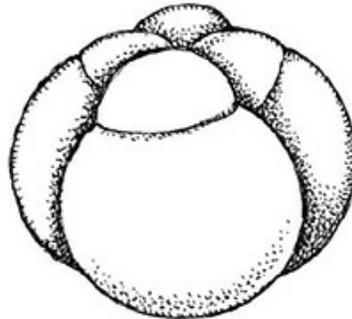
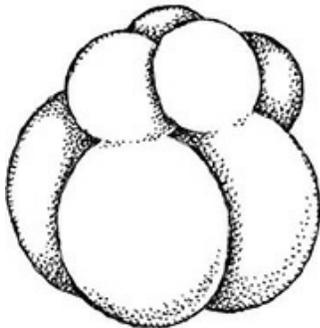
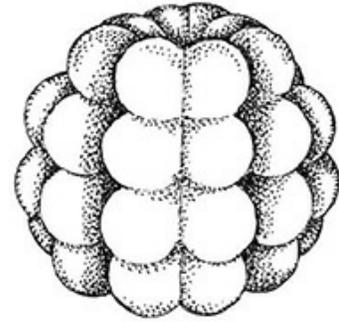
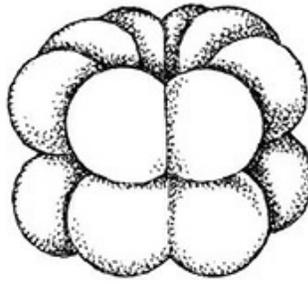
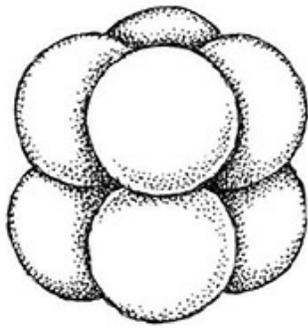
Tengan sinapsis o no estos animales primitivos, está claro que no poseen lo que pudiéramos describir racionalmente como cerebro. De modo que, ¿cuándo se originó el primer cerebro? Para indagar en este problema necesitamos conocer un poco mejor a los que juegan a los «animales superiores». Hasta ahora hemos estudiado los poríferos, los cnidarios y los placozoos, que son

animales bastante asimétricos. Si los partimos por lo que sería el medio del cuerpo, las dos mitades no se parecerían ni serían imágenes especulares. De modo que tenemos que recurrir a los bilaterales, llamados así porque si se parten por medio sus mitades se ven simétricas. Todos los bilaterales (excepto el grupo pequeño de los priapúlidos) tienen también lo que se llama un celoma, una cavidad del plano corporal que se forma como consecuencia de la escisión de la capa mesodérmica del embrión. Dentro de los bilaterales, la siguiente gran división es el resultado de un patrón de división celular extraño durante los primeros estadios del desarrollo.

Tras la fecundación, el embrión inicia una serie de divisiones celulares controlada por un grupo de interacciones genéticas. La primera y segunda división en dos y cuatro células, respectivamente, son iguales en todos los animales. Pero con la siguiente división, en ocho células, se empiezan a diferenciar los dos tipos principales de animales bilaterales. En una de estas grandes ramificaciones, la tercera escisión celular es simétrica (escisión radial). Pero en la otra ramificación principal de los bilaterales, la escisión hace que las células formen una espiral de un lado a otro del embrión precoz. El linaje resultante de la escisión radial se llama Deuterostomia (o deuteróstomos) y la que resulta de la división en espiral se denomina Protostomia (o protóstomos). Los deuteróstomos comprenden todos los vertebrados, incluidos los humanos, más algunos organismos extraños con columnas vertebrales «falsas» o parciales. Por extraño que parezca, también incluye organismos como las estrellas y los erizos de mar. En cambio, una mosca del vinagre o un nematodo, en su primer estadio embrionario, posee la versión de escisión en espiral de los protóstomos. Las rutas de la escisión radial y en espiral producen una situación extraña cuando se comparan las disposiciones corporales de deuteróstomos y protóstomos. Los protóstomos tienen el ano donde los deuteróstomos tienen la boca, y viceversa.

Esta gran división es importante a la hora de considerar si el cerebro de una mosca o un nematodo es realmente un cerebro como el nuestro. Siempre que hay una división importante de organismos como la separación deuteróstomos-protóstomos, vemos los resultados de la divergencia de linajes a partir de un antepasado común. Estas grandes divisiones son una parte

fundamental de la biología evolutiva; y a menudo la reconstrucción de estos antepasados comunes hipotéticos proporciona pistas acerca de los itinerarios evolutivos implícitos. Pero el aspecto del antepasado común de los bilaterales sigue siendo un tanto misterioso. Debido a que hasta ahora no se conocen fósiles de este linaje, no hay mucho que ayude a los científicos a interpretar las transiciones que pudieron haberse producido a lo largo del linaje desde el antepasado común de los bilaterales hasta la separación deuteróstomos-protóstomos. Se supone que la complejidad genómica y anatómica de los animales aumentó a partir del antepasado común de los bilaterales y de los animales inferiores como cnidarios, poríferos y placozoos. Pero debido a la ausencia de fósiles es posible hacer muchas interpretaciones de lo que aconteció. Nicholas Holland, biólogo de la Universidad de California en San Diego dice: «Para algunos, [el antepasado] es una criaturita poco atractiva desprovista de celoma, mientras que para otros es un animal celomado relativamente grande». Pero añade que «a pesar de estas incertidumbres... existe un amplio acuerdo de que tenía un sistema nervioso central». Esto significa que muy probablemente el antepasado poseía nervios periféricos y un punto impreciso donde se comunicaban las células nerviosas.



Escisión en espiral (abajo) y radial (arriba). Se muestran las primeras divisiones celulares embrionarias del desarrollo de un organismo. La escisión en espiral es característica de los protóstomos, y la radial de los deuteróstomos.

El resultado es que el examen de lo que en realidad es el cerebro de una mosca o de un nematodo puede reformularse de muchas maneras. Una es preguntar: «¿Qué es una cabeza?». Después de todo, el cerebro reside en la cabeza, ¿verdad? Otra forma de considerarlo es preguntar: «¿Tiene el cerebro de una mosca o de un gusano las mismas partes que el cerebro de un vertebrado?». Si, por ejemplo, el cerebro de los vertebrados tiene tres partes principales, y podemos demostrar que el supuesto cerebro de una mosca o un nematodo tiene las mismas partes, entonces este es un paso significativo hacia la comprensión de su «cerebridad». Otra manera de formular esta pregunta sería: «¿Intervienen los mismos genes en la formación del cerebro de un invertebrado (no vertebrado: no es una definición estupenda para un grupo, pero da buen resultado) y un vertebrado?». Otro planteamiento sería preguntar,

«¿Son las funciones cognitivas de un cerebro de invertebrado iguales a las de un cerebro de vertebrado?». Y una vez más, el verdadero reto consiste en determinar si el antepasado común de estos organismos tenía las mismas características. Lo cierto es que primero tenemos que hacer las tres preguntas iniciales si queremos obtener la respuesta a la última.

¿Qué forma tienen los cerebros de los invertebrados y dónde se encuentran? Empecemos con uno de los más sencillos, el del nematodo. Como hemos mencionado, el diminuto gusano nematodo hembra está formado por algo más de mil células, de las cuales 302 son células nerviosas diferenciadas. La mayoría de los científicos consideran que un grupo de células que forman un anillo en el extremo anterior del nematodo constituye su «cerebro». Los órganos sensoriales (véase el capítulo 4) envían señales a esta estructura similar a un anillo. A su vez el anillo está conectado a un cordón nervioso que recorre la longitud del animal por el lado del estómago. Este cordón nervioso ventral conecta luego con los músculos. Pero aunque el sistema nervioso de los nematodos es una estructura muy básica, estas criaturas diminutas pueden tener conductas muy complejas. Por ejemplo, algunos de ellos pueden detectar y «contar» el número de otros nematodos cercanos. Si percibe sólo unos cuantos vecinos, el nematodo se queda; pero si percibe que se acerca un grupo de otros muchos nematodos, huye precipitadamente. Muchas especies de invertebrados tienen este cerebro con aspecto de anillo, entre ellas los equinodermos: estrellas y erizos de mar. (Recordemos que los equinodermos están más estrechamente relacionados con nosotros de lo que están con los artrópodos, los gusanos y otros invertebrados.) Más adelante en este mismo capítulo volveremos sobre la forma del cerebro.

Desde el siglo pasado, los científicos han utilizado una técnica de coloreado de libros para averiguar en qué parte de los tejidos se expresan ciertos genes. Un método de probada eficacia es tomar el anticuerpo de una proteína importante para el desarrollo, marcarlo con un colorante fluorescente y lograr que reaccione con un embrión en desarrollo. Puesto que los anticuerpos funcionan adhiriéndose a su objetivo, si fabricamos un anticuerpo que sea específico para una proteína concreta, el anticuerpo se adherirá a esa proteína objetivo. En nuestra metáfora del coloreado de libros, el embrión

actúa como el libro para colorear y las posiciones de las proteínas en el embrión son los contornos de los dibujos. Puesto que se adhiere a la proteína específica para la que se fabrica, el anticuerpo actúa para colocar el crayón, y el propio crayón es la marca fluorescente del anticuerpo. Cuando reunimos la secuencia, obtenemos bellas imágenes de los embriones en desarrollo, o de sus órganos, coloreados ahí donde se producen determinadas proteínas. Este método se ha utilizado mucho en la biología del desarrollo moderna, y constituye una técnica decisiva cuando se examinan los patrones de expresión de las proteínas que tienen importancia en el cerebro.

A menudo, lo que los investigadores llaman cerebro no es más que un conjunto de células nerviosas. Sin embargo, algunos científicos afirman que los cerebros de los invertebrados tienen la misma estructura en tres capas que tienen los cerebros de los vertebrados. Esta estructura tripartita consta de romboencéfalo, mesencéfalo y prosencéfalo. Pero la evidencia de un cerebro tripartito en invertebrados atañe a la expresión de genes importantes para el desarrollo de la unión mesencéfalo-romboencéfalo más que a la forma de la estructura resultante. Los vertebrados, y algunos invertebrados, expresan los mismos genes en el cerebro, en lo que algunos creen que es una unión mesencéfalo-prosencéfalo. Pero, naturalmente, estos genes sólo podrían haberse incorporado de alguna función más antigua.

A propósito de todo esto hay un caso interesante de «igualdad» en el que podemos plantear una pregunta peculiar: «¿Cuándo un tipo de organismo concreto no es ese tipo de organismo concreto?». Este enigma atañe a los gusanos. El experto en parásitos P. Z. Myers, de la Universidad de Minnesota, dice: «Tomemos el gusano. El gusano genérico se da por hecho en biología. Es un tubo muscular de simetría bilateral y un esqueleto hidrostático que se impulsa por medio de ondulaciones sinuosas; la mayoría de sus órganos sensoriales están concentrados en su extremo anterior». Si un gusano es como lo define Myers, entonces los nematodos son gusanos. Pero tal vez algo enfurruñado, Myers se da cuenta de que las cosas podrían no ser tan sencillas cuando dice: «Confieso que a veces todo esto de la ascendencia común se interpone en el camino y es muy molesto». Myers se refiere al hecho de que los orígenes de todos los gusanos que se definen así no pueden remontarse a un

único antepasado común, excluyendo las criaturas que no son gusanos. Myers está molesto porque le gustaría pensar que un gusano es un gusano es un gusano.

Pero he aquí por qué un gusano es un gusano NO es un gusano (con perdón de Gertrude Stein).\* Los nematodos y gusanos acelomados son sin duda animales bilaterales, como lo son algunas otras criaturas tipo gusano que también tenemos que añadir al debate: organismos como los anélidos (sanguijuelas), los platelmintos (como las planarias: pequeños gusanos planos con la cabeza puntiaguda que si se cortan se regeneran), y unos gusanos marinos llamados nemertinos. La principal diferencia entre los acelomados y los nematodos es que estos últimos mudan la piel. Ahora bien, este simple rasgo de muda es importantísimo para seguir el rastro de los organismos vermiformes de los que hemos hablado, porque resulta que los nematodos están relacionados más estrechamente con otras criaturas que mudan llamadas ecdisozoos (porque en la muda interviene una hormona denominada ecdisoma) que con todos los demás organismos vermiformes que no mudan. Estos se sitúan en un grupo de animales raros llamados lofotrocozoos (porque la mayoría tienen un órgano para alimentarse llamado lofóforo). Los lofotrocozoos pertenecen ahora a un grupo enorme de animales entre los que figuran los moluscos (ostras, almejas, calamares) y los briozoos (percebes).

La suerte de los taxónomos no siempre es fácil y no es raro que los científicos abandonen muchos animales difíciles de clasificar en un grupo que les resulte idóneo sólo para deshacerse del problema: ojos que no ven, corazón que no siente. Pero cuando se examinan sus genes en busca de pistas acerca de sus relaciones, resulta que este particular vertedero de organismos tiene sentido aun cuando sean tan diversos y puedan parecer enormemente distintos unos de otros. Nuestros colegas Ward Wheeler en el Museo Americano de Historia Natural y Gonzalo Giribet en la Universidad de Harvard han examinado la mayor colección de lofotrocozoos hasta la fecha y pueden demostrar a las claras el antepasado común de todos estos animales extraños. Así que aquí tenemos un caso en donde algunos gusanos son acelomados y otros mudan la piel; estos últimos tienen una relación más estrecha con otros seres que también mudan como los insectos y otros

artrópodos.

Este descubrimiento tiene a su vez consecuencias para sus sistemas sensoriales, pues significa que las «manchas oculares» que vemos en los lofotrocozoos no son probablemente del mismo tipo que las que vemos en nematodos. Y en este contexto de células sensibles a la luz o de carencia de las mismas, merecen mención dos últimos lofotrocozoos. Uno es de un grupo extraño de organismos llamados mesozoos. Lo increíble es que estos animales tienen entre 10 y 40 células como mucho, y unos pocos tipos celulares. Así que ¿por qué no considerar este animal el más primitivo del planeta en lugar de dar ese papel a las esponjas y tal vez los placozoos? Bueno, al parecer los mesozoos llegaron a su estado de 40 células «cediéndolas» o perdiéndolas, por lo que su antepasado era más complejo de lo que son ellos hoy. Ahora bien, con un máximo de 40 células en todo su cuerpo, no hay sitio para las células nerviosas especializadas. En realidad, estos animales (existen unas cien especies) sólo tienen dos capas de células. Son parásitos que habitan en los riñones de organismos marinos como los bivalvos y el pulpo, y absorben los nutrientes directamente a través de sus células. La mayoría de los biólogos consideran que los mesozoos son platelmintos y, como ya se ha mencionado, otros platelmintos tienen manchas oculares y órganos sensibles a la luz. Éstos se comunican con unos sistemas nerviosos bastante sencillos y es probable que lo único que hagan sea provocar una simple respuesta a la luz.

El otro gusano famoso es *Buddenbrockia*. A pesar de tener una forma y un estilo de vida disparatados, este gusano es un gusano es un gusano. Es un animal sumamente derivado, si bien la mayor parte de sus parientes cercanos son unos organismos unicelulares llamados mixozoos (no confundir con los mesozoos), y todo el grupo está incluido también dentro de los platelmintos. Así que es evidente que la unicelularidad representa una vez más una «devolución» de una especie vermiforme ancestral.

Bien, ¿y la cabeza? «Sin cabeza no hay cerebro» parece un postulado razonable. Pero lo contrario –si tienes cabeza tienes cerebro– ¿es cierto también? Puesto que la cabeza es una estructura tridimensional, podemos estudiar este problema desde la parte delantera del cuerpo a la parte trasera (eje anteroposterior) y desde la parte dorsal a la parte ventral (eje

dorsoventral). No importa en qué dimensión lo hagamos: obtenemos el mismo resultado cuando se trata de la cabeza. Todos los protóstomos invertebrados tienen cabezas reconocibles, e incluso resulta que los mismos genes que intervienen en la elaboración de la cabeza de los invertebrados también participan en general en la fabricación de la cabeza de los vertebrados. En el eje anteroposterior se vio que la expresión colineal de un grupo de genes importantes en la segmentación y la identidad de los segmentos en la mosca del vinagre (los genes homeóticos: HomC) era casi idéntica a la expresión colineal de los mismos genes en los vertebrados. De hecho, el patrón de semejanza se extiende todo a lo largo del sistema nervioso central en ambos tipos de organismos. Además, los genes que se expresan en la parte más anterior de la cabeza de los invertebrados son también responsables del desarrollo del prosencéfalo en los vertebrados. Uno en particular es un gen denominado *empty spiracles* (ems), que controla el desarrollo de los espiráculos en las larvas de la mosca e interviene en el desarrollo de su cerebro. La proteína producida por este gen, la EMX, es importante en el desarrollo de las agrupaciones de neuronas olfativas llamadas glomérulos, tanto en ratones como en moscas, lo que indica que existe una correspondencia entre los centros olfativos de los vertebrados y de los insectos.

Otro método que utilizan los científicos para determinar la equivalencia de los genes de, pongamos, moscas y ratones, encierra una técnica llamada «rescate transfilético». En estos experimentos, un gen de una especie se transfiere a otra que carece del gen. Si el gen es lo bastante importante en el desarrollo del organismo y su ausencia es total, los individuos que no lo tienen morirán en una etapa precoz del desarrollo. Así, cuando el gen de otra especie se transfiere a la especie carente y la descendencia no se ve afectada, entonces se ha producido un rescate transfilético y se confirma la equivalencia entre los productos génicos específicos de la especie donante y la receptora. Se han realizado estudios de este tipo para una gran cantidad de genes implicados en la cabeza que han demostrado que el rescate transfilético parece ser la norma, y confirmado el supuesto de que las funciones de las proteínas son por lo general equivalentes a lo largo de grandes distancias filogenéticas. Hasta aquí todo bien en lo que atañe al eje anteroposterior. ¿Qué hay del eje

dorsoventral?

## EL CEREBRO DE LA MOSCA DEL VINAGRE VISTO DE CERCA

En un estudio de dimensiones gigantescas, unos científicos de Taiwan marcaron más de 16.000 de las 100.000 células del cerebro de la mosca del vinagre para visualizar las conexiones que se forman entre ellas. Ann-Shyn Chiang y sus colaboradores modificaron genéticamente hembras de dicha mosca común de laboratorio, *Drosophila melanogaster*, con varios genes que intervienen activamente en el crecimiento de las células nerviosas. También utilizaron lo que se denomina un «sistema FLP-out» que dispara el proceso de división celular, porque usa un gen «flipasa» importante en el inicio de la mitosis. Para visualizar las células nerviosas acoplaron una proteína verde fluorescente a las regiones promotoras de los genes que toman parte activa en la formación de las células nerviosas. Para lograr que aparezcan células sueltas en lugar de todas a la vez, pusieron también un interruptor de choque térmico en toda la construcción modificada genéticamente, de modo que pudieran activar y desactivar la proteína verde fluorescente en momentos distintos durante el desarrollo del cerebro de la mosca simplemente calentándola. Utilizando estas construcciones y calentando las moscas en diferentes momentos, consiguieron que miles de células sueltas se iluminaran con fluorescencia. Organizándolas para coincidir con los estadios del desarrollo y utilizando algoritmos informáticos para tipificar las formas de los miles de cerebros que usaron, los investigadores pudieron trazar un mapa de las posiciones de las 16.000 neuronas marcadas. Los experimentos necesitaron ordenadores enormes para almacenar las imágenes y procesar la visualización de los miles de cerebros, y el producto final es un atlas del cerebro de la mosca llamado *FlyCircuit* ([www.flycircuit.tw](http://www.flycircuit.tw)), en el que las 16.000 células y sus ubicaciones están plasmadas en los mapas de manera exquisita.

Las formas y patrones que forman las 16.000 células son intrínsecamente fascinantes. Pero lo que de verdad es interesante es cómo se organizan las

neuronas. Con esta gran cantidad de datos, los investigadores tuvieron que redefinir algunas unidades importantes del cerebro de la mosca. Definieron una unidad nueva denominada Unidad de Procesamiento Local (LPU, Local Processing Unit) que ellos veían como «una región del cerebro constituida por su propia población LN (neuronas) cuyas fibras nerviosas están limitadas por entero a esa región. Además, cada LPU entra en contacto con al menos un tracto nervioso». Encontraron 41 de estas en cada hemisferio cerebral de las moscas que examinaron. Otra unidad novedosa que definieron es lo que llaman «tracto», que son agrupaciones de neuronas que conectan distintas partes del cerebro. El cerebro de las moscas tiene 58. Por último, determinaron cuántos «nodos» contenía el cerebro de estos insectos. Un nodo es el sitio donde se unen las LPU en grupos diferenciados y hay seis por hemisferio. Cuando juntan todos los LPU, tractos y nodos, llenan casi por completo el volumen del cerebro de la mosca, lo que indica que no erraron mucho al centrarse en examinar 16.000 células de las 100.000. Lo que es aún más prometedor es la idea de que las conexiones y la organización del cerebro de la mosca siguen el mismo tipo de conexiones desarrolladas por los informáticos para la corteza de los mamíferos. En concreto, los cerebros de las moscas y los mamíferos se ajustan al principio del «mundo pequeño». Este es un principio de organización cerebral en el que un cerebro tiene, como dijo el periodista Nicholas Wade, «grandes agrupaciones locales de neuronas, así como conexiones de largo alcance». Pero similares o no, el asunto de la cerebriudad de los ganglios nerviosos de los invertebrados se sigue reduciendo a la cuestión filogenética que ya hemos planteado varias veces. ¡Cuidado con no reorganizar la metáfora!

#### DIBUJOS AL REVÉS

La importancia de captar correctamente la metáfora cuando se trata del eje dorsoventral de vertebrados e invertebrados es evidente en un debate que ya dura dos siglos. La polémica empezó cuando uno de los científicos más innovadores y audaces de comienzos del siglo XIX, Étienne Geoffroy Saint-

Hilaire, publicó el dibujo de una langosta al revés. Su finalidad era proponer que básicamente los invertebrados eran vertebrados invertidos. El sistema nervioso de la langosta, como el de todos los protóstomos invertebrados, se encuentra en su lado ventral, y su tubo digestivo en el dorsal. Pensemos en esto: nuestro sistema nervioso está en nuestra parte dorsal y nuestro sistema digestivo en la ventral. De modo que, al menos metafóricamente, algo se ha dado la vuelta. Geoffroy sólo contaba con su intuición para guiarle hacia esta conclusión, pero en 1996 Eddie De Robertis y Yoshiki Sasai en UCLA<sup>2</sup> utilizaron métodos de localización de productos génicos para mostrar que las secuencias de dos genes llamados decapentaplégicos (dpp) y *short gastrulation* [gastrulación corta] (sog), conocidos ambos por ser importantes para la polaridad dorsoventral de las moscas, son muy similares a las de dos genes de la rana de uñas africana, *Xenopus laevis*. El gen dpp de la mosca mostró semejanza con un gen de la rana llamado proteína morfogenética ósea 4 (BMP4, Bone Morphogenetic Protein 4), y el gen sog de la mosca reveló un parecido con el gen chordin (chd) de *Xenopus*. Resulta interesante que el examen de la posición y las interacciones específicas de estos genes en los embriones de mosca y embriones de rana descubriera un paralelismo curioso. En concreto, uno de los productos génicos en cada tipo de embrión inhibe al otro. Así pues, el sog inhibe al dpp en la mosca y el chd inhibe al Bmp4 en la rana. Tanto el dpp como el Bmp4 producen lo que se conoce como moléculas de señalización, que controlan muchas otras interacciones de proteínas. Curiosamente, el dpp se produce en la parte dorsal del embrión de mosca, y el Bmp4 en la parte ventral del embrión de rana. Puesto que estas señales han de estar localizadas, el sog se produce en la zona ventral en las moscas y el chd se produce en la zona dorsal en las ranas. Dicho de otro modo, se han invertido las ubicaciones de los productos génicos. Un examen posterior de estos genes en otros organismos ha confirmado la pauta general de que los genes del tipo dpp en protóstomos invertebrados se producen en la región dorsal del embrión y los genes del tipo dpp (como Bmp4) se producen en la región ventral de los embriones de vertebrados. De ahí que lo que parecía ser uno de los argumentos más sólidos a favor de la ausencia de homología entre el cerebro de los vertebrados y el de los invertebrados puede explicarse por

la simple inversión de los ejes del embrión. Después de todo, tal vez los cerebros de estos dos tipos de organismos sean iguales.

#### SEGUIMIENTO DE LOS CEREBROS EN «CUASI» VERTEBRADOS

Aunque hemos dejado para el final del capítulo algunas de las cuestiones que atañen al origen de las sinapsis y los cerebros, está bastante claro que todos los vertebrados heredaron el cerebro de un único antepasado común, concretamente el antepasado de los cordados (el grupo que contiene los vertebrados y algunos parientes cercanos que conoceremos en breve). Pero nos estamos saltando un grupo de animales que, como señalamos antes, se ha incluido siempre en esa tosca agrupación de los invertebrados pero que, por extraño que parezca, su relación con nosotros los vertebrados es más estrecha que con otros invertebrados. Son los equinodermos y los hemicordados. Ya hemos hablado de los equinodermos, es decir, los erizos y las estrellas de mar. Estos organismos tienen simetría radial, la conocida como simetría pentarradial (de cinco puntas). La mayoría de los equinodermos no tienen ganglio cefálico; dicho de otro modo, carecen de cerebro. Lo que sí tienen es un sistema nervioso parecido a una red neural, y parte de él forma un anillo alrededor del tubo esofágico que recuerda al sistema nervioso de los nematodos, aunque lo más probable es que no sea lo mismo. Si los equinodermos tuvieron antiguamente un ganglio cefálico y luego lo perdieron, o nunca lo tuvieron, es una cuestión esencial en la búsqueda del origen de nuestro cerebro.

Un factor que complica la historia del cerebro de los equinodermos es que un grupo grande de ellos, los holoturoideos (pepinos de mar), sí poseen ganglios cefálicos. Aunque sin duda es un factor que lo complica todo, nos puede ayudar a entender cómo toman las decisiones los científicos sobre la reconstrucción de los antepasados. En una situación hipotética, el antepasado del equinodermo empezó con un ganglio central (un cerebro), lo perdió en todos sus descendientes, y luego lo volvió a adquirir en el linaje que conduce a los pepinos de mar. La segunda situación requiere menos pasos que la otra –

dos pasos frente a tres– y, en igualdad de condiciones nos inclinaríamos hacia el camino más corto. Sin embargo, la evolución no toma necesariamente la ruta más corta. Y todavía no hemos dicho nada acerca de cómo se reconstruyó el antepasado de los equinodermos. Para saber cómo evolucionó el cerebro en el resto de este gran grupo de animales interesantes es fundamental conocer cómo empezó el antepasado.

El otro grupo de deuteróstomos no cordados –los hemicordados– está compuesto de tres tipos principales de animales vermiformes: pterobranquios, enteropneustos (gusanos bellota) y una única especie de planctosferoideos difícil de ubicar. Estos organismos tienen tres segmentos corporales – protosoma, mesosoma y metasoma (del extremo anterior del cuerpo al posterior)– y un sistema nervioso semejante a una red que corre a lo largo del cuerpo, aunque no puede hablarse de cerebro. Pero los genes responsables de la ubicación del sistema nervioso en los cordados *están* presentes en los hemicordados y se expresan según el mismo patrón. Para comprobarlo, tenemos que volver a la estructura tripartita del cuerpo de los hemicordados. Los genes que se expresan en el prosencéfalo y mesencéfalo de los cordados se expresan en el protosoma de los hemicordados, y los genes que se expresan en el romboencéfalo de los cordados lo hacen en el mesosoma de los hemicordados.

Si bien esta similitud superficial de los patrones de expresión es interesante, algunos investigadores han sugerido que la condición ancestral de los deuteróstomos era una red nerviosa difusa. De hecho, el examen del sistema nervioso de los hemicordados revela que esta red difusa está situada en la epidermis (la basiepidermis, para ser exactos). La ubicación de esta red nerviosa difusa alentó a Nicholas Holland a proponer que el antepasado de los cordados tenía un «cerebro de piel» y que los sistemas nerviosos más localizados de los cordados evolucionaron después de que los hemicordados y los equinodermos (que también tienen el cerebro de piel difuso) se separaran de los cordados. Un estado difuso del sistema nervioso del antepasado de los deuteróstomos ayudaría también a interpretar las transiciones del cerebro en los equinodermos. Si dicho antepasado tenía una red nerviosa difusa sin cerebro, entonces es muy probable que el antepasado de los equinodermos

hubiera carecido de cerebro, y la segunda situación hipotética descrita anteriormente en relación con el cerebro de los equinodermos se convertiría en la interpretación elegida.

Si esta idea de la red nerviosa difusa es correcta, el sistema nervioso difuso del antepasado común de los cordados se fundió en estructuras más localizadas y mejor definidas a medida que aquellos evolucionaban. En este antepasado se forma un notocordio (una estructura ósea en forma de varilla que recorre casi toda la longitud del animal) en la parte dorsal del animal por encima del intestino. El notocordio no es la espina dorsal, tampoco la columna vertebral ni la médula espinal o el cordón nervioso. En cambio, es una vara de tejido que aparece en una fase precoz del desarrollo embrionario y organiza más o menos el desarrollo posterior de las estructuras cercanas. A medida que avanza la embriogénesis, el cordón nervioso se desarrolla en la parte dorsal del notocordio. En una etapa más avanzada de la embriogénesis, el extremo anterior del cordón nervioso se diferencia en el cerebro y por detrás de la cabeza en la médula espinal en tanto que el propio notocordio empieza a desaparecer.

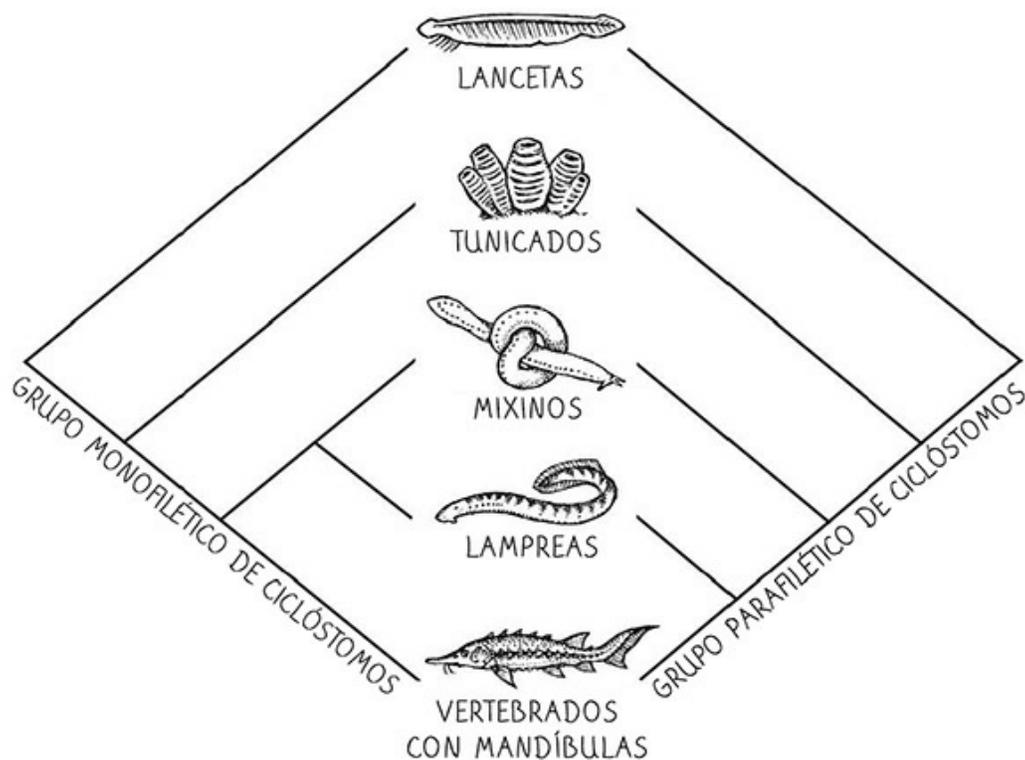
Los primeros organismos en divergir a partir del antepasado de los cordados fueron los urocordados, o tunicados. Estos son unos animales muy sencillos que se han descrito como una bolsa por la que se filtra el agua. Y el sistema nervioso de los tunicados adultos es tan primitivo que resulta engañoso. En este saco filtrador sólo hay un único y pequeño ganglio de células nerviosas que envía una cantidad mínima de nervios a los órganos. Pero estos pequeños individuos son en realidad mucho más complejos que eso, porque cuando son crías (larvas) tienen un sistema nervioso completo del que cualquier cordado se sentiría orgulloso, con un cordón nervioso dorsal bien desarrollado y órganos sensoriales en el extremo anterior (cabeza). Sólo después de haberse transformado en adultos su sistema nervioso adquiere su aspecto ultrasencillo.

El siguiente grupo de organismos en apartarse del resto de los cordados es el de los cefalocordados. Son pequeñas criaturas marinas conocidas también como anfioxos o lancetas. Son un poco más complejos que los urocordados, y su sistema nervioso experimenta una ligera «mejora» con respecto a los

tunicados adultos. Un cordón nervioso recorre el animal a lo largo y en el extremo anterior hay un grupo de células que es difícil creer que sea algo especial. En realidad, muchos zoólogos dudan de que exista algún tipo de «cerebro» en estos organismos. Resumiendo todo esto por lo que respecta a los cordados, los cerebros van y vienen en algunas situaciones hipotéticas y vienen y van en otras. Sin embargo, lo que es seguro es que en cuanto los cerebros de los vertebrados adquirieron importancia, se quedaron.

### CICLÓSTOMOS

Es casi seguro que el antepasado común de todos los vertebrados actuales (peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos) tenía cerebro. Al fin y al cabo, un nombre alternativo que muchos prefieren es craneados, o seres con caja craneana (una caja craneana es un cráneo sin la mandíbula inferior). Y si tienes cráneo, tienes cerebro. Pero hay una cuestión interesante acerca de las relaciones de los primeros vertebrados con cráneos que hemos de examinar antes de tomar en cuenta la organización de los cerebros de los vertebrados (capítulo 4). En esta parte general del Árbol de la Vida hay dos grupos de animales bastante interesantes que han incordiado a los taxonomistas durante mucho tiempo. Uno es el grupo de los hiperotretos, también llamados mixinos o peces bruja, que carecen por completo de cráneo. El otro es el de las lampreas (hiperoartios), que tienen caja craneana pero no mandíbula. Durante mucho tiempo se pensó que las lampreas tenían un parentesco más cercano con los demás vertebrados que con los mixinos, ya que las lampreas tienen caja craneana y los mixinos no. Pero el artículo publicado en 2010 por Alysha Heimberg y colaboradores en Dartmouth sobre las moléculas de ARN pequeño sugiere una relación mucho más estrecha entre las lampreas y los mixinos, que juntos forman el grupo de los ciclóstomos.



La diferencia en el simple reordenamiento de un par de taxones fundamentales en el Árbol de la Vida de los vertebrados. Los ciclóstomos (lampreas y mixinos) son monofiléticos en el árbol de la izquierda y parafiléticos en el árbol de la derecha. Heimberg y sus colaboradores proponen que la monofilia de los ciclóstomos es lo que mejor explica la genealogía de los vertebrados.

De modo que en el escenario clásico, en el que la relación de la lamprea con otros vertebrados es más estrecha que con el mixino (y los ciclóstomos no son monofiléticos), el antepasado de los vertebrados se reconstruye en forma de organismo con un plan corporal sencillo, sin cráneo y con un sistema nervioso y un cerebro rudimentarios. Pero como señalan Heimberg sus y colaboradores, «con el reconocimiento de la monofilia de los ciclóstomos...se pierde esa perspectiva evolutiva. Es evidente que el antepasado de los vertebrados era más complejo, tanto desde el punto de vista fenotípico como del desarrollo, de lo que se ha apreciado hasta ahora». Esto significa que el antepasado de todos los vertebrados portaba la capacidad de ser mucho más avanzado que los llamados vertebrados primitivos –como las lampreas y mixinos sin mandíbulas– que vemos hoy día en el planeta. Como hemos subrayado, la elección de un exogrupo es importantísima a la hora de

interpretar los acontecimientos evolutivos que condujeron al cerebro de los vertebrados. En este caso, el exogrupo clásico de los vertebrados lo constituyen los mixinos y es posible hacer una interpretación sencilla de cómo ha evolucionado el cerebro. Pero si en realidad el exogrupo es todo el grupo de ciclóstomos, es necesaria una nueva interpretación.

#### CUANDO LAS APARIENCIAS ENGAÑAN

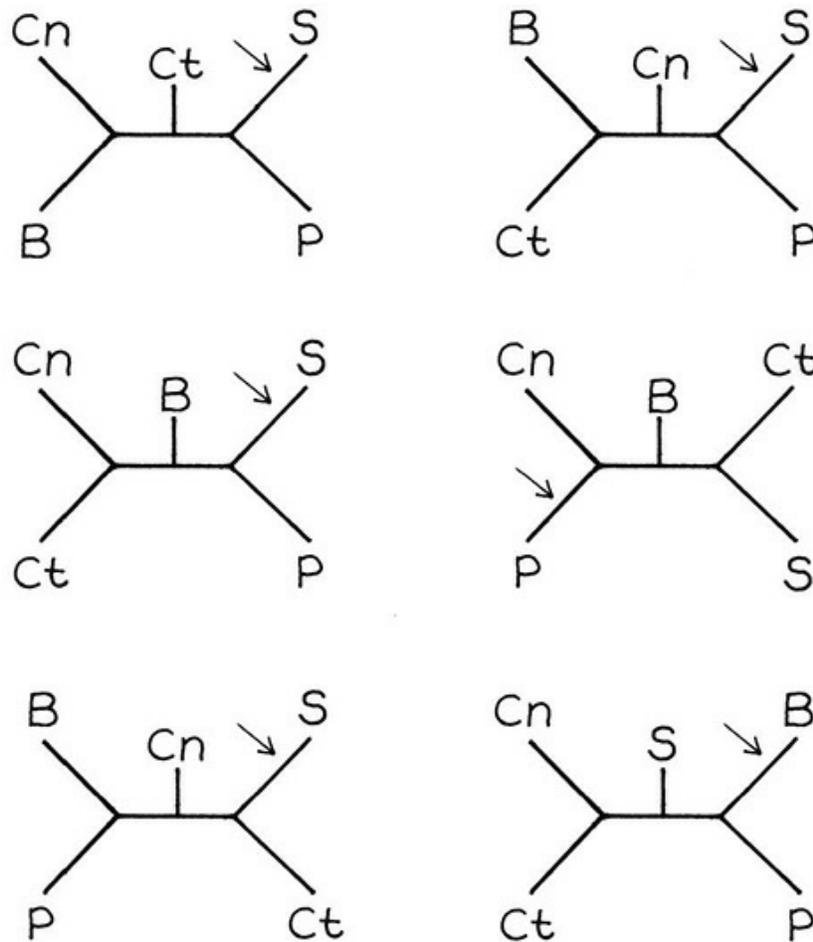
Ahora es el momento de hacer un balance de la información que hemos extraído de nuestro paseo por esta parte del Árbol de la Vida. Iniciamos el capítulo examinando cómo se comunican las células entre sí y comenzamos a hacer preguntas sobre qué es lo que lleva a cabo la comunicación entre células. Esta investigación nos llevó a estudiar qué es y qué no es un sistema nervioso y a indagar qué es y qué no es una sinapsis. Descubrimos que aunque las plantas no tienen sinapsis, sí tienen estructuras que son simbólicamente similares a las sinapsis animales. Asimismo hallamos que algunos de los animales más primitivos, como los placozoos y las esponjas, no tienen neuronas ni sinapsis y de ahí que no tengan sistema nervioso. Y también que estos animales sin nervios poseen algunos de los genes necesarios para la formación de sinapsis. Los animales más simples con sinapsis verdaderas son los cnidarios, pero en lugar de algo que pudiéramos llamarse cerebro, estos animales tienen una red neural. La idea clásica de sinapsis es que las neuronas de todos los animales tienen el mismo origen y que las sinapsis de los vertebrados e invertebrados son por lo tanto iguales. En esta vieja idea, lo que distingue al sistema nervioso animal no es el *tipo* de células presentes, sino la cantidad de células *nerviosas* que poseen los animales.

Además, cuando observamos con más detenimiento las sinapsis de los animales con neuronas, hallamos dos cosas importantes. En primer lugar, los organismos sin neuronas tienen de hecho genes que fabrican proteínas que vemos en las sinapsis. Los hongos tienen genes que intervienen en actividades de membrana que precisamente son los mismos que utilizan los organismos superiores para formar las sinapsis. Los hongos los utilizan para realizar

distintas funciones, como la regulación de la síntesis de proteínas y la alteración de la estructura celular. Organismos como las esponjas y los placozoos, que carecen de sinapsis y neuronas, poseen sin embargo dotaciones casi completas de genes que otros especímenes usan para producir neuronas y sinapsis. En segundo lugar, vemos que si bien las sinapsis existen en invertebrados y vertebrados, estos últimos tienen muchos más genes para las sinapsis que los primeros. Concretamente, los vertebrados han ampliado el número de genes que codifican las proteínas que forman las sinapsis, entre ellas los receptores, las proteínas de adhesión y las proteínas involucradas en la estructura de la membrana. Cuando se comparan los tipos de proteínas que forman la sinapsis de un invertebrado como la mosca del vinagre con las proteínas que forman la sinapsis del ratón, se descubre que la señalización de las del ratón es más compleja que las de la mosca. Estos resultados indican que existe un núcleo o armazón de genes que existía en el antepasado común de todos los animales que forman sinapsis. Los sistemas nerviosos animales se han vuelto cada vez más complejos, y esta complejidad se ha logrado por medio del aumento de la cantidad y los tipos de genes que forman las sinapsis. Como afirmaron Richard Emes, de la Universidad de Keele, y sus colaboradores: «La evolución de la complejidad de las sinapsis alrededor de un núcleo protosináptico ha contribuido a las diferencias entre invertebrados y vertebrados y a la especialización del cerebro». Lo que cuenta no es la cantidad de células nerviosas sino más bien qué hay en ellas y, más concretamente, qué hay en la sinapsis.

En este contexto, sería más sencillo para nosotros considerar que la red neural de los cnidarios no es lo mismo que el sistema nervioso de los bilaterales. Esta idea es aún más atractiva cuando revisamos el conocimiento actual de la filogenia de los animales no bilaterales en relación con los bilaterales. Durante nuestra exposición hemos sido imprecisos adrede porque las relaciones filogenéticas de estos animales siguen sin estar muy claras, aunque a muchos científicos les gustaría creer que lo están. Pero básicamente, cuando consideramos los principales grupos de organismos implicados en esta parte del Árbol de la Vida, estamos hablando de cinco taxones más un exogrupo: placozoos (P), poríferos (S), cnidarios (Cn), ctenóforos (Ct) y

bilaterales (B). El número de árboles que pueden construirse utilizando estos cinco taxones es 105. Uno de éstos se muestra en el diagrama anexo. Es la clásica disposición, en la que las esponjas son los animales más primitivos, seguidos de los placozoos y luego el par cnidarios-ctenóforos cuya relación con los bilaterales es más estrecha. Resulta que otras cinco de las 105 formas posibles de disponer estos taxones han aparecido también en la literatura. Sólo una de ellas separa los cnidarios y ctenóforos. De modo que si decimos que la pareja cnidarios-ctenóforos constituye un único taxón, entonces el número de árboles posibles se reduce a 15, de los cuales se han propuesto cinco como soluciones para los cuatro taxones. Así, una tercera parte de todas las permutaciones posibles de los cuatro taxones P, S, Cn y B se ha insinuado como posibles soluciones.



Árboles alternativos para disponer las esponjas (S), cnidarios (Cn), ctenóforos (Ct), placozoos (P) y bilaterales (B). El coanoflagelado *Monosiga* se utiliza como exogrupo y la flecha indica dónde se situaría

en cada una de las seis hipótesis. Con un poco de imaginación, se pueden observar las leves diferencias en las seis hipótesis. Por ejemplo, los dos árboles de la parte superior tendrían a los poríferos (esponjas) como los metazoos más «antiguos», aunque cambia la posición de los ctenóforos y cnidarios. El árbol de abajo a la derecha es interesante al proponer que los bilaterales es el linaje de los metazoos más «antiguos».

Muchos científicos prefieren la topología del árbol según la cual las esponjas son los más primitivos, seguidos de los placozoos, seguidos del par bilaterales-cnidarios. Esta topología encaja bien con la idea de que las sinapsis, los sistemas nerviosos y los cerebros evolucionaron sólo una vez en el árbol que se muestra. Cualquier otra disposición significaría que los sistemas nerviosos y las sinapsis evolucionaron más de una vez. De modo que este árbol en particular es satisfactorio si las sinapsis y los cerebros evolucionaran una sola vez. ¿Pero podrían otras circunstancias ser más precisas? ¿Qué ocurre si las sinapsis son de hecho metáforas? En efecto ¿qué pasa si los sistemas nerviosos son también metáforas? Descubrimos que uno de los árboles alternativos ofrece un escenario muy interesante, el que indica que el grupo de los bilaterales fue el primero que se separó del antepasado común de todos los animales. A continuación, los placozoos se ramificaron, seguidos del par esponjas-cnidarios. En este escenario, unas estructuras semejantes a las sinapsis evolucionaron dos veces, pero esto no es tan descabellado habida cuenta de que ya hemos establecido que las sinapsis de los cnidarios y los bilaterales tienen diferencias básicas de complejidad; y aún más importante, que los cnidarios no tuvieron que desarrollar genes nuevos para formar sinapsis. Y si los genes de las sinapsis están presentes en placozoos y esponjas, entonces también estaban presentes en el antepasado común de los cnidarios. Este escenario implica también que la red neural de los cnidarios es diferente que el sistema nervioso de los bilaterales, lo que nos da pie a sugerir que llamemos «red cneural» a la red neural de los cnidarios. No es lo mismo que el sistema nervioso de los bilaterales, así que, ¿por qué escribirlo de la misma forma?

A través de la observación del sistema nervioso de los bilaterales, empezamos a llegar a la pregunta: «¿Qué es un cerebro?». Lo investigamos observando a algunos de nuestros parientes más cercanos, los invertebrados bilaterales, y nos hicimos una idea bastante buena de con qué habían tenido

que luchar los científicos al abordar esta cuestión. En este contexto, tal vez sea útil examinar las definiciones populares de la palabra «cerebro», que al parecer las hay de dos tipos fundamentales. La primera es lo que podríamos llamar la definición «vertebrocéntrica», la que se centra en lo que tienen los vertebrados e ignora completamente a los invertebrados. La segunda es la definición «mención invertida obligatoria». Tales definiciones se presentan en dos partes. La primera es una definición minuciosa del cerebro de los vertebrados seguida de la mención obligatoria de que los invertebrados tienen algo que podemos llamar cerebro. El segundo tipo de definición, la que incluye a los invertebrados, es interesante en gran medida porque abre la caja de Pandora (por así decirlo). Algunas de estas definiciones invertidas obligatorias indican vagamente que el cerebro de los invertebrados es «funcionalmente similar» o un «órgano comparable» al de los vertebrados. Otras definiciones del cerebro de los invertebrados son un poco más precisas: sugieren que es «comparable en ubicación y función al cerebro de los vertebrados»; sin embargo, esta definición no es más que una mezcla de «órgano comparable» y «funcionalmente similar».

Las definiciones del cerebro en los textos científicos son más exactas pero no mucho mejores. Una con la que nos topamos afirmaba que el cerebro de los invertebrados es «una parte del sistema nervioso que se corresponde *más o menos* con el cerebro de los vertebrados» (la cursiva es nuestra). Examinemos con detalle esta afirmación, porque su imprecisión está en el meollo de los problemas que implican afirmar que las estructuras de un organismo a otro son «las mismas». En el capítulo 1 introdujimos un concepto importante en lo que respecta a la interpretación de los patrones de evolución entre organismos. A falta de una palabra mejor, lo llamamos «igualdad». Pero existe un término más técnico para esta idea que es «homología». El anatomista británico del siglo XIX Richard Owen, que acuñó la palabra «dinosaurio», acuñó también ésta. Su definición de homología fue importante porque ayudó a los científicos a evitar el problema de «comparar peras con manzanas» al que se enfrentaban cuando se asocian cosas. Esa definición, «el mismo órgano en animales diferentes en todas sus variedades de forma y función», fue propuesta en la década de 1840, mucho antes de que Darwin y Wallace presentaran sus ideas

acerca de la selección natural y la descendencia con modificaciones. Así que cuando Darwin y Wallace presentaron estas ideas radicales sobre la índole de los cambios de los organismos, la definición tuvo que modificarse para incluir la descendencia con modificaciones. En el capítulo 1 definimos tres tipos principales de cambios que pueden producirse cuando ponemos las cosas en el contexto de la descendencia con modificaciones: cambios compartidos y derivados, cambios primitivos y convergencias. De estos tres tipos de cambios, sólo los compartidos y derivados son homologías. De modo que la mejor manera que tenemos de examinar si hay algo en un organismo que es «igual» en otro es asegurarnos de que es compartido y derivado, es decir, heredado del mismo antepasado común, y no un cambio convergente ni un rasgo primitivo.

Volvamos ahora a la parte «más o menos» de la definición. En la década de 1970, los biólogos moleculares empezaron a secuenciar los genes de una amplia variedad de organismos. Para asegurarse de que las comparaciones que realizaban eran las adecuadas, tenían que establecer homología entre los genes. Pronto estalló la polémica porque algunos científicos afirmaban que ciertos genes eran, digamos, homólogos a otros en un 8 %. Basaban estas afirmaciones en la cantidad de secuencia génica que coincidía, o era similar, entre una especie y otra. A un científico en concreto, el biólogo de la Universidad de California en Davis Walter Fitch, le preocupaba este problema, porque sabía que la similitud no era el criterio adecuado para establecer la homología. En un momento agitado de su excelente carrera, señaló que la homología se parece mucho al embarazo. No se puede estar embarazada en un 85 %. O se está embarazada o no. La homología es lo mismo. Las cosas son homólogas o no; no pueden ser más que un 100 % o un 0 % homólogas. Por lo tanto, sólo porque dos cosas muestren una cierta similitud no son necesariamente homólogas.

Con estas reglas en la mano, podría pensarse que es fácil observar la igualdad entre las cosas. Pero no es así, porque hay muchas formas de hacer un análisis pormenorizado de los rasgos que nos interesan. Pensemos en las alas que hemos considerado en el capítulo 1. Tratamos este problema examinando la estructura anatómica de las alas. Fue bastante sencillo entender la falta de

«igualdad» entre las alas de los insectos, las alas de las aves y las de los murciélagos observando simplemente su estructura. La falta de elementos similares en estos tres tipos diferentes de alas fue el eje central para determinar su homología. Pero ¿qué ocurriría si examináramos las alas utilizando un criterio genético y descubriéramos que existen varios genes comunes implicados en la formación de las alas de estos tres tipos distintos de organismos? ¿Cambiaría eso las cosas? Muchos científicos han observado este patrón de una anatomía dispar pero una genética no tan dispar y han hecho declaraciones insólitas acerca de la homología. Esto se parece mucho a las afirmaciones de los expertos en neurobiología vegetal de los que hemos hablado en este mismo capítulo: se trata sólo de una metáfora. Por suerte, las metáforas no son como los chistes. Todo chiste que haya que explicar es un chiste malo. Como dijo E. B. White en una ocasión: «Explicar un chiste es como hacer la disección de una rana. Se entiende mejor, pero la rana muere durante el proceso». Por otro lado, toda metáfora que haya que explicar es muy probable que sea una buena metáfora. Como indicamos anteriormente en el contexto del sistema nervioso de las plantas, las metáforas nos ayudan a explicar mejor las cosas; y comprender el cerebro en este contexto de metáfora es en verdad muy útil. Establecer las metáforas adecuadas hace que el trabajo de los biólogos evolutivos sea mucho más fácil.

Lo que todo esto significa en la práctica es que, a la hora de la verdad, es muy posible que nuestro cerebro de vertebrados sea sólo de un tipo entre muchos que han evolucionado durante la expansión y ramificación del Árbol de la Vida. Después de todo, hace tiempo que los científicos han aceptado que los ojos de los animales han evolucionado de manera independiente más de veinte veces. Si los ojos pueden hacerlo, tal vez entonces los cerebros también. Si a nuestro cerebro lo vamos llamar EL cerebro, entonces sí, los cerebros de los vertebrados son los únicos que han evolucionado en este planeta. Pero si preferimos usar una jerga menos restrictiva, entonces otros cerebros podrían haber evolucionado independientemente varias veces.

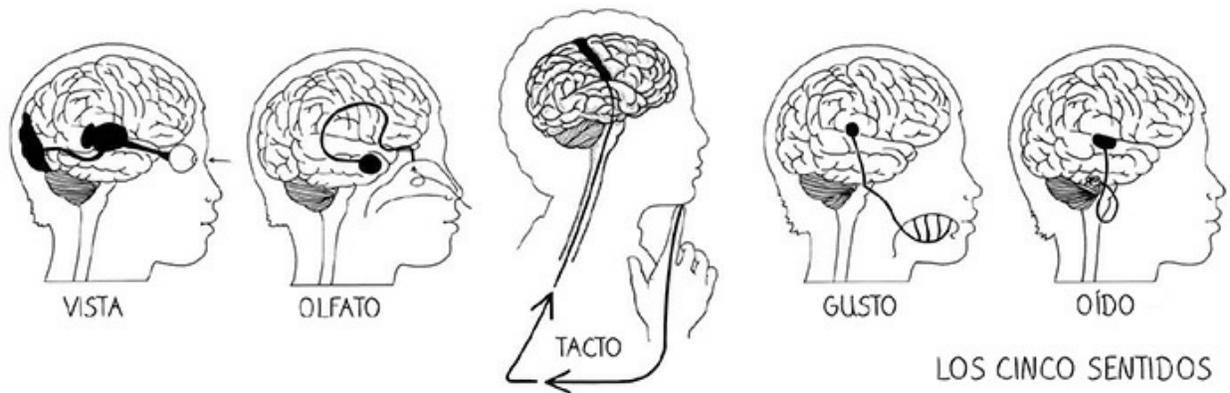
---

1. «Cerebridad» es una palabra inventada como lo es el vocablo inglés correspondiente «Brainness»

(*brain* significa cerebro). Vendría a ser cualidad de cerebro. (*N. de las T.*)

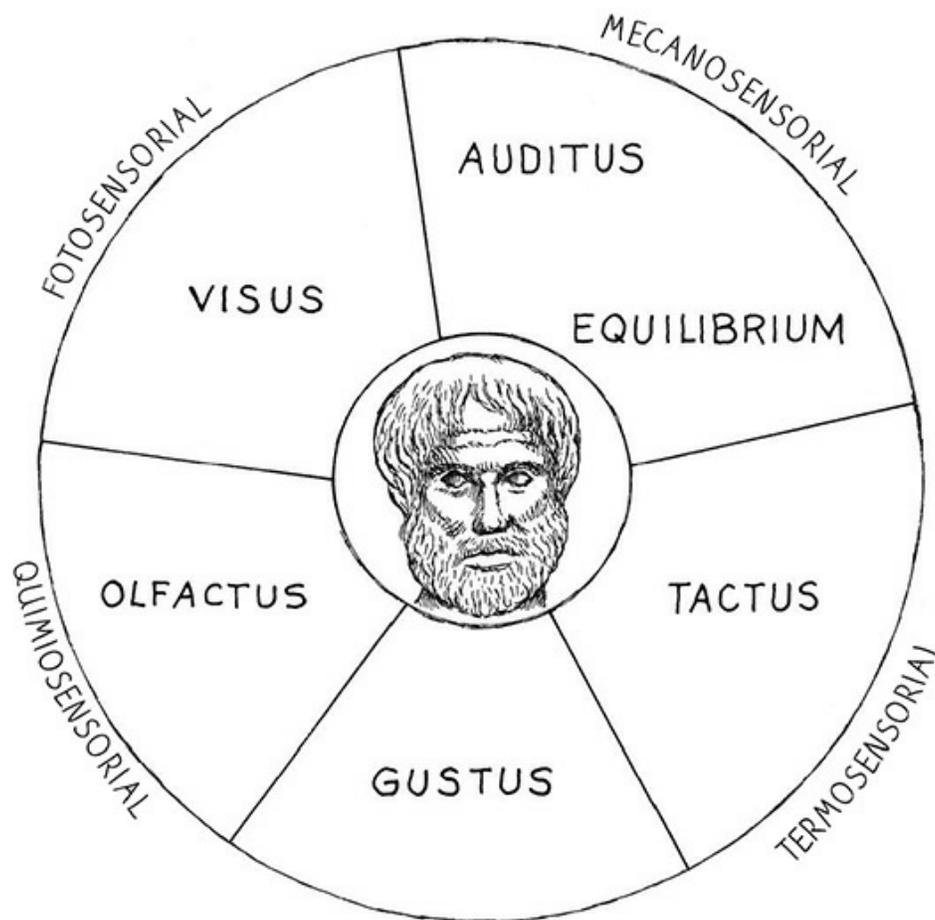
2. UCLA: Universidad de California en Los Angeles (*N. de las T.*)

## Dar sentido a los sentidos



Desde tiempos inmemoriales la gente se ha preguntado cómo perciben e interpretan el mundo otros organismos. Y como ocurre a menudo, nos referimos a Aristóteles para tener un atisbo de cómo veían los antiguos el mundo vivo que les rodeaba. Aristóteles escribió dos tratados sobre los organismos y su lugar en la naturaleza: *Las partes de los animales* y *La historia de los animales*. En estas obras asombrosas, Aristóteles planteó casi todas las cuestiones de la biología que los estudiosos de la historia natural abordarían a lo largo de los siguientes dos mil años. Entre otros asuntos le interesaban los sentidos, cuál era su origen y cómo funcionaban. Formuló algunas preguntas importantes y obtuvo algunas respuestas correctas y otras erróneas. La siguiente cita de *La historia de los animales* detalla la creencia de Aristóteles de que la sensación estaba controlada en parte por el cerebro pero sobre todo por el corazón: «En los animales que tienen cerebro, éste está anudado en la parte delantera de la cabeza, porque la sensación actúa hacia delante; y porque el corazón del que procede la sensación se encuentra en la

parte delantera del cuerpo; y por último, porque los instrumentos de la sensación son las partes que contienen sangre, y la cavidad de la parte posterior del cráneo está desprovista de vasos sanguíneos». Y si bien su idea de que los sentidos se procesan en el corazón era errónea, Aristóteles contribuyó de manera importante a la descripción de qué son los sentidos. Desarrolló un sistema para ellos que se muestra en la figura adjunta de Nils Damann, de la Universidad Católica de Lovaina. Más de dos mil años después, el sistema de Aristóteles se corresponde aún con la idea de cómo intervienen determinados grupos de genes en la especificación de los sentidos. Observemos que se incluye un sexto sentido en la lista; este no es el *Sexto sentido* de Bruce Willis sino más bien el sentido de la orientación, o equilibrio. Eruditos y artistas posteriores como Galileo, Miguel Ángel y Leonardo da Vinci (entre los que había anatomistas magníficos) reflexionaron también largo y tendido sobre cómo funciona el cerebro y cómo éste interpreta el mundo natural y todos sus sonidos, vistas, olores y formas. Miguel Ángel fue incluso «acusado» en 1990 de deslizar disimuladamente el diagrama de un cerebro gigante en esa célebre pintura del techo de la Capilla Sixtina de Dios extendiendo la mano para tocar el dedo de Adán. Aparentemente, el manto de Dios forma la silueta casi perfecta de un cerebro que se completa con el trasero de un ángel que forma la protuberancia anular (una parte del tronco encefálico), la rodilla de otro ángel que forma la glándula pituitaria, y el echarpe de un ángel que forma la arteria vertebral que surte de sangre al cerebro. Al parecer, Miguel Ángel hizo muchas cosas de estas en sus pinturas de la Capilla Sixtina. En 2010 se «descubrieron» otros dibujos neuroanatómicos en sus pinturas.



Nuestros seis sentidos, con Aristóteles en el centro. Auditus=oído, visus=vista, olfactus=olfato, equilibrium=equilibrio, tactus=tacto y gustus=gusto. Tomado de Damman et al. 2008

Los dibujos de Leonardo proporcionan también ejemplos magníficos del conocimiento del cerebro en aquella época. Pero tal vez la interpretación más interesante del cerebro y nuestros sentidos fue la de Galileo. En lugar de adoptar un criterio anatómico, desarrolló una interpretación única de cómo funcionaba la óptica mientras realizaba sus observaciones del sol y la luna, y propuso una manera especial de pensar en los sentidos, en concreto la vista. Galileo creía que en realidad nada existió hasta que los organismos desarrollaron la capacidad de percibir los fenómenos. En su opinión, el mundo físico –montañas, lava, agua, aire, todo– no tuvo forma hasta que aparecieron los organismos con capacidad de percibir el medio ambiente.

## EVOLUCIÓN SENSORIAL

A medida que examinamos los sentidos, hagámoslo desde un punto de vista evolutivo, es decir, considerando que el cerebro humano es fruto de millones de años de evolución. A este respecto, cualquier cerebro o sistema nervioso que examinemos –desde la llamada red neural de las medusas, el sistema nervioso algo más complejo de un nematodo y los sistemas nerviosos en apariencia demasiado complejos de los vertebrados– es, cómo no, el resultado de millones de años de evolución. Para reconstruir este viaje evolutivo a través de los sentidos que tanto aportan a nuestro sistema nervioso, son especialmente útiles varios organismos del Árbol de la Vida. Todos los seres vivos (y extintos) compartieron un antepasado común con nosotros en algún momento de la historia evolutiva. Por ejemplo, nuestro ancestro común con las bacterias vivió hace aproximadamente 3.500 millones de años, y nuestro ancestro común con la levadura vivió hace unos mil millones de años. Más recientes son nuestros antepasados comunes con los insectos (quinientos cincuenta millones de años) y los lagartos (unos cuatrocientos millones de años). En el extremo más reciente de la escala, hace unos veintidós millones de años compartimos un ancestro común con el macaco rhesus, y hace entre seis y ocho millones de años con los chimpancés (tanto el chimpancé común como los bonobos). Y nuestros antepasados comunes más recientes con los parientes extintos se encuentran dentro de nuestro propio género *Homo*. Por último, no podemos olvidar que hoy día todos los *Homo sapiens* de este planeta están relacionados entre sí a través de un antepasado común que vivió hace no más de 150.000 años.

De modo que, mientras examinamos nuestros sentidos y consideramos cómo aparecieron, tendremos que revisar en cada caso los sistemas sensoriales de algunas otras especies. En el caso de sistemas antiguos podemos utilizar organismos unicelulares o animales muy primitivos como las esponjas o los cnidarios. Para estudiar cómo aparecieron las formas más complejas de percepción animal, podemos servirnos de los estudios de los sistemas sensoriales de organismos tales como la *Drosophila melanogaster* y

el nematodo *Caenorhabditis elegans*. Debido a que la siguiente fase importante de la evolución de nuestro cerebro comprende los sistemas nerviosos de los vertebrados, podemos utilizar vertebrados primitivos como peces, lagartos y aves para especificar los sentidos en las etapas evolutivas pertinentes. Y por último, estudiaremos cómo aparecieron los sistemas de detección de los mamíferos y cuáles son los componentes de estos sistemas. Es relativamente fácil examinar los sentidos de este modo, porque desde hace un siglo los científicos han estado utilizando criaturas como ratones, moscas de la fruta, levaduras y bacterias como organismos modelo. En época más reciente, los organismos modelo que se han utilizado son animales de granja como el pollo y animales importantes desde una perspectiva del desarrollo como los nematodos, el pez cebra y las ascidias, lo que aumenta nuestro conocimiento acerca de cómo funcionan los sentidos.

#### HÁGASE LA LUZ: EN EL PRINCIPIO ERAN LOS GPCR

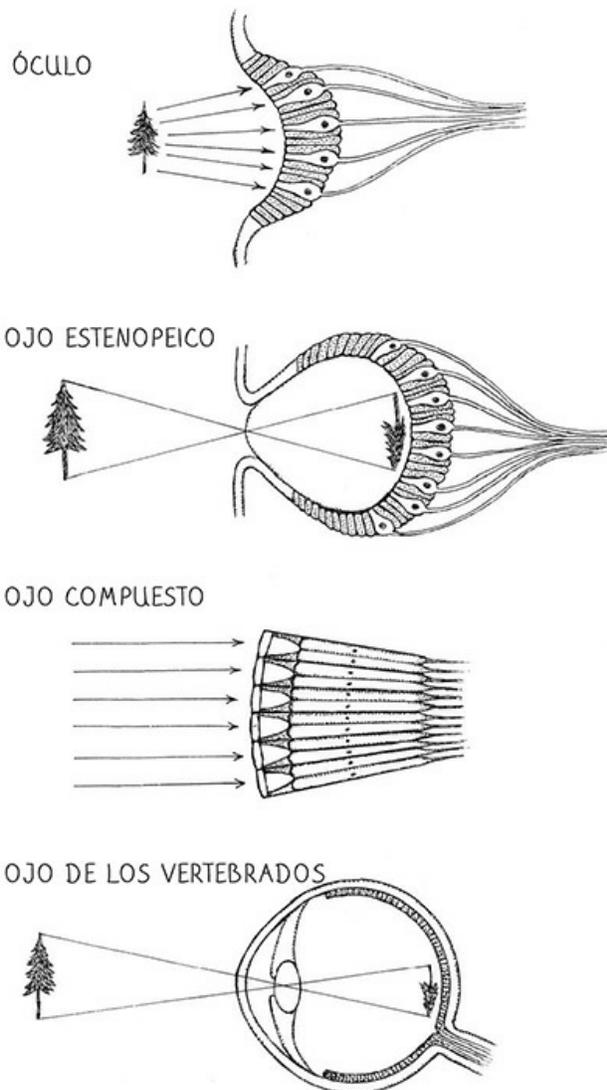
En realidad, la luz es una mezcla de distintas fuerzas producidas por la interacción de partículas cargadas tales como electrones y protones. Ya que es una combinación de los campos producidos por las cargas eléctricas y fuerzas magnéticas, la luz es una forma de radiación electromagnética que puede estar hecha de partículas u ondas, y son sus propiedades ondulatorias las que nos permiten percibir las formas y colores de los objetos de la naturaleza.

Como sucede con cualquier sistema de ondas, las distintas ondas pueden tener diferentes propiedades. Lo más importante para nuestro modo de percibir la radiación electromagnética es la longitud de onda. Técnicamente, la luz posee un amplio rango de longitudes de onda e incluye fenómenos tales como las ondas de radio y las microondas. Las ondas de radio tienen longitudes que pueden llegar a ser de kilómetros, mientras que las microondas de sólo unos treinta centímetros de longitud calientan los alimentos en esos electrodomésticos que muchos de nosotros tenemos en la cocina. En el otro extremo del espectro de luz están los rayos gamma y los rayos X. Los rayos gamma tienen longitudes de onda minúsculas que son 14 órdenes de magnitud

menores que las ondas de radio. Y entre tantas ondas, sólo hay un pequeño rango de longitudes de onda que detectamos como luz y que varía desde la gama del infrarrojo a la gama del ultravioleta, concretamente de los 0,7 a los 0,4 micrómetros. Un micrómetro es la millonésima parte de un metro, así que esto significa que nuestros ojos y cerebro no sólo pueden detectar longitudes de onda de luz diminutas sino que también pueden apreciar la diferencia entre longitudes de onda con una precisión asombrosa de menos de una millonésima parte de un metro.

¿Cómo lo hace nuestro sistema visual? El comportamiento de las moléculas proporciona la respuesta más sencilla acerca de cómo llega la información hasta el cerebro: pero es sólo el principio: el cómo se traduce en lo que de verdad «vemos» es un poco más difícil, y lo abordaremos más adelante (capítulo 5). Nuestros ojos, uno de esos órganos a los que la evolución ha zarandeado, experimentado con ellos y reinventado varias veces durante los últimos mil millones de años, recoge la luz exterior. En una ocasión, el zoólogo Ernst Mayr calculó que los ojos han evolucionado independientemente en los animales más de veinte veces.

Los científicos saben ahora que muchas de las proteínas fotorreceptoras de nuestros ojos existían en el antepasado común de todos los animales y que en todos los organismos con ojos existe un gen maestro regulador específico (en *Drosophila* este gen recibe el curioso nombre de *eyeless*<sup>1</sup>), lo que indica que los ojos constituyen un rasgo primitivo y homólogo de los animales. Sin embargo, si utilizamos nuestro principio de metáfora filogenética para determinar lo que es y no es un ojo, está claro que los numerosos y diferentes «ojos» de los animales son analogías más que homologías, lo cual significa que es posible que la estructura de los ojos de un insecto no sea la «misma» que la de los ojos de un vertebrado. Y de hecho son muy diferentes desde el punto de vista estructural, con diversas configuraciones celulares y la implicación de distintos genes.



Ojos. Estos dibujos representan cuatro de los más o menos veinticinco tipos de ojos que han evolucionado en la Tierra. El diagrama superior es de un óculo, un órgano primitivo sensible a la luz que se encuentra en muchas clases de animales. Debajo está el ojo estenopeico, hallado en varios animales entre los que figuran el molusco Nautilus y los planarios. El ojo cuyo diagrama aparece en tercer lugar desde arriba corresponde a un ojo compuesto. Este ojo está formado por subunidades más pequeñas sensibles a la luz llamadas omatidios. Las flechas indican la luz que entra en el ojo compuesto y choca con los omatidios. Los insectos constituyen un buen ejemplo de organismos con ojos compuestos. El diagrama inferior es de un ojo de vertebrado con cristalino y córnea (a la izquierda del ojo) y retina (la zona oscura de tejido a la derecha del diagrama).

Por ejemplo, el ojo de los insectos está compuesto de muchas facetas u «omatidios» que se agrupan en lo que se denomina un ojo compuesto. Algunos insectos tienen miles de omatidios, otros tienen muchos menos. Las células que integran estos ojos compuestos se denominan rabdómeros y utilizan lo que se conoce como opsinas rabdómeras, una categoría dentro de un tipo importante de receptores conocidos como opsinas. Los rabdómeros son un tipo único de células que recoge y transduce las señales luminosas que entran en los ojos compuestos. Los moluscos tienen unos ojos muy complejos pero formados de otra manera, y además no son iguales que los que observamos en vertebrados. Sin embargo, en cuanto el ojo de los vertebrados evolucionó, la «ocularidad» de éstos persistió obstinadamente, por lo que es difícil afirmar que los ojos de

todos los vertebrados no sean homólogos entre sí.

Aunque no son compuestos, los ojos de los vertebrados son sin embargo complejos. Contienen dos tipos principales de células sensibles a la luz conocidos como bastones y conos. Ambas clases de células son largas y estilizadas, pero sus propiedades de sensibilidad a la luz son distintas. Según el tipo de proteínas que utilice la célula para llevar a cabo la transducción de la señal luminosa, los bastones y los conos detectarán longitudes de onda de luz diferentes. Y las opsinas son la clave para comprender cómo se traduce la luz entrante a un formato que pueda interpretar el cerebro. Las opsinas forman una familia compleja de proteínas relacionadas entre sí que realizan más o menos la misma función, pero cada una con una longitud de onda de la luz distinta. Estas moléculas son cadenas de unos cuatrocientos aminoácidos que se pliegan formando una bonita estructura parecida a la de los receptores acoplados a proteínas G (GPCR) que vimos en el capítulo 2. Poseen siete regiones helicoidales y entre las hélices encontramos los llamados «bucles». En los seres humanos, estas proteínas están ubicadas en la membrana de los bastones y conos, las células receptoras de luz especializadas y situadas en la retina de nuestros ojos. Por extraño que parezca, las opsinas no siempre son exclusivas de los ojos, ya que en otros organismos pueden hallarse en lugares extraños que no se parecen a los ojos en nada. No obstante, en esos lugares también funcionan como receptores de luz.

Las diferentes opsinas detectarán distintas longitudes de onda de luz según la disposición específica de los aminoácidos en su estructura primaria (similar a un collar de cuentas). De hecho, algunos aminoácidos de la opsina situados lejos del sitio de unión a la retina pueden tener un efecto muy grande sobre qué longitud de onda de luz realiza la conversión de la opsina de la forma «cis» a la «trans». Estos aminoácidos, conocidos como «residuos de sintonización espectral» ponen en marcha respuestas en las células y son como los diales de ajuste del color en los viejos televisores. La señal que producen las opsinas en las células receptoras debe enviarse ahora al cerebro, lo cual se hace a través de una proteína G. Y si esto nos suena conocido es porque, como hemos señalado, las opsinas tienen la misma estructura que los GPCR que presentamos en el capítulo 2.

Las opsinas tienen una historia evolutiva fascinante. Las diversas proteínas de esta familia se han clasificado según su parentesco y su función. Las opsinas se dividieron primero en las llamadas proteínas Tipo I y Tipo II. Debido a que estos dos tipos de opsinas tienen secuencias de aminoácidos muy diferentes, se insertan en la membrana de diversas maneras e interactúan con múltiples tipos de cromóforos, derivan sin duda de dos proteínas ancestrales muy diferentes. De hecho, no cuesta imaginar que las estructuras de membrana heptahelicoidales de las opsinas Tipo I y Tipo II hayan convergido entre sí o, como hubiera dicho Darwin, se trate de analogías.

Las opsinas Tipo II tienen por sí solas una historia evolutiva interesante. Si bien la evolución precoz de las opsinas Tipo II es confusa, no hay duda de que estas moléculas están relacionadas con los GPCR. Tienen la misma estructura tridimensional, están acopladas a una proteína G y los aminoácidos de sus estructuras en forma collar de cuentas son similares. Y tal como describimos en el capítulo 1, los genes de las opsinas aumentaron para formar una gran familia génica mediante la duplicación de los mismos y a veces de la duplicación generalizada de los cromosomas. Hasta la fecha se han secuenciado miles de GPCR de distintos organismos: el último árbol filogenético de los GPCR tiene más de 100.000 genes. Cuando se analizan las miles de secuencias de opsinas disponibles junto con los GPCR existentes, podemos plantear preguntas específicas como: «¿Qué fue antes, la opsina o el GPCR?». En realidad ésta es fácil, porque es evidente que las opsinas llegaron tardíamente y que los GPCR existían mucho antes de que se especializaran en opsinas. Seguidamente podemos preguntar: «¿Cuántas opsinas Tipo II hay y cómo se relacionan entre sí?». Según Yoshinori Shichida y Take Matsuyama, biólogos de la Universidad de Kioto, hay cuatro clases principales de las Tipo II: opsinas ciliares, opsinas rhabdoméricas, fotoisomerasas y neuropsinas. Estas cuatro categorías se han diversificado porque han evolucionado para utilizar proteínas G diferentes en sus interacciones con la célula. Las dos últimas categorías son un tanto confusas y aún se sabe poco sobre ellas. Pero esto a nosotros no nos importa, porque son las opsinas ciliares y una de las rhabdoméricas las que posee el sistema visual de los vertebrados. Las opsinas rhabdoméricas son más comunes en los invertebrados como *Drosophila* y los

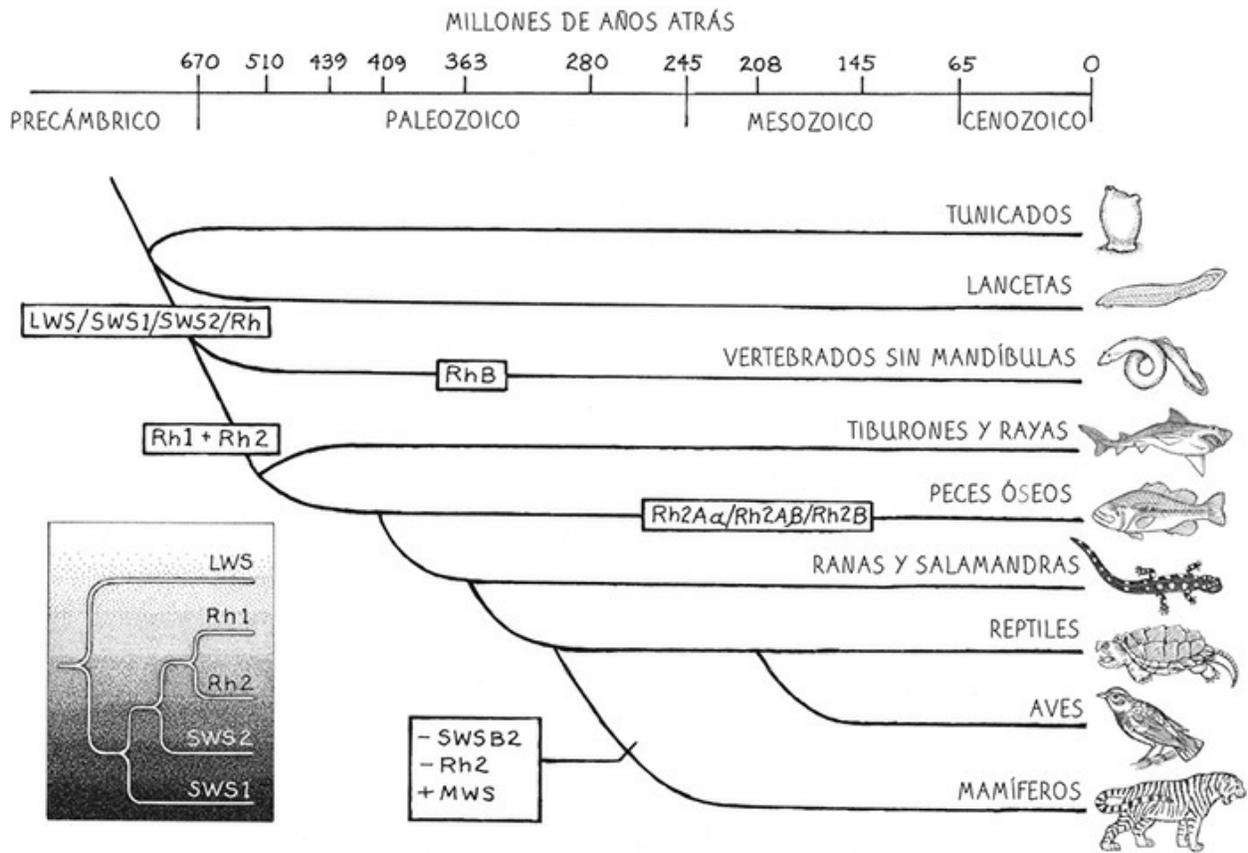
moluscos, aunque una opsina rabadomérica, la melanopsina, se halla también en vertebrados y tiene una función importante en el ritmo circadiano.

Antes de pasar a hablar de las opsinas que nos capacitan para ver los colores, examinemos algunos casos interesantes de cómo trabajan las opsinas en los ojos. El diminuto nematodo *Caenorhabditis elegans* no tiene opsinas en su genoma y sin embargo es capaz de detectar y responder a la luz, por lo general evitándola. Compensa el hecho de no tener genes para las opsinas sirviéndose de un receptor celular relacionado con los receptores del gusto que sí viene especificado en su genoma. Sucede que los nematodos no son los únicos en esto: las moscas de la fruta (o al menos sus larvas) tienen algo similar. En su estado de larva, la *Drosophila* es como una oruga, y su vida se limita a reptar y comer. A diferencia de las moscas de la fruta adultas, que tienen ojos complejos con cientos de omatidios en ellos, las larvas tienen parches oculares de tan sólo 12 facetas dispuestos a cada lado de la larva en una estructura llamada órgano de Bolwig. Los investigadores del mundialmente reconocido Laboratorio Jan, centro de neurobiología de la Universidad de California en San Francisco y conocido por sus investigaciones sobre las moscas de la fruta, mostraron que aunque hicieran que los órganos de Bolwig dejaran de funcionar, las larvas seguirían evitando la luz y, de hecho, lo harían igual de bien que una larva normal. Pero una larva carente de órganos de Bolwig respondía sólo a una longitud de onda de luz muy corta y no se inmutaba ante el rojo y el verde del espectro luminoso. Al parecer, algunas células ubicadas otra parte de la larva también detectaban la luz y transmitían la información. ¡Y cómo! Resultaba que el cuerpo de la larva de una mosca del vinagre está *cubierto* de receptores diminutos para la luz de longitud de onda corta. En realidad, estos receptores están estrechamente relacionados con los receptores del sabor que utiliza el *Caenorhabditis elegans* para detectar la luz. La moraleja es que existe más de una manera de detectar la luz y, lo que es más importante, que gran parte de los organismos desarrollarán tales sistemas si los necesitan.

Entre los detectores de luz, hay cinco clases de opsinas ciliares que son de lejos las más importantes de nuestro sistema visual y del de otros vertebrados. Como ya hemos mencionado, la retina de nuestros ojos, donde la luz que entra

se transforma en información nerviosa, posee dos tipos de células receptoras: los bastones y los conos. Los bastones tienen asociado un único tipo de opsina, mientras que los conos tienen cuatro diferentes. Los bastones utilizan la rodopsina, que detecta tonos monocromáticos con gran sensibilidad, y por lo tanto son importantes en la visión nocturna. Por otro lado, los conos son más versátiles aunque menos sensibles a la intensidad lumínica. Debido a las cuatro opsinas asociadas a los conos, cada una de estas células puede reaccionar individualmente a cuatro rangos diferentes de longitudes de onda de luz. Las longitudes de onda que pueden detectar los conos se clasifican más o menos en tres categorías: larga, media y corta. (¡Ojalá todas las nomenclaturas fueran tan sencillas!) La opsina que detecta la longitud de onda larga, o LWS, reacciona a la luz en la región del rojo del espectro cromático, mientras que la opsina que detecta la longitud de onda media (MWS) reacciona a la luz en la región del verde. Y la última categoría divide la reacción a la longitud de onda corta de luz entre dos opsinas –SWS1 y SWS2– que detectan el azul y el violeta, respectivamente.

Los cambios estructurales que se dan en las proteínas utilizadas para detectar las distintas longitudes de onda de luz son simples variaciones en la secuencia primaria de aminoácidos. Está claro que estas opsinas están relacionadas de algún modo, y una de las preguntas que podemos hacer es sencillamente: «¿Cómo?». Cabe destacar que cuando se demostraron las relaciones de las cinco opsinas ciliares, se hizo patente que la LWS es la hermana mayor de la familia, seguida de la SWS1 y luego la SWS2. Las más jóvenes del grupo son las rodopsinas de los bastones y la opsina que detecta la longitud de onda media. Contra lo que cabría esperar, esto indica que la detección de luz monocromática en vertebrados fue una idea evolutiva tardía (como muchos cuartos y quintos hijos en algunas familias). Los genomas completos de una gran variedad de vertebrados y «cuasi-vertebrados» (aquellos grupos de animales que están estrechamente relacionados con los vertebrados pero que carecen de vértebras, como ascidias, gusanos bellota y demás) revelan con bastante claridad que el antepasado de todos los vertebrados tenía LWS, SWS1, SWS2 y las rodopsinas de los bastones.



Árbol filogenético de los vertebrados que muestra dónde aparecieron y fueron eliminadas las opsinas. Por ejemplo, el nudo del árbol donde los vertebrados sin mandíbulas se separaron de los linajes vertebrados elementales de los tunicados y lancetas hace 670 millones de años adquirió las opsinas LWS, SWS1, SWS2 y Rh como consecuencia de una duplicación del genoma. El recuadro muestra la genealogía de la familia génica de las opsinas. Todas estas opsinas tienen un único antepasado común. En este árbol, las opsinas LWS se separaron primero, luego las SWS1 seguidas de las SWS2. Por último, las opsinas Rh se separaron unas de otras. Las zonas sombreadas del diagrama representan las longitudes de onda que detectan las opsinas. Empezando por abajo, la sombra negra representa la longitud de onda del morado al azul. La siguiente capa gris oscura representa el azul. La gris medio representa el verde. La gris clara representa del verde al amarillo y la zona blanca representa el rojo.

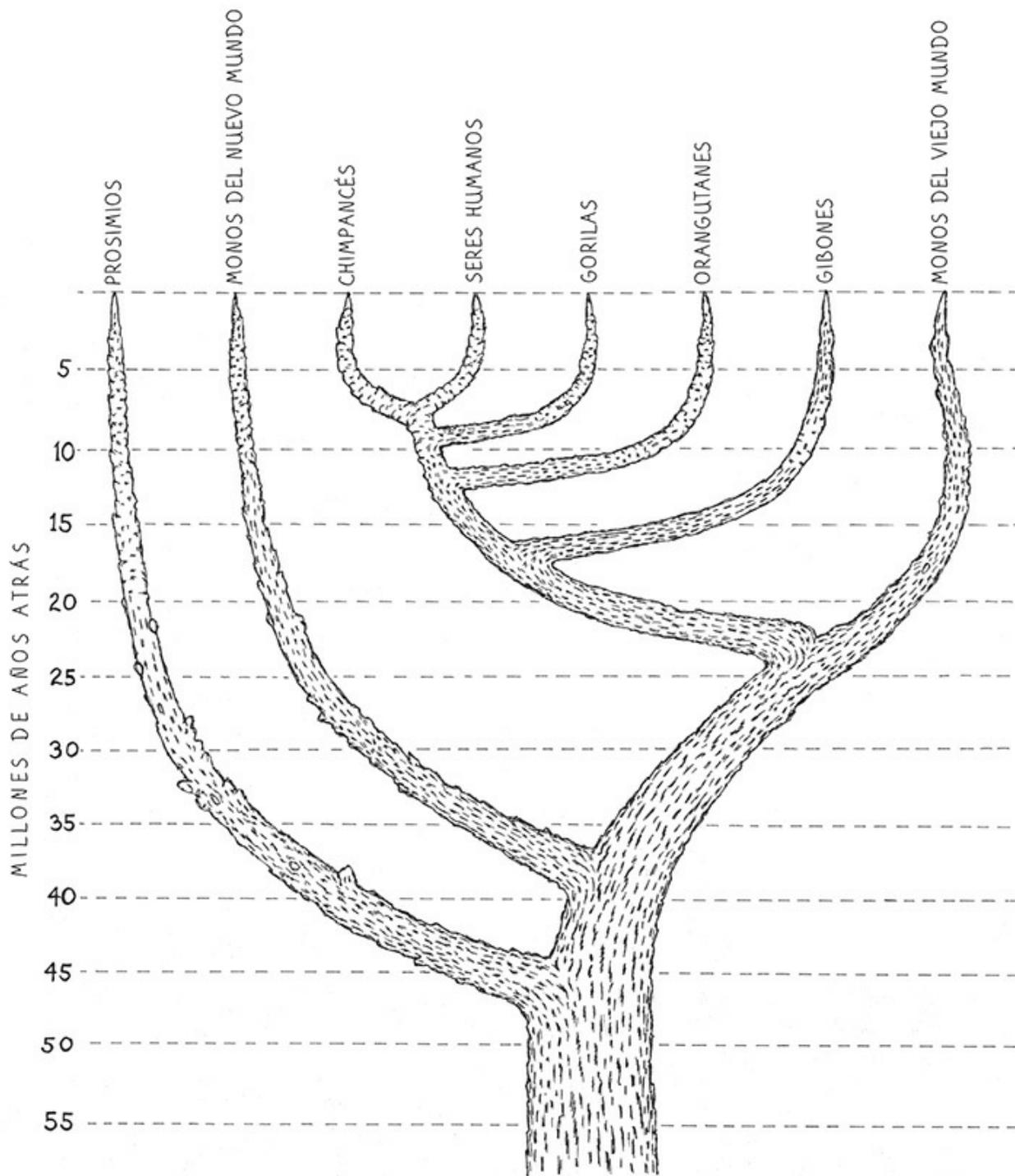
Así pues, ¿cómo evolucionaron las diversas combinaciones de opsinas? Como vimos en el capítulo 1, la evolución de las familias génicas no sólo se ve afectada por la divergencia de las especies, sino también por la duplicación de los genes. De modo que la opsina ciliar ancestral que existía en el antepasado de los vertebrados y cuasivertebrados, tales como equinodermos y tunicados, debió de haberse duplicado al menos dos veces para producir cuatro opsinas ciliares básicas en el antepasado de los

vertebrados. La única opsina que falta, MWS, apareció unos cien millones de años después en el ancestro de los vertebrados con mandíbulas por medio de otra duplicación génica. Es sorprendente que el mecanismo para una buena visión de los colores ya se encontraba en nuestros antepasados hace 500 millones de años.

Pero esto no significa que todos los organismos que ilustran la siguiente figura tengan visión cromática. Y no quiere decir que haya algo especial en la disposición de los genes de las cinco opsinas ciliares. Los genes de las opsinas son algo así como un comodín genómico: se pueden suprimir o duplicar con facilidad durante la evolución. Esto significa que en las diversas ramas del Árbol de la Vida los genes de las opsinas pueden tener historias muy diferentes, y no obstante tener una visión cromática totalmente funcional. Por todo ello, los investigadores han determinado que el catálogo de genes de las opsinas es muy complejo en algunos grupos de peces: por ejemplo, los peces cíclidos que habitan en el lago Victoria en África. Este grupo de peces explotó en poco tiempo en muchas especies con un grado de variabilidad asombroso en tamaño, forma y, lo que es más importante, en color. Si el color es un componente importante para que las numerosas especies diferentes se reconozcan mutuamente, entonces un mecanismo más preciso de reconocimiento de colores supondría una innovación evolutiva de gran importancia para ellos. De hecho, en las especies cíclidas examinadas hasta la fecha hay siete opsinas ciliares en los conos en lugar de las cuatro habituales, incluidas dos opsinas adicionales que detectan luz en el rango de la longitud de onda del verde y otra que la detecta en el rango del violeta.

En cambio, se cree que muchos de los genes de opsinas que tenían nuestros antepasados vertebrados se perdieron a medida que evolucionaban los mamíferos. Sucede que la colección completa de opsinas ciliares del antepasado de los vertebrados se redujo en el ancestro de los mamíferos: pasó de cinco a sólo tres. Las que quedaron fueron LWS, SWS1 y rodopsina. Podemos deducir esto del examen de mamíferos no placentarios (como el ornitorrinco y el equidna australianos) y de varios mamíferos placentarios y la consecuente reconstrucción posterior del antepasado de todos los mamíferos (véase el capítulo 1). El ornitorrinco no deja de ser un enigma, porque

aparentemente ha conservado su gen SWS2 al tiempo que perdía el SWS1. El resultado de este análisis es que el antepasado de los mamíferos probablemente fuera dicromático (sólo LWS y SWS1). Y de hecho, la mayoría de los mamíferos son dicromáticos, sólo tienen dos tipos de conos, uno con LWS y otro con SWS1. Los primates, así como algunos otros grupos dispersos de mamíferos, han recuperado el tricromatismo (tres opsinas en los conos).



Árbol de los primates que muestra las ramificaciones en esta familia de mamíferos. La escala temporal para las divergencias se muestra a la izquierda.

Esto plantea la cuestión de cómo los primates volvimos a ser tricromáticos (LWS, SWS y MWS), e incluso, en raras ocasiones, tetracromáticos (LWS, SWS1,

SWS2 y MWS). Pero si estos escenarios parecen un poco extraños, se vuelven aún más confusos cuando los examinamos más de cerca. Porque hay dos formas de ser un primate tricromático, y podemos comprender mejor lo que ocurre si estudiamos primero cómo están relacionados los primates entre sí. Durante los últimos cincuenta millones de años aproximadamente, el antepasado de los primates modernos dio lugar a más de trescientas especies vivas y una gran cantidad de otras ahora extintas. El primer linaje existente que se ramificó en la parte de los primates del Árbol de la Vida fue el grupo de los «primates inferiores», que incluye los lémures, loris y galagos. A renglón seguido, los tarseros se separaron de un antepasado común con el resto de los primates vivos. Luego llegaron los monos del Nuevo Mundo seguidos de los monos del Viejo Mundo. Las especies vivas de nuestra rama del árbol de los primates, los homínidos, incluyen los gibones, orangutanes, gorilas, chimpancés y bonobos, y a nosotros.

Con respecto a las opsinas y la visión cromática, los humanos somos primates tricromáticos típicos o «habituales» con la disposición característica de la única rodopsina de los bastones y las cuatro opsinas de los conos en nuestro genoma, al igual que los monos del Viejo Mundo y el resto de nuestros parientes homínidos vivos. Así que ¿por qué decimos que somos tricromáticos si tenemos las cuatro opsinas de los conos? Esto es peliagudo. En realidad, la mayoría de los humanos tiene las cuatro opsinas, LWS, MWS, SWS1 y SWS2, y por lo tanto debería ser tetracromática. Pero lo que ocurre verdaderamente es que la absorción bloquea una de las dos opsinas de onda corta y se comporta como si sólo existiera una única opsina SWS. Lo que es aún más curioso es que la disposición «no habitual» de los genes de las opsinas en los monos del Nuevo Mundo produce un caso extraño en el que los machos son dicromáticos y las hembras son dicromáticas y también tricromáticas.

Esperemos que esta descripción de las opsinas y sus genes no haya sido demasiado difícil de seguir. Pero es evidente que estos «comodines» genómicos pueden producir visión cromática de muchas formas, y la historia de las opsinas demuestra la plasticidad del proceso evolutivo cuando los loci son tan inestables como son los de las opsinas. En cualquier caso, una vez que

se ha captado la historia de las opsinas, se entiende fácilmente cómo la disposición de los conos en la retina de los ojos de los vertebrados lleva a la plétora de colores que percibimos nosotros y nuestros parientes primates. En el capítulo 5 volveremos sobre cómo el cerebro transforma la rodopsina de los bastones y las cuatro opsinas ciliares en lo que «vemos».

#### LAS ONDAS SONORAS SE TRANSFORMAN EN IMPULSOS NERVIOSOS

Para comprender cómo funciona el sonido, debemos conocer cómo funcionan nuestros oídos. Una vez tengamos un buen conocimiento de ellos, podremos hablar de cómo «oyen» otros organismos. Nuestros oídos están formados por un conjunto de estructuras de gran complejidad que los científicos dividen en tres áreas: interna, media y externa. Empezamos por donde entra el sonido, el oído externo. Éste se compone del gran pabellón auricular cartilaginoso (u oreja, la parte visible del oído), más el conducto auditivo externo o canal del oído. En pocas palabras, el pabellón auricular recoge las ondas sonoras – vibraciones– del entorno y las dirige al canal auditivo, que a su vez las desvía hacia el oído medio, en concreto al tímpano.

El oído medio está formado por el tímpano y tres huesecillos llamados osículos. Los tres osículos están conectados en una sucesión compleja. Unido al tímpano se encuentra el primer osículo, conocido como martillo, que a su vez está unido al yunque. Éste se une luego al estribo cuyo extremo interno encaja en una estructura del oído interno llamada «ventana oval». Esto completa el sistema mecánico del oído medio. A diferencia de los oídos externo y medio que están llenos de aire, los órganos del oído interno están llenos de fluido. Constan de tres estructuras principales: la cóclea (responsable de la audición) y el utrículo y el sáculo (responsables del equilibrio). Así pues, este sistema de órganos es el soporte de dos sentidos: equilibrio y audición. La cóclea, al igual que los osículos, es ósea y tiene forma de caracol, lo que resulta interesante. En su interior repleto de fluido se encuentra el órgano de Corti, que es el receptor sensorial de la audición. Este órgano está dotado de células pilosas que transmiten los impulsos desde el

sonido exterior al cerebro.



La diversidad de los «oídos». Los poseedores de estos «oídos» se indican en la figura.

Da la impresión de ser todo un ingenio. ¿Cómo funciona? Bueno, todo empieza fuera del oído, con un sonido. Los sonidos están hechos de ondas que el oído tiene que recoger e interpretar. Para ello, el pabellón auricular actúa

de colector desviando las ondas hacia el canal del oído. El pabellón también desempeña un papel al determinar el volumen de los sonidos y de donde proceden. Es, por así decirlo, el guardián de la puerta de los sonidos, pero es muy poco estricto, pues deja entrar a todos. Tras viajar a lo largo del conducto, las ondas chocan con el tímpano. Llamado así con acierto (también se conoce como membrana timpánica), el tímpano inicia la transformación de las ondas sonoras en energía mecánica mediante movimientos adelante y atrás en respuesta a dichas ondas.

Las características de los diversos sonidos, como el volumen, el tono, el timbre y el ritmo, ocasionarán distintas vibraciones en esta membrana, lo que conlleva a que podamos distinguir los sonidos. Debido a que el martillo está unido al tímpano por el lado del oído medio, la energía mecánica procedente de las vibraciones de la membrana viaja a través de este huesecillo por el yunque y sigue hasta el estribo, que se mueve de dentro a fuera. Estos movimientos del estribo imitan los sonidos iniciales que entran en el oído externo, completando la transformación de las ondas sonoras en señales mecánicas y transmitiéndolas hacia delante a través de su contacto con la membrana oval situada a la entrada del oído interno. Esta membrana está cubierta de cilios que recogen el movimiento mecánico y lo envían al cerebro. El movimiento de estos cilios es específico para las distintas señales mecánicas. Por ejemplo, si la energía mecánica que llega a la cóclea lleva consigo información sobre el tono, estimula sólo una pequeña porción de cilios, y de un modo específico para cada tono que pueda interpretar el oído humano. Otros no se estimularán. Los tonos que no oímos son los que no estimulan ningún cilio de la cóclea.

Nuestro cerebro está recibiendo constantemente información de los cilios de nuestra cóclea; y para que la información llegue ahí, las ondas sonoras tienen que sufrir una transformación más. Todos los cilios de la cóclea están conectados a células nerviosas, y la estimulación mecánica de esas células pilosas se convierte en impulsos nerviosos, que se envían al cerebro a través del nervio auditivo (el octavo nervio craneal). Al igual que cuando se ven objetos con los ojos, el mensaje final que recibe el cerebro para su interpretación es una señal que ha sido transducida desde el oído por medio de

interacciones célula a célula y, sí, lo adivinasteis, esto sucede en las células del sistema nervioso a través de una reacción de transducción acoplada a una proteína G. El impulso entra entonces en el cerebro y se procesa (véase el capítulo 5).

UN CANÍBAL LE DICE A OTRO MIENTRAS SE COMEN A UN HUMORISTA: «ÉSTE NO SABE TAN GRACIOSO COMO YO PENSABA»

La facultad de degustar es un sentido importantísimo, y hace mucho tiempo que los especialistas en conducta animal admitieron que incluso los animales más simples con cerebros pequeños tienen preferencias alimentarias. No obstante, lo más probable es que el sentido del gusto que tenemos sea un invento de los bilaterales. Los insectos y otros invertebrados detectan los sabores del mismo modo que los olores, a través del contacto con moléculas que se procesan en su sistema olfativo. La gran diferencia es que en el olor intervienen por lo general moléculas que existen en el aire y en el gusto moléculas que entran en contacto directo con el propio animal; por eso, el gusto se conoce como «quimiorrecepción de contacto». Hace más de un siglo que un naturalista tenaz de nombre A. G. Bourne estableció que el sentido del gusto existe en animales simples como las sanguijuelas. Bourne describió de forma peculiar un sencillo experimento que llevó a cabo en la naturaleza, en el cual pudo apreciar que las sanguijuelas utilizaban una especie de proceso sensorial (él prefería llamarlo sentido del gusto) para detectar la presencia de una «comida»:

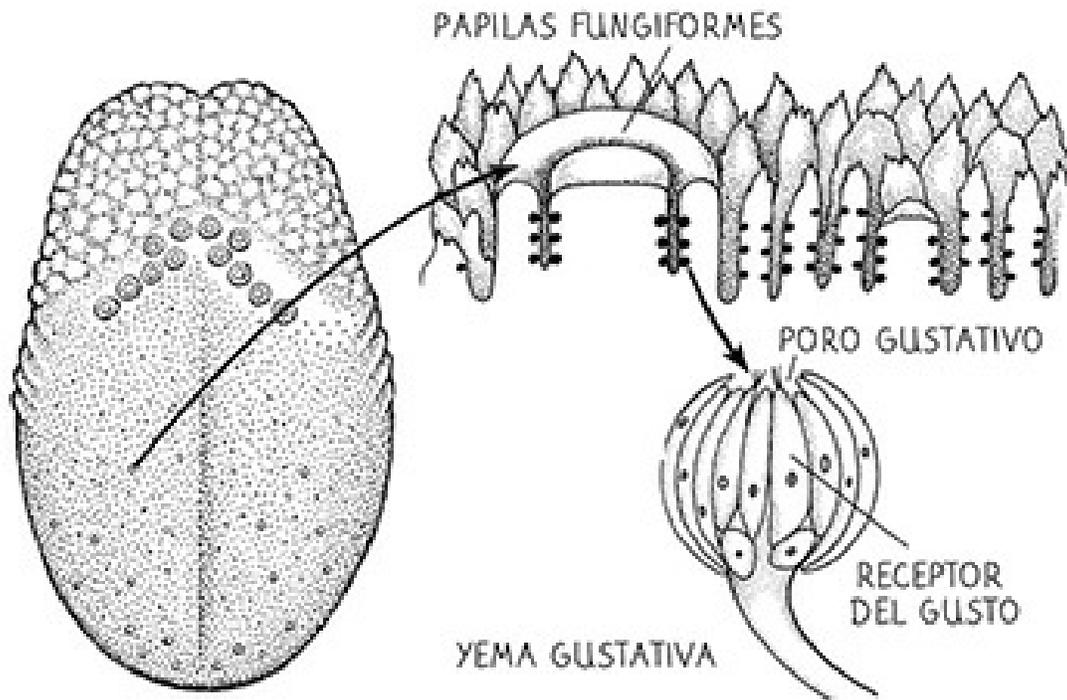
Cogí con mis dedos una piedra del fondo cenagoso de un arroyo adormecido y poco profundo. Volví al mismo sitio pocos minutos después y vi unas cuantas sanguijuelas (aparentemente *Hirudo* sp.) nadando cerca del lugar. Al día siguiente, con la sospecha de que habían «olido» o «degustado» mi mano en el agua, removí la superficie del cieno con un palo pero no apareció ninguna; cuando el agua se aclaró de nuevo «me lavé las manos» en ella sin agitar el cieno y enseguida salieron algunas sanguijuelas y nadaron de un lado a otro. El cieno blando en el que viven tiene una profundidad de unos 30 cm, y aunque el hecho de remover su superficie con un palo no fue suficiente para hacerlas salir, el «olor» de mis manos parece haberse propagado y extendido en un área de más

de un metro.

Además de tener ellos mismos buen sabor, algunos moluscos utilizan su sentido del gusto para construir sus conchas. Usando simulaciones por ordenador, Alistair Boettinger, Bard Ermentrout y George Oster, de la Universidad de California en Berkeley, han demostrado que la forma y la coloración de muchos tipos de conchas se pueden explicar tomando como modelo lo que degusta el molusco utilizando su manto en forma de lengua. Básicamente, el manto se solapa con el borde de la concha que se va a crear. A medida que la concha crece, el molusco degusta el material –un simple compuesto de carbonato cálcico– del día anterior. Puesto que puede degustar diferentes concentraciones de carbonato cálcico y otros aspectos de la concha, puede utilizar los sabores para recordar dónde retomar lo que dejó el día antes. Boettinger y sus colegas incorporaron este notable proceso de degustación a su modelo, y ¡bingo! Pudieron simular con facilidad muchas de las infinitas formas de conchas y patrones de coloración de moluscos que se observan en la naturaleza.

Más cerca del mundo natural, los científicos saben que el simple nematodo de las mil células puede percibir el sabor de compuestos salados, dulces y amargos. Y es bien sabido que los insectos también pueden detectar una amplia gama de sabores. En general lo hacen por medio de órganos bucales especializados, pero también han desarrollado otras formas muy eficaces e interesantes de saborear lo que comen. Algunas especies de mariposas y la mosca común pueden degustar con las patas, pues poseen órganos del gusto en esos apéndices. Esto les permite posarse sobre un posible alimento, degustarlo y decidir si quieren dedicar el tiempo a inclinarse sobre dicho alimento y comérselo. En algunas hembras de otras especies de insectos, los órganos del gusto se encuentran en los oviposidores que utilizan para poner los huevos. Esto les permite degustar el medio vegetal, fúngico o bacteriano, donde podrían depositar sus huevos. Si sabe bien, pone los huevos. Nuestro principal órgano del gusto es, por supuesto, la lengua. No os recomendaríamos hacer esto con nadie salvo que le conozcáis bien, pero mirad de cerca la lengua de una persona y veréis unos granitos en la superficie. Si no se ven bien, poned un

poco de vino tinto o algo de Kool-Aid<sup>2</sup> azul y esos granitos, o papilas, se revelarán de un modo espectacular. Éstas contienen unos pequeños órganos llamados botones gustativos que por desgracia no serán visibles. Después de aplicar el vino o el Kool-Aid azul, las papilas resaltarán como pequeñas estructuras rosa pálido sobre un fondo azulado. Si podéis mirar muy de cerca, los granitos tienen un poco el aspecto de setas, de ahí su nombre: papilas fungiformes. Otras zonas de la lengua tienen tipos de papilas diferentes; éstas se encuentran en la parte posterior o incluso en la epiglotis, por lo que estas zonas también pueden transmitir los sabores al cerebro. Una vieja leyenda afirmaba que las diferentes partes de nuestra lengua –es decir, los distintos grupos de papilas fungiformes– eran las responsables de los distintos tipos de sabores. Pero ahora se cree que los receptores gustativos se distribuyen de un modo bastante equitativo por toda la lengua, de modo que todos los sabores se degustan por igual según la ubicación del receptor correspondiente dentro de la boca.



Primer plano de la lengua humana.

Cada botón gustativo contiene entre 50 y 150 células receptoras agrupadas

como un racimo de plátanos y unidas en su base a una fibra nerviosa. En el otro extremo de estas células alargadas, mirando hacia la superficie de la lengua, hay una zona donde se juntan las puntas formando una bolsa pequeña llamada poro gustativo. Las células receptoras gustativas poseen microvellosidades que se insertan en el poro gustativo. Las proteínas receptoras que en última instancia detectan las moléculas responsables del gusto se encuentran en estas microvellosidades. Todos los receptores gustativos del racimo están conectados a sendas neuronas que se activan cuando dichos receptores reaccionan con ciertas de moléculas específicas.

Muchas moléculas generarán un sabor en este sistema, pero sólo hay un tipo de receptor gustativo por cada célula gustativa. Hay cinco clases de sabores: salado, dulce, ácido, amargo y uno extraño llamado «umami». Los receptores de lo salado detectan moléculas como el cloruro sódico y ayudan al cerebro a modular el equilibrio salino del cuerpo. Si alguien degusta demasiada sal –tanta que el cerebro decide que «eso rompería el equilibrio salino»– entonces es probable que la persona deje de comer. El receptor de lo dulce detecta moléculas como la glucosa y la sacarosa, y detectar este sabor permite decir al cerebro: «Bien, estupendo, aquí llega un poco de energía». Los receptores de lo ácido detectan las moléculas de pH bajo (las ácidas), y moléculas como la quinina activan los receptores de lo amargo en los botones gustativos. Los receptores del extraño sabor umami detectan aminoácidos como el glutamato que da su típico sabor fuerte a los caldos, quesos y otros mejunjes que contienen muchos aminoácidos.

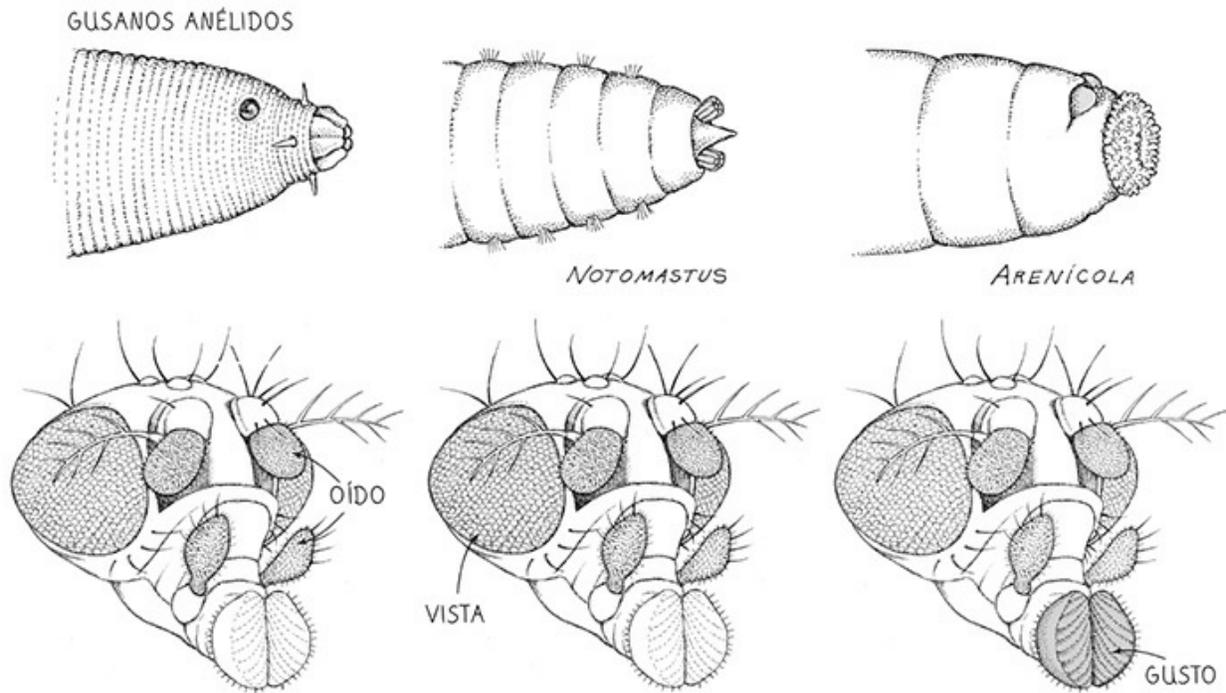
Una vez que el receptor gustativo reacciona con una molécula de sabor ácido, como por ejemplo el vinagre, ¿cómo se transfiere esta información al cerebro? Una vez más intervienen los receptores acoplados a proteínas G. Pero un momento: las proteínas G no son la única manera de producir el sabor. Por ejemplo, mientras que el dulce, el amargo y el umami utilizan receptores acoplados a proteínas G (GPCR), el agrio y el salado usan distintas vías para hacer llegar la señal a la célula. El salado, producido por moléculas como el cloruro sódico, actúa mediante la reacción con los canales iónicos que permiten el paso del sodio al interior de la célula. Este movimiento de iones sodio despolariza la zona de entrada y crea un potencial de acción que luego

se transmite a las neuronas que están conectadas a los receptores. El agrio también actúa a través de un canal iónico que en este caso transporta el hidrógeno del ácido que causa este sabor al interior de la célula, lo cual altera una vez más la polaridad de la célula e induce un potencial de acción que se transmite a las neuronas conectadas a los receptores del sabor agrio. Los cientos de miles de receptores que hay en nuestra lengua son muy sensibles; sin embargo, una parte de nuestro sentido del gusto se ve realzado por los receptores del olfato y la temperatura de la lengua cuando las moléculas de sabor entran en contacto con ella.

## OLOR

Al igual que el gusto, el olfato es un sentido que se encarga de detectar información química del mundo exterior; por ello se conocen como sentidos quimiosensoriales. Los olores no son más que las sensaciones que produce nuestro cerebro al interpretar la presencia, la ausencia y la mezcla de moléculas que flotan en el aire. Ese olor desagradable procedente del cubo de la basura se produce porque algunos microbios y otros pequeños organismos degradan los desperdicios creando una emisión de compuestos de azufre y metano (entre otros productos químicos). Los olores entran en el cuerpo de los organismos por muchas vías. Por ejemplo, un nematodo olfatea con unos pequeños botones sensoriales situados cerca de la boca. Los nematodos son diversos, y en sus distintas especies el órgano del olfato varía mucho, pero en líneas generales el aparato consiste en una «sensilia» pilosa. La sensilia se encuentra justo debajo de la cutícula externa y está compuesta de una célula canal que contribuye a formar el botón; una célula tubular que protege el botón como una funda y una célula nerviosa (neurona) que procesa la información de los olores. Las tres células se extienden por el interior del cuerpo de los nematodos. Las sensilias detectan las sustancias químicas del entorno y la información que proporcionan se envía a otras partes del cuerpo del gusano. El nivel de detección que pueden lograr las simples sensilias es tan preciso que, por ejemplo, cuando el nematodo común de laboratorio *Caenorhabditis*

*elegans* emerge de su envoltura larvaria utiliza su sentido del olfato para determinar cuántos nematodos hay en las cercanías y cuánta comida hay. ¡Vaya con el olor corporal! Si el olor de la comida supera el olor corporal de otros nematodos, entonces se queda y come. Si el olor corporal supera el olor de la comida, el nematodo actúa con prudencia y va a otro lado a buscar alimento.

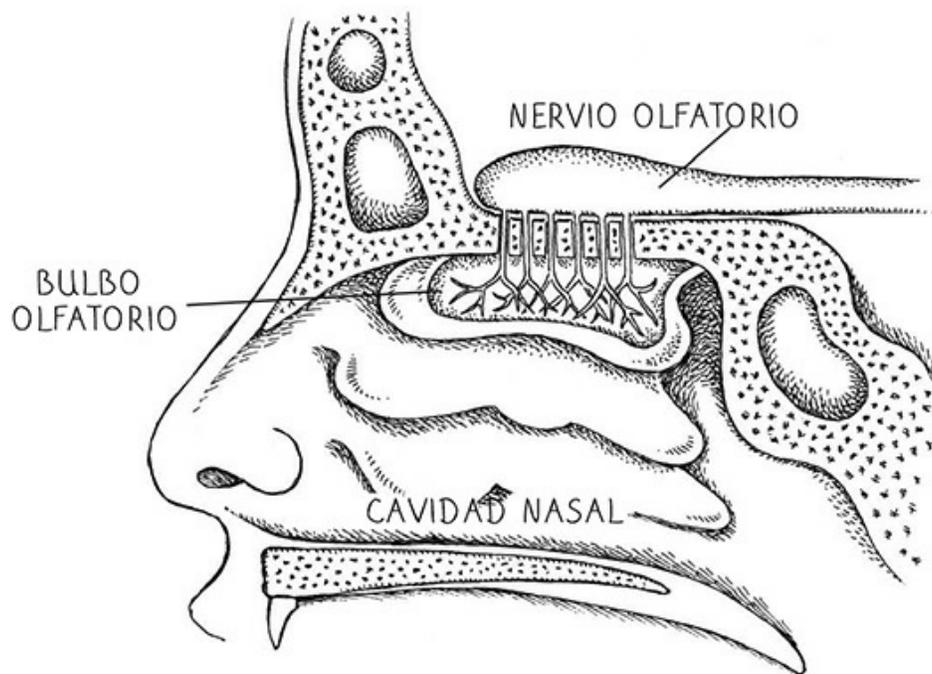


Cabezas de nematodos (arriba) y mosca (abajo) que muestran los puntos de entrada (zonas sombreadas) de los distintos tipos de estímulos externos.

Las moscas de la fruta tienen, sin embargo, otra serie de órganos olfativos. Ante todo utilizan las antenas como órganos receptores de los olores, pero también usan los palpos maxilares. Estas estructuras son protuberancias semejantes a botones que salen hacia fuera y hacia arriba cerca de la probóscide (boca). El palpo maxilar y la antena están compuestos de células que incluyen cutículas y muchas estructuras pequeñas similares a pelos también llamadas sensilias (la misma palabra que en el *C. elegans*, pero tal vez no sea lo mismo). Las sensilias de la mosca del vinagre contienen células nerviosas olfativas. En el órgano más simple de los dos, por cada palpo maxilar hay 60 sensilias que salen de la superficie y dos neuronas olfativas por sensilia, lo que da un total de 120 neuronas olfativas en cada palpo. Las

dos neuronas hermanadas responden de manera distinta a las sustancias químicas que detectan. Puesto que son dos células, en la mosca existen tres maneras de responder a una señal de olor. Es posible que la célula 1 se estimule y la 2 no; y viceversa, que se estimule la célula 2 y la 1 no; y puede que respondan las dos. Si no responde ninguna de las dos, entonces simplemente no hay olor. Esto ofrece a los investigadores una forma computacional de estudiar los olores en el cerebro de *Drosophila*.

El tercer segmento de la antena de la mosca contiene la mayoría de las células que procesan el olfato. Este segmento tiene unas mil doscientas neuronas olfativas. Las sensilias de las antenas son algo más complejas que las de los palpos. Existen cuatro tipos principales de sensilias: basicónicas pequeñas, basicónicas grandes, tricoideas y celocónicas. Las más numerosas son las basicónicas y se han estudiado con cierto detalle. Existen unos dieciséis tipos de neuronas olfativas que se combinan en parejas en cada sensilia basicónica. A diferencia de las sensilias del palpo maxilar, ello proporciona a las sensilias de las antenas la capacidad de oler una variedad increíble de aromas. Con esta cantidad de neuronas, John Carlson y sus colaboradores de la Universidad de Yale señalaron que «en principio, si cada clase de NRO (neurona receptora olfativa) representa una unidad de codificación binaria, las 16 clases que se describen aquí codifican 216 códigos binarios, o lo que es igual unos 65.000 olores distintos». No obstante, los mismos investigadores constataron que es muy probable que la cantidad de olores que una mosca puede asimilar no es ni mucho menos tan grande. Esa enorme cantidad teórica es sólo el resultado de utilizar un código combinatorio de impulsos.

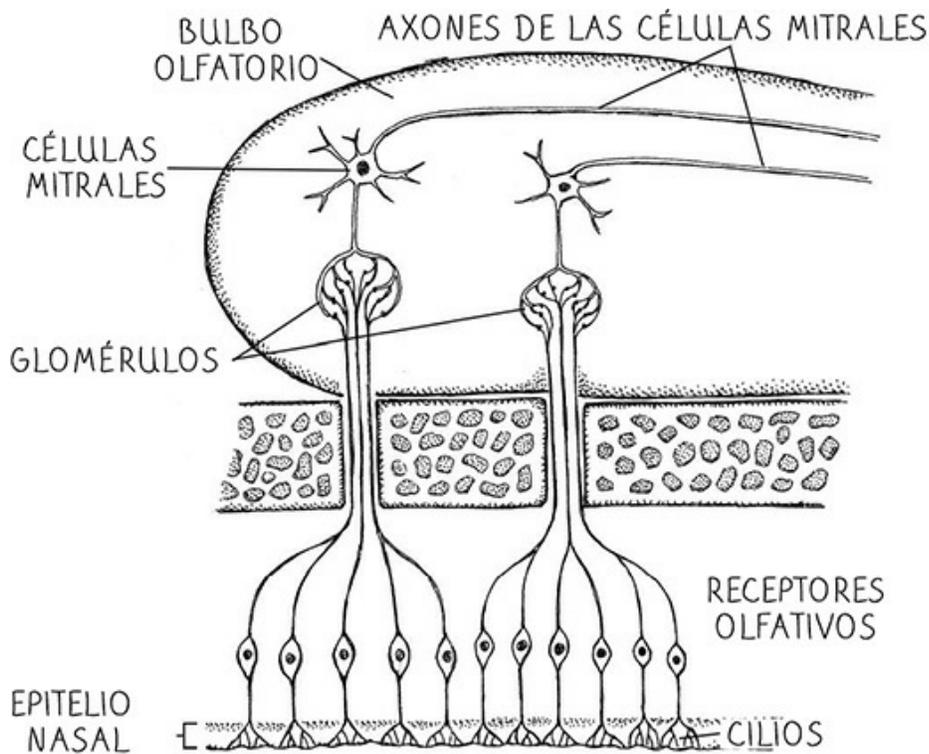


Sección transversal de los sistemas olfativos externo e interno humanos.

Las fosas nasales humanas son un poco como los botones de los nematodos y las antenas de las moscas. Nuestras zonas nasales receptoras son sólo de unos 2,5 cm<sup>2</sup>, pero en esta superficie tan pequeña hay más de cincuenta millones de células receptoras sensoriales. Sin embargo, nuestro sistema olfativo sólo puede detectar moléculas con unas determinadas propiedades. Las moléculas aromáticas han de ser ante todo hidrosolubles. En esencia, somos incapaces de oler algo que esté en el aire y que no sea hidrosoluble. Otras propiedades que ha de tener un aroma son una elevada presión de vapor, baja polaridad (una característica química) y actividad superficial. La mayoría de los olores son también moléculas relativamente pequeñas. Los olores que recogen nuestras fosas nasales interaccionan luego con los receptores, moléculas diminutas que transmiten la información al cerebro. Estos receptores se encuentran en la superficie de unas vellosidades llamadas cilios, pero cómo detectan y transmiten la información sigue siendo objeto de discusión.

Si pudiéramos mirar dentro de nuestra nariz, veríamos que la superficie del área nasal (también llamado epitelio nasal) está revestida de cilios que se

hacían en una capa muy fina de la mucosa epitelial (unos 0,06 mm de espesor total). La capa de mucosa es importante porque baña los cilios en fluido y hace que el contacto de los cilios con los odorantes sea más eficiente. La capa de mucosa está compuesta de lípidos que son importantes en el transporte de las moléculas aromáticas por todo el conducto nasal, ya que los aromas que olemos son solubles en esa capa mucosa de lípidos, lo que les brinda la capacidad de interaccionar con los receptores ciliares. De cada neurona receptora olfativa salen unos cilios similares a pelos que parecen látigos, en los que residen las proteínas receptoras que interaccionan con las moléculas aromáticas. Estas neuronas olfativas se reúnen en los llamados glomérulos, que son agrupaciones de 10 a 100 células que convergen. A su vez, grupos de glomérulos convergen en las células «mitrales» ubicadas en el bulbo olfatorio del cerebro. Las células mitrales son algo así como centros de transmisiones que permiten al bulbo olfatorio comunicarse con el resto del cerebro (véase el capítulo 5). En este punto debemos señalar que existe un segundo tipo de mecanismo olfativo en vertebrados que también transmite olores y sensaciones interesantes e importantes a nuestro cerebro. Esta ruta alternativa se denomina sentido trigémino, y se considera olfativo porque en él participan neuronas integradas en el epitelio olfativo que acabamos de describir. Estas sensaciones «parecidas al gusto» son, por ejemplo, la irritación que provocan algunas cebollas o el frío o calor que se experimenta cuando se ingieren alimentos tales como las mostazas y pimientos picantes, o la sensación de cosquilleo que producen los mentoles refrescantes.



De cada neurona receptora olfativa sobresalen unos cilios semejantes a pelillos que parecen látigos, en los cuales residen las proteínas receptoras que interaccionan con las moléculas aromáticas.

Antes mencionamos que el modo en que se activan los receptores olfativos se ha convertido en objeto de discusión en el estudio del olfato. Cuando existe una relación de quimiorrecepción entre una molécula aromática y su receptor, suponemos que sucede porque dicha molécula interacciona físicamente con el receptor. Esto cambia en cierto modo su configuración, y a su vez afecta a la célula receptora olfativa. ¿Qué ocurre a continuación? ¡GPCR! Más concretamente, los GPCR de tipo olfativo conectan con la ruta del AMPc de la que ya hemos oído hablar tanto. No obstante, aquí el supuesto es que existe un contacto físico de la molécula aromática con el receptor y que la activación viene inducida por dicho contacto. Pero Luca Turin, biofísico que trabaja ahora en el MIT, ha sugerido (después del trabajo de Malcolm Dyson de la década de 1930) que las moléculas aromáticas vibran cuando están cerca de los sitios activos de los receptores. Esta vibración permite que los electrones de la molécula de olor «abran un túnel» a través de la molécula y activen el receptor para inducir el GPCR en el interior de la célula. Debido a que no es

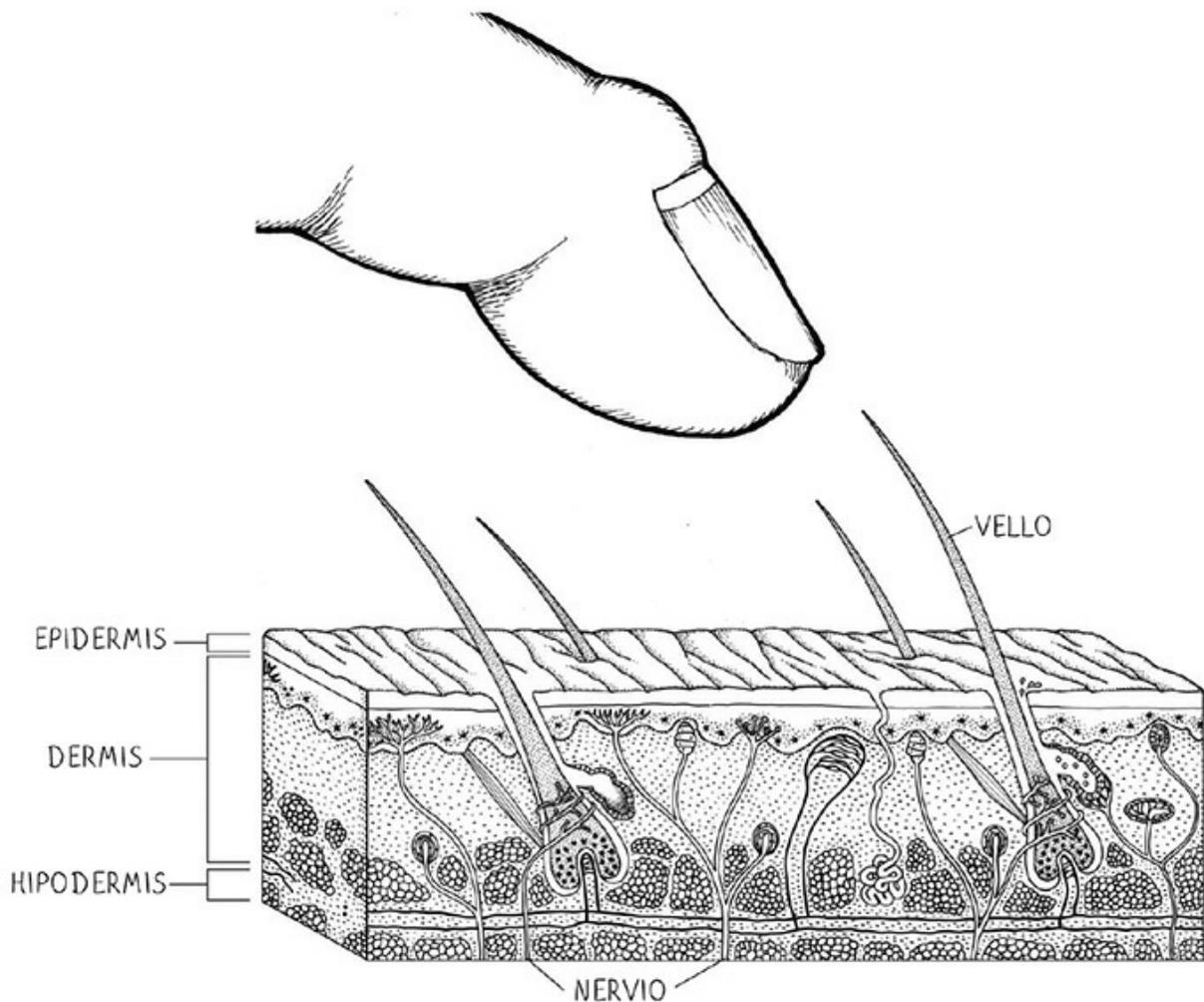
necesario que la molécula aromática haga contacto con el receptor y a que la conformación de éste último no sufre un verdadero cambio, este modo de activar un receptor se conoce como «mecanismo de la tarjeta magnética». Esto contrasta con la forma de pensar habitual acerca de cómo trabajan los quimiorreceptores, que es más «un mecanismo de cerradura-llave».

Según lo que piensa Turin sobre la recepción del olor, esta funciona más como la vista, en la que la luz de longitudes de onda distintas interacciona con diversas opsinas. En el mundo de Turin, las moléculas aromáticas tienen cualidades vibratorias distintas que pueden detectar las moléculas receptoras olfativas. Aunque es posible que el hecho de que Turin haya resucitado esta idea tan interesante sobre el olfato tuviera mucho sentido, el pensamiento convencional sigue siendo que la conexión GPCR hace que el mecanismo cerradura-llave sea la mejor explicación para el olfato. Y hasta la fecha, toda señalización celular mediada por GPCR parece llevarse a cabo por el cambio de conformación de la proteína receptora unida a la membrana, lo que indica que la tarjeta magnética podría no ajustarse a las reacciones de los receptores acoplados a proteínas G. Es más, los experimentos de Andreas Keller y Leslie B. Vosshall en la Universidad Rockefeller de Nueva York no respaldan la teoría vibratoria. Vosshall y Keller utilizaron una predicción específica de la teoría vibratoria, varios seres humanos y algunas vainas de vainilla para demostrar que dicha teoría no se sostiene o que, en el mejor de los casos, no puede explicar todos los aspectos de cómo funciona la detección del olor. Pero sí señalan al inicio de sus experimentos que «en la actualidad no existe una teoría satisfactoria que explique cómo provoca una molécula determinada la percepción de un olor en particular». Vosshall explica que, si bien las pruebas actuales no son consecuentes con la hipótesis de la cerradura y la llave, *no demuestran* que ese sea el mecanismo por el que se produce la detección del olor. Así que daremos por terminada nuestra descripción de cómo se percibe el olor y simplemente hagamos un alto y absorbamos el olor las rosas.

El tacto es sin ningún género de dudas nuestro sentido más básico. Sin él, no podríamos sentirnos verdaderamente parte del mundo que nos rodea. Y para comprender este sentido vital, debemos conocer el mayor órgano y el más extendido del cuerpo humano: nuestra piel. Para empezar por el principio, la mayoría de los organismos tienen un interior y un exterior. Algunos, como las bacterias y las arqueas, tienen simples paredes celulares que separan el interior del cuerpo de su superficie externa. Aquí no hay ambigüedades. Pero convertirse en un organismo multicelular cambia la historia de manera espectacular. Durante los 1.500 millones de años de vida eucariótica, el «interior» y el «exterior» han evolucionado de distinta manera. Esa forma diferente de crear un interior y un exterior ha influido en el modo en que los distintos organismos perciben el mundo circundante que entra en contacto directo con su cuerpo. Con la creciente complejidad de los organismos, que entraña una cantidad cada vez mayor de células y tejidos, llegó la necesidad de recluir estos tejidos en distintas partes del cuerpo. Y en muchos casos, era necesario proteger el conjunto de los diferentes tejidos del mundo exterior.

Las plantas han desarrollado tres tipos principales de sistemas de órganos: dérmico, vascular y radicular. El sistema dérmico es la cubierta protectora externa de la planta y cumple una función «equivalente a la de la piel». Y aunque hemos visto que hay una polémica sobre si las plantas tienen algo parecido a un sistema nervioso (véase el capítulo 2), esta capa dérmica se comunica, a través de interacciones moleculares, con otros tejidos de los sistemas vascular y radicular. Los llamados animales inferiores, como los cnidarios, han desarrollado una forma distinta y más bien primitiva de mantener el mundo exterior alejado de sus entrañas. Estos animales también se denominan «diblasticos» debido a que tienen dos capas de células – endodermo y ectodermo– que corresponden al interior y el exterior del animal. Lo más notable es que estas capas celulares tienen el espesor de una sola célula y están separadas por una capa gelatinosa llamada mesoglea. La capa más compleja es la exterior (ectodermo). A veces también se denomina epidermis y contiene varios tipos de células. La región más interna, llamada gastrodermis, es donde el organismo digiere la comida. La epidermis, capa protectora externa, contiene también células nerviosas que transmiten la

información sensorial a otras partes del cuerpo del cnidario. Recordemos, sin embargo, que los cnidarios no tienen cerebro; como consecuencia, este sistema nervioso es más bien una red que transmite la información sensorial por todo el cuerpo, estimulando otros tipos de células como las epitelio musculares que ejecutan el movimiento, las glandulares que secretan mucosidad, y los nematocistos que envían filamentos urticantes muy desagradables cuando una fuerza externa les estimula en exceso.



Estructuras celulares del mecanorreceptor.

Los llamados animales superiores con simetría bilateral son «triblásticos», con tres capas de organización: endodermo, mesodermo y ectodermo. Ciertos tipos de triblásticos, como los artrópodos, han creado una superficie externa quitinosa y dura que sirve de sistema de apoyo para sostener su cuerpo y para

proteger sus órganos internos del mundo exterior. Otros triblásticos, como los moluscos bivalvos y los caracoles, han desarrollado conchas para proteger y sostener su cuerpo. Pero también hay triblásticos que no han creado un exoesqueleto o concha visible, entre ellos los gusanos y los cefalópodos (pulpos y calamares). Sin embargo, los vertebrados han desarrollado otra manera de dar soporte a su cuerpo (con un esqueleto interno) y por lo tanto necesitan proteger sus órganos internos de un modo completamente distinto; de ahí la necesidad de la piel. Así que cuando buscamos las estrategias de los diversos organismos para detectar el contacto físico con el mundo exterior, vemos diferencias enormes. En nuestro caso, en tanto que seres humanos, la primera línea de defensa es la piel. Nuestra piel está compuesta de varias capas de células. La capa de células más externa se denomina epidermis y se encarga de detectar el entorno más inmediato del cuerpo, lo que nos permite percibir el contacto, la temperatura, el dolor y la presión. Nuestro sistema somatosensorial percibe y procesa estas sensaciones, y las recibe desde cuatro tipos de receptores principales. La presión, la vibración y la suavidad o aspereza de las cosas se perciben a través de unos mecanorreceptores que reciben diversos nombres: discos de Merkel, corpúsculos de Meissner, corpúsculos de Ruffini y corpúsculos de Pacini. Los órganos de Merkel y de Meissner son los más sensibles y se encuentran en las capas más externas de la dermis y la epidermis de la piel sin vello. Para la mayoría de nosotros, esto significa las palmas de las manos, los labios, las plantas de los pies y las puntas de la nariz y la lengua. Estos órganos nos ayudan a determinar no sólo si estamos tocando algo sino también durante cuánto tiempo, ya que los discos de Merkel son receptores llamados de adaptación lenta, mientras que los corpúsculos de Meissner son de adaptación rápida. El cerebro compensa las señales de estos receptores para determinar la duración del contacto. En lo más profundo de la dermis y en las articulaciones, los tendones y los músculos, se encuentran los otros dos receptores –corpúsculos de Pacini y Ruffini– que en su mayor parte detectan las vibraciones. Sin estos mecanorreceptores, no podríamos percibir si estamos forzando nuestros músculos o articulaciones, y no podríamos decidir cuándo hay que encogerlos si los hemos estirado demasiado.

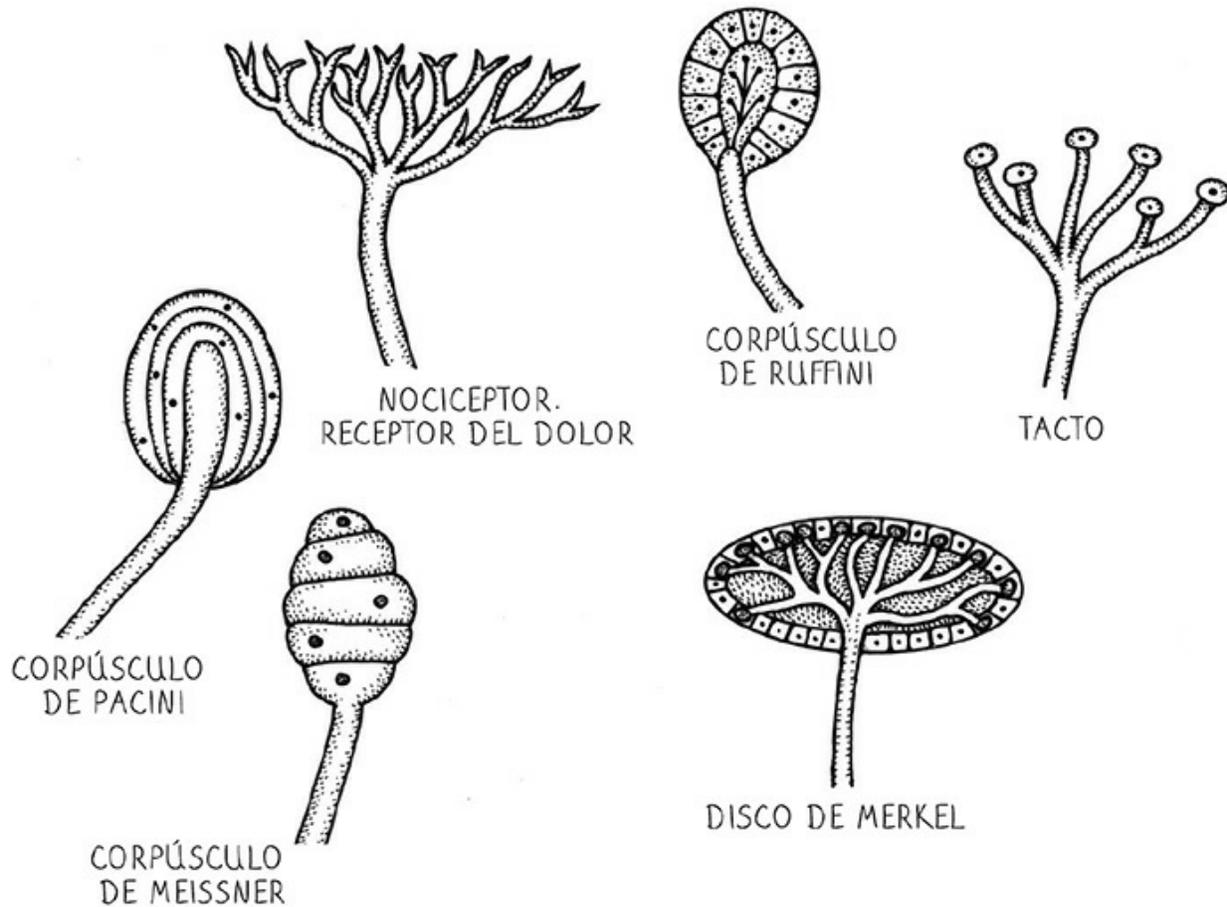


Diagrama que representa el órgano del tacto: nuestra piel.

Un segundo tipo de receptores somatosensoriales son los termorreceptores –calor y frío– que se encuentran en la dermis. Los receptores del frío deberían llamarse en realidad receptores «de un tipo de frío», porque dejan de funcionar por debajo de  $5^{\circ}\text{C}$ , cuando normalmente empieza el entumecimiento. En este sentido, a temperaturas extremas, los receptores del calor deberían llamarse receptores «de mucho calor» porque dejan de funcionar a  $45^{\circ}\text{C}$  más o menos. Por debajo «de un tipo de frío» tiene lugar el entumecimiento, de modo que todos los receptores de ese rango de temperaturas no logran enviar impulsos al cerebro, que por lo tanto no registra sensaciones. Pero si la temperatura cae muy por debajo, se produce el dolor porque entra en juego un receptor denominado Nav1.8. Este receptor detecta temperaturas sumamente frías y se ubica –precisamente– en las neuronas sensoriales del dolor. Los científicos que estudian este tipo de receptor han demostrado que tanto los

animales resistentes al frío como los de sangre fría tienen muchos más receptores de estos en su dermis que los animales de sangre caliente y los resistentes al calor. Asimismo, por encima del rango «de mucho calor» existen receptores en neuronas sensoriales del calor y que enviarán una señal al cerebro del mismo modo que lo hace el Nav1.8 para las sensaciones muy frías.

A propósito de las neuronas del dolor, hay una tercera categoría de receptores somatosensoriales constituida por lo que formalmente se denominan nociceptores, o receptores de dolor, que se activan cuando se dañan la piel, las articulaciones o los músculos. Existen más de tres millones de estos receptores distribuidos por todo el exterior de nuestro cuerpo e incluso en algunos órganos internos. Transmiten al cerebro dos tipos de dolor. Uno es un dolor agudo, instantáneo, que envía una señal a nuestro sistema motor para que retiremos del estímulo la zona corporal dañada para evitar males mayores. El otro es un dolor de fondo, más sordo, que le dice al cerebro qué parte del cuerpo ha resultado herida y que modere su uso posterior. El último tipo de mecanorreceptores lo constituyen los propioceptores. Estos receptores detectan la situación del cuerpo en el espacio y la posición de las partes del cuerpo respecto a las demás. Son los que nos permiten ajustar nuestros movimientos musculares al detectar el grado de estiramiento y tensión de los músculos de modo que podamos modular distintas tareas tales como coser con aguja e hilo en oposición a clavar un clavo rielero.

Todos estos receptores son moléculas. Un grupo de mecanorreceptores cuyo papel en la sensación somática es bien conocido es el de los canales receptores de potenciales transitorios (canales TPR). Estos canales constituyen una clase de moléculas receptoras que se hallan en la membrana de las células. Participan también en el olfato y el gusto, y su papel en la vista y el oído es objeto de debate en estos momentos. Pero estas moléculas son importantísimas para la sensación somática. Tienen una larga historia filogenética y se encuentran en hongos y animales no vertebrados como *Drosophila* y *C. elegans*. Al igual que las opsinas, parte de su estructura proteica se extiende por la membrana celular. De hecho, hay seis regiones de la proteína que se desplazan por la membrana para anclarse en ella

firmemente. Pueden verse estimuladas al entrar en contacto con cosas o por cambios de temperatura. Cuando entran en contacto fuerzas externas con un receptor de potencial transitorio, lo más probable es que cambie de forma, lo que permite que el canal intercambie iones desde el exterior al interior de la célula. Los científicos que estudian los genes del canal TPR indican que son importantes en la regulación del calcio y su concentración en las células.

Como hemos visto a lo largo de este libro, la regulación de las concentraciones iónicas se distingue por el envío de señales electroquímicas de una célula a otra a través de las sinapsis. Mediante la regulación de las concentraciones del calcio, potasio, sodio y magnesio en las neuronas se puede controlar su potencial eléctrico, siendo ésta la verdadera base del funcionamiento del sistema nervioso. Sin embargo, aunque las observaciones realizadas sobre los canales TPR en tanto que receptores de los estímulos externos son interesantes, debemos señalar que, como su propio nombre indica, estas proteínas son transitorias y por lo tanto deben interaccionar con otras proteínas importantes del sistema nervioso que forman los canales de membrana (es decir, los canales del sodio y el potasio). Los canales TRP no son, pues, el factor decisivo del funcionamiento de las neuronas, pero para los organismos constituyen una buena manera de procesar las señales mecánicas, como el tacto, dentro del complejo sistema nervioso. En la levadura (un tipo de hongo) sólo existe un producto del gen del canal TRP que reside en las membranas de las vacuolas. Puesto que la levadura utiliza estas vacuolas para almacenar materia como compuestos tóxicos, necesita comunicarse con la vacuola, y lo hace a través de la proteína del receptor de potencial transitorio. En la levadura esta proteína es mecanosensible, de modo que cuando una toxina le da un meneo desata una respuesta defensiva en la vacuola, lo que induce un cambio osmótico (la ósmosis es el proceso mediante el cual se ajusta la concentración de agua dentro y fuera de las membranas celulares). Los canales TRP participan en la ósmosis, y esto permite que la célula de levadura realice un seguimiento de cualquier materia tóxica dentro de la vacuola.

Los canales TPR desempeñan diversas funciones en la mecanorrecepción y en los sentidos de la vista, el olfato y el oído de la mosca del vinagre. Y son

especialmente interesantes, aunque sólo sea por los nombres estafalarios que los genetistas han dado a las mutantes para estas proteínas. Nombres tales como *nan*, *nanchung*, *water witch* [bruja de agua], *painless* [indoloro] y *pyrexia* [pirexia] se han utilizado para designar los tipos de mutantes estudiados. Las moscas con las mutaciones *water witch* no pueden detectar la humedad del aire, mientras que las moscas *nan* no detectan cuándo es demasiado seco. *Painless* es interesante, porque las moscas que portan esta mutación no notan el calor: pongamos una de estas moscas sobre una cocina caliente y no sentirá nada hasta que empiece a freírse. *Pyrexia* es una versión aún más rara de una proteína TRP insensible al calor. Las moscas con mutaciones de este gen se quedan paralizadas cuando hace demasiado calor (normalmente a temperaturas que exceden los 40°C).

Cuando avanzamos hacia cómo funcionan los sentidos, sobre todo la percepción somatosensorial, en animales con espina dorsal, nos enfrentamos al mismo tipo de problemas que vimos en el capítulo 3. Cuando observamos un ojo de la mosca del vinagre, ¿es la «misma» estructura que el ojo de un ser humano? Aunque tanto los ojos de las moscas como de los seres humanos tienen conos y bastones y utilizan rodopsina y otras opsinas para facilitar la visión, en las moscas los receptores TRP participan con las moléculas de rodopsina en el establecimiento de la visión. En cambio, en los seres humanos (y otros mamíferos) los receptores TRP no interaccionan con la rodopsina. Sin embargo, lo curioso es que dichos receptores desempeñan un papel en la visión de los mamíferos porque interaccionan, no con los conos y bastones (donde se encuentran la rodopsina y otras opsinas), sino con un tipo completamente distinto de células denominadas células ganglionares retinianas intrínsecamente fotosensibles. Mediante la acción de los receptores TRP, estas células comunican al cerebro que está entrando demasiada luz en el ojo y éste ajusta la pupila para compensarlo. Por tanto, si bien los receptores TRP en estas células ganglionares retinianas fotosensibles no facilitan la distinción entre las longitudes de onda de luz como lo hacen los receptores TRP de los conos y bastones de las moscas, sí desempeñan un papel en la visión. Del mismo modo, el otro sentido no químico, basado en las ondas —el oído— también utiliza receptores TRP para procesar el sonido. Y esas proteínas

también tienen un papel importante en los sentidos químicos del gusto y el olfato.

Echemos ahora un vistazo rápido al papel de los receptores TRP en la percepción somatosensorial. Como se ha señalado, estos receptores son expertos en la detección de alteraciones mecánicas, y de algún modo se las arreglan para transmitir al sistema nervioso el mensaje de que se ha producido una perturbación. En los mamíferos, un canal llamado TRPM8 es el encargado de detectar sensaciones en la piel similares al mentol. Este canal es con toda probabilidad el que se activa cuando a alguien le dan un masaje en la espalda con un aceite a base de mentol, o el que se activaba en nuestra niñez cuando estábamos resfriados y nos untaban Vicks VapoRub en el pecho. El VapoRub funcionaba porque el cambio gradual de temperatura que producían sus aceites a base de mentol estimulaba al receptor. No se sabe con exactitud cómo se activa el TRPM8 y la regulación posterior del flujo de iones calcio, pero sí sabemos que no es fruto de una reacción química. Los compuestos mentolados o similares al mentol cambian el TRPM8 desde un punto de vista mecánico, y este cambio permite la posterior regulación de los iones de calcio a través de la membrana.

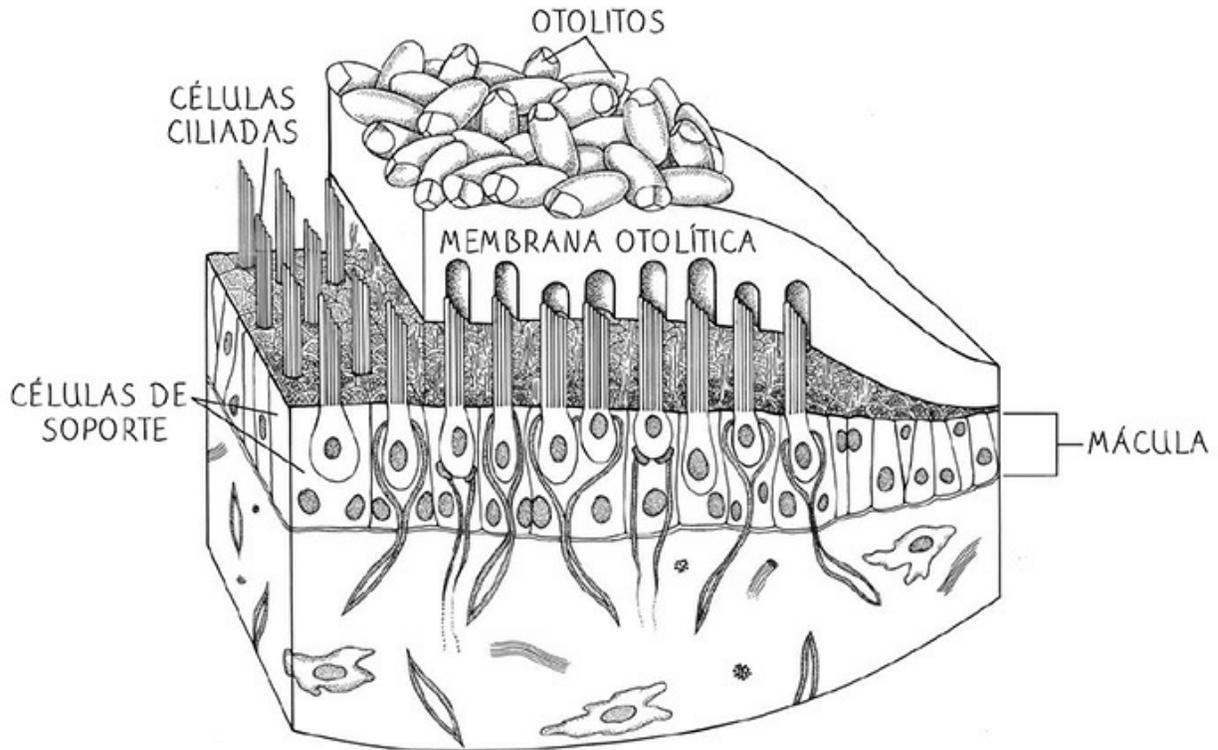
Parece que el TRPM8 de los mamíferos tiene un pariente cercano en las moscas denominado TRPM. Curiosamente, las moscas que portan genes TRPM mutantes tienen problemas con una estructura corporal llamada tubo de Malpighi, más o menos el equivalente en las moscas del riñón de los mamíferos. Los nematodos tienen también proteínas en estrecha relación con el TRPM8 que actúan en el intestino del gusano. ¿Significa esto que nuestra facultad para detectar el mentol procede del tracto digestivo de los organismos inferiores? En realidad no, porque el padre de todos los TRPM es en realidad ese gen del que hemos hablado hace un rato llamado *painless*, el que permite a las moscas tolerar temperaturas elevadas.

Los genes del gusano y la mosca que están más relacionados con el TRPM8 siguen modulando los niveles de calcio en las células, aunque lo hacen en otros tejidos. Otros canales TRP interesantes son los TRPV2, TRPV3 y TRPV4. En lugar de detectar el frío como el TRPM8, estos canales detectan el calor. Es interesante señalar que en las moscas o los gusanos no existen genes que

guarden relación con estos receptores TRP. Y lo que esto significa es que estos genes se extendieron en los vertebrados independientemente de lo que ocurría en los invertebrados como las moscas y los nematodos. Sin embargo, aunque estos canales funcionan de distinta manera que los sistemas que vimos para la vista, el olfato, el gusto y el oído, merece la pena señalar que la influencia externa inicial (luz, sonido, sustancias químicas, contacto mecánico) se convierte siempre en un impulso nervioso de algún tipo.

### MANTENER LA ORIENTACIÓN

La mayor parte de los organismos necesita orientar su cuerpo en el espacio, y la gravedad es la fuerza sobre la que se centra la conciencia de equilibrio resultante. Conocer en qué dirección trabaja la gravedad es la clave del conocimiento esencial de lo que está arriba y lo que está abajo. Incluso algunas bacterias necesitan orientarse en el espacio, si bien no usan la gravedad para ello. Las bacterias conocidas como magnetobacterias pueden orientarse directamente por medio de los polos magnéticos terrestres produciendo en sus células pequeños imanes llamados magnetosomas. ¿Por qué necesitaría saber una bacteria dónde se encuentran los polos terrestres? He aquí por qué. A las magnetobacterias no les gusta el oxígeno en grandes cantidades, prefieren entornos marinos o acuáticos donde las concentraciones de oxígeno sean bajas, así que para encontrarlos descienden «nadando» a aguas profundas. Si una célula fuera una magnetobacteria, perdería el tiempo nadado a izquierda y derecha o adelante y atrás. Ir arriba o abajo es la única dirección sensata, porque la concentración de oxígeno cambiará de una forma más drástica en dicha dirección y eso le permitirá al diminuto organismo explorar las concentraciones de oxígeno con más eficacia. Los magnetosomas permiten que las bacterias se orienten norte-sur, para que vayan paralelas a la superficie de la Tierra. Esa orientación les dice que la dirección arriba-abajo es perpendicular a su posición inducida magnéticamente, y actúan en consecuencia. Esto es casi lo más parecido al equilibrio que consiguen las bacterias.

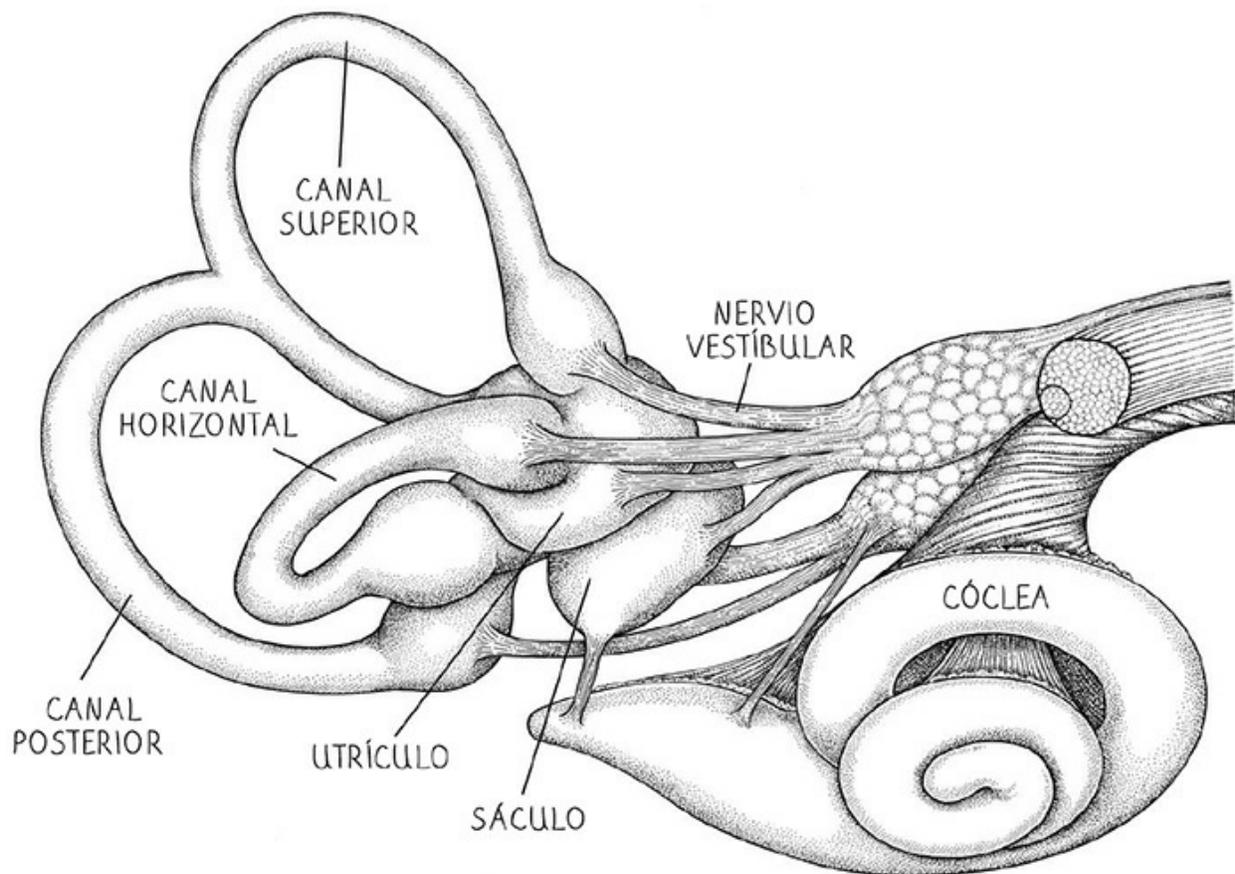


El nivel celular de un órgano del sistema vestibular: el órgano otolito.

Los animales con simetría bilateral también se orientan con respecto a su entorno. Ya que las esponjas, los cnidrios, los ctenóforos y los placozoos son animales marinos, una forma de hacerlo es utilizando la luz. Si una bacteria está en el océano, ciertas longitudes de onda de la luz llegarán desde la superficie debido a que es ahí donde la luz del sol choca primero. La superficie está arriba, de modo que la luz orientará a un organismo hacia la superficie en un proceso llamado fototaxismo. Pero eso no es todo. Estos animales también utilizan un proceso denominado geotaxismo, o el uso de la gravedad, para orientar lo que está arriba y abajo. Este es el proceso que también usan los bilaterales como nosotros. El fototaxismo es una forma muy eficaz de orientarse uno mismo y se han desarrollado numerosos métodos de aprovechar la gravedad. Los cnidarios utilizan órganos especializados denominados estatocistos (también se ven en ctenóforos y en algunos bilaterales). El estatocisto es un órgano primitivo del equilibrio, que tiene una bolita mineralizada llamada estatolito dentro de una estructura en forma de saco que contiene una gran cantidad de vellosidades. Cuando el animal acelera

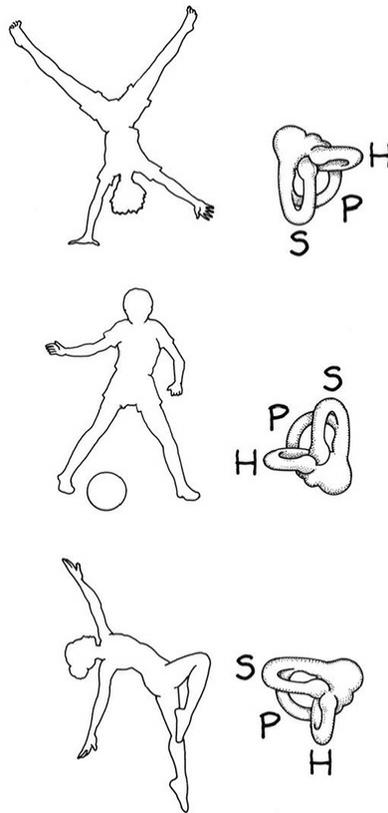
hacia delante, las vellosidades se ven impelidas contra el estatolito. A medida que la gravedad tira de ellas hacia abajo, esto las aparta del estatocisto y activa una señal nerviosa hacia la red neural del cnidario que a su vez provoca una respuesta del animal al cambio de orientación. La red neural puede luego enviar mensajes al resto del cuerpo para compensar la aceleración y mantener el equilibrio.

Los vertebrados como nosotros tienen la misma necesidad de orientarse que las bacterias y los animales inferiores. Si no podemos decir lo que hay arriba y lo que hay abajo estamos perdidos. Los vertebrados han adoptado un método muy especializado para mantener el equilibrio. En el oído interno, en el mismo lugar donde se recogen las ondas sonoras para ser procesadas por el cerebro, se encuentra el órgano del equilibrio denominado sistema vestibular. Este sistema consta de tres estructuras principales –los tres canales semicirculares, el utrículo y el sáculo– y se encuentra cerca de la cóclea, de la que ya hablamos en relación con el sentido del oído. De hecho, está inmerso en el mismo fluido que la cóclea.



Las estructuras del equilibrio del oído interno, los tres canales semicirculares.

El utrículo y el sáculo funcionan más o menos como los estatocistos y contienen partículas minerales conocidas como otolitos (del griego *oto*=oído y *lithos*=piedra; literalmente «piedra del oído»). El utrículo es como un nivel de carpintero que atravesara los oídos. Si la cabeza se inclina hacia la derecha o la izquierda, la burbuja del nivel se alejará del centro, y los cilios sensoriales del utrículo entrarán en contacto con los otolitos. El sáculo, en cambio, es como el mismo nivel de carpintero que penetrara por la frente y saliera por detrás de la cabeza en paralelo al suelo. El movimiento a derecha e izquierda no cambiará la posición de la burbuja.



Cómo funciona el equilibrio en el oído interno. En los dibujos, los canales semicirculares están orientados como lo estarían en las tres posturas del cuerpo humano que está al lado. Los canales horizontal (H), superior (S) y posterior (P) adoptan orientaciones diferentes en las distintas posturas, y dichas orientaciones se transmiten al cerebro como se indica en el texto.

Si bien el utrículo y el sáculo se encargan de detectar la posición de la cabeza en los planos horizontal y vertical, los tres canales semicirculares se ocupan de controlar el movimiento de la cabeza. Están situados en un sistema de coordenadas X, Y, Z y cada canal es paralelo a uno de los tres planos. Los tres canales se conocen como canal horizontal (eje X; inclinación), canal posterior (eje Y; arriba y abajo), y canal anterior (eje Z; a un lado y otro). Los canales llenos de fluido tienen una porción dilatada repleta de vellosidades llamada ampolla que permite que el sistema detecte los movimientos de la cabeza. Si se hace girar la cabeza en el plano horizontal, las vellosidades de la ampolla del canal horizontal detectan dicho movimiento debido a su chapoteo. En cuanto empiezan a chapotear envían una señal a las neuronas que están conectadas a ellas; y como indican algunas investigaciones recientes, las

proteínas G intervienen en la traducción de la estimulación mecánica en información electroquímica que puede utilizar el sistema nervioso.

#### EL CAMINO HACIA EL CEREBRO ES MUY LARGO

Ninguna de las muchas sensaciones que percibimos con los distintos órganos, cilios o receptores de membrana sería diferente si no lo fuera para el cerebro. En este capítulo hemos hablado de todos los mecanismos que gestionan los estímulos externos que invaden nuestro cuerpo y los cuerpos de otros organismos. Pero para que tenga alguna utilidad, el cerebro tiene que procesar toda la información recibida. Y para lograrlo, y que sea inteligible para el sistema nervioso, el cambio debe realizarse en su propia moneda, o potenciales de acción. En todos los casos que hemos discutido, la célula receptora estimulada envía un «impulso» al cerebro para su posterior integración e interpretación. Este proceso es válido para todos los sentidos, y el carácter del propio impulso también tiene su fundamento en la biología molecular.

Tal como hemos intentado puntualizar, los receptores acoplados a proteínas G (GPCR) son importantísimos en este proceso de intercambio de información. Pero el cambio a la nueva moneda toma un camino especial que proporciona el sistema nervioso. Ya hemos dado a conocer las unidades básicas del sistema nervioso que transportan los potenciales de acción desde nuestros órganos de los sentidos a nuestro cerebro y vuelta otra vez. Muchos están implicados solamente en el traslado. Por ejemplo, pongamos que estás fuera paseando. Si te inclinas demasiado hacia delante, las vellosidades del sáculo detectarán la tendencia al desequilibrio y provocarán una respuesta a través de un receptor de membrana. El acto mecánico de desequilibrarse por el hecho de inclinarse demasiado hacia delante se cambia después por un potencial de acción a través de la reacción de un receptor acoplado a proteínas G. A su vez, este potencial de acción se transmite a las neuronas conectadas al sáculo que en seguida envían una señal al cerebro, a través del octavo nervio craneal, a los núcleos vestibulares del tallo encefálico. Una vez

hecho esto, el cuerpo puede corregir el tono muscular y la velocidad para evitar la caída.

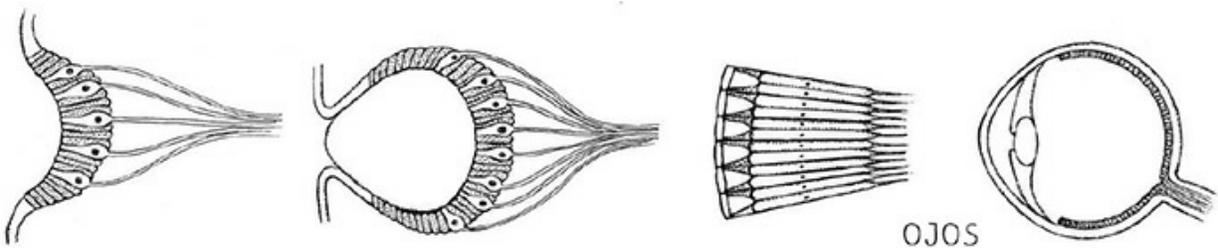
Pero si crees que cosas tan fáciles como mantenerse erguido parecen complejas, imagina lo que nos espera cuando estudiemos las percepciones aún más complicadas de nuestro mundo exterior.

---

1. Término inglés que significa «sin ojos». (*N. de las T.*)

2. Kool-Aid es la marca de una mezcla en polvo para preparar refrescos de distintos sabores. El azul está hecho a base de arándanos (*N. de las T.*)

## El procesamiento de la información



¿Cómo capta nuestro cerebro los potenciales de acción que recibe de nuestros sentidos y cambia esta moneda del sistema nervioso para responder a los estímulos medioambientales? En el capítulo 4, vimos cómo trabajan nuestros sentidos a nivel molecular. Pero ya que los potenciales de acción se abren paso hacia el cerebro, debemos empezar por explicar cómo se transforma esta enorme cantidad de información en aquello que vemos, tocamos, olemos, oímos y degustamos. Cuando vemos algo, alguien o cualquier cosa con los ojos, ¿qué hace nuestro cerebro en realidad? ¿Se proyecta la imagen en la parte posterior de nuestra cabeza como si fuera un autocine en miniatura? De ninguna manera, como veremos. Aun así, cómo se procesa la imagen sensorial en nuestro cerebro es sólo una pequeña parte de la historia de cómo evolucionaron nuestros cerebros. Incluso los animales muy primitivos, como las bacterias, los protistas (eucariotas unicelulares como el *Dictyostelium* del que hablamos anteriormente) y los hongos, tienen modos de percibir, reaccionar y orientarse en el ancho mundo. Pero hay mucho más aparte de percibir el mundo exterior. Los organismos necesitan interpretarlo y actuar, y la selección natural se ha asegurado de que sus respuestas sean relativamente eficaces. ¿Qué procesos cerebrales han desarrollado los organismos para

controlar sus respuestas al mundo exterior?

Las reacciones moleculares que hemos comentado antes (capítulos 3 y 4) constituyen la «primera línea de defensa» en nuestras reacciones al medio ambiente. Las reacciones reflejas son tal vez nuestra «segunda línea de defensa». Los reflejos permiten una respuesta rápida y eficaz de los organismos ante retos medioambientales como los que plantean los depredadores y el calor, así como ante los desequilibrios de su fisiología. Así que las reacciones reflejas se han desarrollado, sobre todo, para ser rápidas y para que el cerebro se vea lo menos implicado posible. En este último aspecto difieren mucho de nuestras respuestas emocionales, otro modo de responder con rapidez y eficacia a los estímulos del entorno. Las respuestas emocionales comprometen la memoria, que es crucial para nuestra supervivencia; casi todos los días aparecen informaciones de más descubrimientos sobre la importancia de la memoria y cómo se origina. Es más, nuestro cerebro y los de otras criaturas se han desarrollado para tomar decisiones, y los procesos que nos llevan a decidir nuestras respuestas ante los estímulos son otra parte asombrosa de la historia.

Cómo evolucionó nuestro cerebro para realizar todas estas cosas está cada vez más claro, no sólo a medida que aprendemos más sobre el funcionamiento de nuestro cerebro, sino a medida que examinamos con mayor detalle nuestro genoma y el de otros organismos. Se pueden comparar los genes involucrados en los procesos cerebrales entre distintos organismos, y debido a que los genes acarrean su historia con ellos, es posible reconstruir la verdadera secuencia de los acontecimientos históricos.

#### LA RESPUESTA DE LOS ORGANISMOS UNICELULARES A LA PERCEPCIÓN PUEDE SER COMPLEJA

En el capítulo 4 evaluamos cómo se transforman las fuerzas externas que nos rodean en potenciales de acción que luego son enviados al cerebro a través de nuestro sistema nervioso sensorial. Ahora preguntemos: «¿Cómo procesan esta información los organismos unicelulares y los animales simples?». Como

hemos visto, incluso los animales muy simples pueden detectar la luz. Esta capacidad tiene mucha lógica, ya que la mayoría de los organismos están expuestos a la luz solar durante gran parte del día, y el hecho de poder utilizar dicha luz como pista o señal es un aspecto importante de la supervivencia incluso de los organismos más simples.

Muchas bacterias tienen células fotosensibles que les ayudan a orientarse hacia la luz, y hemos hablado de esta capacidad referida a opsinas Tipo 1 como la bacteriorodopsina y la proteorodopsina. Es evidente que en las bacterias los genes implicados en la fotorrecepción están diseminados entre los millones de especies que existen. Las arqueas también poseen capacidad de detectar la luz, pero lo hacen de un modo algo distinto (recordemos que si bien las arqueas y bacterias son organismos unicelulares sin núcleo, en lo fundamental son organismos diferentes). Una de las facultades más sorprendentes de detectar la luz entre las bacterias se halla en un extraño grupo de microbios llamados cianobacterias. Estas bacterias pertenecen a un grupo antiguo que ha desarrollado la facultad de fotosintetizar la luz en energía, como hacen las plantas, en realidad de un modo muy parecido a como lo hacen las plantas, porque existe la creencia generalizada de que el orgánulo de las plantas que realiza la fotosíntesis (el cloroplasto) derivó de las cianobacterias.

A medida que las células eucariotas se separaban para producir los muchos linajes protistas que vemos en la naturaleza, amén de los principales grupos de eucariotas como las plantas, los animales y los hongos, se produjeron algunos hechos de canibalismo. Al parecer, el antepasado común de la mayor parte de los organismos que poseen cloroplastos (como las algas, las plantas y un protista extraño y pequeño llamado *Euglena*) se tragó una cianobacteria sin digerirla. Entonces la cianobacteria entabló lo que se llama una relación endosimbiótica con este antepasado común, de modo que las células de todos los descendientes posteriores del antepasado original «hambriento» poseen ese endosimbionte tipo cianobacteria que pasaba por allí. Además, el endosimbionte conservó sus funciones fotosintéticas, incluso su genoma. En realidad, esto pudo haber ocurrido más de una vez. Porque los dinoflagelados (los primeros «dinos» verdaderos), un grupo interesante de

organismos unicelulares con cloroplastos, no están relacionados con las plantas y los genes de sus cloroplastos están dispuestos de un modo muy extraño. Es muy posible que el dino ancestral se tragara una especie de cianobacteria diferente a la que se tragó el ancestro de plantas y algas. Y al parecer, un grupo de algas conocidas como criptomonas comparten un antepasado común con un linaje protista sin cloroplastos; así, los cloroplastos de esa estirpe debieron proceder de un alga afín que se tragó y que sí tenía cloroplastos. Por lo que se ve, existen diversas maneras de obtener cloroplastos y una de las mejores es cenar una especie que ya los tenga.

Pero volvamos a nuestra historia sobre cianobacterias y percepción. Cuando la luz les dé de lleno, las cianobacterias adoptarán un color distinto según el tipo de luz a la que estén expuestas, un proceso que los biólogos denominan «aclimatación». Si las bacterias crecen bajo la luz verde, cambiarán a un color rojo teja. Si las cianobacterias detectan que están creciendo bajo la luz roja, cambiarán a un color azul verdoso fuerte. Estas transformaciones no forman parte de un espectáculo de luces destinado a atraer compañeros o advertir a otros. Lo que hace el cambio de color es realizar un acopio de luz más eficaz. El color azul fuerte de la bacteria absorbe la luz roja con más eficacia, lo cual ocurre cerca de la superficie de entornos acuáticos o marinos; el color rojo es más eficaz acumulando luz verde en aguas profundas. Esta respuesta es única porque, si bien la mayoría de los organismos unicelulares e incluso algunos animales sencillos pueden detectar la luz, no pueden reaccionar ante ella. Por el contrario, parece que las cianobacterias son similares a los fanáticos del bronceado que vemos en la actualidad: les gusta la luz del sol y se aseguran de recibir tanta como puedan.

## PERCEPCIÓN Y REDES CNEURALES EN CNIDARIOS

En los organismos con sistemas nerviosos diferenciados podemos empezar por examinar la red de conexiones del cerebro que permite la compleja serie de reacciones al mundo exterior que le está negada a las criaturas más simples. Los placozoos y los poríferos, que son animales simples, tienen genes de

opsinas, pero no es fácil decir cómo utilizan estos genes y si de verdad tienen sentido de la vista –detección de luz–. Ninguno de los cuatro tipos de células de los placozoos, ni los ocho de las esponjas, tienen la función de detectar la luz. Por otro lado, algunos cnidarios tienen órganos sensibles a la luz llamados ocelos («ojitos») situados en la base de sus tentáculos. Pero decir que un cnidario ve es forzar la metáfora. Más que nada, esos órganos utilizan opsinas para reunir información sobre la luz del mundo exterior y envía señales a la red neural. (Recordemos que los cnidarios no tienen cerebro, por lo que su red neural no puede formar una imagen real.)

El mismo sistema, o algo parecido, actúa en los múltiples tipos de gusanos que tienen manchas oculares, parches y células fotosensibles, y de los que hemos hablado en el capítulo 4. Esperamos que nuestra exposición anterior de estos organismos os haya convencido de que, aunque a veces un gusano es un gusano, algunas veces un gusano es un gusano *no* es un gusano. Pero estos organismos también poseen grupos de células nerviosas llamados ganglios que se forman en la «cabecera» y en la cual se procesa la información procedente de las manchas oculares o las células fotosensibles. Pero el descubrimiento verdaderamente interesante es que el desarrollo de estos órganos, al menos en algunas especies, está controlado por muchos de los mismos genes que controlan el desarrollo de los ojos en animales superiores como nosotros.

Es posible que estos animales actúen de dos maneras después de que sus manchas oculares hayan asimilado la luz. Pueden reconocer que es luz, y esta facultad de detección afecta a su ritmo circadiano (diario) y orienta sus cuerpos con relación a la luz (por lo general para huir de ella). Esta reacción es bastante clara y sencilla. Pero a medida que los ojos bien definidos se vuelven más complicados, el sentido de la vista se hace más complejo. Con ojos de verdad, el procesamiento de la señal luminosa implica vías neuronales muy diferentes. En esencia, los animales con ojos pueden interpretar la luz entrante como imágenes, una capacidad que entraña estructuras y funciones cerebrales muy distintas. Sólo unos cuantos grupos de animales –cordados, artrópodos y moluscos– tienen la facultad biológica de resolver imágenes de este modo.

En realidad, este parece un lugar tan bueno como cualquier otro para hacer

la pregunta inevitable sobre si los animales con redes nerviosas, como los cnidarios, o con cuasicerebros, como los platelmintos, se consideran conscientes. Al fin y al cabo, pueden detectar y responder ante los estímulos. Pero la pregunta misma es tendenciosa. Naturalmente, podemos intentar establecer reglas para determinar si un animal es consciente o no. Pero como siempre nos recuerdan nuestros hijos, las reglas se hicieron para infringirlas. Además, nuestras reglas podrían no ser necesariamente las vuestras. Con todo, podemos hacer algunas preguntas específicas sobre la consciencia y al menos empezar a comprender la complejidad del problema. Estos simples animales son sin duda conscientes de su mundo exterior, pero entonces también lo son los organismos unicelulares. Si este es vuestro criterio, entonces los organismos unicelulares como las bacterias son conscientes por definición. Pero sólo detectar y responder al mundo exterior no es lo mismo que responder de un modo controlado y ajustado. Los cnidarios tienen tendencia a responder de una manera vagamente controlada y en cierto modo ajustada. Pero un grupo de cnidarios, las cubomedusas (esas pequeñas asesinas repugnantes que contemplamos en el capítulo 3), tienen unos órganos fotosensibles bastante complejos y pueden utilizar la información que obtienen de esos órganos para localizar las presas de un modo muy controlado. Este hecho representa un gran avance con respecto a lo que pueden hacer las esponjas y placozoos más primitivos.

Así que ¿cuál sería el siguiente avance en la cognición? Una de las razones de la evolución de los cerebros es hacer que los organismos sean más eficientes y puedan manejar mejor las fluctuaciones medioambientales. Entonces, el siguiente paso podría ser incorporar a las respuestas experiencias anteriores, o tal vez ser capaces de tomar decisiones como, según hemos visto, hacen al parecer los mohos mucilaginosos. O asimismo desarrollar mecanismos que hagan que el proceso de «toma de decisiones» sea muy rápido. En todo caso, no es difícil comprender que el camino hacia un cerebro «mejor» y más complejo sería incrementar la cantidad de células que contiene. Y resulta que esta tendencia a aumentar la cantidad de células cerebrales es más o menos la estrategia que encontramos a medida que seguimos la pista a la evolución de la complejidad del cerebro en lo que queda de capítulo.

## COMPLEJIDAD CEREBRAL Y SENTIDOS EN LOS INSECTOS

Volvamos al cerebro de los artrópodos, que muchas veces parece bastante complejo, y examinemos cómo interacciona con los órganos sensoriales. El premio para el cerebro de artrópodo que más se estudia ha que ser para *Drosophila melanogaster*. Con diez mil células, el cerebro de la mosca del vinagre tiene varios órdenes de magnitud menos de células que nuestro cerebro. Pero esto no quiere decir que el cerebro de una mosca no sea complejo. Un rasgo del cerebro de los artrópodos conocido como «cuerpo fungiforme» permite entender los patrones de expresión de sus genes del desarrollo. Esta estructura lobulada se parece un poco a una seta y está conectada con los lóbulos olfativos del cerebro. Nicholas Strausfeld, de la Universidad de Arizona, propone que su función «es transmitir información sobre los estímulos sensoriales y el contexto en el que se producen a los centros protocerebrales superiores». O quizás «desempeñan un papel fundamental en el aprendizaje y la memoria».

Raju Tomer y sus colaboradores del Laboratorio Europeo de Biología Molecular utilizaron una serie de genes del desarrollo para demostrar que el gusano poliqueto *Platynereis dumerilii* también tiene cuerpos fungiformes y que los mismos genes se expresan en el mismo sitio de los cuerpos fungiformes tanto en este poliqueto como en su pariente lejano la *Drosophila*. También indicaron que la estructura del cerebro de los mamíferos conocida como palio muestra una base genética similar al cuerpo fungiforme de los invertebrados. El palio de los vertebrados se define como «la capa de neuronas sin mielina (la materia gris) que forma el córtex del cerebro», y es notable que basándose en los patrones de expresión génica, Tomer y colaboradores afirman que existe una homología entre el cerebro de los vertebrados y los cuerpos fungiformes de los invertebrados. Una hipótesis interesante pero que sin embargo deberíamos haber echado a la cesta de las metáforas. No obstante, este trabajo pone de manifiesto que el cuerpo fungiforme es un área importante del cerebro de la mosca y que recibe y procesa información de los órganos sensoriales.

Por lo que respecta a la vista, algunos artrópodos (los quelicerados y los extraños organismos llamados gusanos aterciopelados u onicóforos) poseen lo que se denomina un cuerpo central o arqueado. Lo más probable es que la visión se produzca en esta estructura, al menos al principio. Pero parece que en el caso de los quelicerados (un grupo de artrópodos entre los que se encuentran las arañas, los ácaros y las garrapatas) y de los onicóforos, la información visual que llega al cuerpo arqueado es mucho más directa que las conexiones que llegan desde los ojos de los insectos, crustáceos y miriápodos (un grupo de artrópodos en el que se incluyen los ciempiés y los milpiés). Sin embargo, parece que la estructura neuronal de los artrópodos es en lo esencial muy parecida en todo el grupo, de modo que casi seguro los cerebros de los artrópodos son «iguales» y que su método para procesar las señales visuales apareció en los primeros tiempos de la historia de los artrópodos. Esta característica podría revelar el papel del número de células en el origen de la complejidad del cerebro porque, al comparar los cerebros de los artrópodos con los de los vertebrados, se constata que cuanto mayor es el número de neuronas en un organismo, más compleja parece ser la función cerebral. Todos los animales inferiores que hemos comentado anteriormente tienen un número pequeñísimo de neuronas en su cuerpo. Pero en cuanto saltamos a organismos con cientos de miles de células cerebrales y más, la complejidad y la variabilidad se multiplican y empiezan a suceder cosas asombrosas.

#### CEREBROS DE PECES, CEREBROS DE PECES, CEREBROS DE PECES REGORDETES.

En el capítulo 3 ya pasamos revista a los cerebros de los cordados primitivos y sus parientes cercanos, pero nos detuvimos a propósito justo antes de llegar a la descripción de los vertebrados con mandíbulas como nosotros. Los vertebrados con mandíbulas pertenecen a un grupo llamado gnatóstomos o gnatostomados cuya separación de otros vertebrados es el primer gran paso hacia el cerebro humano. Los cordados primitivos llevaban por aquí bastante tiempo antes de que los vertebrados con mandíbulas se separasen del

antepasado común de los gnatóstomos y demás cordados, y uno de los sucesos anatómicos más importantes que ocurrieron en esta transición fue un aumento espectacular del espacio neuronal entre los gnatóstomos. El antepasado común de los gnatóstomos parece haber experimentado al menos dos veces la duplicación completa del genoma, lo que significa que todo el material genético de sus genomas se cuadruplicó. Muchos expertos en biología del desarrollo creen que estas duplicaciones del genoma fueron fundamentales al permitir que los mapas genéticos de los gnatóstomos se ampliaran. El juego básico de genes podría realizar la labor de asegurar que el organismo funcione a la perfección, y los juegos extra producidos por las duplicaciones podrían «servir» para generar innovaciones importantes.

Gran parte de los primeros linajes de cordados que revisamos en el capítulo 3 se caracteriza por tener los cerebros más rudimentarios. Algunos no son más que un grupito de células en la parte anterior del animal. Pero los organismos que consideramos los primeros peces empiezan teniendo más cerebro y secciones bien definidas en su interior. Aun así, no podemos decir que en esa época los peces fueran los organismos más inteligentes del planeta porque los cefalópodos también estaban evolucionando en ese periodo. Para explicar otra de esas situaciones de «la filogenia es un fastidio», deberíamos empezar por señalar que, en sentido estricto, o bien todos los vertebrados con mandíbulas son peces, o los peces no existen. Baste con decir que el problema llamado «pez» como grupo biológico es el mismo problema al que nos enfrentamos cuando hablamos de los protistas. Parece que los peces han hecho lo mismo que hicieron los protistas desde el punto de vista filogenético: divergir muchas veces de una serie de antepasados comunes. Y algunos de los descendientes (entre ellos los seres humanos) han cambiado tanto con respecto al antepasado común más lejano que ya no podemos describirlos como «peces». Sin embargo, ya que todo lo que hoy día creemos que son peces comparten el mismo antepasado gnatóstomo y sus esquemas corporales son relativamente conservadores, los cerebros entre especies son muy similares.

Nuestro colega del Museo Americano de Historia Natural John Maisey y varios colaboradores han reconstruido el cerebro de pez más antiguo que se conoce y lo han estudiado utilizando un potente acelerador, el Síncrotrón de

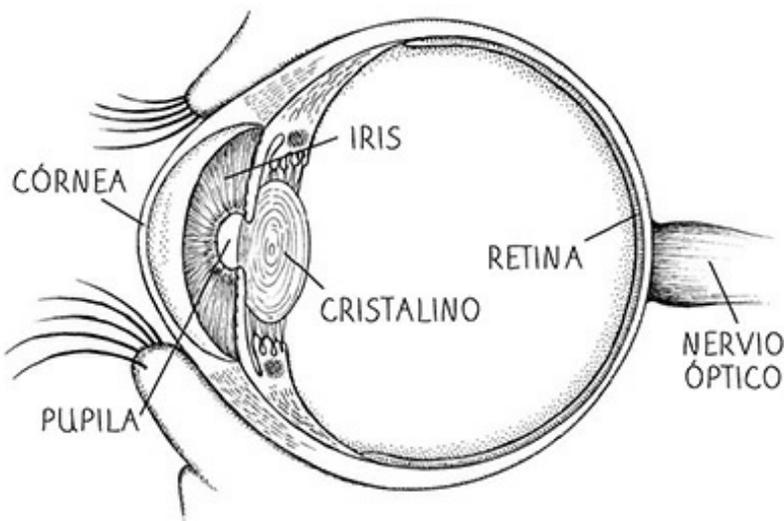
Grenoble, en Francia. Este aparato enorme permitió que Maisey y sus colaboradores escudriñaran dentro del cráneo de un pez fósil de 300 millones de años de antigüedad. Debido a que el fósil estaba muy bien conservado, los científicos pudieron obtener el esquema de su cerebro a partir de la imagen obtenida del sincrotrón (esta nueva tecnología es idéntica en principio a las técnicas más antiguas que utilizan endomoldes, o réplicas físicas del interior de las cajas craneanas, para deducir la forma de los cerebros de los organismos fósiles). Y resulta que, al igual que los peces modernos, estos antiguos especímenes tenían un cerebro con tres secciones: mesencéfalo, médula y cerebelo.

Este cerebro tripartito (tres partes) tiene un alto grado de homología estructural con otros cerebros de vertebrados. Tiene un «tronco encefálico» que está conectado al resto del sistema nervioso del pez y que, al igual que en otros vertebrados, controla la respiración y el latido cardíaco. Tras el tronco encefálico está el cerebelo, o «cerebro pequeño», que contribuye a coordinar movimientos precisos y bien sincronizados que exigen constantes ajustes basados en la información visual. El cerebelo es una parte del cerebro muy versátil porque también se ha demostrado que participa en otras funciones cerebrales más abstractas. Junto con el tronco encefálico, el cerebelo forma el romboencéfalo. A continuación viene el lóbulo óptico, que en la mayoría de los peces es enorme. Esta estructura asegura que el pez pueda ver muy bien, y como vimos en el capítulo 4, los peces en general tienen una visión cromática estupenda. Naturalmente, llegados a este punto podríamos preguntar: «¿Qué ocurre en el pez que pierde los ojos en el curso de la evolución, como el famoso pez ciego cavernario?». En 1872, F. W. Putnam sintió curiosidad por este fenómeno y examinó el cerebro de una especie de pez ciego cavernario. Y, quién lo iba a decir, el lóbulo óptico de esta especie era tan grande como el de un pez con ojos. Pero cerca de tres décadas después, un biólogo experto en peces llamado E. E. Ramsey resultó ser un aguafiestas. Examinó una segunda especie de pez cavernario y demostró que el lóbulo y el nervio ópticos habían, como él mismo dijo, «degenerado sensiblemente». Habida cuenta de que en el planeta existen muy pocas especies de peces ciegos cavernarios, podemos concluir que en esencia «todo está permitido» en el lóbulo óptico cuando una

especie de pez pierde los ojos. Por ejemplo, cabe la posibilidad de que la especie ciega de Ramsey perdiera los ojos hace mucho tiempo, mientras que la de Putnam lo hiciera en época más reciente.

Siguiendo nuestro viaje por el cerebro de los peces, si pusiéramos al pez boca arriba veríamos la parte del cerebro llamada diencéfalo, que regula la producción de hormonas. Los peces tienen incluso una glándula pineal, que en los seres humanos tiene un papel importante en la regulación del sueño. Pero aunque los peces utilizan la glándula pineal para procesar la información lumínica, también mantiene el ritmo circadiano del animal. Todas estas estructuras (el lóbulo óptico, el diencéfalo y la glándula pineal) constituyen el mesencéfalo. Por último, en la parte anterior del cerebro de los peces se encuentran unos lóbulos olfatorios bastante grandes y el telencéfalo. Ambas estructuras procesan las señales olfativas y se consideran la última parte del cerebro tripartito.

En este momento, deberíamos volver a nuestra tarea inicial, que era describir cómo convierte nuestro cerebro en una imagen los potenciales de acción producidos por la estimulación de las opsinas de nuestros conos y bastones. Este proceso de conversión varía bastante entre organismos con diferentes tipos de ojos. En nuestro caso, sin embargo, se dan varios fenómenos electroquímicos importantes que nos permiten «ver». Nuestros ojos, con sus conos, sus bastones y sus opsinas, responden a los patrones de luz creando miles de potenciales de acción que tienen su origen en receptores situados en lugares determinados de la retina. Estas señales eléctricas se envían luego al cerebro a través de los nervios ópticos. De este modo, una serie de células cerebrales recogen las señales y las transmiten a otras neuronas del cerebro y así hasta el final. Las neuronas que reciben estas señales están especializadas en interpretar un aspecto específico de la luz que baña la retina, y la interacción de estas señales que entran en el cerebro crea la escena que «vemos».



El ojo, donde puede verse el cristalino, la córnea, la pupila, el iris, el nervio óptico y la retina.

Vamos a utilizar un ejemplo excelente tomado de la exposición *El cerebro* del Museo Americano de Historia Natural para mostrar cómo funciona la vista. El ejemplo en cuestión es una pieza artística creada por Devorah Sperber, una artista que realiza murales escultóricos usando carretes de hilo. Su obra artística es fascinante porque juega con el foco, la imagen y la agudeza visuales. La obra expuesta es una pieza hecha con 425 carretes de hilo de diferentes colores. Y a simple vista no se reconoce mucho. Pero cuando se mira a través de un dispositivo óptico que da la vuelta a la imagen y la achata, la *Mona Lisa* de Leonardo aparece con todo detalle. ¿Cómo se convierte un montón de carretes de hilo colocados de un modo peculiar en la *Mona Lisa*? En palabras de los guionistas de la exposición, la visión consta de varios pasos y se utilizan diversas partes del cerebro para ejecutarlos:

El hecho de ver puede parecer sencillo, pero no se produce en un solo paso. Muchas partes del cerebro deben actuar juntas.

#### RECOGER LA LUZ

Las ondas de la luz inciden en la *retina*, en la parte posterior de los ojos, y son absorbidas por unas células (conos y bastones) que las convierten en potenciales de acción.

## TRANSMITIR LAS SEÑALES

El nervio óptico recoge las señales y las lleva hasta el *tálamo*, que es el encargado de transportar toda la información sensorial.

## PROCESAR LAS SEÑALES

En la *corteza visual*, en la parte posterior del cerebro, unas neuronas especializadas reciben las señales. Algunas neuronas detectan elementos visuales específicos como líneas, formas, color y movimiento. En el caso de la *Mona Lisa* hecha de carretes de hilo estos incluyen:

*Detectar las líneas a diferentes ángulos:* los elementos de *Mona Lisa* de las líneas horizontales, las líneas verticales y los ángulos de 45°

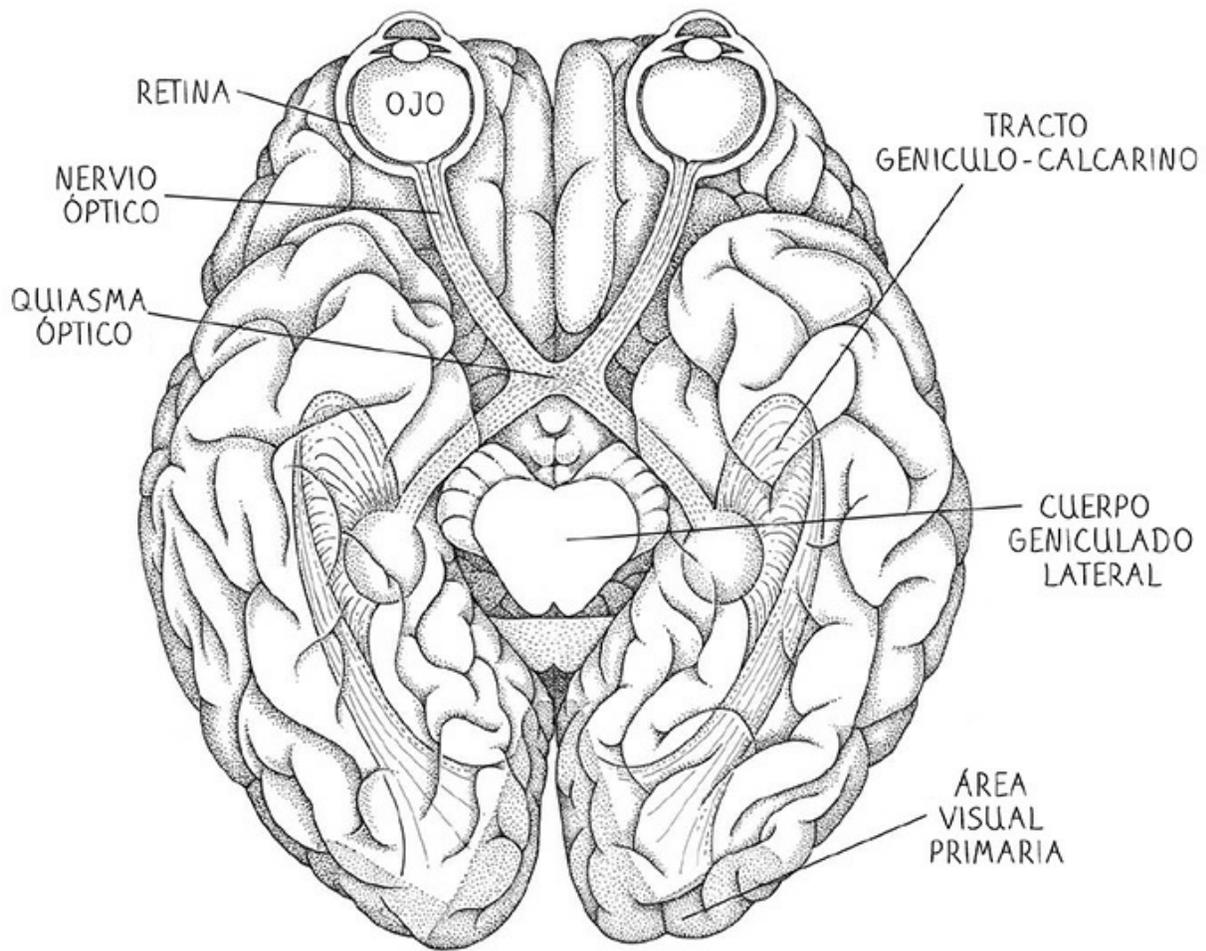
*Percibir el color:* de la *Mona Lisa* donde aparezca un determinado color

*Distinguir una figura:* la silueta de *Mona Lisa*

*Reconocer un rostro:* el contorno y las marcas específicas del rostro de *Mona Lisa*

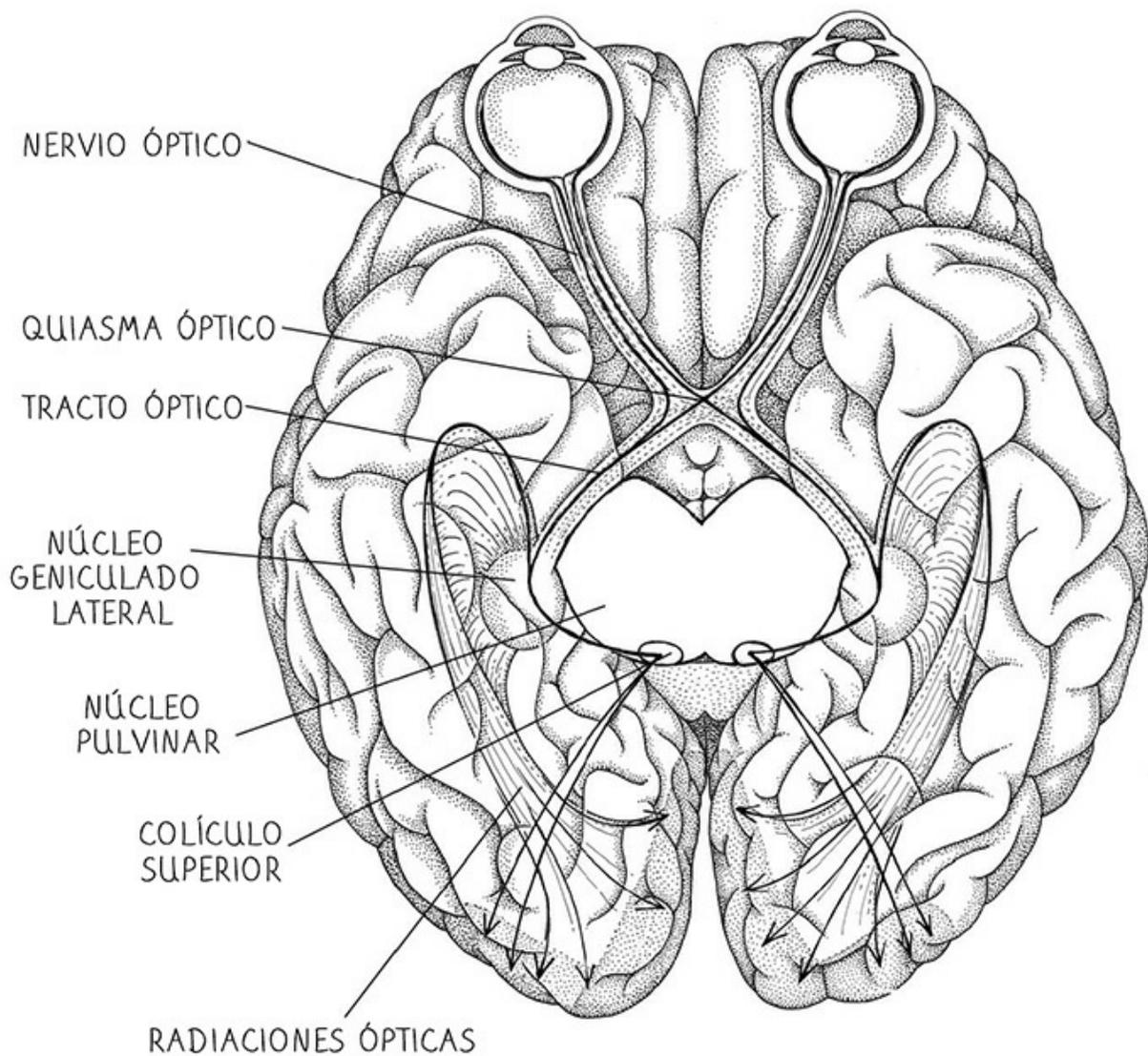
## ENCONTRAR EL SIGNIFICADO

Otras áreas del cerebro vinculadas a los recuerdos, los pensamientos y las emociones nos ayudan a comprender lo que vemos.



El cerebro humano y el sistema de nervios ópticos.

Esta descripción refleja eficazmente el proceso general mediante el cual se origina la visión, utilizando un circuito distinto del cerebro que los psicólogos y neurobiólogos han descifrado en las últimas dos décadas.



Circuito visual del cerebro. El estímulo luminoso exterior entra en el ojo, interacciona con la retina y se convierte en un potencial de acción que viaja por el nervio óptico y cruza de un lado a otro del cerebro a través del quiasma óptico. La información se propaga luego al núcleo geniculado lateral y continúa a otras regiones del cerebro como el colículo superior y el núcleo pulvinar, como indican las flechas (radiaciones ópticas) hasta el área visual primaria.

Y aunque los trayectos que se han definido en estos estudios son complejos, un factor común es que los potenciales de acción los recorren estimulando diferentes neuronas del trayecto y áreas ópticas y dando como resultado final las imágenes que «vemos». Lo más espectacular de este sistema es que la visión que nos da una idea clara del mundo exterior en el que vivimos no es ni un proceso singular ni el resultado de un impulso especial en

el cerebro. En cambio, lo que experimentamos como visión es la suma interactiva de muchos impulsos en muchas partes distintas del cerebro.

#### EL QUE ALGO QUIERE, ALGO LE CUESTA

Tengamos presente que en los peces no existe una estructura que podamos llamar corteza cerebral o «neocórtex», un rasgo importante de nuestro cerebro. Esta falta de neocórtex ha desatado un debate sobre si el pez siente dolor. Algunos investigadores están convencidos de que, al no tener neocórtex, los peces no pueden sentir dolor, porque el neocórtex es la parte del cerebro de los vertebrados superiores donde se procesan los impulsos nerviosos procedentes del calor, el frío o la estimulación mecanosensorial. Al considerar el dolor, tenemos que admitir en primer lugar que el concepto de dolor debe separarse del de «nocicepción» (capítulo 4), que es refleja. Según este argumento, si carecemos de la parte del cerebro que procesa el dolor, entonces no podemos sentirlo. Sí podemos percibir el medio exterior, pero no es doloroso tal como nosotros lo entendemos.

En un experimento de lo más ruin, algunos investigadores de la Universidad de Stanford decidieron comprobar si los peces sufrían dolor. Mezclaron un poco de ácido y veneno de abeja e inyectaron estos compuestos nocivos en los labios de varios peces. La conducta que observaron fue un indicio de que, desde luego, los peces estaban sufriendo dolor: los peces se frotaban la boca contra el suelo del acuario, como si trataran de calmar el picor de sus labios. Sin embargo, James Rose, de la Universidad de Wyoming, rechazó esta interpretación con el argumento de que sin neocórtex los peces no tienen la estructura neuronal para sentir dolor. Y también señaló que los investigadores habían inyectado cantidades de ácido y veneno ridículamente elevadas en los labios de los desgraciados peces, afirmando que habrían reaccionado con mucha más violencia si tuviesen receptores para el dolor y lo hubieran experimentado. En opinión de Rose, el trabajo que afirmaba que los peces sometidos a la prueba sentían dolor no hizo más que demostrar que poseían nocicepción. No es de extrañar que Rose no goce de las simpatías de

los activistas pro derechos de los animales, quienes afirman que es parcial porque le gusta pescar. Al fin y al cabo, vive en Wyoming, uno de los mejores sitios del mundo para practicar la pesca con mosca.

¿Examinar otros grupos puede ayudar a resolver esta polémica? Por ejemplo, ¿sienten dolor las moscas? Si se utiliza el principal criterio de Rose, hay que decir «no» porque, aun cuando algunos científicos piensan que existe una organización tripartita en los cerebros de ciertos invertebrados, no parece que estas criaturas posean un equivalente al neocórtex, que es donde se procesa el dolor. Sin embargo, las moscas sí tienen nocicepción: como se detalla en el capítulo 4, reaccionarán a la temperatura, alta o baja, pero estas reacciones se pueden considerar reflejas. Jane Smith, experta en ética de la Universidad de Birmingham, Inglaterra, abordó con cierto detalle el problema del dolor en invertebrados pero acabó indicando que «debido a que el dolor es una experiencia subjetiva, es sumamente improbable que se encuentre un criterio claro y definitivo para decidir esta cuestión». Dicho de otro modo, la subjetividad implícita al definir el dolor nunca nos permitirá decir: «sí, los invertebrados sienten dolor». Pero también significa que probablemente nunca podremos decir: «No, a buen seguro los invertebrados no sienten dolor». No obstante, Smith propone también que podemos utilizar ciertas respuestas conductuales a estímulos nocivos como indicadores de que el dolor podría existir en organismos tales como los invertebrados.

Todo este razonamiento plantea la pregunta de por qué ha de existir el dolor en los organismos con neocórtex. Si basta con la nocicepción omnipresente, ¿por qué es necesario otro mecanismo como el dolor? Una de las respuestas ha sido que en realidad el dolor podría ser adaptativo. Sería un mecanismo que reforzara la nocicepción, sólo para asegurar que el organismo responde de manera adecuada a un estímulo nocivo. Sin embargo, como señalamos en el capítulo 1, alegar que la adaptación lo explica todo es problemático; y en este caso, no nos lleva muy lejos. Entonces, tal vez el dolor podría ser un subproducto de la evolución de otros rasgos.

Propongamos de forma provisional que los peces y los invertebrados no experimentan dolor. Con arreglo a esto podríamos preguntar: «¿Tienen emociones?». Bueno, se sabe que los peces pueden sufrir estrés, pero esto

introduce el mismo problema que tuvimos con la nocicepción y el dolor. La causa del estrés es un problema físico, no emocional. Algunos piensan que los peces pueden expresar felicidad o tristeza; esta es una idea que se estudiará con más facilidad cuando descubramos qué parte del cerebro de los animales controla las emociones. Examinemos primero en qué parte del cerebro de los animales distintos de nosotros residen las emociones. Tras la aparición de las especies pisciformes, el siguiente gran acontecimiento evolutivo fue la separación de un linaje de peces que dio origen a los vertebrados de cuatro patas llamados tetrápodos.

Muchos de nosotros conocemos la viñeta de Gary Larson en la que dos peces que juegan al béisbol en el agua miran fijamente su única pelota que fue a parar a una isla. Lo cierto es que cuatro patas de apoyo representaban una innovación imponente para el linaje de los tetrápodos, y en su día habría permitido a los peces de la viñeta recoger su pelota de béisbol si hubieran esperado el tiempo suficiente. Pero cuatro patas son insignificantes comparadas con las innovaciones que se desarrollaron en el cerebro de su antepasado común. En concreto, tuvieron lugar dos acontecimientos muy importantes. El primero fue la evolución de lo que, a falta de una palabra mejor, se conoce como «sistema límbico», y el segundo fue la disposición en capas de una lámina de células –el «córtex»– sobre el cerebro básico del pez.

#### «LÍMBICO» Y «TRIUNO» TAMBIÉN SON PALABROTAS

Para comprender mejor el siguiente paso en la evolución del cerebro de los vertebrados, tenemos que volver al telencéfalo de los peces que, tal como hemos mencionado, forma parte del prosencéfalo. El prosencéfalo está formado por dos componentes importantes, y al igual que el área de la que procede nuestra tan cacareada corteza cerebral, es con mucho la más interesante (para nosotros) de las tres regiones principales del cerebro de los peces. Los primeros estudios del telencéfalo de los peces y sus regiones homólogas en otros vertebrados indican que las partes importantes del prosencéfalo aparecieron por orden. En concreto, se creía que una parte del

telencéfalo llamada globo pálido había aparecido en el antepasado común de todos los gnatóstomos y que otra parte del prosencéfalo, conocida como cuerpo estriado (formado por el núcleo caudado y el putamen), había evolucionado a continuación en el antepasado de los anfibios y el resto de los vertebrados. Y la corteza cerebral propiamente dicha evolucionó después con el antepasado común de las aves, los reptiles y los mamíferos.

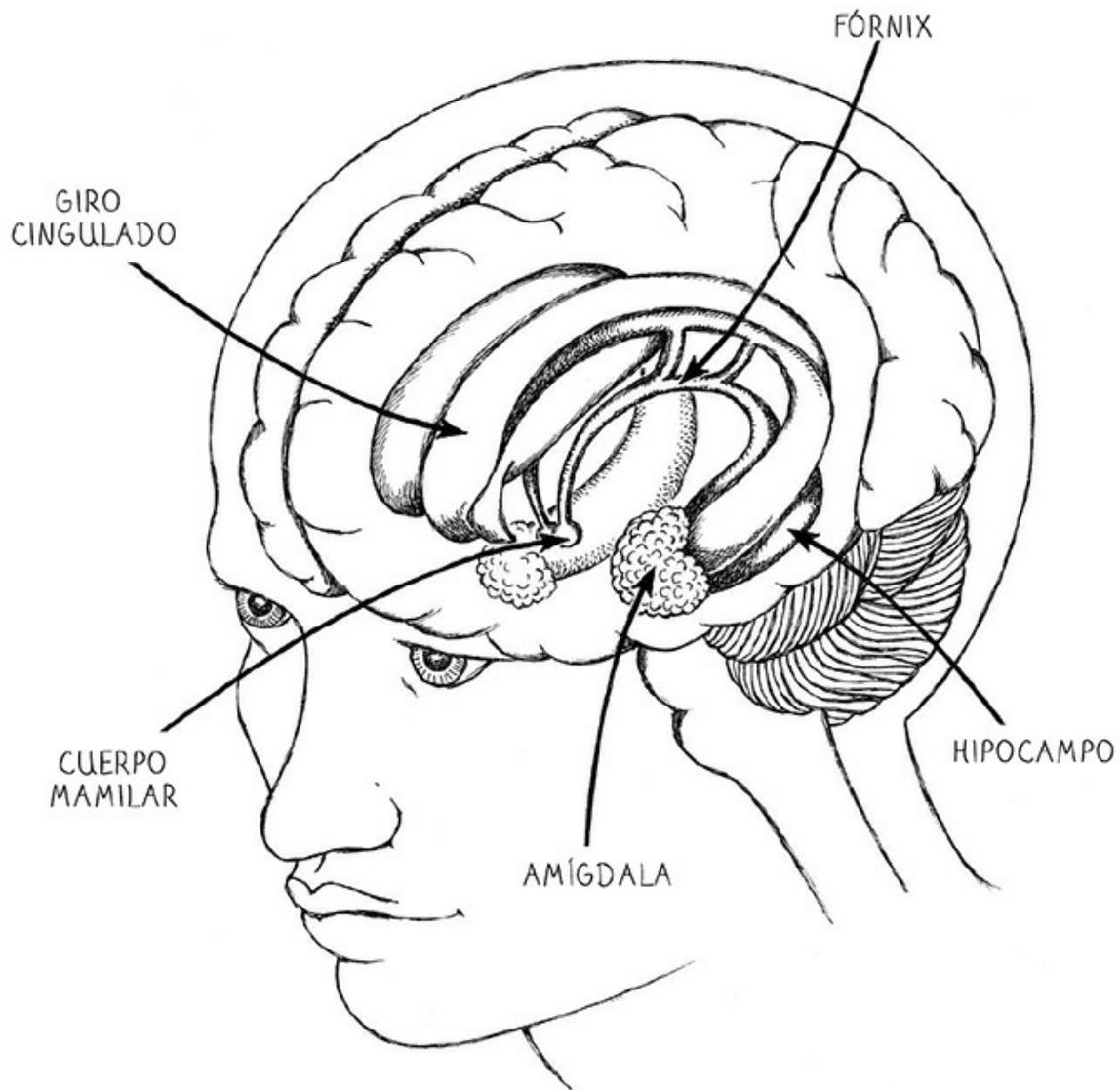
El cuerpo estriado y el globo pálido constituyen lo que la mayoría de los neurobiólogos denominan hoy día los ganglios basales. Éstos controlan el movimiento y también muchas otras funciones. Si los ganglios basales son defectuosos o están dañados, el movimiento motor se ve afectado (las enfermedades de Parkinson y Huntington son dos ejemplos de esa disfunción). Según estas viejas ideas acerca de la evolución del prosencéfalo, se creía que la corteza cerebral había asumido algunas de las funciones de los ganglios basales a medida que los mamíferos evolucionaban. Se creía que el cuerpo estriado y el globo pálido eran a su vez responsables de la clase de movimientos primitivos estereotípicos de los reptiles. Puesto que se pensaba que el córtex había asumido el control de los movimientos motores más sutiles en los mamíferos, los investigadores creían que podrían explicar por qué el movimiento de los mamíferos se adaptaba mucho más al medio que, digamos, el de los reptiles. Sin embargo, resulta que esta forma de pensar secuencial sobre los ganglios basales tiene fallos.

Una manera de examinar la situación es preguntar: «¿Puede haber un cerebro de vertebrado sin ganglios basales?». ¿Por qué? Bueno, si el córtex usurpó las funciones de los ganglios basales, éstos podrían no ser necesarios para la compleja actividad del cerebro. Pero en un artículo con uno de los títulos más terminantes que hemos visto, Anton Reiner, de la Universidad de Tennessee, responde con rotundidad: «NO PUEDE HABER un cerebro de vertebrado sin ganglios basales». Su argumento para responder con tanto énfasis es que, después de examinar minuciosamente varios tipos de cerebros de vertebrados, «el cuerpo estriado y el globo pálido han sido los componentes de los ganglios basales desde los primeros peces con mandíbulas». A tenor del «cableado» de las diversas neuronas implicadas en los ganglios basales, sostiene que extirpar dichos ganglios sería como eliminar

una estación de transmisión en un sistema de conexiones eléctricas. En su opinión, los ganglios basales eran necesarios para asegurar el adecuado cableado del cerebro de los vertebrados, aun cuando el sistema límbico y el córtex se desarrollaran en el antepasado común de los mamíferos.

A ciertos neurobiólogos no les gusta el término «sistema límbico» porque es confuso. Pierde su definición cuando se examina con lupa porque consta de un cúmulo de diversas regiones cerebrales definidas con más precisión y apenas existe acuerdo sobre sus verdaderos límites. Donde coinciden gran parte de los neurobiólogos es en que tres de las muchas regiones cerebrales localizadas en el área general del sistema límbico son la amígdala, el hipocampo y el hipotálamo. También podrían incluirse en el sistema límbico otras regiones del cerebro dependiendo de la definición que se esté utilizando. Entre ellas está el tálamo, la glándula pituitaria e incluso los bulbos olfatorios.

Así que preguntemos qué podría ser, en todo caso y dentro de lo razonable, un sistema límbico.



El «sistema límbico».

Una forma de considerar esta pregunta es revisar la historia de cómo se ha utilizado el término. De esto podemos extraer dos conclusiones: (1) hacer referencia a un sistema límbico supone que en los mamíferos existe una parte del cerebro diferenciada y dedicada a las emociones; y (2) el sistema límbico evolucionó sólo en mamíferos y por consiguiente es un carácter que existió en el antepasado común de todos los mamíferos. Para abordar el primer punto, Mark Bear, Barry W. Connors y Michael A. Paradise, autores de un manual de neurobiología de gran éxito, señalaron que «habida cuenta de la diversidad de

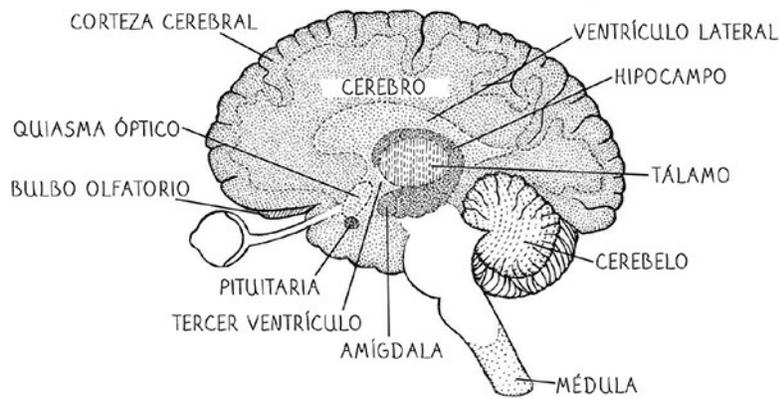
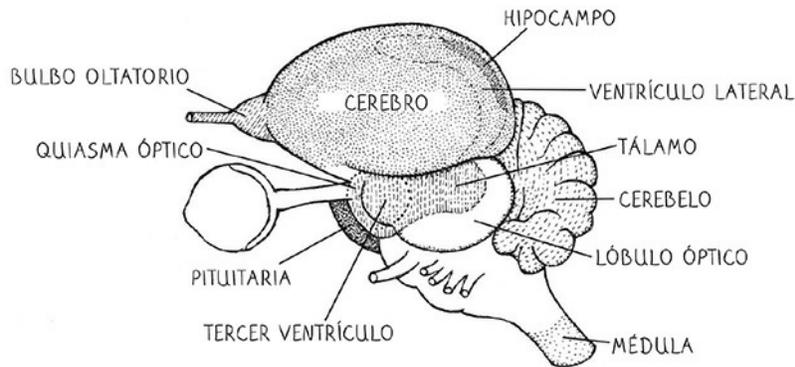
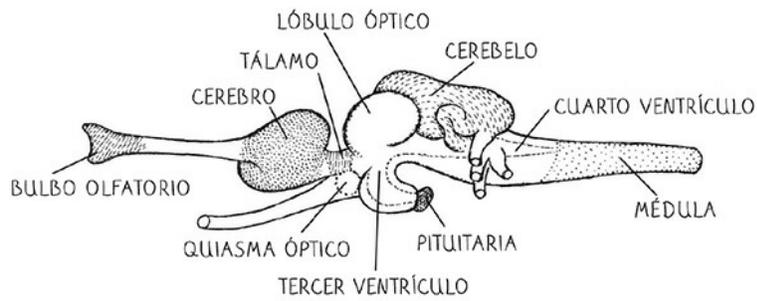
emociones que experimentamos, no existe razón para pensar que sólo esté implicado un sistema y no varios. Por el contrario, hay pruebas fehacientes que indican que algunas estructuras involucradas en las emociones también lo están en otras funciones». Así, para la mayoría de los neurobiólogos está cada vez más claro que la etiqueta de «sistema límbico» simplifica en exceso de qué van nuestras emociones y cómo están estructurados los cerebros. En cuanto al segundo punto, los estudios anatómicos actuales indican que algunas de las estructuras que tradicionalmente se consideraron parte del sistema límbico se encuentran en lagartos y aves, así como en mamíferos. La mejor explicación de estas observaciones es que el antepasado común de lagartos, aves y mamíferos poseyó estas estructuras, lo cual contradice la idea de que el sistema límbico es un invento de los mamíferos. Y esto nos conduce al cerebro de las aves.

Cuando pensamos en todas las conductas complejas que manifiestan las aves, podríamos suponer que ha ocurrido algo interesante en el cerebro de este linaje. En primer lugar, si calculamos la relación cerebro-cuerpo en las aves, resulta que es muy similar a esa misma relación en los simios. Entonces, en términos relativos, el cerebro de las aves no es tan pequeño. Igual de importante para comprender las aves es su genealogía. Este grupo de organismos amplio y variado (las aves han logrado adaptarse a casi todas las zonas ecológicas del planeta) comparte un único antepasado común con los lagartos y, más recientemente, con los dinosaurios. De hecho, suele pensarse que las aves son hoy día los únicos dinosaurios vivos en la tierra. En concreto, comparten un antepasado común con un grupo de dinosaurios llamados celurosaurios, y por ello deberían considerarse dinosaurios sumamente derivados. Debido a que su cerebro no se parece demasiado al nuestro en lo que respecta al córtex, las aves han sido calificadas toscamente de «cabezas de chorlito» o «cabezas huecas». Pero de hecho el cerebro de las aves es más complejo que el de los lagartos. Todo lo que tiene un lagarto también lo tiene un ave, y algo más. Tienen el córtex más desarrollado que los lagartos, lo que hace que en cierto modo sean más parecidos a los mamíferos.

Pero puesto que se considera que las aves son descendientes de los reptiles, las semejanzas entre los cerebros de las aves y los mamíferos deben

haberse producido por convergencia. De hecho, Nathan Emery y Nicola Clayton, de la Universidad de Cambridge, han propuesto que «existen indicios en la neurobiología moderna que apuntan a que los cerebros de las aves y los mamíferos pueden haber hallado soluciones similares a los mismos problemas, lo que demuestra una evolución convergente tanto mental como neuronal». La convergencia es aún más notable cuando se observan las semejanzas dentro de los cerebros respectivos. Resulta que las conexiones neuronales en aves y mamíferos relativas a la visión y el aprendizaje vocal son similares. Además, las aves tienen lo que muchos neuroanatomistas denominarían ciertos componentes de un sistema límbico. Sin embargo, debido a una relación evolutiva más cercana con los lagartos que con nosotros, es evidente que las innovaciones que se desarrollaron en nuestro linaje no formaron parte de las suyas. E igualmente, las estructuras originales que formaron parte del cerebro interno del antepasado ave-lagarto han adquirido los cambios novedosos que no adquirieron las nuestras.

Tenemos tendencia a aceptar que cuando la definición de una estructura es imprecisa, como en el caso del sistema límbico, pierde fuerza. La noción de un sistema límbico unitario causará todo tipo de problemas para dar sentido a la homología, y por lo tanto confundirá todas las metáforas que pudieran ser útiles. Sin embargo, que un neurobiólogo abandone o no un término depende de lo terco que sea. Suprimir un término del léxico de una disciplina es muy difícil, a veces imposible. Un famoso científico dijo en una ocasión que un término que no le gustaba estaba «listo para la quema». Adivina qué término era ese: ¡Homología! Pero aunque este famoso biólogo quería que el término fuera eliminado del vocabulario biológico, sigue ahí, porque su uso es esencial para entender el más fundamental de los principios evolutivos: la descendencia con modificación. Así que aunque es evidente que el término «sistema límbico» tiene su utilidad, y lo más probable es que se aferre a ella, es importante que los neurobiólogos admitan sus limitaciones y que es más valiosa en el contexto de la metáfora evolutiva.



Comparación de los cerebros de lagarto (arriba), de ave (en medio) y humano (abajo), que muestra que la complejidad del córtex en aves y mamíferos es cada vez más parecida. Obsérvese que el lagarto carece de las regiones ampliadas del córtex que sí tienen las aves y los mamíferos, pero obsérvese también las áreas de similitud en los tres cerebros tal como se comenta en el texto.

Otra idea de cómo evolucionó el cerebro que antaño gozó de popularidad es la teoría del «cerebro triuno». Pero en los últimos tiempos también ha sido muy criticada. El término se introdujo para describir el cerebro de tres capas que tenemos los seres humanos y que no hay que confundir con el cerebro de tres partes —romboencéfalo, mesencéfalo y prosencéfalo— del que acabamos de

hablar. El cerebro triuno fue acuñado hace varias décadas por el neurobiólogo de Yale Paul MacLean con la intención de describir la adición secuencial de capas cerebrales a lo largo del periodo evolutivo. Es una idea parecida a la de la adición secuencial de capas en los ganglios basales. El cerebro triuno empezó con un cerebro de lagarto. A continuación apareció un cerebro de «protomamífero» con un sistema límbico. Y por último llegó el córtex, que en los mamíferos adquirió importancia y en los primates se agranda mucho más. Aunque esta explicación sobre la complejidad de nuestro cerebro resulta interesante y nos ayuda a comprender su estructura de dentro a fuera, en realidad representa una simplificación excesiva a la par que burda de cómo evolucionó nuestro cerebro.

Una razón de que esta idea del cerebro fuera tan atractiva es que sigue un modo antiquísimo de describir la naturaleza que al menos se remonta a Aristóteles. Es *La scala naturae*, o La cadena de los seres, que propone que la vida es una progresión desde lo más simple hasta lo más complejo. Empezando por el suelo, la cadena es un proceso ascendente a través de las plantas, luego los animales inferiores y continúa hacia la perfección a través de una sucesión casi infinita de especies. En la cúspide de la *scala naturae* están los seres humanos, sólo superados por los ángeles en la versión cristiana medieval de la cadena y, en última instancia, por Dios. Confiamos en que sea fácil comprender por qué esta forma de pensar es errónea. Como indicamos en el capítulo 1, la evolución no transcurre desde lo primitivo hacia la perfección. Y lo que es más importante, todos los organismos de este planeta tienen una historia evolutiva igualmente larga. Están obligados. Todos los organismos de la Tierra proceden de un único antepasado común, y así las bacterias de nuestros dientes, nuestro perro y las plantas de nuestro jardín han pasado por una enorme cantidad de descendencia con modificación. Ningún organismo ha evolucionado mejor que otro.

Entonces, se podría discrepar de cómo, a veces, hemos adoptado en este libro un enfoque centrado en el hombre para tratar de entender la evolución del cerebro. Pero podemos estar seguros de que nuestros lectores no serán bacterias ni perros ni calamares. Si el amigo cefalópodo de Bob Esponja, Calamardo, fuera el destinatario de este libro, seguramente no nos habría

ocupado tanto tiempo fijar nuestra atención en la validez de la palabra «límbico» o en si existe un cerebro triuno. En cambio, es probable que nos hubiéramos centrado en los matices del cerebro de los cefalópodos. Para llegar a un cerebro de cefalópodo, algunos de los antepasados que ya hemos comentado habrían sido pertinentes, de modo que la historia hubiera sido similar. Pero después de que los protóstomos se hubieran separado de los deuteróstomos, la historia habría divergido. Sin embargo, sea cual sea el producto final en el que centremos nuestra atención, los principios de la función cerebral y la evolución siguen siendo iguales en lo esencial. Esto significa entre otras cosas que, al igual que la mayoría de los términos imprecisos que persisten, «cerebro triuno» resulta útil para ayudarnos a entender cómo encajan las partes del cerebro. Donde falla es en la explicación de cómo evolucionó el cerebro.

Sólo mediante el examen de los verdaderos antepasados, o de los antepasados reconstruidos a partir de pruebas comparativas, podemos dar sentido a los acontecimientos evolutivos que condujeron a nuestra aparición como seres pensantes. Poner en fila a los seres vivos y transformar cada uno en el siguiente es una forma atractiva pero errónea de ver nuestra evolución. Sencillamente, no podemos colocarnos a la cabeza de una serie secuencial y aprender algo que sea útil acerca de cómo llegamos a ser como somos. Sin embargo, no cabe duda de que nosotros, los seres humanos, tenemos muchas conductas interesantes que adquirimos de una serie de antepasados ya extinguidos. Pero antes de pasar a esos temas, tenemos que examinar algunos de los aspectos moleculares y fisiológicos del funcionamiento de dichas regiones cerebrales.

### CÓMETE LAS NATILLAS, CÓMETELAS, CÓMETELAS

Cuando hace tiempo que no has comido, ¿qué ocurre? Tienes hambre. Pero ¿qué significa de verdad tener hambre? Es sólo la sensación del cuerpo que te dice que tienes que alimentarte. Piensa que tienes hambre hacia las cuatro de la tarde. Tal vez tu estómago gruñe, quizás te sientes un poco mareado y

cansado. Tu cuerpo te dice a ti y a Homer Simpson «cómete las natillas, cómetelas, cómetelas». Es una reacción puramente fisiológica a tu situación. Pero ¿qué pasa cuando estás a punto de enfrentarte a algo horrible, como tener que pagar facturas vencidas o contarle algo a un amigo que quizá no quisiera oír? Sientes ansiedad. Y esta vez la sensación procede de otro sitio. Ya no es fisiológica: esta vez es una sensación emocional que te dice que tienes que responder ante algo. La sensación también podría tener un efecto fisiológico, como tener el estómago revuelto o que te suden las palmas de las manos, pero la sensación propiamente dicha es muy diferente del hambre.

La ansiedad y el hambre son por lo tanto dos respuestas divergentes. Una es visceral, la otra más etérea, y su origen es distinto. La fisiología crea la sensación de hambre, pero el cerebro produce la sensación de ansiedad. ¿Cómo funciona todo esto? Bueno, si bien este asunto de las sensaciones es complejo, una buena forma de entenderlo es saber que para producir ansiedad, miedo o felicidad, los potenciales de acción que circulan por nuestros axones tienen que regularse (activarse, desactivarse, aumentar y disminuir) y enviarse a los lugares adecuados del cerebro y del sistema nervioso periférico. La combinación de impulsos electroquímicos en una parte específica del cerebro es lo que produce la respuesta emocional. Uno de los elementos interactivos más inteligentes de la exposición del Museo Americano de Historia Natural en la que se basa este libro, atañe a nuestro intento de explicar cómo afectan los neurotransmisores a las emociones de nuestra vida cotidiana. La aportación científica de la dra. Maggie Zellner y el sentido creativo de Helene Alonso, directora de Módulos Interactivos del museo, desarrollaron el interactivo que realiza el seguimiento de lo que ocurre en el cerebro de un joven que se enfrenta a una serie de problemas cotidianos.

El interactivo tiene dos tableros de mando. El primero es un conjunto de cuatro registros que miden los niveles de cuatro tipos de neurotransmisores: dopamina, endorfinas, oxitocina y hormonas del estrés como el cortisol. Los registros se llenan de distintos colores que representan los cuatro tipos de neurotransmisores. En este tablero hay un mapa del cerebro que indica la cantidad y posición de cada neurotransmisor. El segundo tablero de mandos muestra los diversos sistemas fisiológicos del cuerpo del chico —estómago,

pulmones, corazón, músculos y glándulas sudoríparas— que se verán afectados por la actividad de un aumento o disminución de los neurotransmisores.

Cuando te acercas al interactivo, te preguntan si deseas jugar o aprender más sobre neurotransmisores. Si decides jugar, el interactivo comienza con el chico sentado leyendo un libro. El chico olfatea las galletas que se están horneando. En el diagrama del cerebro que vemos en el tablero de los neurotransmisores, la región olfativa del cerebro se enciende, y entonces se produce una gran cantidad de dopamina que inunda el cuerpo estriado, el hipocampo y la corteza prefrontal. Los niveles de dopamina aumentan en el medidor del tablero. El neurotransmisor dopamina es una molécula pequeña, pero aun así desempeña un papel colosal en la fisiología de nuestro cerebro; en general se la considera responsable de controlar las necesidades y los antojos. Con el cuerpo estriado anegado de dopamina, el estómago gruñe y en el tablero de la fisiología se ve que se le hace la boca agua esperando el momento de comer esas sabrosas galletas que mamá está horneando. Pero de repente aparece un aviso en el interactivo, porque mamá ha advertido al chico que: «No se picotea antes de cenar». Se puede ver un pequeño punto luminoso de la hormona del estrés que asciende en el tablero del transmisor. En este momento, el interactivo pide al jugador que elija: (A) Obedece a mamá y sal a jugar o (B) Ve y coge una galleta. Todavía está por ver que una sola persona que interaccione con esta exposición elija la opción A. Todos quieren la galleta. Elegir la opción B significa que los niveles de dopamina del chico se elevan todavía más. Asimismo, el diagrama del cerebro en el tablero del transmisor muestra una cierta actividad en la corteza motora, la franja de la corteza cerebral que controla el movimiento. Una vez dentro de la cocina, las galletas son una presa legítima, y cuando las ve los niveles de dopamina del muchacho aumentan aún más. Pero la imagen de mamá aparece en la pantalla dentro de una burbuja. Las regiones del hipocampo se iluminan en el tablero del transmisor y el chico recuerda que mamá dijo: «¡No se picotea antes de cenar!». Naturalmente, sus niveles de hormona del estrés se disparan en el registro del tablero de los neurotransmisores, mientras que en el tablero de la fisiología el ritmo cardíaco y la respiración se aceleran, y el chico empieza a sudar un poco. Cuando coge una galleta y se la come, enseguida la glándula

pituitaria libera endorfinas al torrente circulatorio y el hipotálamo hace lo propio a diversas partes del cerebro.

Ahora el chico está muy contento y su respiración así como su ritmo cardíaco se hacen más lentos. Pero entonces mamá aparece en la puerta. «¡Te pillé!», dice el interactivo. Inmediatamente los niveles de la hormona del estrés del muchacho se disparan en el tablero de los neurotransmisores. El tablero de la fisiología se vuelve loco: el ritmo cardíaco aumenta, la respiración se acelera, los músculos se tensan y las manos sudan. En ese momento el interactivo pregunta: (A) ¿Te quedas y pides disculpas a mamá? o (B) ¿sales corriendo y evitas a mamá? Llegados a este punto la mayoría de las personas asumen que han sido bastante malas, de modo que pulsan A y se disculpan. En cuanto se han disculpado, el nivel de la hormona del estrés cae en picado. Mientras el muchacho hace las paces con su madre, los niveles de oxitocina aumentan y también los de endorfinas. El vínculo del chico con la madre se fortalece con la oxitocina, y las endorfinas le hacen sentirse la mar de bien. Ahora el tablero de la fisiología se reinicia y el chico está listo para la siguiente serie de retos que la vida le ofrece. Los visitantes que utilizan el interactivo se van con una idea bastante clara del papel esencial de los neurotransmisores en estas acciones y reacciones que tienen lugar en el cerebro.

Como hemos visto, los neurotransmisores son moléculas pequeñas que las vacuolas de las neuronas presinápticas liberan en las sinapsis. Estas moléculas son diversas y van desde compuestos pequeños como el óxido nítrico, el monóxido de carbono y la acetilcolina, a pequeños aminoácidos como el glutamato, a unas moléculas llamadas monoaminas entre las que se cuenta la epinefrina (también conocida como adrenalina), a moléculas más grandes como las hormonas, y a cadenas de aminoácidos aún mayores llamadas péptidos (proteínas pequeñas). Los neurotransmisores se acumulan en esas vacuolas de la célula presináptica y se liberan como consecuencia de los potenciales de acción o los potenciales electroquímicos escalonados que llegan a la superficie de la membrana interna presináptica. Si el grado y la frecuencia del potencial de acción o del escalonado son los apropiados, la vacuola se fusiona con el interior de la membrana de la célula presináptica y –

¡ya está!— un caudal de neurotransmisores se vierte en la sinapsis. Es más que probable que el uso de aminoácidos o de cadenas cortas de los mismos como neurotransmisores se deba a su gran abundancia (a resultas de la descomposición de los nutrientes), y simplemente se reciclen en componentes neurotransmisores de las sinapsis. Pero algunos neurotransmisores son específicos de ciertas partes localizadas del cerebro. Esto indica que las células de esas regiones están especializadas en elaborar o procesar un neurotransmisor determinado. Los neurotransmisores actúan uniéndose a una molécula receptora específica que se encuentra en la membrana celular de la neurona postsináptica. La unión del neurotransmisor al receptor produce un cambio en este último que desencadena las reacciones intracelulares de las que hemos hablado en el capítulo 3. Según el neurotransmisor de que se trate y la región del cerebro en que se produzca, la célula postsináptica responderá inhibiéndose o estimulándose.

Los neurotransmisores específicos tienen tareas específicas. Por ejemplo, el glutamato, ese pequeño aminoácido transmisor que ya hemos mencionado, afecta a las llamadas sinapsis excitadoras rápidas tanto en el cerebro como en la médula espinal. Por lo tanto, el glutamato es un neurotransmisor excitador, uno de los más importantes de nuestro cerebro. No es de extrañar que las plantas se centren en ese neurotransmisor cuando desarrollan sus defensas para evitar que las devoren. El glutamato también participa activamente —de hecho es el principal agente— en las sinapsis modificables, que pueden incrementar o reducir la intensidad de la conexión y el impulso. Otro neurotransmisor omnipresente es el GABA (ácido gamma-aminobutírico). Éste se comporta de un modo muy parecido al glutamato, salvo que en lugar de ser excitador, es inhibitorio. Es el «botón de apagado» de la transmisión nerviosa, del mismo modo que el glutamato es el «botón de encendido». Un ejemplo de neurotransmisor sumamente localizado es la sustancia conocida como P, un péptido que liberan las puntas de las neuronas sensitivas, y tiene importancia en la transmisión del dolor y la inflamación. Si bien la mayoría de los neurotransmisores actúan inhibiendo o excitando una célula a través de una sinapsis (transmisión sináptica), algunos actúan de manera conjunta y coordinada. Éstos se denominan «sistemas neurotransmisores» y entre ellos

figuran los sistemas dopamina, serotonina, norepinefrina y acetilcolina (en general, sistema colinérgico). Es probable que los dos primeros nos resulten más familiares: la dopamina por su asociación con Oliver Sacks y Robin Williams, y la serotonina por su papel en la depresión.

En la película *Despertares*, Robin Williams interpretaba a Oliver Sacks, un médico joven que investigaba una extraña afección conocida como encefalitis letárgica, un síndrome de origen desconocido pero probablemente relacionado con reacciones inmunes que dejaban a los afectados en un estado de somnolencia. Los pacientes habían contraído la enfermedad justo después de la Primera Guerra Mundial y permanecieron en un estado de estupor parecido al sueño durante varias décadas. Sacks recetó que les administraran L-Dopa, un precursor de la dopamina. Se observó una mejoría espectacular de la «enfermedad del sueño», lo que indicaba que había implícita una falta de dopamina. Sin embargo, tras el tratamiento con L-Dopa, la mejoría es casi siempre de corta duración, ya que el neurotransmisor dopamina está envuelto en un proceso llamado «neuromodulación». A diferencia de la transmisión sináptica directa, un neuromodulador se libera y difunde bañando una gran cantidad de sinapsis; esto provoca una respuesta excitadora o inhibidora de las células nerviosas involucradas en la sinapsis. Lo que hizo Sacks al administrar L-Dopa a los pacientes letárgicos fue inducir una neuromodulación que excitó las neuronas previamente letárgicas.

#### LA LIMPIEZA DEL PASILLO SINÁPTICO

Un aspecto importante de los neurotransmisores y los neuromoduladores es que necesitan que los limpien constantemente y que los reutilicen o los desechen. Si se quedan pegados a los receptores de la superficie de las neuronas postsinápticas, o si pululan alrededor de la sinapsis, entonces las células postsinápticas no detectan los leves cambios de concentración de los neurotransmisores necesarios para inhibir o excitar una neurona. Imaginemos esto: la célula presináptica libera acetilcolina en la sinapsis de dos neuronas que interaccionan. La pequeña molécula transmisora encuentra receptores en

la membrana de la célula postsináptica e interacciona con ellos. Esto induce una respuesta electroquímica en la célula postsináptica y se envía un potencial de acción a través del axón. Si la acetilcolina no se limpia, se barre o se elimina, la sinapsis quedará después inservible. Esto se debe a que si otro potencial de acción se dirige hacia la célula presináptica señalizando la liberación de más acetilcolina, dicha liberación no tendrá ningún significado para la célula postsináptica ya que todos sus receptores de acetilcolina estarán obstruidos.

Por lo que se ve, cada neurotransmisor tiene una manera especial de restaurar la sinapsis, de la misma forma que todos nosotros tenemos maneras distintas de limpiar los suelos sucios. Una estrategia de limpieza consiste en utilizar un producto potente como el Ajax, que disolverá la suciedad del suelo, y otra sacar el Dustbuster<sup>1</sup> y aspirar. Pero es probable que la favorita sea barrer y esconder la mugre bajo la alfombra. Estas distintas estrategias de limpieza son muy parecidas a las que usan las neuronas para limpiar los neurotransmisores. Algunas células utilizan el método del producto de limpieza potente en el caso de la acetilcolina. Una enzima llamada acetilcolinesterasa (el producto de limpieza potente) degrada dicho transmisor en la sinapsis descomponiéndolo en dos productos inactivos. Hay una forma interesante de fregar concienzudamente la serotonina, el otro sistema neuromodulador que ya mencionamos anteriormente. La serotonina está presente en muchas respuestas fisiológicas, pero está íntimamente relacionada con la alimentación y el tracto digestivo, donde se encuentra en grandes cantidades (hasta el 80 % de toda la serotonina de nuestro cuerpo está en el intestino). También se encuentra, por supuesto, en el cerebro. Aquí, un área localizada del tallo encefálico denominada núcleos de rafe libera serotonina y otros neuromoduladores. Las células de los núcleos de rafe se extienden por el cerebro y la serotonina se desplaza a otras regiones a través de los axones de los núcleos de rafe, que llegan a casi todas las zonas del cerebro. Los receptores de serotonina en las neuronas postsinápticas actúan en su mayor parte según los GCPR y segundos mensajeros (véase el capítulo 2). Para detener la respuesta de la célula postsináptica, la serotonina vuelve a ser «succionada» por la célula presináptica, como si pasara el aspirador para

limpiar. Este proceso se llama «recaptación». Por último, la serotonina se dispersa y se acumula en los riñones, donde es degradada, algo así como barrer el neurotransmisor bajo la alfombra; en este caso la alfombra es el riñón.

En la exposición interactiva que acabamos de describir, las neuronas del cerebro del chico experimentan transmisión sináptica, actividad neurotransmisora, neuromodulación y proceso de limpieza una y otra vez en un corto espacio de tiempo. El cerebro y las sustancias neuroquímicas en juego actúan veloz y frenéticamente. A medida que el estado de ánimo y la fisiología del muchacho cambian sobre la marcha, el proceso de limpieza es rápido y eficaz. Como consecuencia de la actividad de los neurotransmisores, del proceso de limpieza y la pauta general de los potenciales de acción que circulan por el cerebro, el chico puede reaccionar exhibiendo diversas emociones. Las opciones elegidas –sea que la persona que interacciona con la exposición elija (B) ser mala y coger la galleta, o (A) ser buena y salir a jugar fuera– ponen de manifiesto otro nivel de intervención cerebral. Son procesos cerebrales de toma de decisiones que tienen lugar en la corteza prefrontal (capítulo 6).

#### LO BUENO, LO MALO Y LO FEO DE LOS NEUROTRANSMISORES

Debido a que la limpieza de cada neurotransmisor se hace por una vía específica, es posible utilizar fuerzas externas distintas para que se dirijan a un transmisor concreto sin interferir con otros. La serotonina, por ejemplo, utiliza el proceso de recaptación para limpiar, y se puede modular su efecto controlándolo. Muchas veces, los antidepresivos se basan en la interrupción específica del proceso de limpieza de la sinapsis. En el tratamiento de la depresión esta interrupción puede ser general o más individualizada, como ocurre con los inhibidores selectivos de la recaptación de serotonina (ISRS). La tan conocida serotonina en los seres humanos se parece mucho a algunos compuestos que proceden de distintos organismos y a otros que pueden sintetizarse. Estos compuestos naturales y sintéticos se denominan agonistas, y

pueden interferir con los receptores situados en la célula postsináptica. Cuando se liberan en el cerebro, «detienen» el proceso de limpieza y bloquean la sinapsis.

Una manera efectiva de alterar el equilibrio de la serotonina en la sinapsis es lograr que las vacuolas que la contienen la liberen en cantidades desorbitadas. Así es cómo funciona el empatógeno-entactógeno MDMA (X o éxtasis). Cuando la serotonina inunda la sinapsis ésta se bloquea y aparecen los colicoes que experimentan los consumidores de éxtasis. Los «alucinógenos clásicos», drogas como la psilocibina, la dietilamida del ácido lisérgico (LSD) y la mescalina, también actúan como agonistas de la serotonina y afectan a los receptores de la corteza cerebral. Estos alucinógenos clásicos son agonistas potentes y pueden modular la interacción de la serotonina y el glutamato en la corteza prefrontal. En un cerebro no colocado, la serotonina modula la liberación de glutamato y asegura que se libere una cantidad razonable en la corteza. Pero cuando se libera demasiado glutamato, el cerebro empieza a excitarse de un modo extraño y se produce el «viaje».

La interacción anormal de los sistemas serotonina y glutamato en los psicodélicos es un ejemplo de dos sistemas neurotransmisores que chocan. Otra clase de interacciones semejantes se producen en la adicción. En este caso, la glándula pituitaria libera unos neurotransmisores llamados endorfinas que entran en el torrente sanguíneo, y el hipotálamo también libera endorfinas pero en el cerebro. Las endorfinas poseen una elevada afinidad por una clase de moléculas neurorreceptoras celulares llamadas receptores opioides. Éstos se presentan en diversos tipos, pero el que forma parte de la interacción de distintos sistemas neuromoduladores se denomina «opioide mu». Las endorfinas tienen una elevada afinidad por este receptor, que por lo general es un receptor de neurona presináptica que afecta a la liberación del neurotransmisor. En concreto, inhibe la secreción de GABA y desinhibe la de dopamina. Todo va bien cuando el sistema está equilibrado por nuestra fisiología, pero cuando se introducen en el cerebro moléculas externas que actúan de agonistas de las endorfinas y se unen a los receptores opioides, suceden cosas perjudiciales. Ingeridos, inhalados o inyectados, los agonistas que se unen a receptores opioides causarán una liberación anormal de

dopamina.

Aquí, la dopamina es la clave. Ayuda a nuestro cerebro a modular nuestras expectativas de placer y recompensa. ¿Cómo consiguió la dopamina un cometido tan importante? La dra. Nora Volkow, directora del Instituto Nacional sobre el Abuso de Drogas, perteneciente a los Institutos Nacionales de la Salud (NIH),<sup>2</sup> explica que los organismos siempre han requerido un cierto refuerzo para admitir que estaban pasando cosas buenas y animarles a ir en pos de ellas. De modo que la dopamina evolucionó como el neurotransmisor que prepara a los organismos para hacer lo necesario por sobrevivir y ofrecer una sensación de placer al cerebro. La sensación de placer asociada a un acto específico como comer o tener relaciones sexuales nos motiva para hacerlo una y otra vez. Y cuando se introducen fuentes exógenas de endorfinas en el sistema y la dopamina se libera de manera anormal en las regiones internas del cerebro («el sistema límbico»), en cantidades hasta 10 veces mayores de lo habitual, el cerebro empieza a decirse a sí mismo: «Si utilizo esta droga, entonces obtendré un gran beneficio en el departamento del placer».

La introducción de agonistas de receptores opioides como la cocaína y la heroína provoca un gran aumento de los niveles de dopamina que el cerebro malinterpretará considerándolos normales. La necesidad del cerebro de mantener un nivel de dopamina «normal» aumentado anulará todo; y puesto que la droga es lo único que puede cumplir la expectativa del cerebro, será utilizada una y otra vez. En esencia, lo que ocurre en la adicción es que los niveles de dopamina en el cerebro de los drogadictos son siempre elevados, lo cual produce alteraciones cerebrales físicas y duraderas. Las neuronas se vuelven, por así decirlo, insensibles a los agonistas y resistentes a verse afectadas por la droga. Esto a su vez conlleva una pérdida de receptores en la sinapsis. El sistema entonces se bloquea, más o menos como en el caso del sistema de serotonina que hemos comentado antes, pero con unas repercusiones radicalmente opuestas. En realidad, «se bloquea» no es la mejor forma de expresarlo. Adam Kepecs, del Cold Spring Harbor Laboratory, estudia la neurobiología de la toma de decisiones y lo llama «secuestro neuronal»; lo explica así:

Pongamos que te sientes feliz con un gran helado de chocolate. Con el tiempo aprendes a contar con que el helado de chocolate sea verdaderamente grande y no liberas más dopamina a la espera de recibirlo. Mientras que si tomas una droga adictiva nunca puedes aprender a esperarla porque la propia droga liberará un chute extra de dopamina. Y cuando eso sucede, el valor de esa droga sigue aumentando porque ahora has aprendido que, «vaya, no se han cumplido mis expectativas, por lo tanto esto debe ser mucho más valioso de lo que yo pensaba». De modo que en esencia lo que termina pasando es que el sistema dopamina se ve secuestrado por estas drogas.

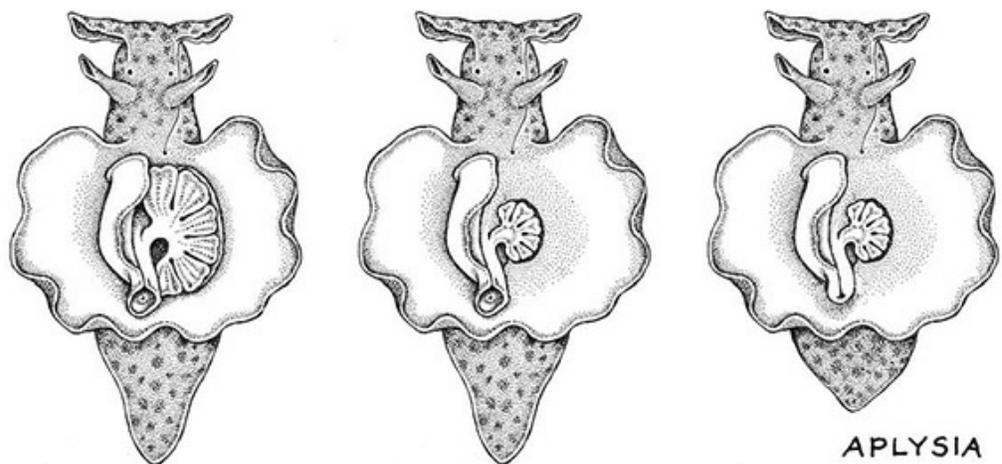
Uno de los aspectos decisivos de la adicción es que, a medida que se lleva a cabo el secuestro y el drogadicto está cada vez más expuesto a la droga, el cerebro aprende en seguida que la droga es necesaria; y la memoria, sobre todo un tipo de memoria llamada condicionamiento, reforzará el deseo de la droga. El cerebro secuestrado está ahora en completa desventaja, con el refuerzo del placer y la memoria condicional actuando en contra suya. La adicción se produce cuando el impulso de consumir el agente que incrementa el nivel de dopamina se vuelve incontrolable. Las emociones y la memoria son aquí la clave; pero también forman parte de la historia de cómo interpretamos el mundo exterior, de modo que ahora pasamos a estos aspectos importantes del cerebro.

---

1. El Dustbuster es un pequeño aspirador de mano de la marca Black and Decker (*N. de las T.*)

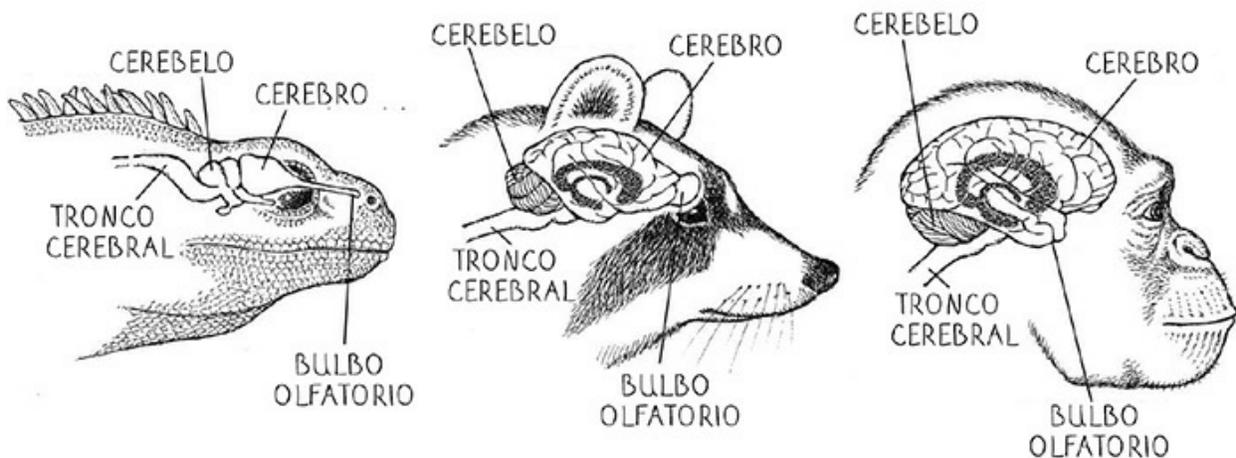
2. Siglas correspondientes a National Institutes of Health, grupo de instituciones del gobierno de los Estados Unidos dedicadas a la investigación médica. (*N. de las T.*)

## Emociones y memoria



Las emociones constituyen una innovación importante en la historia de la vida sobre la tierra. Las partes del cerebro que a veces se atribuyen al sistema límbico poseen funciones diversas, pero por lo general están implicadas en el procesamiento y expresión de las emociones. Entre estas estructuras se cuentan regiones cerebrales como la amígdala, el hipocampo, el córtex cingulado y el hipotálamo, que en conjunto constituyen una especie de circuito en la región interior del cerebro. Dado que los lagartos y los pájaros poseen versiones limitadas de estas regiones, no resulta sorprendente que las diferencias fundamentales de comportamiento entre ellos y los mamíferos residan en los componentes emocionales. Los lagartos, por decirlo de alguna manera, son criaturas que carecen de emociones, que responden de un modo reflejo, aunque ello no constituya necesariamente una desventaja o un indicio de un «menor grado evolutivo». Muchos organismos se manejan de un modo bastante

eficiente sin emociones porque no las necesitan para nada concreto. Los organismos unicelulares, los animales muy simples e incluso algunos muy complejos no tienen emociones. El hecho de sugerir que una hidra, una mosca del vinagre o incluso un lagarto se siente feliz o infeliz supondría sobrestimar su sistema nervioso: sencillamente, no poseen la base neuronal necesaria para experimentar emociones. A la inversa, la comprensión de nuestro sistema límbico se convierte en un aspecto básico de cómo entendemos nuestras emociones.



Comparación del sistema límbico en tres vertebrados: lagarto (izquierda), mapache (centro) y primate (derecha). El sistema límbico aparece sombreado. El cerebelo, el bulbo raquídeo, el cerebro y el bulbo óptico aparecen indicados como puntos de referencia. Obsérvese la ausencia de región sombreada en el lagarto.

Una vez más, Aristóteles constituye un buen punto de partida. Si bien él no creía que el cerebro tuviera mucho que ver con el pensamiento o la conciencia, no dudó en afirmar que emociones como la risa eran un rasgo exclusivo de los humanos. Después de él, hay que saltar aproximadamente dos mil años hasta Paul Broca, ese gran estudioso del cerebro en el siglo XIX, que exploró muchos aspectos de su anatomía y reconoció la importancia de lo que él llamó el lóbulo límbico. A pesar de que Broca se centró en las presuntas funciones olfativas de esta parte del cerebro, sí reconoció su importancia en relación a la conducta emocional (en un aspecto muy visceral que denominó *l'homme brutale*). Quizá debamos buscar en Charles Darwin una conexión más elaborada entre el cerebro y las emociones, ya que nadie articuló mejor

que él en *La expresión de las emociones en el hombre y en los animales* (1872) el vínculo entre las emociones animales y las humanas. En este libro, sorprendente e innovador, Darwin subrayó un gran número de similitudes entre los seres humanos y otros mamíferos con respecto a expresiones faciales, reacciones y posturas. La brillantez del análisis de Darwin reside en su hipótesis de que estas similitudes son innatas, resultado de un ancestro común y (quizá más importante) producto de la selección natural. ¿Por qué si no a un perro se le eriza el lomo y un hombre hincha el pecho cuando se les desafía? ¿Por qué enseñamos los dientes cuando estamos enfadados o tenemos miedo, al igual que los animales? Darwin reconoció que algunas de nuestras emociones se encontraban dentro de esta categoría primitiva, pero también se dio cuenta de que otras parecen más avanzadas. Sin embargo, casi todas las emociones humanas en las que se fijó presentaban las mismas características que aquellas mostradas por los mamíferos, y a pesar de que Darwin no olvidó ni a los lagartos ni a los pájaros en este extraordinario libro, centró la mayor parte de sus explicaciones evolutivas en la conexión mamífero-humano.

Darwin dedicó muchas páginas a emociones como la tristeza, el enfado, la felicidad y el miedo. Observó que las acciones y reacciones de numerosos mamíferos se parecen al modo en que los humanos expresan sus emociones, como en el caso de la risa. Podría decirse, sugirió, «que la sonrisa es la primera etapa en el desarrollo de una carcajada». En su opinión, la risa podría haber evolucionado porque «los mismos músculos participan en débil grado siempre que algo provoca en nosotros un sentimiento que, si fuera más fuerte, nos llevaría a la risa; y el resultado es una sonrisa». Más recientemente, algunos estudiosos del comportamiento animal han sugerido que la risa está más extendida entre los mamíferos de lo que se pensaba con anterioridad, incluso más de lo que Darwin sospechaba. Por poner un ejemplo, el psicólogo Jaak Panskepp, que ha estudiado la risa en las ratas, piensa incluso que el humor en estos animales podría expresarse en forma de gags cómicos. Esto puede parecer poco probable, pero hay que tener en cuenta que no podemos oír a las ratas reírse porque su risa tiene una frecuencia muy superior a nuestro rango de audición (aproximadamente 50.000 Hz, mientras que nosotros habitualmente podemos captar entre 25 Hz y 20.000 Hz); además, para que las

ratas se ríen hay que hacerles cosquillas o sorprenderlas cuando están jugando. Panskepp y sus colegas están convencidos de que las ratas con las que trabajan se ríen (puede verlo usted mismo en <http://graphics8.nytimes.com/packages/video/science/rat.mov>).

Panskepp es muy cauteloso a la hora de dar el salto a la risa humana, pero aquí nos volvemos a encontrar de nuevo con el problema de la metáfora. Cuando buscamos explicaciones para fenómenos que observamos en la naturaleza, tenemos que tener cuidado de no caer en la trampa de contar cuentos (véase el capítulo 1). Si los chillidos de las ratas son lo «mismo» que la risa humana, sería lógico que este fenómeno se diera en muchos más mamíferos de los que en la actualidad conocemos, por lo que es más probable que sea producto de una convergencia con la risa humana. Y sin embargo, dice Panskepp, aunque no sea más que una metáfora, tenemos mucho que aprender de la risa de las ratas, tanto a nivel genético como conductual. ¿Quién sabe? A lo mejor sus chistes son divertidísimos.

#### ESTOY UN POCO *VERKLEEMPT*<sup>1</sup> (MIKE MYERS)

Las emociones son un tema tan delicado que al escribir este libro nos preguntamos si no deberíamos dejarlas de lado. Jaak Panskepp se enfrenta al mismo dilema en *Affective Neuroscience: The Foundations of Human and Animal Emotions* [Neurociencia afectiva: Las bases de las emociones humanas y animales], cuando pregunta: «¿Es necesario que los neurocientíficos entiendan las emociones para entender el cerebro?». Y su respuesta es contundentemente afirmativa: «Los datos recién descubiertos sobre el cerebro, junto con las numerosas *homologías* anatómicas, neuroquímicas y neurofisiológicas existentes en muy diversas especies de mamíferos, ofrecen la posibilidad de convertir procesos mentales como los sentimientos emocionales en algo medible, manipulable y, por lo tanto, científicamente real». Para Panskepp, lo que antes era un ensayo alquímico posee ahora una tabla periódica que le proporciona una base científica. En su opinión, las emociones son esenciales para comprender el cerebro y, además,

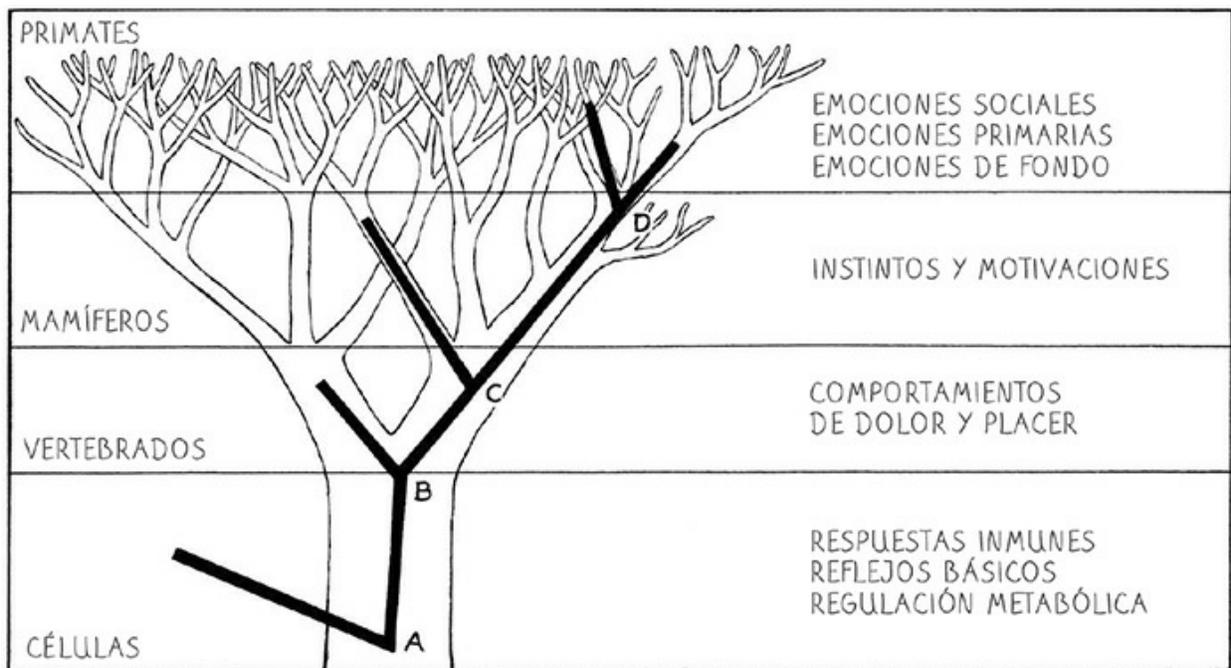
se pueden estudiar. Pero todavía resultan bastante escurridizas, porque en cierto sentido su reconocimiento y denominación son más bien subjetivos y poco científicos: así, por ejemplo, Aristóteles admitía 12 emociones, el filósofo Baruch Spinoza categorizó unas cuarenta y ocho, y el psicólogo B. F. Skinner sugirió que carecemos de emociones.

Más recientemente, Panskepp y otros psicólogos se han valido de ingeniosos experimentos, tanto en animales como en humanos con lesiones cerebrales, para identificar cinco emociones, felicidad, tristeza, ira, miedo y asco, y las han estudiado con técnicas elaboradas para tratar de entenderlas. Para ello han utilizado el enfoque clásico, consistente en encontrar individuos con lesiones específicas en el cerebro relacionadas con una alteración o una anomalía psicológica determinadas. Uno de los ejemplos más conocidos de este enfoque es aquel que implica el estudio de diversas personas con daños en la amígdala a ambos lados del cerebro. La amígdala está constituida por estructuras pequeñas, dispuestas bilateralmente en el cerebro profundo, que en ocasiones se asignan al sistema límbico y en ocasiones a los ganglios basales. Cuando a los individuos con daños bilaterales en la amígdala se les muestran imágenes de rostros humanos con expresiones faciales correspondientes a emociones diferentes, no reaccionan a aquellos que reflejan miedo, lo que demuestra que la comprensión básica del miedo se puede ver alterada por una pérdida de función en una región determinada del cerebro. Así, observando a una serie de individuos con alteraciones psicológicas diferentes cuando se les expone a la misma expresión facial, podemos «atomizar», o desentrañar, las diferentes respuestas emocionales.

Otros investigadores, como el neurobiólogo Antonio Damasio, prefieren diferenciar entre la emoción y lo que en su opinión es un nivel superior de comportamiento al que denominan «sentimiento». Damasio sugiere que la emoción y el sentimiento están estrechamente vinculados, pero que una (la emoción) es una expresión pública del cerebro y el otro (el sentimiento) es una cuestión privada. No sólo, las emociones preceden a los sentimientos: «Experimentamos las emociones antes y los sentimientos después porque la evolución llegó a las emociones antes y a los sentimientos después». Para Damasio, las emociones son el resultado de simples reacciones que

«contribuyen a la supervivencia de un organismo, y ello podría imponerse fácilmente en la evolución». Al valorar estas hipótesis, debemos tener en cuenta que, a medida que los mamíferos evolucionaron, el córtex pasó a constituir una parte considerable de su cerebro y que, en los primates y, sobre todo, en nosotros, la porción prefrontal experimentó un importante aumento de tamaño a lo largo del proceso evolutivo. Este hecho es vital, porque la corteza prefrontal garantiza que no seamos esclavos de nuestras emociones, nos permite procesar las repuestas emocionales de nuestro sistema límbico y nos ofrece la posibilidad de utilizar otros mecanismos de toma de decisiones para modificar las respuestas a los estímulos externos, de forma que no siempre estén determinadas por nuestras emociones.

Argumentos como los de Damasio apoyan la teoría de Darwin según la cual la evolución es la mejor explicación para la existencia de nuestras emociones. En un principio, a Darwin le intrigó el hecho de que nuestro cabello (o lo que quede de él) se erice cuando los humanos nos sentimos asustados o amenazados, pero finalmente llegó a la conclusión de que esta respuesta había evolucionado en los mamíferos inferiores como una reacción adaptativa defensiva que persistió en sus descendientes. En lo que se refiere a otras emociones que observó tanto en humanos como en diversos mamíferos, llegó a la misma conclusión: las conservamos porque resultaban beneficiosas para algún antepasado. Al hablar de las emociones en *En busca de Spinoza*, Damasio ordena jerárquicamente los rasgos de los organismos de acuerdo con las emociones incluidas o excluidas en cada nivel. Señala que los distintos niveles de la jerarquía están anidados los unos en los otros: los más primitivos se incorporan en el siguiente nivel, que a su vez se incluye en el nivel superior. Así, por ejemplo, observa que los organismos poseen sistemas de comunicación muy primitivos, similares a los sistemas que discutimos en el capítulo 2, que incluyen los reflejos básicos y la respuesta inmunitaria. En el siguiente nivel se encuentran los comportamientos básicos relacionados con el dolor y el placer, mientras que en la penúltima capa, previa a aquella donde se alojan las emociones y sentimientos, residen los instintos.



El árbol de los sentimientos de Antonio Damasio redibujado para demostrar el posible funcionamiento de una visión filogenética. La estrella de la parte inferior representa a los antepasados de toda la vida en la Tierra. Los círculos abiertos y las letras representan a los antepasados que adquieren los rasgos descritos por Damasio y que aparecen a la derecha. Aunque resulta difícil determinar a qué organismos dieron lugar estos antepasados, podemos estimar que el antepasado A lo es de Bacteria, Archaea y Eukarya; B podría serlo de los metazoos, C de los vertebrados y D el antepasado de los mamíferos. Esto no quiere decir que no existan otros organismos con los rasgos enumerados a la derecha. De hecho, si estos otros organismos, como por ejemplo plantas y Bacteria, poseen dichos rasgos o evolucionan de forma que lleguen a poseerlos en un futuro, estos rasgos son o se convertirán en convergencias.

A continuación, Damasio propone la existencia de tres tipos básicos de emociones: de fondo, primarias y sociales. De acuerdo con su teoría, estos tres tipos básicos también están anidados: es decir, las emociones de fondo son un tipo específico de emociones primarias, y las emociones primarias son un tipo específico de emociones sociales. Este anidamiento implica un patrón evolutivo en el que los organismos más primitivos exhiben la categoría menos inclusiva, la de las emociones de fondo. Los organismos que tienen sistemas nerviosos también poseen las emociones primarias, y los organismos con sistemas nerviosos altamente desarrollados poseen las emociones sociales. De hecho, Damasio utiliza un árbol como artefacto explicativo para demostrar esta jerarquía pero, desgraciadamente, su árbol se ramifica en todas

direcciones por lo que, pidiendo de antemano disculpas a Damasio, lo hemos redibujado para que resulte más similar a un árbol evolutivo y así demostrar que el anidamiento puede también contemplarse como un proceso evolutivo. Esta forma de presentar las emociones resulta a la vez interesante y esclarecedora: dado que algunos de estos avances en las emociones, significativos desde el punto de vista evolutivo, están correlacionados con cambios en la estructura del cerebro, nos proporcionan información sobre el modo en que las emociones actúan realmente a nivel fisiológico y molecular. Pero ¿de qué manera provoca la estimulación exterior esos pequeños momentos *verklempt* que todos tenemos?

## PARA QUE PUDIÉRAMOS TENER ROSAS EN DICIEMBRE<sup>2</sup>

Uno de los grandes misterios del cerebro es el modo en que los organismos almacenan e interpretan las experiencias pasadas, y aspectos importantes de este fenómeno afectan a nuestra conciencia en cuanto seres humanos: nuestra capacidad para pensar fácilmente en un contexto temporal, para anticipar el futuro y para sintetizar el pasado son elementos fundamentales de la unicidad de nuestros cerebros en comparación con otros cerebros existentes en el planeta. Pero no somos el único organismo capaz de almacenar y utilizar recuerdos: *Aplysia*, un sencillo caracol de mar con 20.000 neuronas, se ha empleado con frecuencia para estudiar la neuroquímica básica del cerebro. Sin embargo, el término «memoria» es muy amplio, y puede resultar difícil seguir la pista de los diferentes tipos de memoria que se han descrito en la literatura neurobiológica. La situación resulta especialmente complicada, porque cualquier forma posible de organizar la memoria en subcategorías suele dar como resultado una simplificación excesiva.

No obstante, algunos sistemas de clasificación de los diferentes aspectos de la memoria son útiles. En este libro utilizamos una forma «bidimensional» de estudiar la memoria. En una de las dimensiones se tiene en cuenta la longitud de la memoria, es decir, la memoria a largo plazo frente a aquella a corto. La memoria a corto plazo consiste en la captura por parte de nuestros

sistemas de percepción de experiencias sensoriales fugaces, y en ella participan dos aspectos del tratamiento inmediato por parte de nuestros cerebros de las experiencias externas. En primer lugar, interviene la memoria sensorial. Como vimos en el capítulo 4, ésta consiste en las señales neuronales que llegan al cerebro desde los seis sentidos. Una memoria sensorial es una copia directa de la experiencia, y tiene una duración muy breve. Toda memoria sensorial que el cerebro considera útil es transferida a la memoria a corto plazo, siendo posteriormente transmitida a otras regiones del cerebro. Hay que pensar en la memoria sensorial y la memoria a corto plazo como mecanismos de filtrado que básicamente controlan el almacenamiento de la información sensorial. Si la memoria sensorial no se pasa a la memoria a corto plazo, o si la memoria a corto plazo no se refuerza o se repite explícitamente, no se transmitirá a la memoria a largo plazo. La memoria a corto plazo pierde todo aquello que no resulta esencial para la supervivencia del organismo, limitándose a no transmitirlo para su integración posterior en los circuitos de la memoria a largo plazo.

Nuestras memorias a corto plazo son limitadas. Si uno no pudiera recordar más de un segundo lo que se ha dicho en la primera parte de la frase, el final de la frase no tendría sentido. La capacidad habitual de la memoria a corto plazo es de siete unidades o elementos: cuanto más pequeña sea la tarea memorística, más probabilidades tenemos de recordarla. Así, si nos enfrentamos a un número como el 369201144830, la probabilidad de que lo recordemos después de observarlo durante 10 segundos es muy pequeña. Inténtelo. Pero si dedicamos esos mismos diez segundos a dividir el número en cuatro grupos de tres (369 201 144 830) y asociamos esos cuatro números más pequeños con episodios de nuestra vida que recordamos fácilmente (múltiplos de tres, el número de la habitación de la residencia universitaria, 12 do-cenas y la hora a la que llega todas las mañanas el cercanías), entonces la tarea es posible. Este proceso se llama «troceado» y es el mismo que usan los mejores jugadores de ajedrez para memorizar o recordar movimientos o estrategias: si se juega con alguien que es capaz de trocear y uno no sabe hacerlo, la mejor estrategia es el abandono. Según nuestro colega Alex de Voogt, del Museo Americano de Historia Natural (AMNH), el troceado también

se utiliza en juegos de mesa africanos y del sudeste asiático, como el mancala o el boa. Estos juegos requieren rapidez en las habilidades de cálculo y memoria, obteniéndose los mejores resultados si se utiliza la estrategia del troceado. Parece ser que algunos jugadores de mancala saben exactamente cómo se desarrollará una partida tras unos pocos movimientos, y esto se debe a que recuerdan escenarios anteriores del juego. Asimismo, si se juega al mancala con alguien capaz de trocear es mejor no apostar.

En la otra dimensión de la memoria, podemos considerar esta habilidad como una función de la flexibilidad o reflexividad, es decir, si la memoria es declarativa (muy flexible) o no declarativa (con escasa o ninguna flexibilidad). La memoria no declarativa es la responsable de acciones repetitivas como montar en bicicleta o los movimientos que empleamos al lavarnos los dientes. En cambio, la memoria declarativa es el tipo de memoria que utilizamos al escribir este libro, cuando aprovechamos nuestros conocimientos sobre la evolución y la biología para redactar un texto. Una manera interesante de distinguir entre las dos memorias es pensar en la memoria declarativa como la que se podría utilizar para recordar por qué nos lavamos los dientes y en la no declarativa como la que se utiliza para controlar los movimientos del cepillo cuando uno se los está lavando.

La memoria declarativa (también llamada explícita) es un proceso complejo que se puede subdividir a su vez en memoria episódica y semántica. La diferencia entre estos dos tipos de memoria es el grado de contexto personal que posee cada una: la memoria semántica es impersonal y está desconectada del pasado autobiográfico del individuo que la experimenta, mientras que la memoria episódica es muy personal y autobiográfica. Como ejemplo de memoria semántica, uno sabe que el 11/09/2001 era una fecha del calendario de septiembre del 2001 y que, si era martes, el día siguiente habría sido miércoles. Una memoria episódica sería un recuerdo de dónde estaba uno y qué hacía el 11 de septiembre: por ejemplo, que era un día soleado en Nueva York y que estaba sentado en su oficina en el AMNH (sobre este tema hablaremos más adelante). Existe cierta controversia en lo que respecta al lugar del cerebro en que se alojan este tipo de memorias. Se cree que la memoria declarativa está modulada por el hipocampo, esa estructura tan

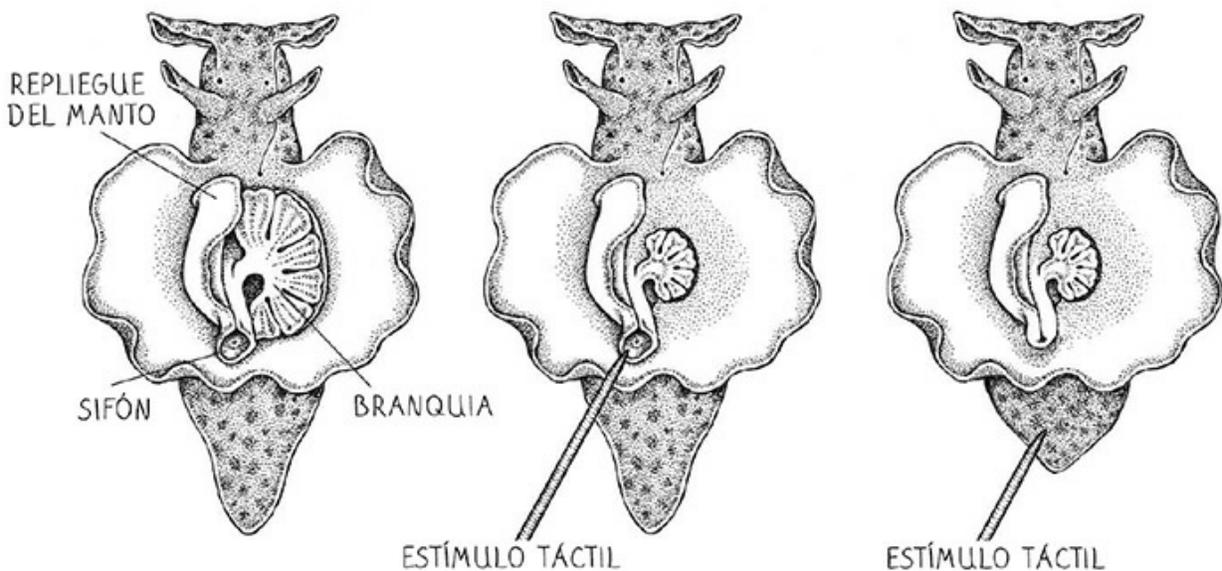
importante del sistema límbico, mientras que la memoria semántica residiría, dependiendo de los neurocientíficos, en la misma zona (el hipocampo), o más bien en la corteza prefrontal.

Para Katharina Henke, la memoria no declarativa (también conocida de manera más informal como la memoria implícita) se puede subdividir en cuatro categorías diferentes basándose en la localización dentro del cerebro de la función o el lugar de almacenamiento de cada una. La categoría principal es la «memoria procesal», de gran importancia en la memoria de las habilidades y las conductas habituales (como los movimientos que se utilizan para lavarse los dientes); esta categoría reside en los ganglios basales. El segundo tipo de memoria es el *priming* o «memoria incidental», que puede localizarse en el neocórtex; el «condicionamiento clásico» es un tipo de memoria no declarativa que reside en la amígdala y el cerebelo, y la «habitación» y la «sensibilización» están localizadas en los circuitos reflejos del sistema nervioso central y periférico. Más adelante, cuando hablemos del control molecular, trataremos algunas de estas formas de memoria.

#### NO ES TAN GUAPA COMO HEIDI KLUM, PERO HAY QUE VER QUÉ BUENA MODELO

Hasta épocas muy recientes, todo lo que sabíamos sobre la memoria procedía de dos tipos principales de enfoque científico: los estudios de cerebros no humanos, que aceptaban de buen grado que se les dijera con quién tenían que aparearse (el enfoque del organismo modelo), y los estudios de los cerebros humanos diseccionados (el enfoque clínico-anatómico). En el primer enfoque, la elección de un organismo modelo para el estudio de la memoria, o de hecho para cualquier tipo de estudio biológico, representa todo un arte: hay que elegir algo que no sólo no nos muerda, sino que además posea determinadas cualidades por las que merezca la pena utilizarlo. Por lo general, los investigadores que eligen los modelos son naturalistas consumados que poseen un conocimiento privilegiado sobre los organismos que seleccionan y, a través de experimentos cuidadosamente diseñados, se aprovechan de las

características del organismo modelo para descubrir los misterios de los genes, las conexiones neuronales y las células. De hecho, un modelo animal no humano de gran importancia para la investigación de la memoria es el humilde caracol de mar *Aplysia*, no la conocida *Drosophila* o el nematodo, y ni siquiera el ratón. En realidad, «humilde» o «inferior» no son adjetivos apropiados, porque los caracoles de mar tienen la misma relación con nosotros que un nematodo o una mosca. Todos ellos son protostomados, y por lo tanto comparten con nosotros el mismo antepasado común. Fue Eric Kandel, de la universidad de Columbia, quien eligió *Aplysia* como organismo modelo para estudiar la memoria, debido en parte a su facilidad para la reproducción en laboratorio, pero sobre todo por sus grandes y jugosas neuronas (de hasta 1 mm de diámetro) y su escaso número (20.000 en total).



*Aplysia*, el caracol de mar, y su sistema reflejo, que Eric Kandel y sus colegas aprovecharon para estudiar la memoria.

Pero Kandel también seleccionó *Aplysia* debido al interesante comportamiento que muestra cuando se le estimula. Este animal posee lo que cariñosamente se conoce como un «reflejo de retracción de la branquia y el sifón»: si se toca el sifón del caracol, esto provoca su contracción y la retracción de la branquia, como si fuera un gusano guareciéndose en un agujero, para proteger estos importantes órganos externos del caracol. Es una

respuesta ordinaria a un estímulo sencillo. Teniendo presente esta respuesta, Kandel realizó lo que habitualmente llamamos un experimento del tipo «dáselo al becario». Cuando el caracol vuelve a alargar el sifón para alimentarse, si lo tocamos de nuevo suavemente, tanto la branquia como el sifón se vuelven a contraer, pero no tan rápida y profundamente como la primera vez. Cada vez que se toca el sifón, se registra el grado de respuesta del caracol. Si se repite este procedimiento entre 70 y 80 veces, con intervalos de tres minutos entre los estímulos, la vez 78 el caracol prácticamente no se contrae: se ha «habitado» a la estimulación del sifón. La habituación clásica se reduce si se permite al caracol descansar durante un cierto tiempo; de hecho, si el becario se toma dos horas para comer y al regresar estimula el sifón del caracol (la réplica número 80) la respuesta será tan intensa como al principio del experimento. Esta forma de habituación es similar a la que se produce en vertebrados, y representa un tipo de memoria no declarativa, por lo que Kandel llegó a la conclusión de que *Aplysia* sería un buen modelo para comprender la base neuroquímica de la memoria (o por lo menos de la memoria no declarativa).

Kandel y sus colegas de Columbia utilizaron el reflejo de retracción de la branquia y el sifón para hacerse tres preguntas básicas sobre la memoria: 1) ¿Dónde se almacena la memoria de la habituación en el sistema nervioso? 2) ¿Los cambios plásticos en las conexiones sinápticas básicas contribuyen al almacenamiento de la memoria? y 3) En caso afirmativo, ¿cuáles son los mecanismos celulares del almacenamiento de la memoria? Al ser *Aplysia* un sistema modelo relativamente nuevo, el planteamiento experimental para estas tres preguntas requirió un gran trabajo previo de elaboración, pero Kandel y sus colegas lograron, con gran dedicación, desentrañar el circuito neuronal del reflejo de retracción de la branquia y el sifón, desarrollar un método para registrar la activación (potenciales de acción) de las neuronas individuales dentro del circuito, y correlacionar la habituación con el movimiento de vesículas cerca de las sinapsis. El siguiente paso consistía en aplicar estos hallazgos a responder las tres preguntas que Kandel y sus colegas se habían planteado.

La primera pregunta resultó tener una respuesta relativamente sencilla,

pero excelente, aunque previamente hubo que resolver una paradoja del sistema nervioso. Esta paradoja surgió al observar que, si bien las conexiones neuronales del sistema nervioso del caracol de mar están predeterminadas para todos los caracoles de mar desde el desarrollo, existe sin embargo una cierta plasticidad con respecto a la forma en que este sistema programado reacciona ante estímulos diferentes y, lo que es más, el mismo sistema puede reconfigurarse tras la habituación. Si la conectividad es realmente invariable, hay que resolver la paradoja antes de poder explicar cómo se pueden almacenar diferentes memorias en el mismo circuito. Kandel lo explicó demostrando que, a pesar de que el circuito no varía, sí lo hace la fuerza de las conexiones neuronales dependiendo del momento puntual en el tiempo, lo que le proporcionó la respuesta para las dos primeras preguntas: la memoria efectivamente se almacena en las sinapsis, y sí, los cambios plásticos en la fuerza de las sinapsis constituyen la base del mecanismo de almacenamiento de la memoria no declarativa en el sistema nervioso. La tercera pregunta resultó más difícil de responder, pero al ser Kandel capaz de observar cambios en la morfología de las sinapsis, ya fueran éstas habituadas, recuperadas o vírgenes, pudo correlacionar la liberación o no de vesículas en la sinapsis con el estado de habituación del animal, descubriendo que la habituación disminuía de forma significativa el contacto de las vesículas con las sinapsis. O, dicho de otra manera, las sinapsis perdían «intensidad» con la habituación.

Con estos experimentos, Kandel y sus colegas lograron demostrar un principio fundamental del sistema nervioso, que relacionaba todos los trabajos previos sobre el mismo, independientemente de su modalidad; se remitieron incluso a la hipótesis previa de Santiago Ramón y Cajal (véase el capítulo 3), según la cual las sinapsis no son estructuras fijas, sino que su fuerza puede verse alterada a lo largo del tiempo por las experiencias y la repetición. Para ser más precisos, cambiaron nuestro modo de pensar sobre la memoria. Antes de los experimentos de Kandel, se creía que la memoria se almacenaba en el cerebro de un modo muy similar a como lo hace en un ordenador: sencillamente se le asignaba un lugar, quizá incluso una única neurona o un grupo de ellas. Pero los experimentos con *Aplysia* demostraron de un modo

evidente que el almacenamiento de la memoria es mucho más complejo, y que la *fuerza* de las sinapsis neuronales se encuentra implicada en el funcionamiento de la memoria. Y Kandel dedujo, correctamente, que esto a su vez estaba relacionado con el funcionamiento químico de las neuronas y sus sinapsis.

Así que él y sus colegas llevaron el modelo un paso más allá. Hay que señalar que, hasta aquel momento, Kandel había sido capaz de deducir estos principios seminales sobre la memoria sin examinar el interior de una célula: todas las observaciones se habían realizado, o bien rastreando las conexiones neuronales, o bien midiendo los potenciales de acción, o bien manipulando el comportamiento del caracol de mar. Dado que los cambios en las vesículas de las neuronas parecían estar estrechamente conectados con la plasticidad de las sinapsis, Kandel decidió entrar en las neuronas propiamente dichas e investigar lo que ocurría en las vesículas desde el punto de vista químico. Kandel utilizó otros dos aspectos fácilmente manipulables de la conducta de *Aplysia* para descubrir la naturaleza química de la memoria; la habituación es una respuesta simple, por lo que decidió utilizar la sensibilización y el condicionamiento, otras dos respuestas no declarativas más complejas.

La sensibilización es en cierto sentido la otra cara de la habituación. Desafortunadamente para el caracol de mar, para inducir la sensibilización hay que aplicar una ligera corriente eléctrica a la cola, lo que provoca una respuesta refleja extrema de retracción del sifón y la branquia. Tras una única administración, *Aplysia* conserva la memoria y retrae el sifón y la branquia de forma automática y enérgica, pero pasados varios minutos, el caracol reconfigura su recuerdo de la descarga y deja de reaccionar de forma tan enérgica a la corriente. Pero si el animal recibe las descargas en la cola cuatro o cinco veces de forma consecutiva, permanecerá sensibilizado durante dos o más días, en los cuales su respuesta a la corriente será intensa. Con un mayor adiestramiento, se pueden conseguir periodos incluso más largos de sensibilización en *Aplysia*. Dado que es la cola la parte involucrada en el experimento, Kandel tuvo que diseñar experimentos todavía más elaborados para desentrañar el circuito neuronal de esta parte del caracol de mar, basándose en el siguiente razonamiento: si la habituación producía una

disminución de la fuerza sináptica como resultado del alejamiento de las vesículas de las sinapsis, la sensibilización produciría un incremento en la fuerza sináptica y un aumento correlacionado en el contacto de las vesículas con la sinapsis. Como hemos visto, al cabo de un cierto tiempo la habituación provocaba en el organismo la indiferencia frente al estímulo, al comprobar que era siempre inocuo, mientras que, por el contrario, en la sensibilización las corrientes aplicadas eran tan desagradables que el sistema neuronal amplificaba la respuesta a las descargas continuas. Pero ¿qué pasaría si un experimento lograra que el animal relacionara algo malo, como una descarga, con una estimulación inofensiva, como la que producen las cosquillas en el sifón? Esto se conoce como condicionamiento, y así lo describen Kandel y Larry Squire: «Las reglas predictivas que caracterizan el condicionamiento clásico reflejan las reglas de causa y efecto que gobiernan el mundo físico, exterior. Por lo tanto parece plausible que los cerebros animales hayan desarrollado mecanismos neuronales diseñados para reconocer acontecimientos que predictivamente tienen lugar juntos y para distinguirlos de otros que no están relacionados entre sí». Sorprendentemente, Kandel y sus colegas fueron capaces de provocar el condicionamiento en *Aplysia*, un animal de una extrema sencillez, empleando únicamente la retracción de la branquia y el sifón. Y como resultado de todo ello, otros científicos que se guiaron por los trabajos pioneros de Kandel pudieron estudiar aspectos importantes de la neuroquímica de la memoria haciendo uso de las herramientas de la sensibilización, la habituación y el condicionamiento y teniendo a *Aplysia* como «caracol de trabajo».

#### AQUÍ PHINEAS GAGE, AQUÍ HENRY MOLAISSON (H.M.)

La forma más antigua y rudimentaria de enfrentarse al problema de la memoria es buscar a alguien con un desorden de conducta o una lesión cerebral, describir su conducta y a continuación esperar que se le someta a una operación del cerebro o, aún peor, que muera. En ese momento se abre el cráneo y se examina el cerebro en busca de anomalías o lesiones. Si la lesión

cerebral se puede localizar mientras la persona está viva, tanto él o ella como usted están de suerte, ya que no hará falta que muera para sacar conclusiones. Este enfoque «clínico-anatómico» se ha utilizado durante 150 años y su fundador fue Jean-Martin Charcot, famoso por ser considerado el padre de la neurobiología. Charcot era profesor de neurología en París, y tras una ilustre carrera le dieron su nombre a una enfermedad (la enfermedad de Charcot-Marie-Tooth). Fue asimismo el primero en describir formalmente y dar nombre a la enfermedad de Lou Gehrig (la llamó *sclerose en plaques* [esclerosis en placas], décadas antes de que Lou Gehrig naciera), una isla de la Antártida recibió su nombre (isla de Charcot) y fue conocido como el Napoleón de las neurosis.

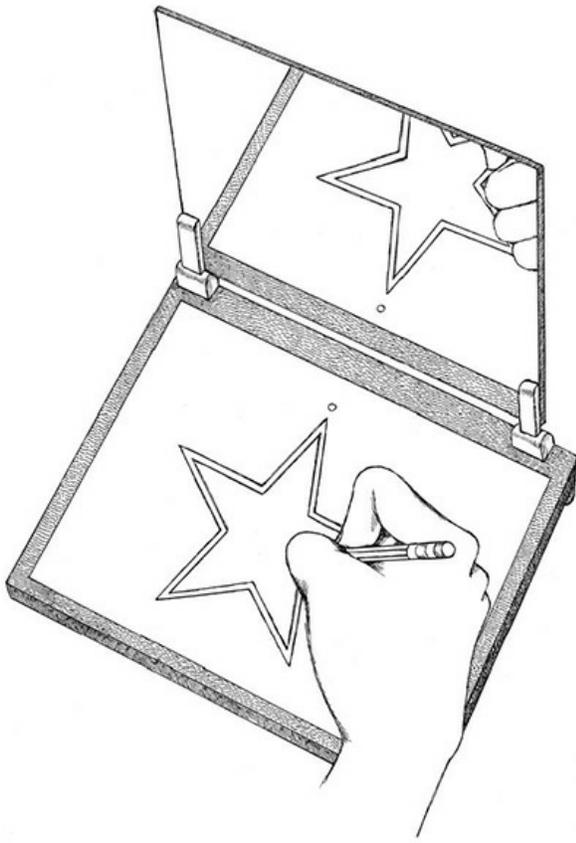
Si bien el epicentro del enfoque clínico-anatómico fue el París de la década de los setenta en el siglo XIX, quizá el caso más famoso había tenido lugar 20 años antes en Nueva Inglaterra, como resultado de un terrible accidente en el que se vio implicado un caballero llamado Phineas Gage. Gage trabajaba en la construcción del ferrocarril colocando cargas de dinamita para volar la roca. El procedimiento era por aquel entonces bastante primitivo, y mientras compactaba la dinamita en un agujero con una barrena, Gage sufrió un terrible accidente. Las barrenas tenían casi dos metros de largo, con un extremo puntiagudo, y al manipularla Gage provocó de alguna manera una chispa, seguida de una explosión que hizo que la barrena saliera disparada del agujero en la roca y le atravesara la cabeza: entró por su mejilla izquierda, justo debajo del ojo, y atravesó la corteza prefrontal del cerebro, saliendo por el centro de su cabeza y aterrizando a varios metros de distancia. Huelga decir que esto tuvo un profundo efecto sobre Gage, pero no fue la muerte. Sobrevivió al incidente intacto (exceptuando la pérdida de un buen pedazo de su corteza prefrontal), vio a un médico, regresó andando a casa y al día siguiente fue a trabajar. Resultaba evidente para los doctores que lo examinaron que la parte frontal de su córtex, esa masa de cerebro situada tras la frente, había sufrido daños terribles, y sin embargo podía andar, hablar y recordar cosas.

No obstante, Phineas Gage, hasta ese día un hombre templado, religioso, trabajador y servicial, se convirtió en un vago borracho, pendenciero y soez:

en palabras de algunos de sus amigos, «ya no era Gage». Y no lo podía evitar. Ahora sabemos que en la corteza prefrontal residen la razón y la personalidad, y cuando sufre daños, la personalidad del individuo en cuestión experimenta cambios drásticos. Numerosos ejemplos de lesiones relacionadas con enfermedades o con la genética del cerebro han contribuido a desvelar la función de la misma, aunque la mayoría no son tan espectaculares como el caso de Phineas Gage. Las más famosas están relacionadas con las regiones epónimas del cerebro implicadas en la percepción y producción del lenguaje que fueron descubiertas en el siglo XIX por dos médicos, Paul Broca y Carl Wernicke.

Desde los tiempos de Broca y Wernicke, se han utilizado numerosos ejemplos de pacientes con desórdenes cerebrales o síndromes genéticos concretos para identificar la ubicación de la memoria en el cerebro. Existe una convención según la cual los médicos y científicos que estudian a estos pacientes los identifican por sus iniciales, y quizá el estudio más famoso sobre la memoria que utiliza este enfoque haya sido el de H.M, que sufría una epilepsia severa. Al morir, H.M. perdió el anonimato, por lo que ahora se sabe que su nombre completo era Henry Gustav Molaison. Para aliviar sus ataques, un cirujano de Connecticut llamado William Scoville eliminó la zona de su cerebro que se creía los causaba, concretamente todo el hipocampo y el lóbulo temporal medial. La cirugía logró controlar los ataques, pero a partir de ese momento H.M. perdió la capacidad de almacenar recuerdos: lograba recordar hechos previos a la cirugía, pero ahora su vida consistía en viñetas de dos minutos que no se almacenaban en su memoria a largo plazo. Debido a su singular estado fisiológico, H.M. se convirtió en el sujeto de gran número de tests psicológicos llevados a cabo por Brenda Milner, una psicóloga canadiense. Milner llegó a diversas conclusiones importantes. La primera y más evidente fue que la obtención de algunos tipos de recuerdos nuevos era una función de las regiones ahora ausentes del cerebro de H.M; en segundo lugar, Milner dedujo que el lóbulo temporal medial y el hipocampo, las regiones eliminadas, no eran el destino final del almacenaje de los recuerdos a largo plazo, dado que H.M. era capaz de recordar hechos anteriores a la cirugía. Milner también dedujo que estas regiones no eran necesarias para la

memoria a corto plazo inmediata, puesto que H.M. era capaz de retener pequeñas cantidades de información durante algunos minutos. En cambio, parecían ser responsables de algún aspecto de la transmisión de la memoria a corto plazo a la memoria a largo. La principal conclusión final de Milner se basaba en una prueba psicológica muy conocida, la prueba de trazado de una estrella. En esta prueba, se le pide al paciente que trace una estrella, tal como se ve en la figura que se muestra a continuación. Parece fácil, pero cuando la única imagen que se nos permite ver es la de la estrella reflejada en un espejo, se convierte en algo bastante difícil. La primera vez que se intenta, se cometen muchos errores, pero con la práctica se mejora: esto se debe a que la persona que realiza la prueba comienza a almacenar el recuerdo del trazado en su memoria procesal (que, como recordará el lector, es un tipo de memoria no declarativa). H.M. hizo la prueba, y en un periodo de tres días pasó de cometer entre 20 y 30 errores en el trazado de la estrella a sólo uno o dos, pero cuando le preguntaban antes de cada prueba si la había realizado con anterioridad, siempre respondía que no, que ni siquiera había oído hablar de semejante prueba. Por lo tanto, resultaba evidente que H.M. podía almacenar recuerdos procesales aunque no pudiera almacenar recuerdos declarativos a largo plazo, lo cual por supuesto indicaba que la parte del cerebro eliminada por la cirugía no había afectado a la memoria procesal.



El diagrama de trazado de estrella utilizado para la prueba de trazado reflejo que se planteó a H. M. para estudiar la memoria procesal y declarativa.

Los pacientes con lesiones cerebrales que se dan de forma natural han permitido estudiar otros aspectos de la memoria, y en la actualidad se pueden utilizar los enfoques basados en las técnicas de neuroimagen, como la resonancia magnética nuclear, la tomografía por emisión de positrones y otras, para ubicar las lesiones con precisión y correlacionar estas lesiones con funciones determinadas. Notger Müller y Robert Knight realizaron un estudio con varias personas afectadas por lesiones cerebrales (todas ellas con lesiones específicas causadas por traumatismos craneoencefálicos, infartos o cirugía invasiva) para estudiar un tipo de memoria conocido como memoria de trabajo. Los investigadores examinaron la capacidad de los pacientes para utilizar y manipular la memoria de trabajo, y por medio de las técnicas de neuroimagen pudieron escudriñar las estructuras de sus cerebros sin tener que abrir ningún cráneo. La conclusión a la que llegaron fue que las lesiones que afectan a la corteza prefrontal dorsal y ventral tienen un impacto significativo

en la memoria de trabajo, pero más importante aún fue que con su experimento demostraron la trascendencia del estudio del comportamiento en conjunción con la localización de las lesiones en el cerebro. A los pacientes se les dice que realicen determinadas tareas mentales mientras se les somete a un escáner, lo que permite estudiar detalladamente la actividad cerebral resultante. A medida que las técnicas de neuroimagen mejoran, las recompensas prometen ser todavía mayores; Müller y Knight señalan que las nuevas técnicas, como la resonancia magnética de difusión [DTI, por las siglas en inglés] y un enfoque similar, la resonancia magnética de perfusión, contribuirán en gran medida a entender cómo funciona el cerebro y cómo le afectan las lesiones, no sólo en lo que se refiere a la memoria sino también en otras áreas de la actividad cognitiva.

¿LTP? OMG CRS

El trabajo de Eric Kandel y otros investigadores sobre la memoria a corto plazo posee una gran relevancia cuando se investiga la memoria declarativa a largo plazo desde la perspectiva de la neurona, a pesar de que los tipos de memoria no declarativa que ellos estudiaron en el siglo XX presentan ciertas diferencias con la memoria declarativa. Para entender la razón de que esto sea así hay que comprender la capacidad de una neurona para mantener una señal durante un periodo de tiempo prolongado. Esto debería ser fácil de visualizar, ya que evidentemente la señal es de alguna manera responsable del recuerdo, y si se debilita o se pierde, el recuerdo debería asimismo perderse. Su vinculación desde el punto de vista neuroquímico constituye una historia fascinante que comienza con Donald Hebb, un neurocientífico que comenzó a trabajar con el famoso neurocirujano Wilder Penfield en Canadá para posteriormente continuar en solitario gran parte de su carrera. A finales de la década de los cuarenta del siglo pasado, Hebb cuestionó la convención generalmente aceptada sobre la necesidad de circuitos complejos en el cerebro para el aprendizaje y la memoria, y propuso en cambio que el aprendizaje se debía al reforzamiento de las sinapsis. Para Hebb, el proceso

de almacenamiento de recuerdos debía estar relacionado con la neuroquímica de la sinapsis, una idea muy similar a la que tuvo Cajal y que Kandel más tarde ampliaría al proponer que la fuerza de la sinapsis es la base de la memoria.

Para comprender qué es lo que modifica la sinapsis, hay que retrotraerse a su funcionamiento. Resulta lógico pensar que cualquier diferencia que se pueda encontrar entre las sinapsis de la memoria y el funcionamiento en estado de equilibrio de las sinapsis en general sea exclusivo de la memoria. En las sinapsis ocupadas en sus tareas cotidianas, la actividad en la célula presináptica provoca una excitación de la célula postsináptica, y dicha activación refuerza a su vez la sinapsis. Este planteamiento propone una forma completamente distinta de estudiar el aprendizaje de aquella que proporciona la visión de los circuitos complejos, pero hay que averiguar el método que la sinapsis utiliza para mantener o incrementar la señal. La depresión de largo plazo (LTD, por sus siglas en inglés) y la potenciación de largo plazo (LTP) proporcionan la respuesta. Estos procesos neuronales fundamentales se demostraron por primera vez en el hipocampo y las estructuras relacionadas del conejo, y posteriormente en la corteza cerebral, el cerebelo, la amígdala y muchas otras estructuras. La LTP, descubierta en 1973 como una respuesta artificial de las células del hipocampo del conejo a los estímulos eléctricos, es quizá el mecanismo que mejor se conoce de los dos y en él interactúan neurotransmisores, receptores y las membranas sinápticas de las células nerviosas que se comunican.

Cuando se libera glutamato en una sinapsis neuronal normal (véase el capítulo 3), éste se une a receptores proteínicos específicos en la superficie de la membrana de la célula postsináptica. Los receptores a los que se une son de dos tipos: NMDA y no NMDA. El glutamato que se une a los receptores NMDA provoca una obstrucción del canal regulable por medio de los iones de magnesio, mientras que el que se une a los receptores no NMDA hace que esos canales se abran y que los iones de sodio y potasio se liberen en la célula postsináptica, para salir posteriormente. Por lo tanto, el medio electroquímico de esta célula se ve alterado y se produce en ella un potencial de acción. En la LTP intervienen diversos mecanismos y cambios celulares que mantienen a una

neurona en un estado neuronal específico durante un largo periodo de tiempo, y posee dos fases, la precoz y la tardía. La fase precoz es provocada por la excitación rápida de «alta frecuencia» de la célula presináptica, cuyo resultado es la liberación de grandes cantidades de glutamato y la reducción del potencial de membrana de la célula postsináptica. Cuando esto ocurre, el ion  $Mg^{+}$  que está alojado en el receptor NMDA salta fuera de la sinapsis, lo que provoca la desconexión (por decirlo de alguna manera) del receptor NMDA y la movilización de los iones de calcio, sodio y potasio. El resultado de esta desconexión es el aumento de la concentración del ion calcio en el interior de la célula postsináptica, hasta unos niveles críticos que provocan una cascada de reacciones químicas en las que están implicadas las proteínas quinasas de la neurona postsináptica. Estas quinasas son enzimas que añaden fosfatos a otras moléculas (independientemente de que éstas quieran o no) en un proceso llamado fosforilación, cambiando la conformación de las proteínas que adquieren los fosfatos: dicho proceso en ocasiones activa, y en otras reprime, la actividad de la proteína diana, por lo que esta cascada de reacciones, provocada por la desconexión inicial de los receptores NMDA, pone en marcha una serie de interruptores en las proteínas de las células postsinápticas y cambia el potencial de la célula postsináptica.

Hasta aquí, todo bien, pero ¿cómo se mantiene la LTP en la célula postsináptica? Para ello hace falta la implicación de otro receptor de membrana, llamado receptor AMPA, y su producción por parte de la neurona está controlada por una de las quinasas de las que acabamos de hablar. Una vez que el receptor AMPA se encuentra en la membrana de la célula postsináptica, la concentración de iones de calcio crucial para la LTP se puede mantener durante un largo periodo de tiempo. Además, las quinasas activadas por el estímulo inicial actúan sobre los receptores no NMDA incorporados en la membrana postsináptica; tras su fosforilación, estos receptores son más sensibles a los efectos del glutamato en la sinapsis. La sinapsis ha cambiado, y ahora es mucho más eficiente en el manejo de los potenciales de acción cuando tiene que hacerse cargo de tareas neuronales. La LTP presenta tres características fundamentales que encajan muy bien en lo que los neurobiólogos interesados en explicar la memoria buscan. La primera es la

«culpabilidad por asociación». La LTP aparece en dos de los circuitos neuronales básicos del cerebro. Ambos están presentes en el hipocampo y están relacionados con regiones del cerebro fundamentales a la hora de procesar la información de nuestros sistemas sensoriales, por lo que tiene sentido que en estas regiones exista un proceso activo de memoria. Por otra parte, la LTP es rápida y es capaz de aumentar la capacidad de la sinapsis para excitarse de una forma más eficiente y con un ritmo preciso, algo realmente importante dado que necesitamos recuperar los recuerdos de forma ágil y eficiente. En tercer lugar, una vez que la LTP se da en una célula, la neurona es capaz de mantenerla durante largos periodos de tiempo. Este aspecto final de la LTP tiene una importancia especial porque, después de todo, los recuerdos «se prensan entre las páginas de nuestras mentes» y tienen que durar mucho tiempo.

Así que el problema está prácticamente resuelto, ¿no? Ya tenemos un mecanismo celular molecular capaz de alterar la fuerza de las sinapsis durante periodos prolongados, por lo que debe de ser lo que buscamos. Pero no nos apresuremos. Tal como Squire y Kandel señalan: «El hecho de que la LTP posea características comunes a un proceso ideal de memoria no basta para demostrar que es el mecanismo utilizado para el almacenamiento de la memoria en la vida real». Con esto se refieren al hecho de que la LTP se descubrió en un sistema experimental artificial; por ello, es fundamental vincular la LTP con la memoria a largo plazo en el mundo real. Se han planteado dos tipos de experimentos para comprobar la validez de la LTP en la memoria declarativa a largo plazo. En el primer enfoque se utilizan ratas nadadoras, en el segundo, ratas con el cerebro cableado. El experimento consiste básicamente en alterar la maquinaria de la LTP por medio de la manipulación genética o química de la rata. A continuación, se introduce a la rata modificada en una piscina circular con una plataforma sumergida que la rata no puede ver y cuya existencia desconoce. Se colocan indicadores espaciales en las paredes de la sala donde se encuentra la piscina, y la rata navega por ella hasta que encuentra la plataforma y descansa. Una rata normal recuerda fácilmente dónde está la plataforma orientándose con las señales espaciales de las paredes de la sala de experimentos, y para encontrar la

plataforma y correlacionarla con la localización espacial utiliza su memoria declarativa y el hipocampo.

En otro experimento, en el que se usaron ratones, se marca la plataforma con un banderín. El ratón encuentra la plataforma y correlaciona la bandera con la plataforma. Esta actividad utiliza la memoria no declarativa y constituye un proceso no espacial en el cerebro; los investigadores se valen de este enfoque (conocido como el laberinto acuático de Morris) para observar lo que ocurre cuando se alteran los receptores de NMDA necesarios para que se cree la LTP. Cuando se bloquean los receptores de NMDA por medio de un agente químico que se inyecta en el roedor, éste conserva la capacidad no espacial de encontrar la plataforma, pero su memoria declarativa está confundida y fracasa estrepitosamente en la tarea. Los resultados de este experimento sugieren que, en efecto, la LTP está implicada en la memoria declarativa. Para determinar el mecanismo con mayor precisión, se manipuló genéticamente a ratones mutantes con el objeto de eliminar de su genoma los genes específicos implicados en la LTP. Así, al «quitar de en medio» uno por uno los componentes de la LTP los investigadores lograron demostrar que partes específicas del proceso de la LTP afectan a los aspectos declarativos de la memoria espacial de los ratones.

La segunda estrategia, que emplea roedores a los que se les ha cableado el cerebro, se puede utilizar para estudiar ratones con deficiencias proteínicas en el proceso de la LTP. El experimento consiste en cablear el cerebro de un ratón con un discriminador de impulsos (un mecanismo que mide los potenciales de acción en una célula determinada del cerebro). En este caso, la sonda se inserta en lo que se conoce como una célula piramidal del hipocampo, de especial interés por su relación con el reconocimiento espacial. El ratón se despierta tras la cirugía con un cable que sobresale de su cabeza, se le coloca en un recinto cerrado circular y se le permite explorar, mientras se miden los picos de los potenciales de acción en las células donde se han colocado las sondas. Si se registra la posición del ratón cuando se producen los picos y se realiza un mapa del recinto con su localización en dichos momentos, se comprueba que los ratones normales son capaces de orientarse espacialmente, tal como demuestran las células individuales que sólo se excitan en una

pequeña área del recinto circular. En cambio, en los ratones mutantes en los que se ha alterado un gen implicado en la LTP las células del hipocampo se disparan de forma aleatoria, sin ninguna correlación con la localización espacial dentro del recinto circular. Esto representa otro fuerte indicio de la implicación de la LTP en los sistemas vivos reales.

Durante los últimos dos años los científicos han comenzado a identificar las bases químicas y genéticas de la plasticidad sináptica y de la LTP. La mayoría de los estudios que acabamos de describir demuestran que en la memoria a largo plazo la consolidación de la información se produce muy pronto después de haber experimentado los acontecimientos que se van a almacenar. Esto en lo que respecta al almacenamiento inicial; pero ¿cómo se mantiene la información? Muy posiblemente, el mantenimiento de la LTP requiere la presencia de una proteína que actúe a largo plazo, y se ha descubierto una con estas características, la proteína quinasa Md (PKMd). La investigación sobre ésta y otras proteínas está desvelando los fundamentos de otros aspectos del almacenamiento de la memoria, pero la historia no acaba aquí. Existen otras estrategias en el estudio de la potenciación de largo plazo necesaria para el funcionamiento de la memoria, como por ejemplo un modelo llamado la «hipótesis del marcado sináptico y captura». Esta hipótesis trata de explicar el mecanismo por el que las neuronas adquieren, y mantienen, un potencial determinado, y se basa en la idea de que, de alguna manera, las sinapsis se marcan y se tratan posteriormente en el proceso de almacenamiento de la memoria. Esta hipótesis se ha visto apoyada por una serie de experimentos genéticos y psicológicos, y se han identificado determinadas moléculas que pueden estar implicadas. La teoría del marcado aborda un aspecto de la memoria que todavía no hemos tocado: que el sistema también permite que los recuerdos se pierdan más tarde. En otras palabras, el marcado permite que se posponga el compromiso de la célula con un estado determinado. Esto es necesario porque, si conserváramos todos los estímulos sensoriales que experimentamos a lo largo de nuestras vidas y las células se comprometieran de forma permanente con estos recuerdos, entonces nuestros sistemas neuronales se quedarían rápidamente sin espacio de almacenaje. Algunas memorias a largo plazo también se pueden eliminar en la fase

posterior, cuando los recuerdos se consolidan; la hipótesis del marcado permite un control adicional en el proceso de la memoria, actuando como un filtro antes de que el recuerdo pase al punto siguiente para consolidarse.

Hemos mencionado otro tipo de proceso de largo plazo, la depresión de largo plazo –la otra cara de la moneda de la LTP–, también importante en la memoria. La investigación en esta área se ha centrado en dos tipos básicos de depresión de largo plazo o LTD [por sus siglas en inglés]: aquellos en los que están implicados los receptores de NMDA y aquellos en los que están implicados los receptores de glutamato. Los circuitos de la LTD son muy complejos, pero en ambos casos están siendo desentrañados. La LTD tiene un papel extremadamente importante en la memoria, el aprendizaje y de hecho en cualquier otra respuesta cognitiva que requiera flexibilidad.

CUANDO ERA MÁS JOVEN ERA CAPAZ DE RECORDARLO TODO, INCLUSO  
AUNQUE NO HUBIERA OCURRIDO (MARK TWAIN)

No se han desentrañado todavía todas las facetas del procesamiento de la memoria a largo plazo en nuestros cerebros, pero aun así ya existe mucha información al respecto. Como hemos visto, las emociones son tratadas por diversas partes del cerebro interconectadas entre sí y pertenecientes a esa zona que acordamos llamar el sistema límbico. Los recuerdos también se procesan en esa misma área. Existen circuitos neuronales que conectan el hipocampo y la amígdala, los principales nodos implicados en la memoria y la emoción, con la corteza prefrontal. Por medio de la técnica de neuroimagen conocida como resonancia magnética de difusión, o DTI, los científicos han podido visualizar estas conexiones con gran detalle. La DTI muestra haces serpenteantes de neuronas que conectan diversas áreas de lo que se conoce como el sistema límbico: la amígdala, el hipocampo, el córtex cingulado y otras zonas. Los circuitos van trazando bucles alrededor de la parte interior del cerebro donde reside el sistema límbico, y muchas de las ramificaciones de estas autopistas neuronales se conectan con la corteza prefrontal. Esta conexión es crítica, ya que permite al cerebro, o bien mitigar las reacciones

emocionales más básicas o bien provocar comportamientos que respondan a la emoción o la memoria. Las conexiones con el hipocampo y la amígdala tienen especial importancia. El hipocampo es fundamental en el proceso de fabricación de recuerdos, como demuestra el caso de H. M., y esta área del cerebro posee muchas conexiones con las áreas sensoriales que discutimos en el capítulo 4. La magdalena de Proust parece ser la favorita de los neurólogos a la hora de demostrar que los olores constituyen una parte muy importante de los recuerdos, pero también los demás sentidos lo son.

Dado que un recuerdo cualquiera puede ser la suma de aportes procedentes de muchos sentidos, el hipocampo está conectado a muchas regiones del cerebro donde se procesan estos sentidos. Además, dado que nuestros recuerdos están asociados con frecuencia a respuestas emocionales, nuestra amígdala se convierte en un centro fundamental de almacenaje de las reacciones a hechos que nos ocurrieron en el pasado. Por lo tanto, la amígdala está estrechamente ligada al sistema y es muy probable que filtre recuerdos basándose en nuestras respuestas emocionales a los mismos.

Como importante colofón, hay que señalar que la memoria es muy flexible; en el caso de los humanos, no es un sistema infalible para recuperar un registro de los acontecimientos pasados, ya que nuestros recuerdos de sucesos reales pueden ser no sólo vagos sino también muy inexactos. Existen cada vez más pruebas de que nuestros recuerdos se ven influidos por elementos como por ejemplo las preguntas capciosas o las insinuaciones (algo que nuestros sistemas de justicia penal necesitan tener en cuenta), y que mientras algunos aspectos de nuestros recuerdos captan con gran habilidad el sentido general de los acontecimientos pasados, no lo hacen tan bien cuando se trata de los detalles concretos. Un ejemplo procedente de la experiencia personal bastará para demostrar cuán maleable es en realidad la memoria. En un evento reciente en un museo, a uno de nosotros le preguntaron dónde estaba el 11 de septiembre de 2001. La respuesta fue: «Estaba en mi oficina en el AMNH, con vistas a Central Park. Escuché sirenas y vi reactores volando sobre el parque. Recuerdo que hacía un día despejado y agradable». Resulta que estos «recuerdos» eran inexactos en diversos frentes. Para empezar, su oficina en aquel momento no tenía vistas a Central Park: la oficina tenía ventanas, pero

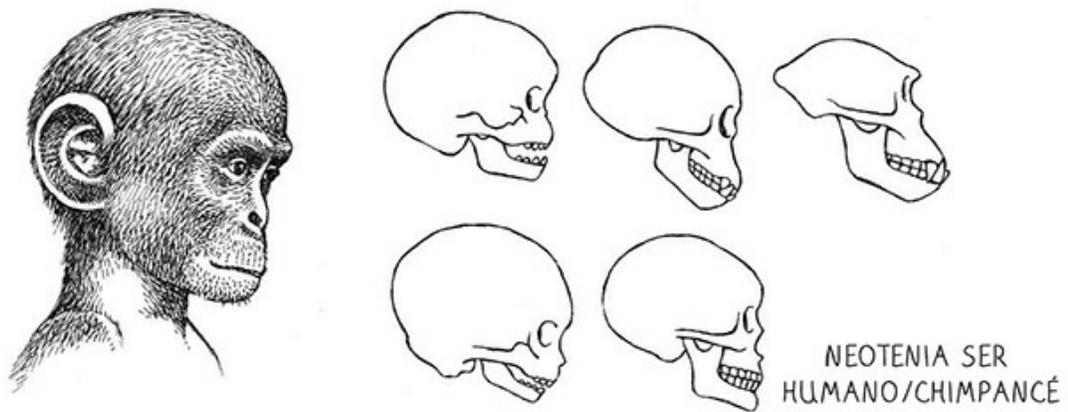
daban al interior del museo. De hecho, el edificio en el que recordaba haber estado aquella fatídica mañana ni siquiera se había construido en 2001. El porqué, desde el punto de vista biológico, de esta peculiaridad de nuestros recuerdos es algo que los científicos siguen estudiando con gran interés.

---

1. *Verklemt*. Palabra yidis que significa superado por la emoción. (*N. de las T.*)

2. Parte de una cita de J.M. Barrie: «Dios nos dio la memoria para que pudiéramos tener rosas en diciembre». (*N. de las T.*)

## La evo-devo del cerebro



Nuestros cerebros y los de otros organismos están en un proceso de cambio continuo, pero ¿cómo se definió en un principio la estructura básica del cerebro? Una manera de enfrentarse a esta pregunta es el estudio de la embriología de los organismos, para comprender la interacción de los genes y su ambiente a la hora de generar un cerebro plenamente desarrollado.

### FOTOS SUBIDAS DE TONO

Los embriones de todos los vertebrados muestran un grado de semejanza sorprendentemente alto. En el siglo XIX, el biólogo Ernst Haeckel fue el primero en darse cuenta de este hecho, y en 1874 publicó un diagrama (convertido en un clásico) demostrando las similitudes de los embriones vertebrados, desde los peces, pasando por las salamandras, las tortugas, los pájaros y los mamíferos, hasta los humanos (obsérvese el tufillo *scala*

*naturae*: esto debería darnos una pista de que algo no encaja). Haeckel propuso que el desarrollo embrionario, que de acuerdo con sus observaciones avanzaba desde vertebrados «inferiores», como los peces, a los vertebrados «superiores», reflejaba un proceso por el que la evolución se limitaba a añadir estructuras cada vez más complejas a un plan básico, y resumió su trabajo de forma concisa en la frase «la ontogenia recapitula la filogenia». En un sentido, esta frase quería decir que, cuando observamos la ontogenia (el desarrollo) de una serie de vertebrados, podemos reconstruir su grado de parentesco utilizando los patrones de desarrollo observados en el embrión más desarrollado.

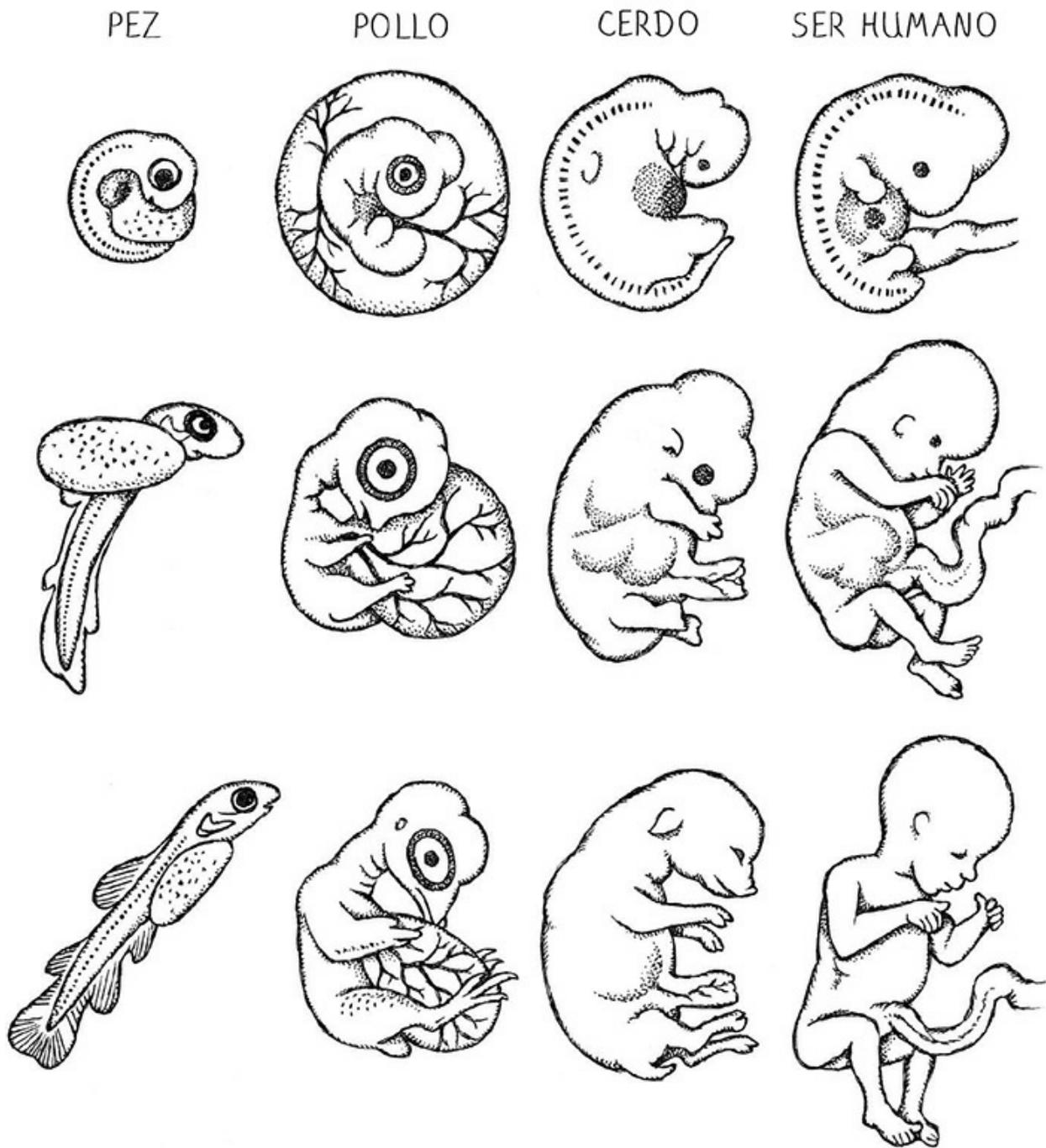


Imagen de la «ontogenia recapitula la filogenia» de Ernst Haeckel, redibujada de acuerdo con el libro de texto de biología de Joe Levine y Ken Miller. Se muestran tres etapas en un pez, un pájaro, un mamífero no primate y un primate.

Pero Haeckel también creía que la embriología era, de un modo más literal, una repetición del registro evolutivo. Los creacionistas no vacilan en

destacar que Haeckel falseó sus dibujos para hacer que los embriones resultaran más similares de lo que lo eran en realidad, y con ello creen estar desacreditando la evolución en sí misma. Pero en un libro de texto muy utilizado, los biólogos Joe Levine y Ken Miller señalan que ni siquiera en vida Haeckel logró evitar que el fraude se descubriera: varios de sus colegas observaron discrepancias y exigieron que admitiera públicamente que había falseado los dibujos. Lo que hizo debidamente, en un ejemplo magnífico del funcionamiento del proceso científico. Sin embargo, cuando se dibujan correctamente los embriones, como de hecho hicieron Levine y Miller, las similitudes siguen siendo notables. Reproducimos aquí una versión de este dibujo, para que el lector pueda juzgar por sí mismo si la idea original de Haeckel (que resulta evidente la existencia de un alto grado de similitud en los embriones de vertebrados) era correcta; creemos que hay muchas probabilidades de que coincida con él.

Pero no es necesario proponer que la evolución actúa simplemente añadiendo cambios al final de programas de desarrollo ya establecidos. Tal como lo expresaron Levine y Miller: «La evolución puede afectar a *todas* las fases del desarrollo, eliminando pasos o añadiéndolos, y por lo tanto la embriología no es una repetición precisa del linaje». Por ello, es imprescindible entender los procesos subyacentes que controlan el desarrollo del cerebro, ya que, como se ha descubierto, cualquier fase del desarrollo puede ser alterada; incluso la pérdida de alguna de estas fases puede ser responsable de las estructuras cerebrales actuales en los organismos, sobre todo en los vertebrados.

### CÓMO CONSIGUE EL CEREBRO SUS RAYAS

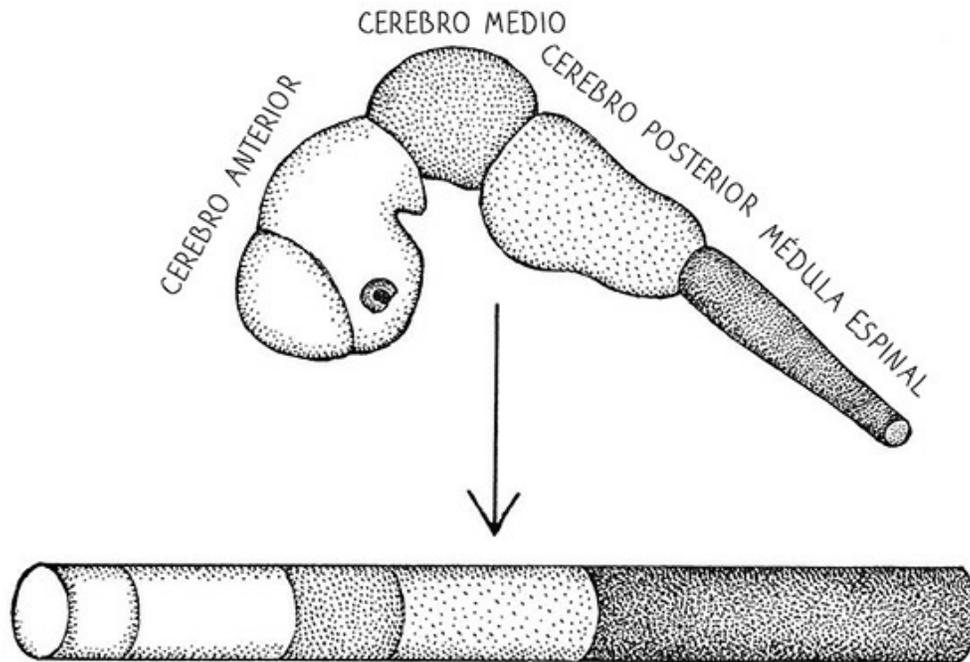
La transformación de cualquier animal desde el huevo-más-esperma unicelular hasta un organismo pluricelular es fundamental para el estudio de la evolución del cerebro. Para comprender mejor este proceso, hay que estudiar el mecanismo por el cual el cerebro decide que debe repartirse en las tres secciones principales: cerebro anterior, cerebro medio y cerebro posterior.

Estas secciones constituyen el «núcleo» del cerebro; si se les añade una médula espinal y un córtex, ya tenemos el clásico cerebro vertebrado. La clave para entender el proceso que origina esta estructura compleja reside en comprender que cada célula del embrión en desarrollo posee el potencial para convertirse en cualquier cosa, porque cada célula contiene el genoma completo del individuo. Los inductores localizados que especifican en qué se convierte cada célula en el embrión en desarrollo son los elementos que controlan la diferenciación de las distintas partes del sistema nervioso.

Los genes implicados en el desarrollo embrionario temprano de los vertebrados, incluidos los humanos, han recibido nombres extraños, como *Notch*, *evenskipped*, *engrailed* y *wingless*. Pero ¿por qué iba a afectar un gen llamado *wingless* [sin alas, en inglés] al desarrollo del cerebro humano? Todos los genes enumerados arriba se descubrieron y describieron primero en la mosca del vinagre, por lo que sus nombres están muy orientados a las características de ésta. Por ejemplo, *Notch* hace referencia al fenotipo de los mutantes adultos para este gen –que presentan una muesca en el ala– y *wingless* (*wnt*) se refiere al fenotipo que carece de alas, mientras que *engrailed* y *evenskipped* están relacionados con patrones de disposición de los segmentos en fases tempranas larvales de la mosca del vinagre. Y lo que resulta sorprendente es que existen homólogos de todos estos genes de la mosca en los genomas de vertebrados; además, todos ellos son asimismo lo que se conoce como factores de transcripción.

El problema del desarrollo temprano del cerebro pasa a ser por tanto el de averiguar cómo se expresan estos genes en el embrión en desarrollo. Tom Jessell, de la Universidad de Columbia, señala que el embrión temprano puede verse como una distribución lineal de tejidos, similar a un tubo; también propone que el tubo neural en desarrollo es como una «*tábula rasa* en la que, al principio, todas las células son equivalentes». Como se ve en la ilustración, las posiciones en las que los genes se expresan a lo largo del tubo se pueden visualizar como diferentes gradaciones de gris, por lo que desentrañar el proceso de desarrollo del cerebro equivale a descubrir «cómo consigue el cerebro sus rayas» con respecto a estas gradaciones de gris. Y la caracterización de estas bandas exige que seamos capaces de ver dónde y

cuándo se expresan los genes, porque la expresión de los genes determina la identidad de los tejidos regionales cerebrales diferenciados.



Cómo consigue el cerebro sus rayas. El diagrama muestra los compartimentos del sistema nervioso en desarrollo en un vertebrado prototípico. Estos compartimentos se colorean por medio de gradaciones de gris y se traducen para demostrar que el embrión en desarrollo puede representarse como una disposición lineal de segmentos.

Afortunadamente, los científicos son capaces de observar la expresión de los genes en los embriones a medida que se desarrollan gracias a la técnica de detección mediante anticuerpos. La técnica es sencilla, por lo menos en su diseño. Se fabrica una molécula que se une a una proteína importante para el desarrollo cerebral, se le conecta una molécula fluorescente, se deja que reaccione con un embrión en una fase concreta del desarrollo y se observa el resultado a través de un microscopio. Siempre que aparezca fluorescencia, se habrá producido la proteína. Por medio de esta técnica los científicos han logrado descubrir que la diferenciación de la médula espinal, el cerebro anterior, el medio y el posterior como regiones discretas del cerebro se debe a un gradiente de expresión proteínica en determinados genes. En el caso del tubo neural, las señales que recibe el sistema nervioso en formación proceden de otros tipos celulares del embrión en desarrollo. Un tipo de señal

extremadamente importante aquí es la de la familia de proteínas *wnt*, todas ellas proteínas inductoras con estructuras similares pero con un alto grado de especificidad de un miembro a otro de la familia. Su función consiste en crear un gradiente de concentración creciente entre la parte anterior y la posterior del tubo neural; dado que en cada célula se expresan selecciones diferentes de genes, el gradiente activa destinos diferentes de las células. En este caso, las células diana son los mismos factores de transcripción, por lo que el gradiente inicial provoca una cascada de reacciones.

La inducción de las *wnt* es fundamental en el cerebro en desarrollo, y tiene un papel destacado en la conectividad neuronal. Así, las proteínas *wnt* controlan el modo en que los axones encuentran su camino, estableciendo las señales de las rutas que atravesarán las extensiones neuronales. Además, controlan determinados aspectos de la formación de sinapsis, los cambios en los axones y el crecimiento de las dendritas en el sistema nervioso.

Otro regulador importante del desarrollo en el cerebro y el sistema nervioso en formación recibe el nombre de *sonic hedgehog* (como si los absurdos nombres de las moscas no fueran suficientes). *Sonic hedgehog* (*shh*) también produce un gradiente a lo largo de todo el tubo neural y, de una forma muy similar a como trabaja *wnt* para dar lugar a la disposición tripartita básica del cerebro, controla la posición del tejido neural en el cerebro en desarrollo. De hecho, se ha calculado que más de un 40 % de todo el desarrollo neural temprano es inducido por *shh*, por lo que su importancia como proteína no se puede exagerar. En la región de la cabeza, el gradiente de *shh* determina la ubicación de los ojos en el sistema nervioso. El gradiente es mayor a medida que nos alejamos del punto donde finalmente se desarrollan los ojos, lo que implica que el *shh* no se produce, o sólo en muy bajas cantidades, en la zona donde se desarrolla el ojo. Si se altera, este gradiente puede provocar cambios anatómicos drásticos. Imaginemos que se elimina todo el *shh* de forma gradual: la eliminación de un porcentaje pequeño del gradiente –es decir, la reducción de la concentración de manera general– provocará un desplazamiento de los ojos hacia abajo, más cerca de la zona donde la nariz acabará desarrollándose; si se elimina un poco más, los ojos se aproximan aún más, y si se elimina del todo, los ojos llegan a solaparse y se

generan en el mismo lugar, dando como resultado un organismo ciclópeo, con un solo ojo. Tanto las sustancias químicas ingeridas o liberadas en el medio ambiente como las mutaciones genéticas pueden causar este síndrome en algunos vertebrados.

Fijémonos en que, en ambos casos, la expresión génica es la clave. La expresión o inhibición de los genes es un aspecto vital de la forma en que se desarrolla el cerebro. Los ejemplos de *wnt* y *shh* son claras muestras de que en ocasiones el control conlleva un gradiente morfológico activado por lo que se conoce como un morfógeno: en nuestros ejemplos, *wnt* y *shh*. Los investigadores han utilizado este concepto del control de la expresión génica para explicar algunas diferencias entre nuestros parientes más cercanos; al secuenciar el genoma del neandertal (*Homo neanderthalensis*), también estamos empezando a comprobar las diferencias en la regulación genética entre nosotros y este pariente extinto.

El papel de la regulación genética en las diferencias anatómicas y conductuales entre organismos fue observado por primera vez por Allan Wilson y sus colegas en la Universidad de California en Berkeley. Utilizando como medida la similitud proteica basada en la inmunología, Wilson y Mary Claire King calcularon que la divergencia a nivel de proteínas entre los seres humanos y los chimpancés comunes (*Pan troglodytes*) era de aproximadamente un 1 %: dicho de otra manera, uno de cada 100 aminoácidos de los que forman las proteínas difiere entre los humanos y los chimpancés. Dadas las divergencias extremas a nivel anatómico y conductual existentes entre los dos, esto sólo podía significar que las estructuras de las proteínas (es decir, sus formas y tamaños) tenían muy poco que ver con las enormes diferencias anatómicas entre ellos. Entonces ¿de dónde procedían estas disparidades anatómicas? De acuerdo con la hipótesis de King y Wilson, la regulación de los genes es el auténtico árbitro de las vastas diferencias entre organismos. Este descubrimiento increíble se realizó en 1970, pero no fue posible calcular en detalle la divergencia real de la secuencia del ADN hasta que se compararon las secuencias génicas de los genomas de humanos y chimpancés comunes. Y resultó que King y Wilson no se habían alejado mucho de la verdad, porque la medida de la diferencia humano-chimpancé a nivel de

secuencia de ADN era de un 1,23 %.

HACE COMO LOS MONOS, QUE CUANTO MÁS ALTO TREPA, MÁS ENSEÑA EL  
TRASERO (FRANCIS BACON)

Cuando King y Wilson emprendieron su análisis original, estudiaron casi cincuenta proteínas, una tarea hercúlea en 1975. Para comprobar su hipótesis exhaustivamente haría falta observar la expresión de miles de genes en tejidos diferentes, y ello exigió el desarrollo de una técnica que permitiera estudiar la expresión original de grandes cantidades de genes. Dicha técnica, conocida como de micromatrices, equivale a tener una pequeña mesa de laboratorio en la que se puede no sólo realizar miles de experimentos simultáneamente, sino además en un portaobjetos de microscopio. El método permitía a los investigadores cuantificar, tanto en humanos como en chimpancé, qué genes y en qué tejidos se expresaban. Varios grupos de investigación han demostrado que, cuando se mide la expresión génica general por medio de esta técnica, es posible seguir la pista hasta las diferencias en los genes que se están expresando –sobre todo en el cerebro– como origen de las mayores diferencias entre humanos y chimpancé, tal como habían pronosticado King y Wilson. Y, en muchos casos, la principal diferencia resultó ser que el cerebro humano sobreexpresa muchos más genes que el del chimpancé.

En una revisión de los estudios realizados hasta 2004, Todd Preuss, Mario Cáceres, Michael Oldham y Daniel Geschwind señalaron que los tejidos del cerebro humano sobreexpresan de dos a ocho veces más genes que el cerebro del chimpancé, mientras que Philip Khaitovich, Wolfgang Enard, Michael Lachmann y Svante Pääbo, en otra evaluación de los datos de las micromatrices, lograron desentrañar aún más los mecanismos del cambio. Para ello, compararon la expresión génica en varios tejidos, incluidos el cerebro, el riñón, el corazón, el hígado y los testículos, y observaron que el cerebro era el tejido que mostraba un menor cambio. De hecho, con respecto a la expresión génica el cerebro ha cambiado como mucho sólo la mitad que los demás tejidos. Lo que sin embargo resulta significativo es que, en este estudio,

el cerebro fue el único tejido que mostró tasas *aceleradas* de cambio en la expresión génica en el linaje humano, coincidiendo así con las conclusiones de Preuss y sus colegas.

Es posible obtener una información aún más detallada sobre el modo en que la expresión génica afecta al cerebro estudiando directamente los genes que se sobreexpresan y cómo se relacionan entre ellos en su coexpresión. Al examinar de esta manera varios productos de las proteínas, se observa que forman lo que se conoce como módulos, porque interactúan entre ellos. Podemos describir las conexiones entre proteínas en los módulos tanto en humanos como en chimpancés, con el sorprendente resultado de que, en los cerebros de ambos, regiones subcorticales como por ejemplo los ganglios basal y la amígdala muestran una conservación modular mayor que la corteza cerebral. Dicho resultado es lógico, ya que las principales innovaciones en la evolución de los cerebros humanos se encuentran en las regiones corticales. Al profundizar aún más en las diferencias en los patrones de expresión entre los humanos y los chimpancés, los investigadores se han centrado en dos áreas: una está relacionada con proteínas activas en el metabolismo energético, y la otra con factores de transcripción, lo que nos lleva a un refinamiento ulterior de la hipótesis de King y Wilson, a punto ya de cumplir cuarenta años. La nueva información sugiere que un pequeño número de cambios coordinados en los factores de transcripción (aproximadamente unos noventa) han dado como resultado las principales diferencias que observamos en los patrones de expresión génica entre los cerebros de los chimpancés y de los humanos.

Otra teoría más antigua sobre la evolución de los cerebros de chimpancés y humanos hace referencia a la *secuencia temporal* en que se producen los procesos de desarrollo. Stephen Jay Gould defendió esta hipótesis en su libro *Ontogenia y filogenia* (sí, la misma ontogenia y filogenia que proponía Haeckel); en él, sintetizó la literatura sobre el tema demostrando que la *secuencia temporal* de los procesos en las rutas del desarrollo podría ser fundamental para la generación de diversidad morfológica, y quizá incluso conductual. Estos cambios, estudiados por primera vez por Haeckel, se conocen como *heterocrónicos*, y entre los resultados de la heterocronía

tratados en la literatura científica se encuentra uno en concreto, la *neotenia*, de interés a la hora de discutir las diferencias entre los humanos y los chimpancés. La neotenia es el mecanismo por el que los adultos de una especie más avanzada evolutivamente conservan características juveniles de una especie ancestral, y su resultado es la *paedomorfosis*.

Un ejemplo clásico natural de la paedomorfosis es el ajolote (*Abystoma mexicanum*). En su estadio adulto, estas curiosas salamandras conservan la cola y las hendiduras branquiales juveniles, que les dan el aspecto de renacuajos gigantes, pero su aparato reproductivo es completamente funcional. Al *Homo sapiens* se le llama en ocasiones el *simio paedomórfico*, ya que aproximadamente treinta rasgos de los adultos humanos equivalen a fases juveniles de sus ancestros reconstruidos y de los simios con él emparentados.

Este solapamiento en los rasgos se produce porque, en términos generales, la trayectoria del desarrollo de los primates superiores determina que las fases juveniles sean muy similares en especies como los gorilas, los chimpancés y los humanos. En el caso más evidente, la fase inicial del cráneo infantil del chimpancé o el gorila se parece mucho a la del cráneo infantil humano; durante el desarrollo en los simios, el rostro se alarga y se deforma hacia delante, mientras que el humano permanece más bien plano, sin alejarse mucho de la fase infantil. Si uno entiende el principio de la neotenia, entonces se está a la altura de Aldous Huxley, que lo utilizó en su libro *Viejo muere el cisne*. En él Huxley narra la historia de un millonario que busca la vida eterna por medio de las investigaciones de un científico, y tras un asesinato, unos cuantos libros antiguos y una aventura amorosa, Huxley llega a un final sorprendente, en el que narra el descubrimiento de un ser humano europeo que ha logrado alcanzar la inmortalidad. Desgraciadamente, este humano ha desarrollado unas características muy simiescas: al parecer, el simio paedomórfico (nosotros) se convierte en un simio normal si se le proporciona el tiempo suficiente.

Esto demuestra lo que da de sí la literatura... Pero los estudios sobre la expresión génica en el cerebro también han influido en el concepto evolutivo clásico de la neotenia en humanos. Los investigadores estudiaron la expresión de los genes en el córtex de seres humanos, chimpancés y macacos Rhesus en

diferentes estadios del desarrollo y, coincidiendo con la idea de que los humanos son, por lo menos en cierta medida, simios neoténicos, los científicos demostraron que la expresión de los genes en el córtex está retrasada con respecto a estos otros dos primates. Además, comprobaron que este retraso no es uniforme para todos los genes que se expresan, sino que afecta a un subconjunto específico relevante para el desarrollo y crecimiento de las neuronas.

## REGRESO AL MUNDO DEL ARN

El estudio del control de la expresión génica en el cerebro ha desvelado dos clases importantes de procesos, involucrados en el desarrollo del cerebro, que nos llevan de vuelta al mundo del ARN que se trató en el capítulo 2. Tal como lo describimos, este mundo estaba dominado por el ácido ribonucleico de una sola cadena, una molécula muy versátil capaz tanto de transportar información como de catalizar reacciones químicas; al parecer, algunos de los restos del ARN se habrían conservado en nuestro mundo actual dominado por el ADN.

El dogma central de este mundo es que la información fluye en una única dirección: del ADN al ARN, y del ARN a las proteínas. Sin embargo, recientemente se descubrió que entre todo el conjunto de ARN transcrito de las células hay pequeños fragmentos, compuestos únicamente por secuencias de 18 a 30 nucleótidos de longitud, que aparecen en grandes cantidades en todas las células y cuya función sólo ahora se está descifrando. Reciben el nombre conjunto de pequeños ARN (smRNA, por sus siglas en inglés), y se dividen en varios tipos diferentes, dependiendo de su longitud y función.

El descubrimiento de los smRNA se vio facilitado por las novísimas tecnologías de secuenciación de los ácidos nucleicos, capaces de generar información sobre millones de moléculas individuales de ARN en un solo ciclo. Estas técnicas permiten a los investigadores identificar el número y tipo de moléculas de ARN que flotan en las células; así, se ha comprobado que los smRNA influyen tanto sobre la regulación de los genes como en la determinación del destino de las células y en la biología de las células madre.

Existen cientos de clases distintas en el genoma humano, cada una con una función propia. La cuestión consiste en averiguar cómo estos pequeños fragmentos de ARN regulan los genes más grandes de un modo tan exacto que determinados tejidos dependen en gran medida de ellos para desarrollarse de forma adecuada. La función de estos fragmentos en la regulación génica se descubrió por primera vez en el nematodo *Caenorhabditis elegans*, y dos ejemplos bastarán para ilustrar su complicado y preciso papel en la neurogénesis.

El primero está relacionado con la «culpabilidad por asociación». En este ejemplo se ha examinado en detalle el procesamiento de los smRNA, sobre todo de los conocidos como miRNA (microRNA). Los miRNA se procesan por medio de una serie de proteínas, una de las cuales, llamada Dicer [literalmente, troceadora], los fragmenta. Una vez que Dicer lo ha cortado, el miRNA se une a ARN mensajeros que constituyen la plantilla para la síntesis de proteínas, formando un complejo silenciador inducido por microRNA (o RISC). A continuación, el RISC provoca la ruptura del mRNA de forma que se interrumpa la producción de la proteína, silenciando así la expresión génica. En los peces cebra, las mutaciones de Dicer están asociadas con diversas anomalías del sistema nervioso; así, por ejemplo, los tubos neurales de los individuos afectados son defectuosos y carecen de la frontera medio-posterior del cerebro tan importante en el desarrollo correcto del mismo; si posteriormente se proporciona a un embrión mutante de Dicer un tipo específico de miRNA, los científicos pueden llegar a *rescatar* al mutante. De la misma manera, el complejo RISC puede alterarse por medio de la mutación de una proteína llamada Argonata, responsable de la formación del mismo. Si el RISC no se forma en los ratones mutantes, no se produce el silenciamiento de una serie de genes concretos y esta anomalía en la expresión génica dará como resultado fallos en el cierre del tubo neural. El principio de «culpabilidad por asociación» implica por tanto a los miRNA de forma relevante y específica en el desarrollo del tubo neural y el cerebro.

El segundo tipo de ejemplo lo proporciona lo que conocemos como los «experimentos de balancín» e implica el control de los factores de transcripción por parte de los miRNA. Utilizamos la palabra *balancín* porque

el experimento consiste en añadir un miRNA al sistema y comprobar a continuación cómo afecta a la regulación al alza y a la baja de los genes neuronales, suponiendo que el miRNA influye en la actividad de los factores de transcripción. Estos factores son proteínas que suelen unirse al ADN en el genoma, y al hacerlo regulan la expresión de la transcripción de los genes implicados. Así es posible medir el impacto de miRNA concretos en la transcripción de genes específicos implicados en la neurogénesis, como en el caso del miR-124. Se ha demostrado que este miRNA es el smRNA más abundante en el sistema nervioso central de los adultos, tanto vertebrados como invertebrados. Pero el hecho de que exista en abundancia en un tejido determinado no implica suficiente «culpabilidad por asociación» para demostrar su papel en la neurogénesis. Por ello, y para valorar el papel de este miRNA en el desarrollo del sistema nervioso central, los científicos crearon un sistema experimental de cultivo celular en el que eran capaces de conseguir que las células produjeran grandes cantidades de miR-124, y a continuación sólo tuvieron que identificar y contar el número de genes que estaban regulados al alza (producidos en mayores cantidades que en una célula que no fabricara miR-124) y los que lo estaban a la baja (producidos en menores cantidades que en una célula que no fabricara miR-124). Utilizando el análisis con micromatrices que discutimos con anterioridad, en el que se puede seguir la actividad de miles de genes a la vez, los investigadores descubrieron que el miR-124 provocaba tanto la regulación al alza de los genes neuronales como la regulación a la baja de los genes no neuronales.

Otro proceso celular relacionado con el ARN que muy probablemente influye en la neurogénesis es el conocido como edición del ARN. Este proceso tiene como resultado la alteración del ARN celular con posterioridad a la transcripción debido a influencias ambientales: dicho fenómeno de alteración del material genético por parte de factores ambientales recibe el nombre de epigénesis. Hace tiempo que se sabe que la edición del ARN es fundamental en muchos seres vivos, pero es un proceso que ha aumentado gradualmente desde los vertebrados, pasando por los mamíferos, hasta los primates, y *Homo sapiens* es el que parece tener los niveles más altos. Gran parte de la edición del ARN es catalizada por unos productos genéticos llamados ADAR (adenosina

desaminasa que actúa sobre ARN). Cuando se examinan los tejidos para detectar la presencia o ausencia de ADAR, se observa que se expresan preferentemente en el sistema nervioso; lo que es más, una forma de ADAR se expresa exclusivamente en el cerebro. ¡Culpable por asociación una vez más!

Tal como hemos mencionado, *Homo sapiens* es la especie con el grado más alto de edición del ARN. Además, cuando se compara este proceso en humanos con la edición en ratones, más del 90 % de la diferencia resulta deberse al procesamiento de un único tipo de ARN. Este ARN procede de pequeños tramos de ADN, repetidos a lo largo del genoma humano, denominados familia de secuencias Alu: deben su nombre al hecho de que se describieron por primera vez utilizando una enzima, llamada AluI, que cortaba en puntos determinados de la familia, lo que facilitaba su identificación. Estas secuencias están repartidas por todo el genoma humano: hay aproximadamente un millón, y se pueden encontrar en los 23 cromosomas humanos, tanto en regiones codificadoras como en las no codificadoras. La mayor parte de las Alu de humanos se encuentran en las posiciones correspondientes en los genomas de otros primates, pero curiosamente, existen aproximadamente siete mil elementos Alu exclusivos del genoma humano que no aparecen en otros primates.

Esto permite establecer una curiosa serie de culpas por asociación: 1) la edición de ARN es importante sobre todo en el cerebro, lo que nos lleva a que 2) los seres humanos muestran un grado mucho mayor de edición del ARN que otros mamíferos, lo que nos lleva a su vez a 3) la mayor parte de esta edición se produce en las secuencias Alu, que aparece únicamente en los genomas de los primates, y finalmente a 4) los primates son el linaje que ha experimentado el nivel más elevado de innovación cognitiva evolutiva. Si se unen los puntos, es posible llegar a la conclusión de que tanto las secuencias Alu como la edición del ARN han sido elementos cruciales en la evolución de la cognición en primates. Pero no se traducen en proteínas, y hay una gran cantidad de ellas: entonces, ¿de qué modo están involucradas en la regulación del desarrollo del cerebro? La hipótesis más satisfactoria es que, de alguna manera, participan en la regulación de los genes relevantes para la neurogénesis. La edición del ARN se produce no sólo en las secuencias Alu del ARN (que no se expresan, es

decir, no se traducen a proteínas) sino también en las que codifican (o sea, en los genes que se traducen a proteínas), y se da la casualidad de que un gran número de las regiones codificadoras en las que el ARN se edita corresponde a genes específicos del sistema neural, lo cual no resulta en absoluto sorprendente dado que el proceso de edición del ARN es muy abundante en los tejidos neurales.

También se ha sugerido que la edición del ARN es el mecanismo utilizado para almacenar los recuerdos. En el capítulo 6 describimos la plasticidad neuronal y cómo se relaciona con la memoria. En la visión clásica de las sinapsis, la plasticidad neuronal está relacionada con la fuerza sináptica, pero recordemos que uno de los problemas de la potenciación a largo plazo (LTP) como mecanismo para almacenar los recuerdos era la cuestión del tiempo: la potenciación a largo plazo permite el mantenimiento y reforzamiento de una sinapsis, pero el lapso de tiempo en que esto se mantiene supone un problema cuando los recuerdos se almacenan durante periodos largos de tiempo. El papel potencial de la edición del ARN en el almacenamiento de la memoria es muy distinto, y se basa en la observación de que las transcripciones de los genes que codifican enzimas para la reparación del ADN están sometidas a la edición del ARN. Sabemos con certeza que un aspecto de nuestro genoma que se ve afectado por los genes de reparación del ADN es el correspondiente a nuestros genes del sistema inmunitario. Los organismos con sistemas inmunitarios adaptativos poseen conjuntos de genes que controlan la producción de las proteínas participantes en la respuesta inmunitaria; el sistema detecta factores ambientales, como por ejemplo virus, bacterias u otras causas de infección, lo que provoca que la célula modifique las secuencias génicas inmunitarias propiamente dichas para enfrentarse a las infecciones, en un proceso que genera la diversidad de receptores.

La diversidad de receptores es un aspecto importante del cambio genómico epigenético que permite al genoma enfrentarse a infecciones futuras. El proceso completo se conoce como recodificación del ADN, y tiene como resultado una alteración estable del ADN de determinadas células a nivel de los genes del sistema inmunitario que producen los anticuerpos que luchan contra las infecciones. De ahí a sugerir que este proceso puede darse también

en las células nerviosas hay sólo un pequeño paso: de hecho, esta recodificación puede ser el mecanismo por medio del cual los episodios y las experiencias aprendidas se reescriben en el ADN de la célula. El proceso podría ser el siguiente: una célula nerviosa experimentaría un cambio epigenético en su genoma (recordemos que todas las células poseen el genoma completo) que ordenaría a la sinapsis mantener el potencial y, por lo tanto, el recuerdo. Como apuntaron los neurobiólogos John Mattick y Mark Mehler en un artículo de 2008: «Cada célula nerviosa poseerá de hecho una secuencia génica y una estructura cromatínica propia definida espacial y temporalmente», y: «La memoria, en cuanto consolidación del almacenaje, recuperación y adaptaciones a largo plazo de la forma y función del cerebro humano, debería poderse modificar por medio de la modulación dirigida y diferencial de la expresión de los genes que codifican las enzimas implicadas en la edición del ARN y la recodificación del ADN». Una idea muy interesante, sin duda, pero que por ahora se basa únicamente en la culpabilidad por asociación.

#### EL TAMAÑO IMPORTA (¿O NO?)

Una característica de los cerebros que desarrollan formas superiores de cognición es un aumento en el tejido cerebral: en otras palabras, cuanto más grande es el cerebro, mayor es su potencial para lograr funciones cognitivas superiores. Pero no todo se puede reducir a «cuanto más grande, mejor». El tamaño absoluto del cerebro es importante en diversas especies de homínidos (véase el capítulo 10), pero a la hora de analizar funciones cognitivas de complejidad creciente, el tamaño del cerebro en relación al de otras partes del cuerpo es todavía más importante. Una forma de resolver esta cuestión del tamaño relativo es a través de la medición en bruto del tamaño del cerebro en diferentes organismos, para a continuación correlacionarlo con algún aspecto de la biología de los organismos que se miden.

Desde la década de los sesenta del siglo pasado se sabía que existía una correlación aproximada entre el tamaño del cerebro y el del cuerpo en los

vertebrados, una relación que implica que, a medida que se desarrolla, el cerebro mantiene la misma escala que el resto del cuerpo. Pero también se ha señalado con frecuencia que existen algunas desviaciones significativas de esta relación general; así, se sabe desde hace tiempo que tanto los delfines como los seres humanos poseen cerebros más grandes de lo que se predeciría a partir del tamaño de su cuerpo, basándonos en la tendencia general de los vertebrados. Durante la última década los investigadores han profundizado en esta cuestión, con algunos resultados interesantes e inesperados.

En lo que se refiere a los orgullosos seres humanos poseedores de grandes cerebros, parece que el mayor insulto que pueden lanzar a un grupo de organismos es decir que sus cerebros son pequeños. En el capítulo 5 mencionamos la idea generalizada de que los pájaros son «cabezas huecas», pero de hecho la mayoría de los pájaros presentan unos índices cerebro/cuerpo totalmente normales, y el estudio de las especies de pájaros que se desvían de este índice demuestra lo inteligentes que son algunos de ellos. Daniel Sol y sus colegas estudiaron más de seiscientos casos de traslado natural, o de introducción artificial, de especies de pájaros en ambientes nuevos, midiendo los índices cerebro/cuerpo de todas las especies en cuestión, tanto antes como después de la introducción, y descubrieron que los pájaros con cerebros más grandes tienen más éxito al invadir y establecerse en ambientes nuevos. En muchos de los casos, Sol y sus colegas lograron demostrar además que el éxito de estos pájaros de cerebro grande se debía a su capacidad de innovar, más que a mecanismos no cognitivos.

Otro grupo de organismos con una fama no merecida de cerebros pequeños es el de los marsupiales. Estos mamíferos carecen de placenta y por lo tanto se clasifican, junto con los monotremas, dentro de los mamíferos no placentarios. Vera Weisbecker y Anjali Goswami han analizado el tamaño de los cerebros de marsupiales y mamíferos placentarios, pero introduciendo un factor nuevo. La mayor parte de las comparaciones no tienen en cuenta la tasa metabólica basal, una medida de la tasa a la que el cuerpo absorbe y procesa nutrientes, pero ellos sí la introdujeron en los cálculos, examinando además el tiempo que las madres dedican al cuidado de los pequeños desde el nacimiento. Cuando se incluyen estos parámetros, resulta que la tasa metabólica basal y la

inversión materna tienen de hecho más importancia que el tamaño del cuerpo a la hora de determinar el tamaño del cerebro, por lo que, aunque los marsupiales poseen cerebros pequeños, no se debe al mismo motivo que en el caso de los mamíferos placentarios pequeños.

Se ha estudiado, asimismo, en diversos grupos de mamíferos placentarios la hipótesis según la cual características sociales como el cuidado materno pueden influir en el tamaño del cuerpo. Una socialización mayor requiere más capacidad comunicativa y mejores habilidades cognitivas que los estilos de vida solitarios, por lo que se pensó que el comportamiento social requeriría una mayor potencia cerebral, según la hipótesis conocida en ocasiones como del «cerebro social». Nuestros colegas del AMNH John Finarelli y John Flynn examinaron el fenómeno de la relación entre el tamaño del cerebro y la socialización en uno de los órdenes de mamíferos más sexí, los carnívoros (Carnivora: perros, gatos, osos, etc.). Cuando emplearon únicamente especies vivas, detectaron una correlación entre estos dos factores, pero cuando incluyeron tanto especies vivas como extintas (400, de las cuales aproximadamente un tercio eran fósiles), descubrieron que los cambios en el tamaño del cerebro eran muy numerosos, y que aparecían con frecuencia durante la evolución de los carnívoros en grupos con hábitos sociales diferentes. Por lo tanto, el proceso del aumento del tamaño del cerebro es probablemente algo mucho más complejo que una simple función de una mayor socialización: de hecho, cuando se examinó directamente la hipótesis del cerebro social por medio de registros fósiles, no se obtuvo prueba alguna de esta correlación, lo cual se corresponde con otros estudios que utilizan parámetros más exactos que la simple socialización. Uno de estos estudios, llevado a cabo por Simon Reader y sus colegas, empleó lo que llamaron medidas «ecológicamente relevantes» de la habilidad cognitiva para tratar de comprobar si estaban correlacionadas con un aumento en el tamaño del cerebro. Para ello examinaron aproximadamente quinientos casos cada uno de conducta innovadora, aprendizaje social y uso de herramientas entre animales, y cuando analizaron la relación de estos indicadores cognitivos ecológicamente relevantes con el tamaño del cerebro, encontraron una correlación únicamente en aquellos casos en los que utilizaron unas

definiciones muy precisas de las características sociales.

## MICROCEFALIA

Si bien algunos de los estudios que hemos tenido en cuenta hasta ahora ponen en entredicho la correlación directa del tamaño del cerebro con las habilidades cognitivas, un grupo en el que la tendencia es bastante clara es aquel al que pertenecemos los seres humanos: los primates. Cuanto más derivado es el linaje de un primate, mayor parece ser su cerebro, sobre todo el neocórtex; no sólo: el aumento del tamaño del cerebro se ha producido en múltiples linajes de primates de forma independiente. Y el hallazgo de acontecimientos múltiples independientes en la historia evolutiva es el sueño de todo biólogo evolutivo, porque la comparación de un fenómeno similar a través de distintos linajes permite el estudio en detalle de ese acontecimiento en particular. Este hecho, unido a la creciente facilidad para analizar los genomas de los primates, nos ofrece la oportunidad de utilizar linajes múltiples como herramienta para entender la influencia genética y genómica sobre el aumento del tamaño del cerebro.

Uno de los grupos de genes implicados en este aumento recibe el curioso nombre de genes «microcefálicos»: curioso porque el nombre quiere decir «cerebros pequeños», pero menos curioso, quizá, si se tiene en cuenta que estos genes se descubrieron como consecuencia del estudio de una serie de trastornos humanos agrupados bajo el término «microcefalia». Este síndrome es un trastorno congénito en el que la corteza cerebral no alcanza el tamaño adecuado, y no parece deberse a anomalías ambientales, cromosómicas o metabólicas. Los genetistas han llegado a la conclusión de que el síndrome es heredado y de que existen por lo menos ocho genes implicados en su expresión. Cuatro de los genes examinados hasta ahora producen proteínas que participan en la formación de complejos relacionados con la división celular en las células nerviosas; estos genes influyen en procesos fundamentales para la división celular, el momento en que tanto los juegos de cromosomas recién copiados como los antiguos se trasladan desde el centro de las células en

división al interior de las nuevas células hija. Por lo tanto, estos genes participan muy probablemente en la regulación del número y tipo de células disponibles para divisiones subsiguientes. Otro gen está implicado en el proceso celular de reparación del ADN dañado. Cuando las células se dividen, comprueban automáticamente los cromosomas para encontrar daños e intentar repararlos antes de la replicación; si el daño no se detecta o no se repara, las células en división corren el peligro de no ser capaces de llevarla a cabo. No se han descrito todavía los tres genes restantes de los ocho implicados en la microcefalia.

El modo en que los tejidos cerebrales se expanden durante el desarrollo viene en gran medida forzado por la división celular durante la embriogénesis. Muchas de las hipótesis que tratan de explicar este crecimiento del tejido, y por lo tanto el modo en que se «esculpe» la forma del cerebro, se basan en una división celular diferencial simétrica y asimétrica en el cerebro, puesta en marcha muy probablemente por el modo exacto en que las células se dividen durante la mitosis. Resulta muy verosímil la implicación, a través de estos mecanismos, de los genes que acabamos de describir en el aumento del tamaño del cerebro: desde luego, los desafortunados bebés que presentan mutaciones en dichos genes nacen con cerebros notablemente más pequeños que los normales. Estos bebés puede vivir un cierto periodo de tiempo, pero presentan grandes deficiencias mentales. Cuando se examinan los cerebros de estos individuos microcefálicos, se observa algo interesante. Se podría pensar que una disminución en el tamaño conllevaría un menor grosor del córtex: después de todo, en los individuos microcefálicos el cráneo es más pequeño y más compacto. Pero no es el grosor lo que disminuye, sino el área superficial. Y si se piensa en las funciones de los genes implicados en este proceso, esto tiene mucho sentido, ya que la mayoría regula el tamaño del conjunto de células nerviosas disponibles para la división, lo cual es totalmente congruente con la reducción del área superficial del córtex.

Es fundamental adoptar la perspectiva adecuada en el estudio del cerebro al analizar los cambios en su tamaño a lo largo de la historia de los organismos, y el hecho de saber que estos cinco genes microcefálicos están implicados de alguna manera proporciona a los investigadores mejores

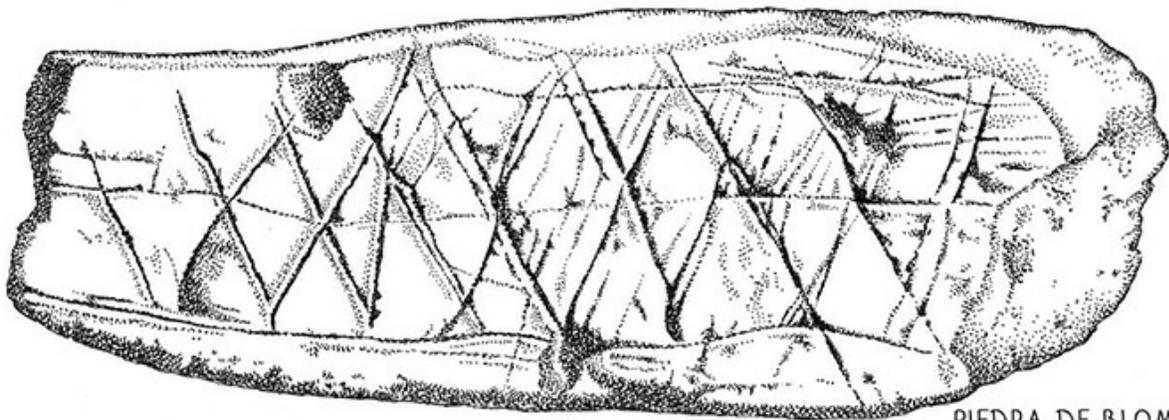
herramientas para dicho análisis en los primates. Por lo tanto, a pesar de que la mayoría de los estudios realizados hasta ahora se han centrado en el tamaño general del cerebro (incluyendo, por defecto, el grosor de la corteza cerebral), en realidad sería preferible estudiar el área superficial de la corteza, o la masa cerebral, en una amplia selección de primates. De hecho, estos dos datos se correlacionan mucho mejor con el número total de neuronas que el tamaño absoluto del cerebro, y es exactamente este número lo que se ve afectado por los genes que hemos tratado.

Varios grupos de investigación han planteado la posibilidad de que los cuatro genes que afectan directamente a la mitosis, a través de la alteración de las estructuras que permiten el movimiento cromosómico durante la división celular, se encuentren sometidos a una intensa selección adaptativa, y creen que esta selección ha sido más pronunciada en el linaje que conduce hasta nosotros. Dicho de otra manera, creen que el hecho de tener cerebros más grandes se debe a la selección natural, que ha favorecido los cambios en esos genes. Pero el estudio de este fenómeno en primates llevado a cabo por Stephen Montgomery y sus colegas sugiere que sólo es probable la implicación de dos de los cuatro genes, y que una selección similar se ha producido en muchos puntos de la filogenia de los primates. Sin embargo, hay un hecho más importante que debemos destacar: el tamaño del córtex no es el factor limitante en la evolución del tamaño del cerebro en primates, ya que los cambios en el tamaño del cerebro propios de cada linaje de primates afectan más bien al área superficial y a la masa cerebral.

Los cambios a nivel genómico que provocan alteraciones de la anatomía del cerebro, como los que vemos en la microcefalia, son esencialmente diferentes del tipo de cambio genético que parece haber sido más frecuente en la evolución del cerebro: recordemos si no el trabajo de King y Wilson, y la investigación posterior realizada con micromatrices en la que se demostraba que la regulación génica era la principal responsable de los cambios en la anatomía y la fisiología del cerebro, tanto en el linaje de los chimpancés como en el de los seres humanos. De hecho, los genes que acabamos de describir se encuentran entre los relativamente escasos ejemplos que poseemos de cambio evolutivo provocado por la alteración de los genes estructurales (como si

dijéramos, los genes que luchan en las trincheras) en contraste con los cambios mucho más ubicuos provocados por sus comandantes, los genes reguladores.

## Letra y música de...



PIEDRA DE BLOMBOS

El cerebro humano es capaz de realizar una serie de actividades –entre ellas el lenguaje y la música– claramente únicas. ¿Cómo funcionan estos aspectos tan importantes de nuestras llamadas habilidades cognitivas superiores, y cómo evolucionaron?

## LAS ÁREAS DE LENGUAJE Y EL ÁREA DEL LENGUAJE

El lenguaje no consiste simplemente en comunicarse. Si se limitara a eso, es evidente que muchas especies, si no todas las que existen en el planeta, lo tendrían. René Descartes reconoció este enigma cuando propuso (con una visión bastante moralizante) que los animales no podían ser seres conscientes y racionales porque no poseen el lenguaje. Pero en realidad muchos animales son capaces de comunicarse vocalmente de formas sofisticadas: los delfines y

los cercopitecos verdes, por ejemplo, se comunican por medio de mecanismos vocales de gran eficiencia e incluso elegancia, y existe un bonobo llamado *Kanzi* que puede hacer uso de por lo menos algunos aspectos del lenguaje para comunicarse. Dichas realidades convierten la palabra «lenguaje» en algo escurridizo: al igual que muchas de las palabras que hemos examinado en este libro («cerebro», «sinapsis» u «homología»), puede llegar a significar casi cualquier cosa si se la tergiversa lo suficiente. Por lo tanto, es importante definir sin dilación, antes de examinar sus orígenes en el cerebro, lo que entendemos por lenguaje. Estas son algunas de las descripciones que hemos encontrado en nuestros esfuerzos por llegar a una definición:

Las palabras, su pronunciación, y los métodos para combinarlas que una comunidad utiliza y comprende.

Un sistema especial para codificar y decodificar información.

Un lenguaje formal es un conjunto de palabras, es decir, series finitas de letras, símbolos o fichas.

Una forma de comunicación en la que se utilizan palabras habladas o bien representadas por gestos de las manos y estructuradas por medio de la gramática.

El énfasis varía, centrándose unas veces en las palabras y otras en las reglas para combinarlas, pero desde nuestro punto de vista la clave reside en que ambos aspectos están involucrados: los casi siete mil idiomas del mundo tienen en común que un vocabulario finito de (habitualmente) símbolos auditivos se puede combinar, de acuerdo a unas reglas, para dar lugar a un número infinito de afirmaciones sobre el mundo. Pasamos gran parte de nuestra vida hablando con los demás, por lo que pensamos de forma intuitiva en el lenguaje como un sistema de comunicación de una precisión y flexibilidad extraordinarias, si bien en realidad, con los aproximadamente siete mil idiomas que existen hoy en día en el mundo (cada uno de los cuales debe ser aprendido), el lenguaje constituye sin duda una de las mayores barreras existentes para la comunicación: de hecho, en este aspecto es prácticamente un símbolo de las diferencias culturales que nos amenazan y que a la vez hacen del mundo un lugar tan interesante. Pero uno de los aspectos

más importantes del lenguaje es que nos permite *pensar* del modo tan original en que lo hacemos. El lenguaje nos proporciona un sistema para categorizar el mundo que nos rodea en forma de distintos símbolos abstractos que podemos barajar en nuestras mentes, además de las reglas organizativas que necesitamos para conectar y reordenar estos símbolos y así dar lugar a ideas coherentes. Sin lenguaje seríamos incapaces, no sólo de comunicarnos como lo hacemos, sino también de pensar de una manera tan especial.

Existen cuatro enfoques básicos para el estudio de la evolución del lenguaje. El primero utiliza un método fiable y conocido, la neuroanatomía cognitiva, que llevó a la localización de las funciones del habla en las áreas de Broca y Wernicke. La delimitación de estas áreas nos puede ayudar también a interpretar moldes cerebrales de homínidos extinguidos, y entre los descendientes modernos de esta línea de ataque se encuentran unas increíbles técnicas de imagen que ni Broca ni Wernicke, y ni siquiera Wilder Penfield a mediados del siglo XX, tuvieron a su disposición: la imagen por resonancia magnética funcional, la tomografía por emisión de positrones y la magnetoencefalografía.

La segunda estrategia importante hace uso de la genómica, como en el caso de los genes de la microcefalia utilizados para comprender los fundamentos del tamaño del cerebro (véase el capítulo 7), mientras que la tercera consiste en estudiar la relación entre los idiomas propiamente dichos, utilizando componentes específicos de los mismos como características para reconstruir la historia de los idiomas conocidos; en el último enfoque se recurre a otros sistemas para ayudarnos a descifrar la evolución del lenguaje. Pero, sea cual sea la estrategia que se adopte, no hay que perder nunca de vista lo que entendemos exactamente por lenguaje, para evitar que el término acabe cayendo en el cubo de las metáforas.

Hace ya más de dos siglos que se mapearon en detalle, por medio del método clínico-anatómico adoptado por Charcot, regiones del cerebro involucradas en el lenguaje, y no debería sorprendernos el hecho de que algo tan complejo como el lenguaje resulte NO tener una única ubicación en el cerebro. No obstante, algunas de las regiones que participan en la producción del lenguaje sí están muy localizadas: se utiliza un área al expresarse uno

mismo, y otra diferente cuando se interpreta lo que dice otra persona. Y, por supuesto, todas las áreas del cerebro relacionadas con el proceso trabajan juntas constituyendo una única red integrada. Uno de los resultados más interesantes obtenidos en los intentos de situar el lenguaje en regiones determinadas del cerebro es la dicotomía izquierda-derecha ya discutida en el contexto del control corporal y la visión. El lenguaje, en su nivel más burdo, puede localizarse en ambos lados del cerebro, pero a pesar de que el lado izquierdo parece ser el responsable de manejar el sentido literal de las palabras, el derecho se ocupa de asuntos más sutiles, como por ejemplo la comprensión de emociones incorporadas en las palabras (el sarcasmo y el humor, por ejemplo, o la detección del tono de voz). Curiosamente, la comprensión de las metáforas también es tarea del lado derecho.

Se han obtenido algunas conclusiones impresionantes con respecto a la dicotomía cerebral izquierda-derecha a través de personas en las que se ha interrumpido físicamente la comunicación entre los dos hemisferios, en lo que se conoce como el «fenómeno del cerebro dividido». Estas personas suelen ser epilépticos a los que, para aliviar las crisis, se les ha seccionado quirúrgicamente el cuerpo calloso por medio de un procedimiento llamado comisurotomía. El cuerpo calloso es la región del cerebro situada en el centro, literalmente un haz de nervios a través del cual se produce toda la comunicación entre el hemisferio izquierdo y el derecho. El curioso modo en que las personas a las que se les han practicado comisurotomías perciben el mundo ha permitido a los neurocientíficos resolver algunas de las complejidades del control del lenguaje. En los experimentos con cerebros divididos llevados a cabo primero por Robert Sperry y más recientemente por Michael Gazzaniga, se proyectaron imágenes de objetos por medio de un mecanismo con un divisor que garantizaba que las imágenes fueran percibidas sólo por un ojo, de forma consecutiva en los ojos izquierdo y derecho del sujeto. Al mismo tiempo, se presentaban cuatro ilustraciones a la izquierda del sujeto y cuatro a su derecha, que no coincidían necesariamente con las imágenes proyectadas pero sí estaban relacionadas de alguna manera con éstas.

En uno de los experimentos de Gazzaniga, éste presentó un paisaje con

nieve en el campo visual derecho y una pata de pollo en el izquierdo. Debido a la configuración del sistema visual, el ojo izquierdo envía información al hemisferio derecho y viceversa; cuando el sujeto ve la imagen correspondiente a una prueba específica, su hemisferio derecho responderá con la mano izquierda, y el izquierdo lo hará con la mano derecha. El sujeto con el cerebro dividido identificará fácilmente como tal con la mano derecha una ilustración relacionada con la pata de pollo y con la mano izquierda una asociada al paisaje con nieve, pero con una inteligente manipulación de las imágenes que los sujetos utilizaban para identificar el paisaje con nieve y la pata de pollo, los investigadores descubrieron aspectos interesantes del cerebro dividido. Así, si la escena de nieve se relacionaba con una pala (para limpiar la nieve), el sujeto elegía la pala como la ilustración que mejor se asociaba con el paisaje nevado. Si a continuación se le preguntaba por qué su mano izquierda había elegido la pala, no se producía respuesta alguna del hemisferio derecho, pero el izquierdo, que también había entendido la pregunta y dado que es la parte del cerebro que domina el lenguaje y había visto el pollo, se inventaba una historia en la que el sujeto incorporaba lo que veía: una explicación para el pollo. Así, un sujeto señaló la pala porque se podía usar para limpiar un gallinero. Este tipo de resultados revela la importancia de la comunicación entre ambos hemisferios del cerebro.

¿Por qué en el último ejemplo el sujeto se inventó esa historia, lógica pero absurda, sobre la pala y el gallinero? De acuerdo con el razonamiento de los investigadores, la decisión inicial de indicar la pala la tomó el hemisferio derecho, que veía el paisaje con nieve, pero a este hemisferio no se le da bien hablar ni resolver problemas, por lo que permaneció bloqueado y callado: de ahí su falta de respuesta al ver la escena de nieve. Dado que el hemisferio izquierdo domina el área del lenguaje, el sujeto dio la mejor respuesta que encontró basándose en lo que veía esa zona del cerebro: una pata de pollo.

A lo largo de muchos años de trabajo, que comenzaron con Broca y Wernicke, los investigadores han logrado obtener una representación bastante buena de las áreas del lenguaje en el cerebro y de cómo funcionan al producir, comprender e interpretar el lenguaje. La exposición *El cerebro* del AMNH resume estas áreas funcionales principales de la siguiente manera:

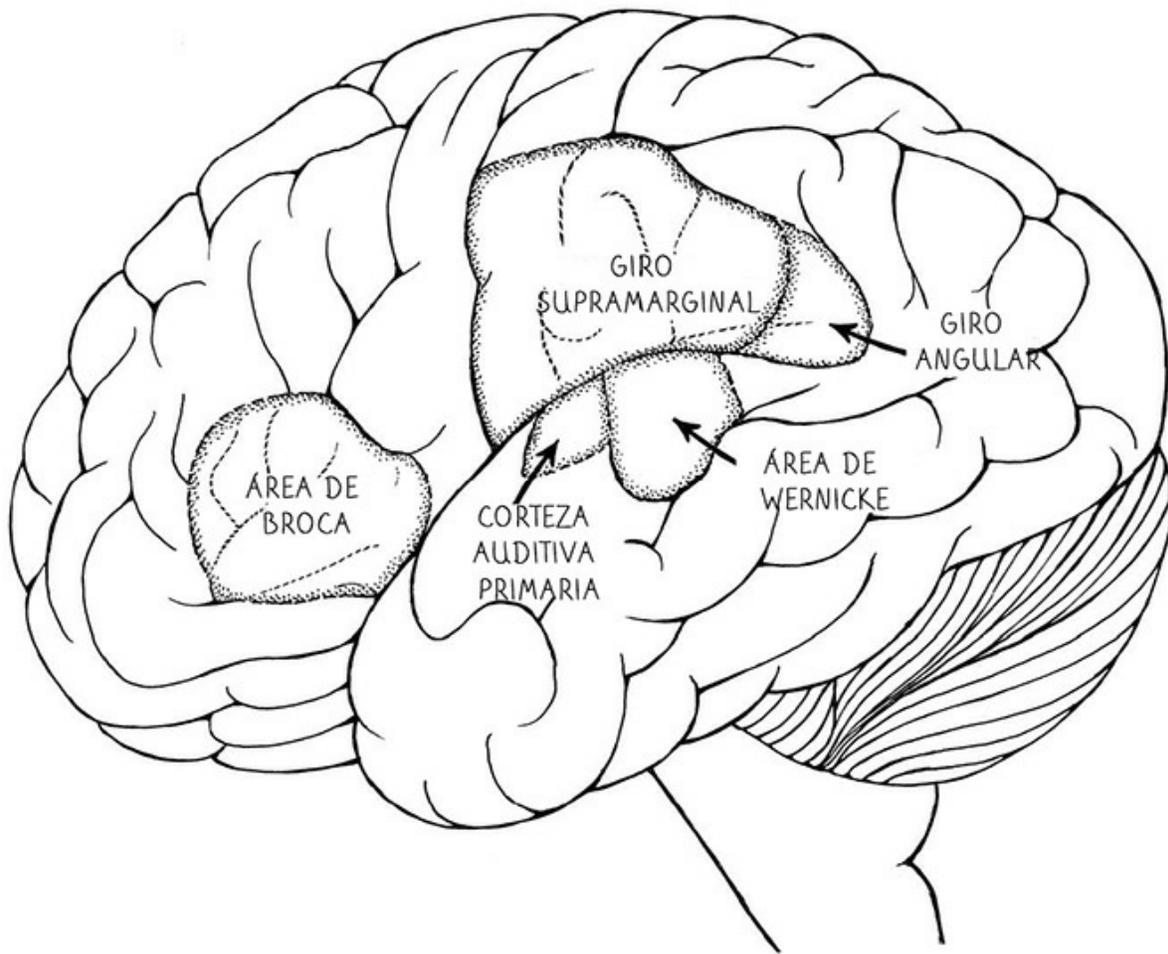
*UNIR PALABRAS* –Área de Broca. La generación de las palabras que uno quiere decir o escribir tiene lugar en esta región. Las personas con daños en esta área son capaces de entender lo que otros dicen pero tienen muchos problemas para responder.

*HABLAR Y ESCRIBIR* –*Corteza motora*. Existen zonas específicas en la *corteza motora* que controlan los músculos de la boca, la lengua y la laringe cuando se habla y los músculos de la mano cuando se escribe.

*COMPRENSIÓN DEL LENGUAJE* –Área de Wernicke. Aquí tiene lugar la comprensión de la escritura y el habla de otras personas. Los individuos que presentan daños en esta región son incapaces de comprender lo que otros dicen. Aun así pueden hablar, pero posiblemente de una forma confusa.

*OÍR* –*Corteza auditiva*. Los sonidos que los demás producen al hablar se procesan en primer lugar en la *corteza auditiva*, y a continuación se envía el mensaje al área de Wernicke, que averigua el significado del sonido.

*VER* –*Corteza visual*. Las palabras escritas se procesan en primer lugar en la *corteza visual*, pero el sentido de las palabras y frases se descodifica posteriormente en el área de Wernicke.



Regiones del lenguaje en el cerebro, indicando las principales áreas relacionadas con esta función.

A primera vista, esto no parece demasiado complicado, pero cuando se añaden las peculiaridades de otros aspectos del lenguaje y su localización en el cerebro, la cosa empieza a enmarañarse y uno se da cuenta de la complejidad del lenguaje. Tengamos simplemente en cuenta el siguiente dato: sólo en los primeros nueve meses de 2009 aparecieron en las revistas científicas 100 artículos que utilizaban las técnicas de neuroimagen para ubicar aspectos del lenguaje en regiones específicas del cerebro. La neurobióloga Cathy Price recapituló estos estudios en un trabajo de 2010, correlacionando 20 áreas bien definidas del cerebro con diversos aspectos del lenguaje, entre los que se incluían los siguientes: percepción preléxica del habla, detección de habla con sentido, recuperación semántica, comprensión de oraciones, reconocimiento de oraciones incomprensibles, conocimiento

previo de asociaciones semánticas, secuencias de palabras y articulación de palabras que predicen el contenido de una oración, producción del habla, recuperación de palabras, planificación articulatoria, ejecución del habla y supresión de respuestas no intencionadas. Price llegó a la conclusión de que, en efecto, existían áreas específicas del cerebro que jugaban papeles importantes en muchas de estas tareas complejas del lenguaje.

Dada su complejidad, resulta inevitable que exista una cierta controversia con respecto a la utilidad de estas técnicas de imagen para ubicar funciones específicas del lenguaje. La crítica principal hace referencia al hecho de que los datos de imagen se obtienen de grupos de personas, y a que la variabilidad en las capacidades lingüísticas de cada individuo enmascara la localización de las funciones del lenguaje. En una interesante crítica a este enfoque, Evelina Fedorenko y Nancy Kanwisher afirmaron que «dos preguntas genéricas han servido de base para docenas de estudios sobre la base neural del lenguaje publicados en las últimas décadas: 1) ¿Existen áreas diferenciadas del córtex implicadas en aspectos diversos del lenguaje? 2) ¿Son las regiones relacionadas con el procesamiento del lenguaje propias del campo del lenguaje? Las técnicas de neuroimagen no han proporcionado todavía una respuesta clara a ninguna de las dos preguntas». Pero otro biólogo, Yosef Grodzinsky, expresó su desacuerdo con dicha afirmación: «Cuando se examina el paisaje neurolingüístico con las gafas lingüísticas adecuadas, la imagen que aparece no es turbia, a pesar de su intrigante complejidad, sino más bien estable y clara, una imagen que divide el cerebro lingüístico en fragmentos funcional y anatómicamente coherentes». Es evidente que todavía no se ha escrito la última palabra sobre el tema, pero hay algo de lo que podemos estar seguros: por muy reveladoras que puedan resultar las técnicas de la resonancia magnética funcional, la tomografía de emisión de positrones y la localización magnetográfica, la tarea del mapeado de las diferentes tareas involucradas en el lenguaje en relación con las zonas del cerebro está resultando ser de una complejidad asombrosa.

En el cerebro se expresan muchos genes, tanto durante su desarrollo como en su mantenimiento a lo largo de la vida. El caso mismo de los genes relacionados con la microcefalia mencionado con anterioridad proporciona a los investigadores una buena herramienta para tratar de entender el tamaño del cerebro en los animales; afortunadamente para los estudios del lenguaje, existen varios genes candidatos también en esta área. Uno de los más prometedores es el FOXP2. La relación de este gen con las funciones del lenguaje y el habla se identificó por medio del estudio de una familia conocida como KE. La mitad de los miembros de esta familia presentaba un síndrome llamado dispraxia verbal, consistente en una disfunción de la coordinación en los movimientos del sistema productor del habla que da como resultado individuos con muchas dificultades para hablar. Tras una comprobación exhaustiva de toda una serie de parámetros y comportamientos del habla en esta familia, los investigadores llegaron a la conclusión de que la alteración producía el impacto mayor en las áreas de la repetición palabra/pseudopalabra y de la praxis orofacial (control volitivo de los movimientos faciales finos no verbales). Hay otros muchos rasgos que también muestran alteraciones, pero estos dos permitieron a los investigadores estudiar el trastorno de un modo inequívoco. Tal como señalaron Faraneh Vargha-Khadem, David Gadian, Andrew Copp y Mortimer Mishkin: «El déficit básico detectado en los miembros afectados de la familia es una disfunción o dispraxia motora orofacial de alto nivel cuyo mejor ejemplo es el habla, dado que el habla requiere una selección, coordinación y cadencia precisas de secuencias de movimientos orofaciales rápidos». Este síndrome presenta aspectos de alteración del habla muy similares a los de la afasia de Broca que ya hemos mencionado, si bien, mientras que el síndrome de la familia KE es específico tanto en lo que se refiere a la repetición palabra/pseudopalabra como a la praxis orofacial, la afasia de Broca afecta únicamente a la repetición palabra/pseudopalabra. En este punto hay que señalar que ambas afectan a aspectos del habla y de la producción del lenguaje muy localizados, por lo que estamos hablando de un segmento muy pequeño del fenómeno general del lenguaje. Y a pesar de que la identificación de los agentes individuales responsables de un trastorno es una forma excelente de comenzar

a entender una conducta en su conjunto, aun en el caso de que logremos descifrar el gen concreto para este defecto no habremos descubierto *el* gen de todo el proceso.

La familia KE fue sometida a análisis de ligamiento genético y se localizó el síndrome en el cromosoma 7, un cromosoma común y corriente de longitud media. En este punto se añadió al experimento CS, un individuo sin relación con la familia que presentaba los mismos síntomas del trastorno. Afortunadamente, CS tenía una traslocación cromosómica ya conocida por los médicos y posiblemente relacionada con el problema en el habla de CS. Esta traslocación presentaba un punto de ruptura (el punto del cromosoma donde se produjo la traslocación) que se podía localizar fácilmente por medio de las técnicas de clonación molecular, gracias a lo cual los investigadores descubrieron que el punto de ruptura se hallaba en un gen no identificado hasta entonces. Cuando lo analizaron en detalle por medio de la secuenciación del ADN, descubrieron que era muy similar a un gen de la *Drosophila* llamado *forkhead* que afecta al desarrollo del intestino de la mosca del vinagre.

Las proteínas *forkhead* poseen una secuencia específica de aminoácidos que les otorga un importante papel en la transcripción y regulación genética durante el desarrollo. De hecho, existen entre los mamíferos muchas proteínas con secuencias *forkhead*, y aquella que resultó tener el punto de ruptura en el genoma de CS se llama *forkhead* box P2 (FOXP2). Este gen codifica una proteína, de más de setecientos aminoácidos de longitud, que se une a los cromosomas cuyos genes regula. Cuando se volvió a examinar a la familia KE en busca de las secuencias genéticas del FOXP2, se observó un cambio extraño: la posición 553 está ocupada en los individuos normales por el aminoácido arginina, mientras que (sólo) en los miembros afectados de la familia KE esta arginina había sido sustituida por una histidina. La posición 553 en el FOXP2 es vital para la función de la proteína en la regulación de otros genes, y se encuentra próxima a la parte crítica de la proteína que se une a los cromosomas que regula. La ausencia de la arginina en esta posición implica que la unión no es tan fuerte o se realiza de manera incorrecta.

A continuación, los investigadores examinaron la neuroanatomía y función de los cerebros de la familia KE por medio de la resonancia magnética

nuclear y una técnica analítica llamada morfometría basada en Voxel. Estos estudios permitieron localizar las diferencias entre los individuos afectados y no afectados de la familia en una zona concreta de los ganglios basales conocida como el núcleo caudado, un área del cerebro constituida por un manojo de nervios fundamental, no sólo para la memoria sino también, en colaboración con el tálamo, para la comprensión del lenguaje. Además, los estudios estructurales descubrieron cantidades anormalmente bajas de materia gris en el área de Broca (y en otras zonas concretas del cerebro), mientras que eran más altas de lo normal en el área de Wernicke y en una estructura llamada putamen. Los estudios funcionales por resonancia magnética de los cerebros de los miembros de la familia KE que sufrían el trastorno muestran una actividad menor de lo habitual en la zona de Broca y el putamen, pero no en el núcleo caudado. Hay que señalar que estos mismos individuos presentaban simultáneamente una sobreactivación de las regiones del cerebro que no suelen asociarse con el lenguaje, lo que en opinión de los investigadores podría reflejar el esfuerzo adicional que estos individuos debían realizar para completar las tareas que se les habían encomendado durante las pruebas de resonancia.

Al combinar toda esta información, los investigadores se plantearon la posibilidad de que FOXP2 participara en la implantación de los circuitos neurales en determinadas zonas del cerebro. De hecho, cuando examinaron el lugar del feto en el que FOXP2 se expresaba, encontraron un solapamiento significativo de las regiones expresadas con las áreas anatómicas que acabamos de discutir. Cuando un electricista hace la instalación eléctrica de una casa, localiza los puntos donde hay que instalar apliques e interruptores, y a continuación encuentra las mejores vías para que la electricidad fluya de forma eficiente hasta estos puntos; Vargha-Kadem y sus colegas utilizaron el mismo enfoque con el cableado del cerebro en el sistema FOXP2. De acuerdo con su planteamiento, «cuando se combinan las pruebas sobre el fenotipo neural de la familia KE con el patrón de expresión neural de FOXP2, el circuito propuesto proporciona una posible explicación, no sólo del modo en que la mutación KE ha provocado la dispraxia orofacial y verbal de los miembros afectados, sino también del modo en que el gen normal del FOXP2

puede haber contribuido a la aparición del lenguaje hablado experto». Y esto, por supuesto, nos trae de vuelta a la evolución.

Se han estudiado varios vertebrados en busca de este gen, y los resultados se corresponden con lo que se podría esperar conociendo su importancia para el desarrollo de *Drosophila* (aunque allí sea en el intestino): el FOXP2 se encuentra en parientes lejanos como los pájaros, en parientes cercanos como los chimpancés y los gorilas, e incluso en los neandertales. Lo que sin embargo resulta sorprendente es que en los pájaros la proteína es casi idéntica a la humana, diferenciándose únicamente en ocho posiciones, y la curiosa similitud se extiende a otros ámbitos, ya que existe una extraordinaria semejanza entre los lugares donde el gen se expresa en los cerebros de mamíferos y en los de las aves cantoras. Anteriormente mencionamos que FOXP2 no es la única proteína que posee la secuencia *forkhead*: de hecho, existe otra proteína muy similar llamada FOXP1. En pájaros, la FOXP1, que se une a FOXP2, se expresa mucho más en machos que están aprendiendo a cantar que en las hembras, que no lo hacen.

La historia de los murciélagos y la FOXP2 resulta igualmente fascinante. Algunos murciélagos son capaces de ecolocalizar en un proceso rápido y sintonizado por medio de unos mecanismos parecidos al sónar: da la casualidad de que estos murciélagos presentan cambios en la misma región de la proteína FOXP2 que el *Homo sapiens*, región de la que carecen a su vez los murciélagos que no pueden ecolocalizar. Estos magníficos resultados conducen a dos conclusiones. En primer lugar, sugieren con fuerza una correlación de FOXP2 y FOXP1 con la producción del canto de las aves, y en segundo, hacen que parezca muy probable que, a algún nivel, FOXP2 tenga un papel importante en la producción del habla humana. Los resultados de los murciélagos son significativos con respecto a este último punto, porque tanto el proceso de ecolocalización como el del habla requieren una habilidades motoras muy bien sintonizadas; quizá el gen FOXP2 controla la modificación de estas habilidades para dar lugar, por un lado, a la ecolocalización en los murciélagos y al habla en los humanos, por otro.

Tanto en chimpancés como en gorilas, el número de cambios en las secuencias con respecto a los seres humanos es dos de media, y se producen

en unas posiciones (304 y 326) en las que sólo el *Homo sapiens* muestra desviaciones de las condiciones primitivas. Esto podría hacernos pensar que nos parecemos mucho a nuestros parientes vivos más cercanos, pero éstos a su vez se diferencian en una sola posición de los ratones, parientes muy lejanos. Resulta aún más notable que Svante Pääbo y sus colegas del Instituto Max Planck de Leipzig, al descifrar recientemente el genoma del *Homo neanderthalensis*, descubrieran que los neandertales son idénticos a los humanos, hasta el último residuo.

Esta sorprendente observación suele explicarse de la siguiente manera. FOXP2 está implicado en el desarrollo del habla. Los humanos difieren de los primates no humanos en dos posiciones de la proteína FOXP2. Por lo tanto, dado que las proteínas FOXP2 de los neandertales son idénticas a las del *Homo sapiens*, es probable que tanto los neandertales como el *Homo sapiens* poseyeran la capacidad del habla y, de acuerdo con los cálculos de los investigadores, la hubieran tenido desde hace aproximadamente medio millón de años. Todo esto se basa evidentemente en un marco temporal. Se calcula que los neandertales y el *Homo sapiens* divergieron hace aproximadamente medio millón de años (véase el capítulo 10). Esto significaría que los cambios en la FOXP2 que se encuentran hoy en día en el linaje del *Homo sapiens* surgieron antes de que se produjera la divergencia. Hasta aquí, todo bien. Pero la tesis según la cual ambos poseían capacidades para el habla no coincide con lo que podemos deducir razonablemente a partir de otras pruebas. Por lo tanto, dado que el genoma de los neandertales parece estarnos diciendo claramente que la proteína FOXP2 estaba presente en el ancestro común del *Homo sapiens* y del *Homo neanderthalensis*, sería más adecuado concluir que, a pesar de que FOXP2 podría ser necesaria para el desarrollo del lenguaje, no es suficiente. Es posible que los neandertales poseyeran una forma de comunicación vocal muy elaborada que requiriera la mutación FOXP2, pero aun así no era lo que podríamos reconocer como lenguaje.

FOXP2 es un gen muy estable en los vertebrados, y presenta una clara resistencia al cambio. Entonces ¿por qué se incorporó la mutación humana FOXP2 al linaje *Homo sapiens/neanderthalensis*? Después de todo, ningún primate sobre la faz de la Tierra presenta alteraciones en esas dos posiciones,

y el cambio podría potencialmente haber conllevado algún tipo de presión sobre la viabilidad del ancestro que adquirió los cambios. Sin embargo, no parece que este fuera el caso. Hay que recordar que, en aquel momento de la historia del género *Homo*, las poblaciones tenían un tamaño extremadamente pequeño, lo cual favorece las probabilidades de que se fijen las características más absurdas y menos útiles. Por lo tanto, si la alteración FOXP2 en el ancestro común del *Homo sapiens* y del *Homo neanderthalensis* hubiera resultado sólo ligeramente ventajosa para alguna función distinta del habla que todavía no hemos descubierto, podría haberse conservado en las poblaciones de ambas especies por razones no relacionadas con el habla. O quizá se mantuvo simplemente porque no presentaba desventajas. En cualquier caso, aunque resulta evidente que la variante humana de FOXP2 es un garante importante de nuestra capacidad para el habla, su presencia en los neandertales sugiere que probablemente no fue responsable de la etapa final de perfeccionamiento de nuestros sistemas vocales periféricos.

Con respecto al lenguaje y los patrones de conducta modernos, se ha barajado también la posibilidad de que, hace aproximadamente cincuenta mil años, otro gen o conjunto de genes se modificara y permitiera el gran salto cognitivo hacia delante del que tan orgullosos estamos. Este tipo de propuestas son útiles si conllevan hipótesis realmente concretas y comprobables (siempre, evidentemente, que aquellos que las proponen estén dispuestos a descartarlas en caso necesario). Pero tal como señalamos en el capítulo 1, suele ser problemático equiparar un gen a un comportamiento, aunque esto no haya impedido a muchos investigadores hacerlo.

#### TIRAR LA RED PARA PESCAR UN ÁRBOL DE IDIOMAS

Tenemos la certeza de que, una vez que nuestra especie encontró el lenguaje, la capacidad de comunicarse eficientemente que éste le otorgó se convirtió en el catalizador de otros muchos cambios cognitivos fundamentales. Y resulta igualmente evidente que dicha adquisición fue muy reciente en la escala evolutiva, si bien a juzgar por la inmensa variedad de idiomas y familias

idiomáticas que existen hoy en día, una vez que el lenguaje arraigó, su diversificación fue amplia y rápida, un proceso probablemente magnificado por el aislamiento y el tamaño de las poblaciones del *Homo sapiens* presentes durante el primer 95 % de la existencia de nuestra especie. La revista *Ethnologue*, una publicación del Instituto Summer de Lingüística, registra casi siete mil idiomas hablados hoy en día en el planeta, y este gran número palidece en comparación con los que se cree se han extinguido ya. Sin duda, las condiciones actuales están acelerando el proceso de extinción: se estima que, para el año 2050, el 90 % de los idiomas actualmente existentes habrá desaparecido. Incluso ahora, se cree que hay 500 idiomas, hablados por 10 personas o menos, que evidentemente se encuentran al borde de la extinción. La situación es tan grave que el Instituto de Lenguas Vivas para los Idiomas en Peligro ha señalado cinco regiones del mundo como «zonas calientes» de pérdida lingüística: el norte de Australia, el noroeste y el suroeste de EE.UU., la cuenca amazónica y el extremo nororiental de Asia.

El inmenso número de idiomas que se habla en el mundo es un tributo a la importancia del lenguaje en el éxito del *Homo sapiens*, y por medio del estudio de las relaciones entre idiomas se puede aprender mucho sobre la historia de cómo esta importante innovación influyó, y sigue influyendo, en el éxito de nuestra especie. Uno de los problemas a los que nos enfrentamos cuando se reconstruyen las historias de los organismos –y en este caso de los idiomas– es que, si la evolución del fenómeno que se observa es demasiado rápida, la probabilidad de que aparezcan convergencias aumenta exponencialmente. Dichas convergencias se evitan por medio de una estrategia consistente en seleccionar la información, aunque evidentemente este no es un sistema óptimo. Como alternativa, se puede construir un modelo que permita «filtrar» la convergencia y, con ello, la información capaz de alterar los resultados.

Para facilitar el estudio de los idiomas del mundo se creó el Atlas Mundial de las Estructuras Lingüísticas (WALS, por sus siglas en inglés), que contiene información sobre casi tres mil idiomas y 141 características lingüísticas. Al reconstruir la historia de los idiomas, se suele utilizar dos tipos principales de información. La primera categoría de atributos se llama «léxica» y supone la

comparación de palabras y sus definiciones en los distintos idiomas; la segunda se llama «tipológica» y en ella se incluyen características estructurales como por ejemplo la complejidad de las oraciones, la fonología y la sintaxis nominal. S. J. Greenhill, un experto en idiomas, y varios de sus colegas tomaron estos datos y crearon un árbol filogenético muy similar a los árboles biológicos que discutimos en el capítulo 1. Su esperanza residía en encontrar categorías de características lingüísticas que pudieran estar cambiando con mucha lentitud, porque ello les permitiría reconstruir la historia primitiva de los idiomas, que se había perdido en la cacofonía del cambio. El análisis de estos autores representa uno de los intentos más completos por determinar las relaciones entre los idiomas y, lo que es más importante, por calcular a cuándo se remonta la «madre de todos los idiomas».

El árbol que Greenhill y sus colegas elaboraron es muy coherente con respecto a muchos estudios previos, al unir idiomas cuya vinculación se sospechaba desde hace tiempo, como por ejemplo el grupo de idiomas indoeuropeos, entre los que se incluye el inglés, el alemán, el francés, el ruso, el lituano, el griego y el español. Y su descubrimiento más destacado, que también se hace eco de otros estudios, es que en realidad un árbol no es la mejor manera de describir las relaciones entre los idiomas. De hecho, algunos grupos de idiomas se agrupan muy bien, pero en la base del «árbol» se ha producido un intercambio tan intenso de fragmentos de todo tipo que es preferible describirlo como una «red». Tal como sugieren estos autores: «Nuestros resultados demuestran que los datos tipológicos presentan un marcado carácter “no arbóreo” y no se ajustan bien a las “relaciones” conocidas entre idiomas dentro de las familias de los idiomas austronesios e indoeuropeos».

Tal como se ha indicado, Greenhill y sus colegas trataron de diferenciar entre aquellas características del lenguaje que hubieran experimentado cambios rápidos y aquellas otras que hubieran cambiado lentamente en distintas partes del mundo, y sus hallazgos a este respecto son también interesantes. En primer lugar, no encontraron ninguna diferencia entre las tasas de las características léxicas y las de las tipológicas, aunque las primeras son mucho más variables. Pero cuando examinaron varias categorías de

características tipológicas, surgieron algunas diferencias muy claras en diversas partes del mundo. Por ejemplo, la complejidad de las oraciones, una característica tipológica, no mostraba diferencias en la tasa de cambio cuando se comparaban lenguas austronesias e indoeuropeas, pero sí se encontró una tasa de cambio significativamente más alta en la sintaxis nominal (otro conjunto de características tipológicas) de las lenguas austronesias. Estos resultados indican que no hay ninguna categoría tipológica lingüística que evolucione más lentamente que la categoría léxica, por lo que al final Greenhill y sus colegas llegaron a la conclusión de que su trabajo simplemente «subraya lo poco que sabemos sobre la forma y el ritmo del cambio lingüístico».

Aunque estos resultados nos dejan un problema que no se resolverá sin un trabajo exhaustivo sobre los modelos de cambio de los idiomas, cuanto más profundo sea nuestro conocimiento del comportamiento de las características lingüísticas, mejor comprenderemos qué modelos podemos usar. Esto es importante, ya que el conocer dónde y cuándo se originaron los idiomas de nuestra especie constituye un paso fundamental en la comprensión de nuestra humanidad; por tanto, es posible que merezca la pena esperar para no equivocarnos.

#### TODO EL MUNDO ME HABLA (HARRY NILSON)

Los organismos han desarrollado miles de maneras de comunicarse entre ellos. Ya hemos estudiado en profundidad el modo en que los organismos unicelulares se comunican a nivel celular y molecular, pero los animales lo hacen de un modo bastante más complejo y han desarrollado una gran variedad de sistemas que utilizan estrategias olfativas, táctiles y visuales, además de auditivas. Los medios visuales de comunicación se basan en la coloración o los movimientos estereotipados de una especie; se conocen muy bien los cambios en la coloración de algunos peces, como por ejemplo los cíclidos africanos, grupo a partir del cual se han formado varios cientos de especies en tres de los lagos más grandes de África oriental (Victoria, Tanganica y

Malawi) en un periodo de tiempo muy corto (desde hace dos millones de años en el más antiguo de la cadena hasta hace 130.000 años en el lago más joven). Al existir tantas especies, es importante que cada individuo sea capaz de comunicarse con los miembros de la suya, tanto para aparearse como para alejar a pretendientes no deseados de otras especies. Las capacidades visuales de estos peces también se han desarrollado para permitir a los peces distinguir lo que es comida de lo que les comerá (o lo intentará).

Los peces, por supuesto, viven en el agua, y aunque en este medio se pueden utilizar los sonidos para comunicarse, los cíclidos parecen preferir las imágenes. Los cíclidos de África oriental presentan una increíble colección de patrones de coloración para comunicar su pertenencia a la especie y para proporcionar información depredador-presa al espectador. La gama de colores que estos peces pueden ver recorre el espectro de la luz visible y la ultravioleta, y parece ser que, para aumentar su «vocabulario» (utilizado aquí como metáfora), han desarrollado un elaborado surtido de genes para las opsinas, los genes que fabrican las proteínas que permiten a los conos y bastones de los ojos detectar el color.

Algunas especies animales, entre ellas los peces, reptiles, crustáceos y cefalópodos, pueden cambiar su color y la polaridad de la luz por medio de los cromatóforos, unos órganos insertados en su piel. Existe una gama muy amplia de cromatóforos para alterar la coloración, lo que permite a estas especies emplear un «vocabulario» visual aún más amplio. En la mayor parte de los organismos, los cambios de color están controlados y desencadenados por las hormonas cuando se envían a la piel; los cromatóforos de los cefalópodos se encuentran en la capa exterior de la piel, pero algunos animales (sobre todo cefalópodos) pueden utilizar otros órganos (iridóforos y leucóforos) situados en la piel por debajo de la capa exterior de los cromatóforos para reflejar la luz o producir luz polarizada. Y no hay que olvidar que el sistema de cromatóforos está conectado al sistema nervioso central, lo que permite un control más rápido y preciso del proceso de cambio de color.

Los cefalópodos utilizan esta habilidad para protegerse de sus depredadores mimetizándose con el fondo. Y por si esto no fuera suficiente,

algunos, como la sepia, pueden llegar a cambiar la textura de su piel, aumentando aún más su «vocabulario» potencial. Todo esto es impresionante, y da muy bien en televisión, pero los investigadores han sugerido que los cefalópodos, más allá del camuflaje y el habitual cortejo sexual de las especies, utilizan este mecanismo de cambio de color para comunicarse entre ellos. Al examinar la posibilidad de que los cambios de coloración puedan representar una comunicación más específica, Roger Hanlon y sus colegas del Instituto Oceanográfico de Woods Hole han observado que los cefalópodos no sólo producen luz polarizada, sino que también responden a ella. Hanlon no se ha apresurado a sacar conclusiones, y a pesar de que tanto a él como a sus colegas les intriga la posibilidad de que estos cambios de color y estas polarizaciones de luz constituyan una forma de comunicación, señalan que la evidencia es circunstancial. Como resultado de todo ello, han redactado un conjunto de criterios muy útiles que se deben satisfacer cuando se vaya más allá de la deducción circunstancial. Para poder admitir la comunicación hay que observar varias cosas: «1) la producción de una señal por parte de un emisor, 2) la recepción de esta señal por un receptor y 3) un cambio en el comportamiento del receptor beneficioso tanto para el emisor como para el receptor». Estas reglas constituyen una guía excelente para decidir si una especie se está de verdad comunicando o no.

Prácticamente todo el mundo conoce varios ejemplos de formas más avanzadas de comunicación indiscutible entre animales no humanos de las que se podría decir que bordean el lenguaje. Para los investigadores, por ejemplo, el ladrido de los perros de la pradera es una forma de lenguaje, las llamadas de alarma de los cercopitecos verdes un ejemplo de vocabulario, los cantos de ballena tienen sintaxis y el complejo parloteo de los delfines es un lenguaje propiamente dicho; existe incluso una reunión anual de científicos, EVOLANG, que se juntan para discutir este tema. Pero hasta los defensores de la idea de que el lenguaje existe en especies no humanas reconocen que en este campo hay muchas más hipótesis que comprobación de las mismas.

La investigación se ha centrado en los pájaros por sus excepcionales dotes para la comunicación, y de hecho son quizá el único grupo de organismos en los que la experimentación con el lenguaje es la norma, y no la excepción. El

proceso de aprendizaje de una canción en las aves cantoras jóvenes ha resultado ser muy similar a aquel a través del cual los seres humanos aprenden el lenguaje: un macho adulto da clases al pájaro joven que está aprendiendo. En los pinzones cebra este aprendizaje presenta dos fases: la primera es la memorización, mientras que la segunda consiste en una «imitación» en la que el pájaro joven trata de hacer coincidir su producción vocal con la canción memorizada que utiliza como patrón. El patrón es bastante rígido, y los pájaros parecen poseer una facilidad innata para hacerse con él. Este proceso resulta bastante similar a una de las dos teorías que los lingüistas utilizan para explicar la adquisición del lenguaje en los humanos. Dicha teoría deriva del trabajo de Noam Chomsky, para el que todos los idiomas comparten un núcleo gramatical, o patrón, que a su vez refleja una disposición innata en los humanos hacia el lenguaje. La segunda teoría afirma en cambio que, aunque existen similitudes en la gramática de los idiomas humanos, se ven ampliamente superadas por las diferencias. Esta forma de pensar sobre el lenguaje se limita a proponer que, debido a la gran diversidad en el funcionamiento de los idiomas, no existe en los seres humanos una disposición innata única hacia el lenguaje condicionada previamente: más bien, en palabras del científico Johan Bolhuis, «la capacidad general de aprendizaje del cerebro humano basta para explicar el aprendizaje del lenguaje».

A pesar de ello, las similitudes son asombrosas. Por ejemplo, el parloteo de los bebés está considerado un elemento crítico del aprendizaje del idioma: los niños sordos parlotean con sus manos antes de aprender el lenguaje de los signos. Algunas aves cantoras trinan o emiten subcanciones, lo que ciertos investigadores consideran una forma de parloteo, y además existen otras fases del aprendizaje del idioma en los seres humanos que parecen corresponder a las de las aves cantoras, que siguen un camino paralelo al de los seres humanos hacia la adquisición completa del lenguaje. Bolhuis y sus colegas han examinado estas similitudes y señalan que «el desarrollo del lenguaje y el aprendizaje de las aves cantoras presentan paralelismos a nivel conductual, neural y genético». Se ha estudiado en profundidad la estructura de las redes de conexiones sinápticas en las regiones corticales y en los ganglios basales, cruciales para el proceso en los seres humanos, y al parecer existen en las

aves cantoras redes neuronales de estructura similar.

Sin embargo, estas redes parecen de hecho estar ausentes en especies que se consideran más elementales en la filogenia de las aves, lo que implica que éstas divergieron antes de los tipos comunes ancestrales de aves en términos evolutivos que las aves cantoras, más derivadas. Por lo tanto, las conexiones neuronales de mayor complejidad de los cerebros de las aves cantoras y los loros debieron desarrollarse de forma convergente con las nuestras. Si las conexiones neuronales fueran realmente el elemento que nos demuestra la presencia del lenguaje, entonces el «cableado común» que comparten los cerebros humanos y los de las aves sugeriría que los pájaros poseen una forma de «lenguaje». Pero, sea lo que sea, no es homólogo con el lenguaje humano.

Cuando se trata de parientes más cercanos, como el bonobo o el chimpancé, se puede afirmar con mayor justicia que lo que vemos son sistemas de comunicación con, por lo menos, alguno de los elementos homólogos a los que subyacen a nuestra compleja comunicación vocal (que por supuesto también incluye componentes visuales, como los gestos y el lenguaje corporal). Pero existe una diferencia fundamental en la manera en que los simios tratan los símbolos auditivos y visuales y nuestra forma de procesarlos. Algunos simios han aprendido a reconocer un volumen considerable de palabras habladas (aunque el récord no humano pertenece de hecho a un perro pastor) y a responder a ellas, o bien ejecutando órdenes verbales o bien tocando los símbolos visuales correspondientes en la pantalla de un ordenador. Pero el uso de estos símbolos por parte de los simios está inherentemente limitado y no pueden utilizarlos para generar afirmaciones estructuradas sobre el mundo tal como hacemos nosotros.

Por lo tanto, la conclusión que se alcanza es que, a pesar de que las capacidades cognitivas de los simios son impresionantes (y, de hecho, las conductas espontáneas complejas que se observan en la naturaleza, como el uso de piedras para partir nueces de palma sobre «yunques», la «pesca» de termitas con ramas a las que se les han arrancado las hojas o las «lanzas» de los lemures con ramas afiladas, son para nosotros pruebas tan demostrativas de la complejidad cognitiva como cualquier respuesta a una situación que se plantee en un laboratorio), los simios sencillamente no procesan la

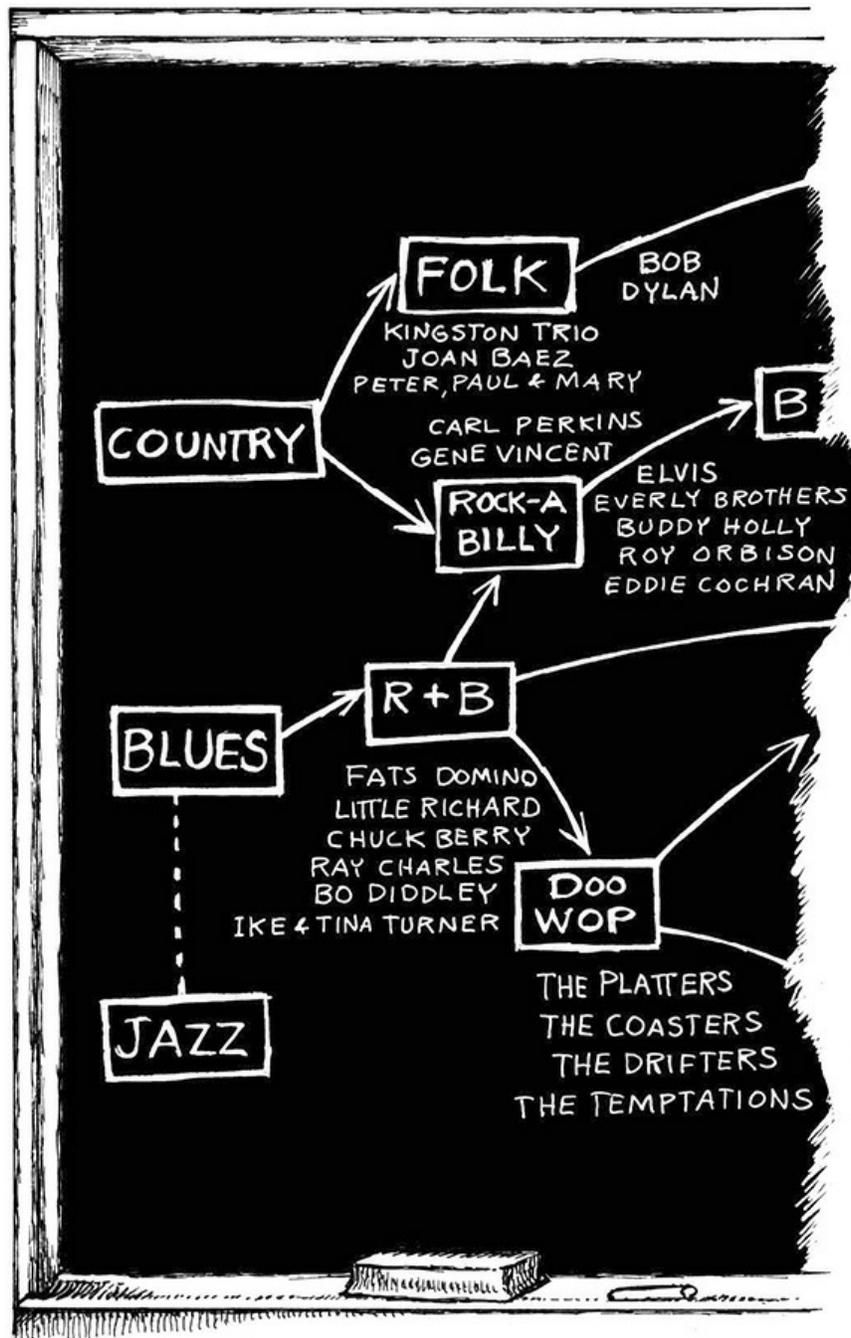
información en sus cerebros de la misma forma metódica que nosotros. Aunque probablemente los bonobos nos estén proporcionando un atisbo indirecto de una «fase» cognitiva por la que nuestros ancestros remotos pudieron haber pasado, lo que observamos en ellos es como mucho un eco de los cimientos en los que se apoya nuestra peculiar forma de conciencia.

Por ello, y para resumir, la importancia de la observación de los presuntos «lenguajes» de otras especies reside en el contexto más amplio que proporciona, dentro del cual necesitamos comprender cómo surgió nuestra conciencia, y es en este contexto donde debemos ser especialmente cuidadosos para evitar mezclar las metáforas con la historia. La solución más probable a la incógnita planteada por el vasto número de observaciones sobre la cognición y el «lenguaje» no humano probablemente no será una solución única, sino más bien un ramillete de informaciones fragmentarias que aclararán nuestro proceso de adquisición del lenguaje y nuestro estilo cognitivo único. En el camino, sin duda, descubriremos lo poco que sabemos ahora mismo y, con suerte, llegaremos a comprender lo mucho que necesitamos descubrir.

#### ANCESTROS CANTORES Y LA ESCUELA DEL ROCK

En *Escuela de rock*, una película del año 2004, Jack Black interpreta el papel de un músico de rock sin dinero que se hace pasar por profesor de música de primaria para llegar a fin de mes. Su personaje, un impostor, enseña a los niños del colegio, entre otras cosas, la historia del rock and roll, para lo que utiliza un diagrama de árbol en el que se detalla su evolución desde el jazz hasta la música de la década de los ochenta (al parecer, para el señor Black la música dejó de evolucionar con los Dead Kennedys y los Meat Puppets). Otra lección de historia de la música popular es la que proporciona la *Evolución del baile*, un vídeo de YouTube del cómico Jason Laipply que ha sido visto aproximadamente doscientos millones de veces en internet. Laipply comienza su narración bailada incluso después del jazz, con el balanceo de caderas de Elvis, y culmina la evolución con 'N Sync. Pero, mientras el diagrama de

Black tiene forma de árbol, la presentación de Laipply, a pesar de ser muy entretenida, es definitivamente *scala naturae* en su peor manifestación, y en ambos casos los cómicos entran en escena muy tarde: de hecho, la música se remonta mucho más atrás de lo que ninguno de los dos cree, mucho más que a Elvis Presley o Lionel Hampton, por duro que resulte aceptar esto para alguien que ama el rock and roll (nuestras disculpas por supuesto a Mozart, Beethoven, Puccini, Stravinsky, Copland o, ya que estamos, a los compositores del canto gregoriano).



La evolución del rock and roll en *Escuela de rock*

No se puede poner en duda que la música tal como la conocemos es una invención de nuestra especie. Los primeros instrumentos musicales a los que es posible dar con certeza este nombre tienen aproximadamente treinta y cinco mil años. Existen algunos artefactos controvertidos procedentes de

yacimientos neandertales, pero hasta la fecha no se ha encontrado ninguno que se pueda identificar con seguridad como instrumento musical procedente de ningún yacimiento de más de treinta y cinco mil años, y todos ellos están asociados al *Homo sapiens*. No obstante, algunos creen que los neandertales podrían haber tenido habilidades musicales (véase *Los neandertales cantaban rap*, de Steven Mithen), pero esta es una historia que está a la espera de investigaciones ulteriores. Por ahora podemos tener la práctica certeza de que la música fue un producto del tipo de cerebro que sólo el *Homo sapiens* posee.

El modo en que nuestro cerebro procesa la música es tan complejo como en el caso del lenguaje, otra sensación auditiva: después de todo, la puerta de entrada de la música es el oído, la misma que utiliza el habla. En la exposición del AMNH *El cerebro: la historia desde dentro*, los diseñadores quisieron demostrar la unicidad de nuestro cerebro para la música y eligieron para ello las imágenes de resonancia magnética funcional de la cocomisaria de la exposición, Joy Hirsch. Joy es una neurobióloga de la Universidad de Columbia y dirige el Programa de Imagen y Ciencias Cognitivas, un centro de la Facultad de Medicina dedicado a la imagen del cerebro. Ella y sus estudiantes escanearon el cerebro de Yo-Yo Ma, el famoso chelista, y el de un músico venezolano de jazz funk o ácido, Cheo (José Luis Pardo), del grupo Los Amigos Invisibles, mientras veían y escuchaban películas de sí mismos tocando. Y las imágenes que se obtuvieron en ambos casos son muy interesantes. Al contemplarlas, se ve cómo grandes franjas de rojo y amarillo bañan las partes activas de sus cerebros estimuladas al verse a sí mismos. No resulta sorprendente que las áreas del cerebro donde se procesa el sonido resplandezcan rojas y amarillas, pero lo que sí resulta extraño es que, mientras se escuchan y se ven, también se desatan sus zonas motoras. Para algunos científicos, esta respuesta puede ser el resultado de la activación de las neuronas espejo.

Los primeros en descubrir las neuronas espejo en monos fueron Giacomo Rizzolatti, Leonardo Fogassi y Vittorio Gallese. Estos investigadores estaban amaestrando a monos para que cogieran plátanos y otros objetos mientras ellos medían las señales procedentes de una única neurona, y así describir el papel

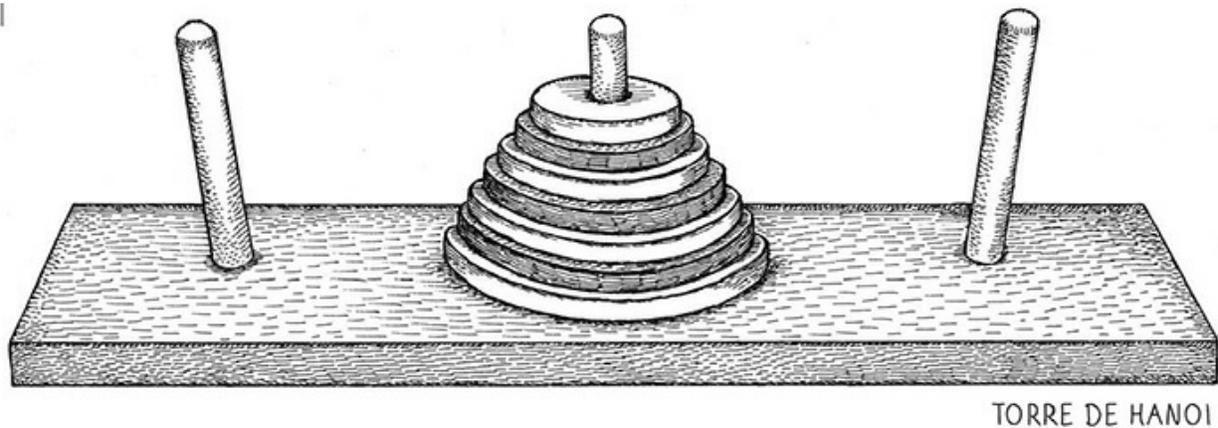
que jugaba en el movimiento muscular. Tras mucho entrenamiento, y la obtención de datos que les permitieron afirmar con seguridad que las neuronas sobre las que estaban trabajando controlaban el movimiento, uno de los investigadores alargó por casualidad la mano para coger un plátano mientras se analizaba la neurona, al tiempo que un mono lo miraba. Y la neurona que se estaba estudiando se disparó, demostrando que la neurona del movimiento del mono que observaba se había activado sencillamente como resultado de ver a otra persona cogiendo un plátano.

Ahora se han descubierto ya neuronas espejo en muchos organismos, y no supuso una gran sorpresa que los cerebros de Ma y Cheo se encendieran en esas áreas como si estuvieran realmente tocando los instrumentos. Pero cuando se escanearon áreas más profundas de los cerebros de ambos músicos, empezó a resultar evidente que existía una diferencia muy importante: mientras se escuchaba tocar, el cerebro de Cheo se encendía en las zonas responsables de la imagen de uno mismo, y existía una altísima actividad en aquellas responsables de la creatividad; en cambio, en el caso de Ma el cerebro se encendía en tantos lugares que resultaba difícil discriminar qué partes del cerebro eran más importantes. Y aunque tenemos la certeza de que el cerebro de Cheo se estaba esforzando mucho, Hirsch dijo del cerebro de Yo-Yo Ma que era el «cerebro más hermoso» que había visto en su vida, debido precisamente a la complejidad de las áreas que se encendían. Lo que más impresionó a Hirsch fue la riqueza de los circuitos neuronales que conectaban todas las áreas musicalmente activas en el cerebro de Ma.

Pero ¿qué tiene la música para que le resulte tan atractiva a nuestros cerebros? Una parte de la respuesta se encuentra en la solución del problema del lenguaje y la música: ¿qué fue primero, el huevo o la gallina? Algunos de los científicos que trabajan en este tema consideran que es fundamental saber si fue primero la música o el lenguaje, y como en muchas de las otras cuestiones que hemos tratado con respecto a las llamadas habilidades cognitivas superiores, no existe unanimidad en la respuesta. El científico cognitivo Steven Pinker cree que la música simplemente no fue, y no es, tan importante para la supervivencia, y la llama la «tarta de queso evolutiva», es decir, que es agradable y dulce como la tarta, pero no formaba parte de la

dieta que nuestros antepasados necesitaban para sobrevivir. Esta idea implica que la música apareció *después* que el lenguaje: el lenguaje en esta dieta sería el equivalente al azúcar y las proteínas, mientras que la música es la tarta de queso que surgió más tarde como resultado del placer que nos proporcionaban el azúcar y las proteínas. Otros científicos, como por ejemplo Daniel Levitin, discrepan. Para él, la música es un agente importante de la selección sexual en las poblaciones humanas. Quizá la confirmación de que la música es un factor de adaptación en algún sentido pueda ayudarnos a resolver esta pregunta, pero también es posible que no sea la pregunta adecuada. De hecho, es más probable que tanto la música como el lenguaje sean productos emergentes de una capacidad más generalizada subyacente del cerebro, en la que se basan ambos. Esta capacidad se discutirá en profundidad en el capítulo 10.

## Decisiones, conductas y creencias



El conocimiento del mecanismo por el que los procesos físicos del cerebro dan lugar a decisiones, el saber cómo y por qué experimentamos la espiritualidad y las depresiones, y la explicación de fenómenos extraños como las alucinaciones son aspectos importantes de la comprensión de la evolución de nuestro cerebro. La neuroeconomía es un camino que nos puede ayudar a la hora de aclarar estas cuestiones. Con este enfoque, y examinando situaciones en las que resulta relativamente sencillo medir las ventajas y las desventajas, es posible que encontremos a largo plazo una vía para empezar a entender la base neuronal de otras decisiones más personales en las que los parámetros no están tan claros. Por ahora, no obstante, sólo poseemos un conocimiento superficial de cómo nuestro cerebro traduce todos estos estímulos en lo que conscientemente (o, de hecho, inconscientemente) experimentamos como el funcionamiento de nuestro cerebro. Hemos avanzado mucho en el proceso de ensamblaje de todas las piezas, pero todavía tenemos que desentrañar

exactamente cómo funcionan en conjunto; en otras palabras: cómo el cerebro se transforma en mente sigue siendo un misterio. Así que echemos un vistazo a algunas de esas funciones cognitivas superiores para comprobar dónde nos puede llevar la neuroeconomía.

CUANDO LLEGUES A LA BIFURCACIÓN...  
TÓMALA (YOGI BERRA)

Tal como explicamos en el capítulo 5, tomamos muchas decisiones sobre nuestras vidas con el sistema límbico del cerebro. Esto se debe a que nuestros cerebros evolucionaron para tratar la información que reciben de la forma más eficiente y rápida posible. Tal vez nuestros cerebros no estén optimizados para realizar una tarea específica, como las máquinas, pero aun así funcionan bajo las mismas restricciones que han controlado la evolución cerebral en otros organismos. Las similitudes convergentes que se pueden observar entre nuestras áreas cerebrales y sus circuitos, y los de sus equivalentes en algunas formas muy remotamente relacionadas, debería ser prueba suficiente de la influencia que han tenido estas restricciones.

¿Cómo tomamos decisiones que no necesitan soluciones rápidas? ¿Y qué ocurre cuando nos enfrentamos a informaciones conflictivas? En la exposición *El cerebro* en el AMNH, abordamos dos aspectos del procesamiento de la información procedente del mundo exterior que nuestra corteza prefrontal ha logrado apropiarse.

El primero se refiere a las informaciones conflictivas. El test de Stroop se centra en el hecho de que en ocasiones tenemos que procesar conjuntos conflictivos de información. Consiste en dos columnas de palabras que describen colores; las mismas palabras son de distintos colores, y en la columna izquierda el color de las letras que forman las palabras coincide con el de su significado, mientras que en la derecha no. Por ejemplo, en la columna izquierda la palabra «rojo» está escrita en rojo y la palabra «amarillo» en amarillo, pero en la derecha la palabra «rojo» puede estar escrita en azul y «amarillo» en verde. Al sujeto del test se le pide que grite el color de las

palabras de la columna izquierda (no lo que dice la palabra, sino su color). Por lo general, esta parte del test se hace rápidamente y sin cometer errores, pero en la lista de la derecha la velocidad se reduce: se tarda casi el doble en recorrerla, y aun así se cometen errores. Como se explica en la exposición:

Tu cerebro se ve inundado todos los días por sensaciones, pensamientos y recuerdos que compiten por tu atención. Para poder manejarnos en el mundo, necesitamos ignorar algunas cosas y centrarnos sólo en unas pocas. El test de Stroop que presentamos aquí comprueba tu habilidad para hacer exactamente eso. El proceso que sigue tu cerebro se describe a continuación:

Paso 1: leer la palabra. Las regiones del cerebro dedicadas a la visión y la comprensión del lenguaje (el área de Wernicke) te ayudan a leer la palabra.

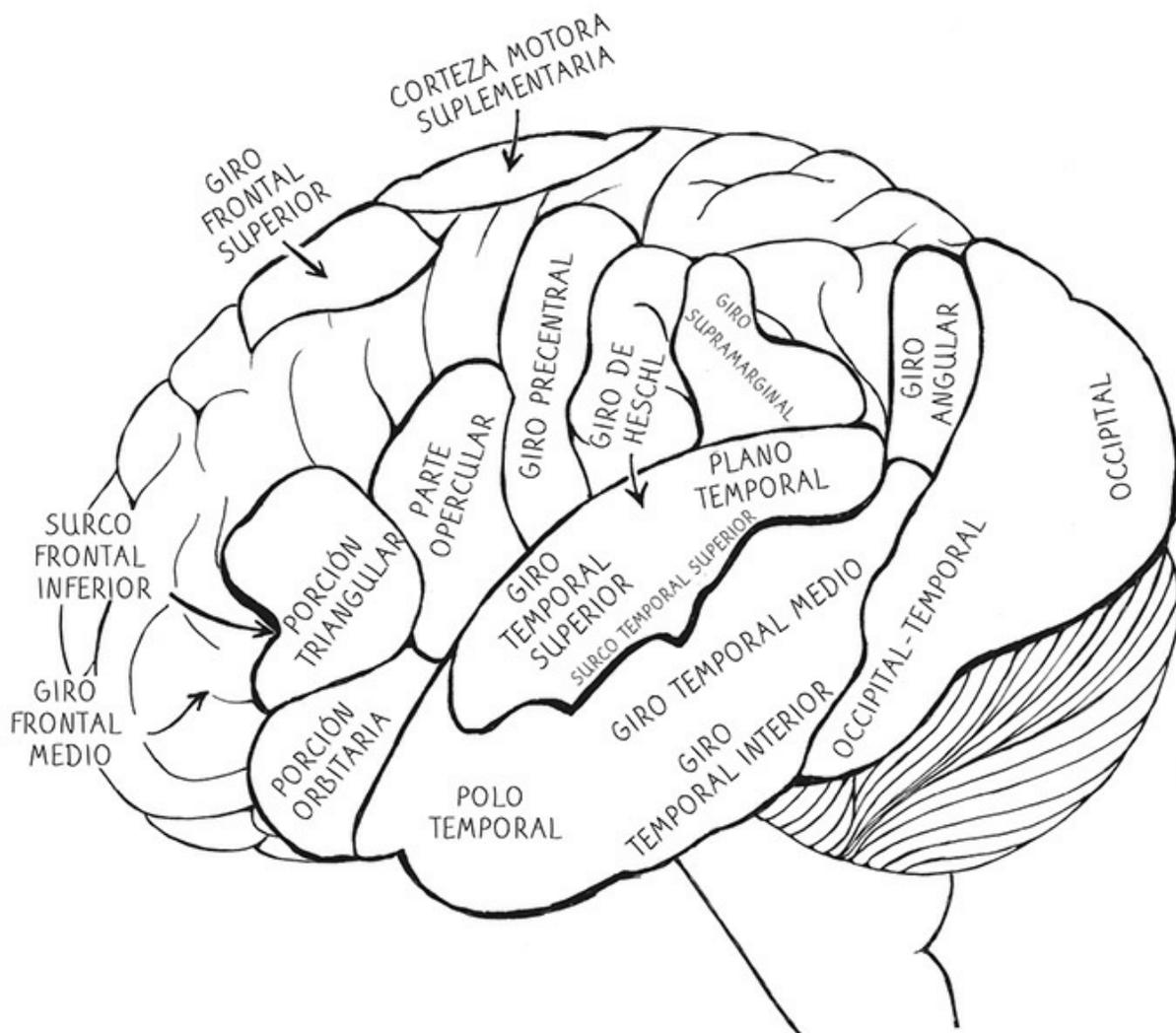
Paso 2: nombrar el color. Las regiones del cerebro que se utilizan para la visión y la producción del lenguaje (el área de Broca) te permiten reconocer y nombrar el color de las letras.

Paso 3: detectar el conflicto. El córtex cingulado detecta el conflicto entre la palabra y el color y transmite el mensaje a la parte anterior del cerebro.

Paso 4: controlar tu atención para centrarte en la tarea que te ocupa. Grupos de neuronas de la corteza prefrontal te ayudan a centrar tu atención únicamente en el color.

Cuando resistes el impulso de leer las palabras, se utilizan los centros ejecutivos de la parte anterior del cerebro, junto con una zona más profunda del córtex que te avisa de que debes mantener el control.

Por lo tanto, es nuestra corteza prefrontal la que nos ayuda a reducir un poco la velocidad y a corregir la información.



Regiones del cerebro involucradas en la toma de decisiones

Otro aspecto en el que nuestra corteza prefrontal nos ayuda a la hora de tomar decisiones es la planificación a largo plazo. Una vez más, podemos utilizar la exposición *El cerebro* para explicarlo. El objeto interactivo que se utiliza en esta ocasión se llama la torre de Hanoi y consiste en un conjunto de tres palos con discos en el palo de la izquierda. El de abajo es el disco más grande, el del centro el mediano y el de arriba el más pequeño, y el juego consiste en mover los tres discos desde el palo de la izquierda hasta el de la derecha, dejando los discos en el mismo orden que al principio y con el mínimo número de movimientos posible. Según las reglas, no se puede mover más de un disco a la vez y no se puede colocar un disco más grande encima de

uno más pequeño. Con tres discos sólo hay una manera de hacerlo en el número mínimo de pasos, siete. Podemos garantizar que, si no se planifica cada movimiento con antelación, no se logra hacer en el número mínimo, e incluso así, a veces no se consigue. Los responsables de la exposición explican este procedimiento de planificación como sigue:

Cuando se planifican los movimientos del juego de la torre de Hanoi, se activan las neuronas en la zona frontal del cerebro. Éstas asimilan ráfagas de señales del resto del cerebro, te ayudan a estudiar tus opciones y a elegir el mejor camino, y a continuación transmiten el plan a las áreas motoras del cerebro para que se produzca la acción. Las principales áreas del cerebro que participan son las siguientes:

Paso 1: pensamiento espacial. Las áreas de procesamiento visual y espacial te ayudan a ver las piezas del juego y su relación espacial, así como a imaginar los movimientos. Estos pensamientos se producen en la corteza visual y parietal.

Paso 2: pensamiento lógico. Las áreas planificadoras ayudan a coordinar la información procedente de otras zonas del cerebro, a utilizar la memoria a corto plazo para seguir el curso de tus pensamientos, y a calcular los pros y los contras de los posibles movimientos. Están situadas en la corteza prefrontal.

Paso 3: control del movimiento. Las áreas motoras preparan los músculos de tus dedos y manos para mover los discos. Están situadas en la corteza motora y premotora del cerebro.

¡Muy bien, tipo listo! Lo has logrado con tres discos: ¿y si ponemos cuatro? El número mínimo de pasos para cuatro discos es 15, y el problema de la planificación se complica cada vez más a medida que se añaden discos al juego. La planificación por adelantado ayuda mucho, y es un rasgo que los seres humanos han perfeccionado bastante (por lo menos, algunos adultos).

La toma de decisiones ha supuesto un aspecto importante de nuestro éxito como especie. Tomamos todos los días muchas decisiones, incluidas las que se producen cada vez que sacamos dinero del bolsillo. La neuroeconomía nos permite ilustrar esto. Hay una serie de elementos determinados que son

necesarios para que un sistema económico funcione. En una charla reciente en el AMNH, uno de los fundadores de este campo, el neuroeconomista Paul Glimcher de la Universidad de Nueva York, explicó que las elecciones económicas pueden ser racionales o irracionales. A continuación nos propuso un juego en el que asumí el papel de consumidor en un sistema racional; en este sistema, él prefería las manzanas a las peras, las peras a los plátanos, y las manzanas a los plátanos, lo que se puede representar como  $M > P$ ,  $P > PL$  y  $M > PL$ . El objetivo de este juego es comenzar con una fruta que no nos gusta y acabar con la fruta que nos gusta más; cada vez que tienes una fruta, la cambias por otra que prefieres, previo pago de un dólar. Como vendedores, podíamos ofrecerle a Glimcher un intercambio en el que él comenzaba con una pera que quería cambiar por una manzana, lo que le costaba un dólar. Al finalizar la transacción, todos estábamos contentos: nosotros habíamos ganado un dólar y un plátano que podíamos vender más tarde, mientras que él conseguía su manzana por un solo dólar. Incluso si se confundía e intercambiaba la fruta dos veces, no le habría ido nada mal al haber pagado dos dólares y haber intercambiado una pera y un plátano por su adorada manzana.

A continuación, dejó que nosotros fuéramos los consumidores, pero esta vez creó un sistema de decisión irracional. En este sistema preferimos los plátanos a las peras, las peras a las manzanas, y las manzanas a los plátanos, o  $PL > P$ ,  $P > M$  y  $M > PL$ . Como en el caso anterior, todos los intercambios de fruta costaban un dólar. A continuación, Glimcher nos dio un plátano. Pero nosotros sabíamos que preferíamos una manzana, así que le dimos un dólar y obtuvimos la manzana. Después advertimos que también tenía peras; dado que nos gustan más que las manzanas, se la cambiamos por la pera y pagamos otro dólar. Nos sale caro, pero estamos consiguiendo lo que preferimos, así que creemos que vamos bien. Pero entonces recordamos que nos gustaban los plátanos más que las peras, y nuestro sistema de elección nos obligó a cambiar la pera por el plátano y a pagar otro dólar. Fue en este punto cuando nos detuvimos y oímos la fruta, por así decirlo: darnos cuenta de que acabábamos de pagar tres dólares para volver a conseguir el plátano que teníamos al principio nos resultó violento, sobre todo delante de público (tras su charla nos aseguramos de que Glimcher no se hubiera llevado también nuestras carteras).

Hay otros aspectos económicos que deben estar presentes para que funcione un sistema racional, y todos ellos parecen compatibles con la forma en que nuestros cerebros han evolucionado. En neuroeconomía, la mayor parte de la toma de decisiones se centra en los aspectos mecanicistas de la elección, como por ejemplo el sistema económico racional que acabamos de describir. Glimcher utiliza macacos para determinar sus parámetros, pero otros investigadores han preferido los monos capuchinos para estudiar las bases de la elección racional. Estos investigadores son capaces de entrenar (¿engañar?) a los monos del experimento para que utilicen algún tipo de moneda de cambio y así comprobar sus habilidades y planteamientos a la hora de tomar decisiones económicas. También emplean otras técnicas que les permiten medir la respuesta neurológica de los monos al realizar las elecciones e indicar con precisión las regiones del cerebro y los grupos de neuronas implicados en el proceso de elección. En el caso de los capuchinos, la moneda es un conjunto de anillos; para los macacos, el zumo de frutas. En un experimento muy ingenioso, se entrenó a los macacos para que, o bien intercambiaran el zumo por un vistazo a una foto o bien pidieran el zumo para mirar fotos que no les gustaban: una especie de «pagar por mirar» de los monos, como lo explica Michael Platt, un investigador de la Universidad de Duke. Los macacos muestran un comportamiento social jerárquico, y los machos más dominantes son respetados por los más jóvenes; las hembras, en cambio, no suelen formar parte de esta jerarquía.

Cuando a los monos entrenados para utilizar el zumo como moneda de cambio se les enseñan imágenes de machos dominantes, pagan para ver una mayor porción de la imagen, pero cuando las imágenes corresponden a machos cada vez más bajos en la escala jerárquica, van pagando cada vez menos, hasta que llega un momento en que exigen que se les pague para mirar a los que se encuentran en los peldaños inferiores. Cuando se les muestran rostros de hembras, también pagan muy poco o exigen que les paguen para verlas. Ahora bien, estos son machos reproductivamente maduros, y cualquiera que haya estado en una colonia de macacos sabe que hay sexo por todas partes. Entonces, ¿quiere esto decir que a estos machos no les interesa el sexo? Como señala Platt, el problema reside más bien en que los investigadores les estaban

enseñando a los monos el extremo equivocado de las hembras. Cuando se les mostraron imágenes del perineo (un eufemismo para describir sus órganos reproductivos) femenino, los machos comenzaron a subir las apuestas para mirarlas: una especie de canal Playboy para monos. De hecho, los monos pagaban mucho más por echar un vistazo a un perineo que por ver el rostro de un mono dominante. Esta conducta no sólo tiene interés, sino que Platt pudo reconducir la actividad neuronal involucrada en la toma de decisiones del cerebro del mono hasta una serie concreta de neuronas. Y descubrió que existe una correlación estrecha entre la formación de preferencias y la toma de decisiones, por un lado, y la activación de neuronas en una región del cerebro que se encuentra en la corteza parietal, concretamente el área lateral intraparietal, por otro. Esta área controla la secuencia temporal de la mirada del mono, lo cual es fundamental para interpretar la información relativa a cómo enfrentarse a la sociedad y la jerarquía de los macacos.

Algunos seres humanos también pagan por ver caras bonitas. Platt ha realizado experimentos similares con estudiantes y ha descubierto que los varones pagan medio centavo americano para ver imágenes de los rostros atractivos femeninos y nada para ver rostros que no encuentran atractivos (independientemente del motivo de su falta de atractivo), pero las féminas no pagan absolutamente nada para contemplar un rostro masculino atractivo. Que sepamos, no se ha llevado a cabo el experimento correspondiente utilizando imágenes de genitales humanos, lo cual no resulta sorprendente: sólo hay que imaginarse la burocracia que conllevaría su aprobación por parte de la Junta de Revisión Interna (cada universidad revisa absolutamente todos los experimentos que se realizan con animales vivos y seres humanos).

Nuestras emociones también chocan a veces con nuestro raciocinio. Un buen ejemplo de este problema es el juego del ultimátum, en el que hay dos jugadores. A uno de ellos se le dan 100 dólares y se le pide que los reparta con el segundo jugador. Entonces el primer jugador (A) hace una oferta; el segundo (B) la evalúa y la acepta o la rechaza. Si rechaza el trato, ninguno de los dos consigue nada, si la acepta, el dinero cambia de manos. El juego continúa hasta que se rechaza un trato. La mayor parte de los A cierran un trato razonable, como por ejemplo un reparto al 50 %, en las primeras fases del

juego, y B casi siempre acepta esas ofertas iniciales, pero a medida que el juego avanza, es muy probable que A se vuelva avaricioso y haga una oferta que a B le parezca injusta. En ese punto, B la rechaza y el juego se acaba sin que se haya producido intercambio de dinero alguno. Se ha sacrificado la gallina de los huevos de oro. Aquí hay dos mecanismos en marcha, relacionados con la emoción y con la lógica. En este juego, lo más lógico para A es ofrecer lo menos posible, pero por lo general no lo hace debido a cuestiones emocionales que implican cierta noción de justicia. Desde el punto de vista de la lógica, B debería aceptar cualquier oferta, porque en caso contrario el juego se acaba y con ello las posibilidades de que el dinero cambie de manos. Pero B suele rechazar el trato si le parece demasiado injusto. De nuevo, observamos la aparición de la emoción y un sentido de la justicia. Las emociones constituyen una parte fundamental de nuestra condición de animales sociales, y en este caso la toma de decisiones se ve complicada por factores sociales y emocionales, ya que lo más lógico sería que B siguiera jugando *ad infinitum*, aunque las probabilidades de ganar fueran de 99 a una.

Datos más recientes sobre este juego, cuando los jugadores son adultos autistas, resultan muy esclarecedores en este contexto de toma de decisiones y de idoneidad social. Estos jugadores aceptan cualquier trato y ofrecen los peores repartos posibles, y lo hacen al parecer porque no son capaces de evaluar las creencias, sentimientos o actos del otro jugador. Finalmente, se ha utilizado la resonancia magnética funcional para localizar las partes del cerebro implicadas en la toma de decisiones que se utilizan en este juego. Cuando al jugador B se le ofrece un trato «injusto», una de las áreas del cerebro que se activa es la corteza insular, una región relacionada con la aversión; otra es la corteza anterior cingulada, asociada a su vez con la toma de decisiones difíciles. Parece ser que, cuando se nos ofrece un trato injusto, la corteza insular responde con aversión, y a continuación entra la corteza anterior cingulada para tratar de decidir qué es peor, la aversión o quedarse sin dinero. Si se considera peor la aversión, se rechaza el trato; si es la pobreza, se acepta la oferta, pero se nos queda un mal sabor de boca. La parte cognitiva de un experimento similar se ha realizado con monos capuchinos, y se ha comprobado que reaccionan de un modo muy parecido al de los seres

humanos, al igual que lo hacen los perros.

La neuroeconomía ya ha contribuido, a través de este tipo de experimentos, a nuestra comprensión de características cognitivas como por ejemplo la obtención de recompensas, la gratificación a largo plazo, el desarrollo de estrategias y la cooperación, pero más allá de su papel en el análisis de los mecanismos de funcionamiento del cerebro y en la explicación de regularidades en la función mental, Paul Glimcher también confía en que esta disciplina ayude a unificar la ciencia de la economía propiamente dicha. Como él mismo señala, existen dos estrategias diferentes a la hora de enfocar la economía. La primera emplea metodologías prescriptivas que pretenden desarrollar algoritmos matemáticamente eficientes capaces de descubrir estrategias eficaces y óptimas para la toma de decisiones, mientras que la segunda es descriptiva y pretende utilizar datos empíricos para crear un modelo o describir la conducta de las personas en un contexto económico. Glimcher resume de la siguiente manera su visión del potencial futuro de la neuroeconomía, así como de la investigación que lleva asociada sobre cuestiones económicas relacionadas con el cerebro:

Una tendencia reciente en la economía que podría reconciliar esta tensión existente entre los enfoques prescriptivos y descriptivos es el creciente interés, tanto entre economistas como entre neurocientíficos, por los mecanismos físicos que se producen dentro del cerebro humano y que llevan a la toma de decisiones. Estos académicos *neuroeconómicos* argumentan que el estudio de la arquitectura física de la toma de decisiones revelará los cálculos subyacentes que el cerebro ejecuta durante el comportamiento económico. Si esto es así, entonces es posible que los estudios económicos y neurobiológicos que buscan salvar la distancia existente entre estos dos campos logren proporcionar una metodología capaz de reconciliar la economía prescriptiva y la descriptiva.

Como revelan las palabras de Glimcher, todavía no hemos alcanzado este punto, pero la forma en que tomamos decisiones económicas es el resultado de uno de esos «hermosos experimentos» que el proceso evolutivo ha llevado a cabo con nuestro cerebro, y tenemos la suerte de disponer en la actualidad de la herramienta de la neuroeconomía para ayudarnos a desentrañar cómo se

produjo este hermoso experimento.

### ¿CASOS DIVINOS, ABDUCCIONES ALIENÍGENAS Y EL BLUES?

A juzgar por el alboroto que provoca, la Virgen María debe de haber cambiado tantas veces de aspecto como Lady Gaga. Prácticamente todos los años se publica la noticia de que su imagen ha aparecido en cualquier tipo de sitio, desde las vallas de las salidas de las autopistas hasta los sándwiches: de hecho, hace una década se subastó un trozo de sándwich de queso a la plancha con su imagen por 28.000 dólares. Y este fenómeno no es algo reciente: hay noticias de la aparición de la Virgen María desde el momento de la Asunción, y los artistas han creado innumerables imágenes del acontecimiento y de la persona. Así que, cuando se suman la tostada, las marcas de agua en las paredes y todas las demás y variadas apariciones, el surtido de aspectos que adquiere resulta realmente sorprendente.

Al mismo tiempo que la gente descubre imágenes de la Virgen en sus sándwiches, aparecen noticias en todo el planeta de gente que ha sido abducida por los alienígenas. Abundan los casos delirantes en los que a un individuo le han «llevado a pasear» o ha sido «examinado analmente» por estos seres, y aunque los detalles cambian, en muchas de estas descripciones la víctima se encuentra en un quirófano, completamente indefensa mientras una presencia la examina, a veces de un modo no muy delicado y en lugares no muy agradables. Suelen existir otras coincidencias, como por ejemplo los ojos habitualmente grandes de los alienígenas, las luces y el aspecto de sus naves en forma de platillo volador.

Que nosotros sepamos, no existe bibliografía científica sobre cómo y por qué algunas personas ven a la Virgen en señales que para otras personas no significan nada, pero, aunque cueste creerlo, los científicos sí han estudiado el tema de las abducciones alienígenas, y se ha descubierto que la parálisis del sueño, un interesante fenómeno que aparece de forma regular en los patrones del sueño, puede ser la responsable. Esta idea tiene mucha lógica: la mayor parte de las sensaciones de abducción se producen de noche, y algunas

personas incluso describen cómo se han despertado de un sueño profundo y han tenido la sensación de que alguien se los estaba llevando. La parálisis del sueño implica una pérdida del tono y el control muscular, y se produce durante la fase REM (por sus siglas en inglés, que significan «movimientos oculares rápidos») del sueño, cuando el cerebro (sobre todo la amígdala) presenta una actividad inusitada y se tienen los sueños de mayor carga emocional. De hecho, algunos científicos creen que la función de la parálisis del sueño consiste en inhibir la agitación, y sus posibles daños, que podría darse si el individuo dormido actuara de acuerdo a esos sueños.

Debido a esta asociación con los sueños intensos, muchas de las experiencias que se recuerdan están relacionadas con la parálisis del sueño, y de hecho algunos recuerdos recuperados de abuso sexual se han atribuido a este fenómeno. La característica principal de la parálisis del sueño es la sensación de que uno está indefenso, incapaz de moverse, y se ve acompañada con frecuencia por alucinaciones en las que hay alguien o algo cercano. Cuando la persona está algo sugestionada con los alienígenas, o es susceptible a la hipnosis, la parálisis del sueño, cuyos efectos pueden prolongarse incluso cuando el individuo se despierta, se interpreta con frecuencia retrospectivamente como una intromisión alienígena. David Forest, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Columbia, añade lo siguiente con respecto a los pacientes que estudió y que afirmaban haber sido abducidos por los alienígenas:

Me di cuenta de que muchos de los detalles que solían aparecer en las narraciones de la experiencia de la abducción mostraban unas similitudes más que casuales con los procedimientos médico-quirúrgicos, y propongo que el estar familiarizado con éstos puede también contribuir a ello. Hay un estado alterado de la conciencia, la aparición de figuras del mismo color con ojos saltones, en un habitación de alta tecnología bajo un objeto redondo y brillante en forma de platillo; hay desnudez, dolor y pérdida de control mientras se tantean las fronteras del cuerpo; y sin embargo se cree que las figuras son benevolentes.

El trabajo de Foster resulta esclarecedor en lo que respecta al poder de la

sugestión para provocar episodios de supuesta abducción alienígena, y quizá pueda resultar también útil a la hora de llegar a la raíz de algunos recuerdos recuperados de abuso sexual.

Vacilamos a la hora de incluir sentimientos más generalizados de espiritualidad en el mismo capítulo que la abducción alienígena, pero al igual que casi todas nuestras experiencias, estos sentimientos también se filtran a través del cerebro y son, por lo tanto, al menos en principio, accesibles a la neurociencia: en un famoso caso, se indujeron experiencias espirituales por medio de la estimulación electromagnética de los lóbulos temporales. El premio Nobel Francis Crick describió en una ocasión nuestros procesos mentales como el resultado de un «extenso ensamblaje de células nerviosas y las moléculas a ellas asociadas», en cuyo caso fuerzas externas como un campo magnético deberían ser capaces de estimular estas células, o de alterar la actividad de las moléculas, para generar pensamientos en nuestros cerebros. Para comprobar esta teoría Michael Persinger, un psicólogo de la Laurentian University, diseñó un casco para la cabeza conectado de forma que enviara una fuerza magnética relativamente fuerte. Con este casco estimuló a más de mil sujetos, algunos de ellos periodistas avezados, en un experimento que consistía en concentrar un campo electromagnético sobre diversas regiones del cerebro mientras se observaba al sujeto y se le hacían toda una serie de preguntas psicológicas.

Quizá el sujeto más rebelde fue Richard Dawkins, autor de *El espejismo de Dios* y suministrador habitual de malas noticias sobre la religión. En una ocasión Dawkins dijo: «La religión consiste en convertir creencias no probadas en verdades indiscutibles a través del poder de las instituciones y del paso del tiempo». Y esa es una de sus afirmaciones más benévolas sobre el tema. Dawkins posiblemente no sea el sujeto ideal para este experimento y, tal vez como era de esperar, resultó completamente insensible a la prueba, si exceptuamos un ligero mareo. Pero Persinger afirma que casi un 80 % de sus sujetos respondieron con sentimientos relacionados con la religión y la espiritualidad, llegando en algunos casos a verdaderas experiencias de éxtasis. Y aunque su trabajo con el «casco divino» ha recibido críticas de otros científicos, no se puede negar que los campos magnéticos tienen un

impacto en el funcionamiento de nuestros cerebros.

Los primeros experimentos de estimulación magnética transcraneal (TMS) se realizaron a mediados de la década de los ochenta del siglo pasado, y consistían sencillamente en la estimulación de la corteza motora y las consiguientes contracciones musculares. Esta técnica ha sido adoptada posteriormente por los neurobiólogos en multitud de aplicaciones clínicas, sobre todo para ayudar a diagnosticar los daños en pacientes que han sufrido ictus u otros daños cerebrales. Más recientemente se planteó la posibilidad de que la TMS pudiera resultar útil en los tratamientos por depresión, pero la US Food and Drug Administration (FDA) encontró que no había pruebas de su eficacia para esta función; por ello, en 2008 se denegó el permiso para la venta al público de estos aparatos, si bien se comercializaron un año más tarde gracias a un vacío legal. Parte del problema de la FDA para autorizar su uso en el tratamiento de la depresión residía en el hecho de que los grupos de control de las pruebas podían adivinar si se les estaba tratando con TMS, por lo que existían más probabilidades de que se produjera un efecto placebo. Pero sea cual sea el efecto del TMS en la depresión, resulta interesante, y quizá también significativo, que la estimulación de una pequeña parte del cerebro pueda tener semejante impacto sobre comportamientos humanos tan complejos como la espiritualidad y la depresión. El trabajo más reciente de Persinger se ha centrado en la meditación y el cerebro, así como en la percepción de viaje en el tiempo que se genera en el cerebro, quizá porque son áreas de investigación mucho menos provocadoras y controvertidas.

Nos encontramos todavía al inicio de los estudios en este campo, por lo que por ahora sólo podemos tener la certeza de que la generación por parte del cerebro humano de nuestra conciencia y sus distintos productos está de alguna forma determinada por lo que ocurre en su interior, en ocasiones en zonas funcionales muy limitadas; esto es evidentemente cierto en el caso de las abducciones alienígenas y de las visiones de la Virgen. Pero (a pesar de lo contagiosas que pueden resultar) estas percepciones específicas no son la norma, mientras que la espiritualidad en un sentido general es una característica más o menos omnipresente en las poblaciones humanas, por lo que su comprensión tiene mucha más importancia para nosotros. Y,

evidentemente, la primera pregunta que se nos plantea es el porqué de su existencia.

Una de las explicaciones plantea la teoría de que la espiritualidad resulta adaptativa para el comportamiento social en humanos. De acuerdo con esta hipótesis, los grupos de personas necesitan un contexto unificador para su existencia y supervivencia, y tanto la religión como los ceremoniales y los rituales ofrecen una buena manera de lograr la cohesión del grupo. Otro planteamiento afirma que la religión alivia la conciencia de nuestra mortalidad, que nos agobia continuamente con su angustia existencial. Algunos incluso creen en la teoría del «gen divino», según la cual existen genes específicos implicados en la evolución de la religión en humanos; sin embargo, cada vez que se afirma que se ha encontrado «el gen» para una conducta compleja, debería levantarse una bandera roja. Nosotros, en cambio, basándonos en las inclinaciones innatas de la singular forma de conciencia humana que discutiremos en el capítulo 10, sospechamos que la religión (como la invención de la cerveza) puede haber surgido de forma independiente en sociedades y culturas diversas. Una vez que resultó posible imaginar otros mundos, otros planos de existencia, se hizo inevitable que *fuera* concebidos en las distintas sociedades humanas repartidas por el planeta, aunque es probable que ocurriera en momentos diferentes. Como en el caso de la cerveza, los ingredientes eran diferentes cada vez que se inventó la religión, pero se mantuvo el mismo principio general. Por lo tanto, si algún gen concreto *participó* en este proceso, probablemente cambió de una cultura antigua a la otra. Resulta mucho más probable que los sentimientos espirituales sean producto de la capacidad genérica de pensar en símbolos, en cuyo caso probablemente sea mejor describir la religión, aunque en apariencia sea una conducta humana «universal», como un conjunto complejo de conductas que comparten un sustrato pero que han evolucionado de forma independiente en las distintas culturas.

YLUEGO ESTÁN LOS ADOLESCENTES

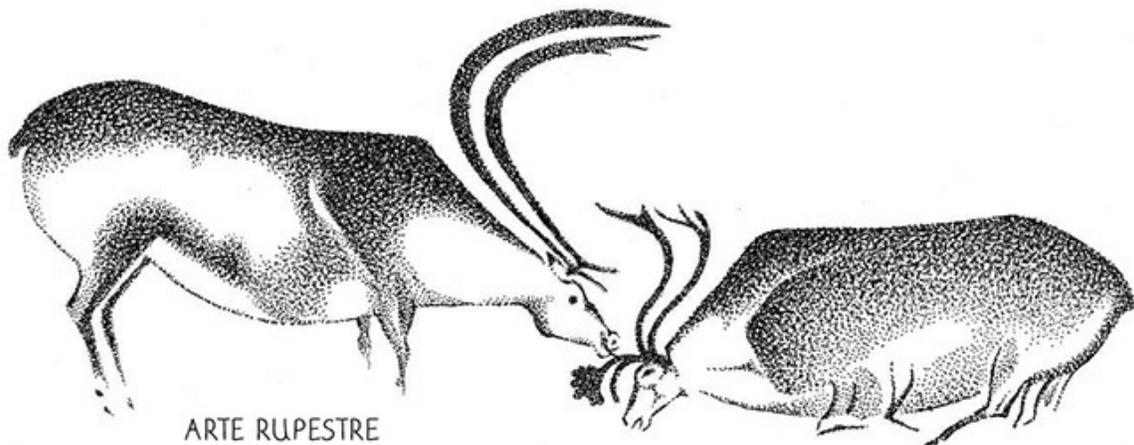
La mayor parte de los padres sabe, o lo descubrirá pronto, lo que supone tratar con hijos adolescentes. Aunque la experiencia suele ser gratificante, también se ve complicada por el hecho de que el camino hacia los veintitrés está empedrado de toda una serie de decisiones por parte del adolescente típico que, siendo muy benévolo, podrían calificarse de «malas». El cerebro del adolescente constituye también uno de los mejores ejemplos que se nos ocurren para ilustrar el «desorden» de nuestros cerebros del que hablamos en el capítulo 1. No hay duda de que cualquier padre que diseñara un cerebro, muy probablemente trataría de encontrar la manera de saltarse la adolescencia. Esto se debe a que, a medida que el cerebro se desarrolla durante estos años, los lóbulos parietales y temporales y todas las estructuras asociadas son la primera parte del córtex en madurar, lo que implica que los centros sensoriales, auditivos y de lenguaje se desarrollan por completo relativamente pronto: por ello los padres con frecuencia se asombran, y se enorgullecen, de las aptitudes de sus adolescentes para hablar, intelectualizar o practicar un deporte. Hasta aquí, todo bien. Pero el problema reside en la región prefrontal del córtex, una adquisición evolutiva mucho más reciente y de crecimiento mucho más lento. Hemos visto que esta región participa en el pensamiento, la planificación y algunos procesos de toma de decisiones. Los adolescentes, como todo el mundo, tienen que tomar decisiones, y en vez de utilizar sus cortezas prefrontales sólo parcialmente desarrolladas, recurren a la siguiente opción, sus amígdalas, en una etapa más avanzada de crecimiento. Como vimos en el capítulo 5, en los vertebrados esta región del cerebro se ocupa sobre todo de las respuestas emocionales, lo cual es una de las razones por las que los adolescentes toman unas decisiones tan malas y son tan impulsivos.

Existe alguna evidencia experimental que apoya esta interpretación del comportamiento adolescente. Cuando a los adultos se les muestra el rostro de una persona que tiene miedo, prácticamente un 100 % identifica correctamente la emoción de la imagen, pero cuando se les enseña a adolescentes, casi un 50 % se equivoca. Los datos procedentes de técnicas de imagen son aún más reveladores, ya que señalan a la corteza prefrontal como la región responsable de esta interpretación en los adultos. Cuando se les enseña esta imagen a los adolescentes mientras se les somete a una resonancia magnética funcional, su

amígdala muestra una actividad desacostumbrada, al igual que otras regiones que habitualmente no se asocian con la evaluación de las emociones. Por lo tanto, aunque no nos gusta establecer analogías entre los cerebros y los ordenadores, entendemos perfectamente la descripción del cerebro adolescente como un superordenador tremendamente avanzado... antes de que se haya instalado el sistema operativo y el *software*. Por el bien de los padres, y de los propios adolescentes, un cerebro diseñado de un modo racional habría evitado esta etapa del desarrollo.

Entonces, ¿por qué tenemos este desfase en el desarrollo? Algunos psicólogos evolutivos sugieren que la etapa de la adolescencia es adaptativa, es decir, que existe debido a la selección natural: dicho de otra manera, las peculiaridades del comportamiento en la adolescencia comportaban alguna ventaja evolutiva para los grupos en aquellas etapas de la existencia humana previas al sedentarismo. Resulta difícil imaginar cuál podría ser ésta, por lo que resulta más verosímil que el origen de esta fase «desequilibrada» del desarrollo del cerebro se encuentre en el patrón embriológico general que Ernst Haeckel descubrió en el siglo XX, según el cual las estructuras más antiguas suelen aparecer antes en el desarrollo. Así, los refinamientos arquitectónicos de la corteza prefrontal, en los que profundizaremos más adelante, fueron los últimos en la larga serie de adquisiciones que condujeron hasta el cerebro humano que conocemos hoy en día, y son por lo tanto los últimos en desarrollarse y madurar. Pero, por supuesto, cualquier explicación sirve si nos evita encerrar a los adolescentes en un manicomio hasta que se les pase.

## El cerebro humano y la evolución cognitiva



A estas alturas el lector debería tener una imagen aproximada de los cerebros de otros organismos y de lo que hacen en términos generales. En los capítulos previos hemos sentado las bases necesarias para regresar a la tarea que expusimos en el capítulo 1: pensar en el pensamiento. Por fin estamos preparados para enfrentarnos a la pregunta de cómo se desarrolló el cerebro humano en concreto, y cómo adquirió sus extraordinarias capacidades. Para abordar esta tarea central puede resultarnos de ayuda resumir las complejidades del cerebro, así que comenzamos con una breve recapitulación de su estructura.

El cerebro humano consta de una amalgama de partes estructural y topográficamente diferenciadas, adquirida cada una de ellas en una etapa diferente del largo viaje evolutivo de los seres humanos. En lo más profundo del cerebro se encuentran las estructuras antiguas del tronco cerebral, que lo conectan con la médula espinal, que es el conducto que lo comunica con el

resto del cuerpo, y que controla funciones básicas como la respiración. Por detrás de este complejo se encuentra el cerebelo, abultado y lleno de pliegues, que se ocupa del equilibrio y el movimiento, además de participar en otras funciones superiores, y por encima del tronco cerebral se hallan las diversas estructuras agrupadas habitualmente en el sistema límbico. De ellas forman parte la amígdala, que procesa emociones como el miedo y la gratificación; el hipocampo, que interviene en la formación de la memoria a largo plazo y en la capacidad para orientarse; el giro cingulado, que ayuda a regular funciones autónomas como el ritmo cardíaco y la presión arterial, así como la atención; y el hipotálamo, que secreta hormonas importantes en la regulación del sistema nervioso autónomo en su conjunto, incluidas otras estructuras límbicas como el giro cingulado antes mencionado. El hipotálamo resulta vital en la estimulación de funciones como el hambre, la sed, el sueño y la vigilia, y la actividad sexual. Que una única región del cerebro pueda llevar a cabo funciones tan diferentes parece indicar que muchas de ellas posiblemente se incorporaron para darles nuevos usos en distintos momentos del proceso evolutivo, lo cual constituye en realidad una forma bastante habitual de improvisación evolutiva.

Por encima de las estructuras límbicas se encuentra el cerebro, formado por los ganglios basales en la parte inferior y la corteza cerebral en la superior. Los ganglios basales participan en el control motor y el aprendizaje, mientras que el córtex, en coordinación con el cerebelo, controla todas las acciones voluntarias del cuerpo, incluidas las funciones cognitivas superiores. El córtex es una fina lámina de neuronas, con un grosor inferior a una fracción de centímetro, cuya expansión durante la evolución de los mamíferos ha sido tan grande que, en las especies con cerebros más grandes, ha habido que doblarla y plegarla para que cupiera dentro de los límites de la bóveda craneal, de la misma manera que se estruja una prenda de vestir para encajarla en el rincón de una maleta a rebosar.

Los pliegues principales de la parte exterior del cerebro que aparecen al llevarse a cabo este estrujamiento se han utilizado tradicionalmente para identificar las principales áreas funcionales del córtex. El cerebro propiamente dicho presenta una simetría bilateral y está dividido en dos

mitades, la derecha y la izquierda, cada una de las cuales se ocupa no sólo del lado contrario del cuerpo sino también, en parte, de funciones diferentes: el hemisferio derecho se suele identificar con la creatividad y la generación de nuevas ideas, mientras que el izquierdo sigue una lógica más rígida. Los dos hemisferios se «hablan» a través de un gran haz de fibras conocido como el cuerpo calloso. Desde el punto de vista topográfico, en cada lado del cerebro aparecen representados cuatro «lóbulos» corticales principales, que se distinguen entre sí por grandes pliegues, los surcos o cisuras. Los lóbulos parietales se encuentran en las partes superiores y se ocupan del movimiento voluntario, el reconocimiento de los estímulos y la orientación; los lóbulos occipitales están en la parte posterior y participan en el procesamiento visual, mientras que los lóbulos temporales se sitúan por debajo del córtex parietal y poseen funciones asociadas con la audición, la memoria y el habla. Por último, en la zona anterior encontramos los lóbulos frontales, donde reside el razonamiento, la planificación, la solución de problemas, el control de las emociones y todo un conjunto de otras funciones de las llamadas ejecutivas. Dentro de cada lóbulo principal se pueden reconocer fácilmente una serie de subdivisiones delimitadas por profundos pliegues: así, por ejemplo, la corteza motora primaria es una franja vertical de corteza situada en la parte posterior del lóbulo frontal que trabaja en coordinación con un área «premotora» situada por delante suyo para ejecutar, basándose en la información suministrada por otras áreas del cerebro, los movimientos del cuerpo. Junto al área premotora se halla la división «prefrontal» del córtex frontal, la región por encima de los ojos que juega un papel fundamental en la cognición compleja: su ámbito abarca áreas clave de la actividad mental como las correspondientes a la toma de decisiones, la expresión de características de la personalidad y la moderación de las conductas sociales. De la misma manera, la pequeña región conocida como el área de Broca situada dentro del lóbulo frontal izquierdo está directamente implicada en las funciones motoras, entre las que se cuenta el control del aparato productor del habla, mientras que el área de Wernicke, igualmente limitada y asociada desde hace muchos años a la comprensión del lenguaje, se encuentra al fondo del lóbulo parietal.

A medida que el cerebro crece dentro del cráneo durante el desarrollo de

cada individuo, se va estableciendo una asociación íntima entre su forma exterior y el contorno interior de la bóveda craneal que lo contiene. Sólo tres finas capas de membrana y algunos vasos sanguíneos los separan. Por lo tanto, la morfología interna de la cavidad craneal constituye una representación sorprendentemente exacta de la forma interna del cerebro que se extiende por debajo suyo, con todos sus lóbulos, pliegues, surcos y cisuras. Por supuesto, no todo se puede deducir simplemente examinando el exterior de un cerebro; lo crucial es lo que ocurre en el interior, y los estudios de imagen en individuos vivos han demostrado que muchas acciones están distribuidas por el cerebro de un modo más difuso de lo que una división puramente modular en áreas funcionales visibles externamente sugeriría. Y no sólo eso: estudios en profundidad de regiones concretas del cerebro hacen pensar que la arquitectura interna de sus diferentes partes puede variar mucho entre los mamíferos, incluidos los primates.

Así, por ejemplo, en algunos estudios se ha empezado a observar que, a pesar de que el cerebro humano, tan desarrollado, no muestra estructura concreta alguna que no esté igualmente presente en los simios, la arquitectura neuronal de cada región del cerebro puede ser muy característica. Tomemos el caso de una parte de la corteza prefrontal situada exactamente en la parte anterior del cerebro, por encima de los ojos. Se cree desde hace mucho tiempo que esta región cortical, llamada área de Brodmann 10 (BA 10), tiene un papel fundamental en el pensamiento complejo, y ahora se ha descubierto, no sólo que BA 10 está más desarrollada en humanos en relación a los monos, sino también que las neuronas de su interior están más espaciadas en los primeros. Esta disposición permite a las neuronas emitir más axones y dendritas, que se ramifican y desarrollan una red de conexiones más compleja con sus vecinas. Además, BA 10 presenta en los humanos una gran cantidad de las llamadas neuronas de Von Economo, unas células nerviosas que se cree están especializadas en facilitar la transmisión de información a alta velocidad de una parte del cerebro a la otra. Posiblemente sea significativo el hecho de que este tipo de diferencias entre los humanos y los monos no se encuentra –o no se ha descubierto todavía– en otras regiones corticales, como por ejemplo las áreas motoras o visuales. Si sumamos toda esta información, el resultado no

sólo refuerza la sospecha largo tiempo albergada de que la corteza prefrontal tiene un papel fundamental en la integración de datos procedentes de múltiples regiones del cerebro, proceso básico para nuestra conciencia humana, sino que también pone de relieve que, en la evolución humana, la reorganización interna del cerebro fue por lo menos tan importante como el aumento general del tamaño.

Sin embargo, aun admitiendo la validez de estos dos últimos puntos, tanto la forma externa del cerebro de una especie mamífera como su tamaño total (sobre todo su tamaño en relación al del cuerpo que tiene que controlar) son fuentes de información potencialmente importantes en lo que se refiere a sus capacidades cognitivas generales. Este tipo de conocimiento es, por supuesto, especialmente significativo en el caso de las especies extintas, donde no se pueden observar directamente ni las capacidades ni la microarquitectura del cerebro propiamente dicho. Por lo tanto, tenemos suerte de que con frecuencia se pueda recuperar información sobre la morfología externa del cerebro de las especies fósiles a partir de moldes del interior de su cavidad craneal, bien directamente, bien a través de nuevas técnicas de neuroimagen. De hecho, en algunas casos la naturaleza nos ha ahorrado el esfuerzo: se conocen no pocos moldes endocraneales naturales en los registros fósiles, que se formaron cuando las bóvedas craneales de los individuos muertos se rellenaron con sedimentos antes de la fosilización. Y dado que estos moldes son el único registro que poseemos sobre el aspecto original de los cerebros pertenecientes a las especies extintas de homínidos (primates que estaban más estrechamente relacionados con nosotros que con ninguno de los grandes simios actuales), los paleoantropólogos especializados en este tema, que se llaman a sí mismos paleoneurólogos, los han examinado en detalle, si bien con resultados ciertamente desiguales.

#### EL PUNTO DE PARTIDA

Dadas las limitaciones inherentes a los moldes endocraneales, tenemos suerte de que no sean el único sistema en nuestro poder para hacer inferencias sobre

las primeras etapas de la evolución cognitiva humana. A partir de las estructuras neurales más primitivas, nos hemos encontrado en la afortunada posición de poder utilizar evidencias comparativas procedentes de organismos vivos para dar cuerpo a nuestra imagen de la historia evolutiva del cerebro. En el caso de la familia de los homínidos (o la subfamilia homininos, como muchos prefieren llamarla: se puede utilizar uno u otro término, porque en realidad a efectos prácticos no hay ninguna diferencia), podemos servirnos de nuestros parientes vivos más cercanos, los grandes simios, para que nos ayuden a determinar un punto de partida. La ayuda se acaba aquí, dado que no existen análogos vivos en el mundo para las etapas posteriores de la evolución humana, pero dado que los simios poseen unos cerebros muy cercanos en tamaño (tanto desde el punto de vista absoluto como en relación a su volumen corporal) a los de nuestros antepasados más antiguos, nos pueden servir para hacer inferencias sobre cómo estos percibían el mundo e interaccionaban con él.

Los parientes cercanos vivos que mejor conocemos son los bonobos y los chimpancés del África tropical, y cuanto más estudiamos los aspectos cognitivos de estas extraordinarias criaturas, más nos sorprenden. No pasa ni un mes sin que se anuncie que los chimpancés han hecho algo que hasta entonces creíamos patrimonio exclusivo de los humanos. Al principio fue la cuidadosa preparación de las ramitas para usarlas en la «pesca» de termitas en sus nidos; después, el uso de las rocas para aplastar duras nueces de palma sobre yunques de piedra y así extraer su carne comestible (una actividad cuyo «registro arqueológico», como se ha descubierto hace poco, se remonta a varios miles de años), y ahora entre estas actividades se cuenta incluso la preparación y uso de «lanzas» de madera para empalar crías de galago dormidas en el fondo de los agujeros de los árboles. Los chimpancés se agrupan para cazar, capturar y comer colobos en los árboles y crías de potamoquero en tierra, e incluso «conspiran» para asesinar a adversarios pertenecientes a otros grupos sociales. Son unos animales realmente sorprendentes, y nadie que haya mirado a los ojos a un chimpancé cautivo en un zoológico (o, si son lo suficientemente afortunados, en libertad) podría negar que ve mucho de nosotros mismos en el simio. Pero sigue habiendo una

diferencia: cognitiva y físicamente, están a la vez muy cerca y muy lejos de nosotros.

Así, por ejemplo, tras largos y exhaustivos esfuerzos para entrenarlos, ni los bonobos ni los chimpancés consiguen todavía captar los principios básicos utilizados por los primeros homínidos para fabricar herramientas de piedra, hace aproximadamente dos millones y medio de años o quizá mucho más. Entienden rápidamente la idea de utilizar una lasca de piedra afilada para cortar una cuerda que sujeta una recompensa comestible a la que no llegan, e incluso han logrado encontrar soluciones ingeniosas para el problema de la obtención de estas láminas, pero se les siguen escapando los rudimentos de la acción de golpear un trozo de piedra con otro en el ángulo exacto y con la cantidad de fuerza necesaria para arrancar una lasca afilada. De forma similar, los grandes simios han demostrado en el laboratorio una notable habilidad para reconocer símbolos verbales y visuales, e incluso para combinarlos y hacer con ellos enunciados, pero no parecen ser capaces de mezclarlos y crear un número infinito de enunciados con un número finito de elementos básicos, tal como hacemos nosotros cada vez que utilizamos el lenguaje. Para ser justos, hay que reconocer que estos simios carecen de un tracto vocal capaz de producir los sonidos que empleamos en el habla, pero ello no oculta el hecho de que, mientras su uso aditivo de los símbolos (por ejemplo en «coge... pelota... roja... fuera») les permite comprender enunciados simples e incluso crearlos, con ayuda de teclados y pantallas de ordenador especialmente diseñados, ello limita seriamente la complejidad de estos enunciados y no deja lugar para la abstracción. No sólo eso: todos estos comportamientos son el resultado de elaborados experimentos de laboratorio y no reflejan las respuestas cognitivas de los simios en condiciones naturales. De hecho, aunque los chimpancés poseen un impresionante repertorio de vocalizaciones naturales espontáneas –comparados incluso con otros primates no humanos–, prácticamente todas parecen estar asociadas con, y limitadas a, estados emocionales inmediatos.

A pesar de los numerosos estudios realizados sobre la cognición en los simios, ninguno ha revelado evidencia alguna entre nuestros parientes vivos de la moderna propensión humana a la cognición «simbólica». Parece ser que

sólo nosotros, los seres humanos modernos, poseemos la capacidad de diseccionar el mundo en nuestro cerebro y obtener un amplio vocabulario de símbolos intangibles que podemos después combinar y recombinar para componer un número infinito de enunciados, no sólo sobre el mundo como es, sino también sobre cómo podría ser. Esta forma simbólica de inteligencia es lo que convierte nuestro modo de percibir y enfrentarnos a lo que nos rodea en algo único dentro del mundo vivo, y el estudio de la evolución de la cognición humana moderna supone en gran medida la búsqueda de pruebas que demuestren cuándo y cómo se adquirió esta capacidad. Evidentemente, no estaba presente desde el comienzo: no era algo primitivo en los homínidos, y la historia evolutiva posterior de nuestra familia no consistió simplemente en el perfeccionamiento durante siglos de una capacidad que había existido bajo forma rudimentaria desde el principio. Aun distinguiéndose por sus tendencias bípedas, y a pesar de que no hay duda de que eran inteligentes para los estándares de la época, desde el punto de vista cognitivo los primeros homínidos era unos primates superiores bastante corrientes. En efecto, sus cerebros eran mucho más grandes que los de cualquiera de los primates contemporáneos que conocemos, pero esos cerebros no eran más grandes que los de los grandes simios actuales, incluso teniendo en cuenta el tamaño corporal. No se han obtenido todavía moldes endocraneales en condiciones de las primeras especies de homínidos conocidas, pero no hay razón alguna para pensar que sus cerebros fueran significativamente diferentes en sus proporciones externas o en su organización interna de los de, por ejemplo, los chimpancés. En resumen, no disponemos de datos convincentes que nos lleven a creer que nuestros parientes más primitivos representaban algún tipo de avance cognitivo en relación a lo que observamos en nuestros parientes más cercanos vivos hoy en día.

Teniendo en cuenta estas observaciones, resulta razonable utilizar a los simios modernos como vara de medir para, por lo menos, calibrar el estado cognitivo general de los primeros homínidos. No hace mucho, el conocido psicólogo cognitivo David Povinelli dedujo que una de las diferencias fundamentales en el modo en que humanos y chimpancés ven el mundo es que, mientras los humanos componen imágenes abstractas de los demás individuos

y sus motivaciones, «los chimpancés se basan exclusivamente en las características observables de los demás para dar forma a sus conceptos sociales». De ello infería que, si esto fuera correcto, «significaría que los chimpancés no se dan cuenta de que los demás no son sólo sus movimientos, sus expresiones faciales y sus hábitos de comportamientos. No serían capaces de entender que los demás seres son depósitos de experiencias privadas, íntimas». Esto no son, por supuesto, más que deducciones a partir de lo que podemos observar sobre la conducta de los chimpancés, tanto en condiciones naturales como en el laboratorio; no tenemos manera de acceder al estado mental subjetivo de un chimpancé. Pero parece una conclusión razonable, e implicaría asimismo que los chimpancés en cuanto individuos no poseen una conciencia equivalente de *sí mismos*. Ellos *experimentan* las emociones e intuiciones que se despiertan en sus cerebros, y en tanto seres intensamente sociales pueden expresarlas o inhibirlas, de acuerdo con la situación social. Pero Povinelli cree que ellos «no razonan sobre lo que otros piensan, creen y sienten... porque, de partida, no forman este tipo de conceptos». Y parece razonable concluir que esto también es aplicable a la reflexión sobre uno mismo, ya que si los chimpancés en cuanto individuos no son capaces de desarrollar conceptos sobre las vidas íntimas de los demás, es altamente improbable que posean una percepción equivalente de su existencia íntima.

Esta diferencia cognitiva entre los simios y los humanos no siempre producirá, a pesar de ser muy profunda, comportamientos superficiales diferentes; y si bien es cierto que las acciones de los chimpancés y los humanos parecen en ocasiones sorprendentemente similares, deberíamos ser extremadamente cautelosos a la hora de juzgar dichas similitudes. Sin duda, podemos explicar su existencia remitiéndonos a las larguísimas historias evolutivas que compartimos, pero no deja de ser cierto que conductas observables similares pueden ocultar procesos cognitivos completamente diferentes. Mucho ha pasado (por ambas partes) desde la última vez que los seres humanos compartieron un antepasado con cualquier simio; no obstante, casi todos los expertos consideran razonable concluir que el nivel de cognición que se observa en los chimpancés y otros grandes simios nos puede proporcionar una estimación aceptable del punto cognitivo de partida de

nuestros antecesores hace aproximadamente siete millones de años. En palabras de Povinelli, podemos asumir que esos antepasados eran «criaturas inteligentes, pensantes, que apreciaban y aprendían de las regularidades que se producían en el mundo que las rodeaba. Pero... no razonaban sobre aquello que no observaban: carecían de ideas sobre la “mente”, de la noción de “causalidad”». En el sentido humano, esto implica que no tenían todavía una idea del «yo». Encontramos muy plausible esta descripción del punto de partida cognitivo de nuestro linaje, pero, a pesar de lo limitada que resulta, prácticamente agota todo lo que se puede decir sobre este tema con algún fundamento. Para proseguir la historia, tenemos que dirigir la mirada a nuestros registros fósiles y arqueológicos.

### LOS PRIMEROS HOMÍNIDOS

Las primeras pruebas de que disponemos sobre la existencia de seres relacionados más de cerca con nosotros que con cualquiera de los grandes simios nos llegan en forma de unos cuantos fósiles procedentes de yacimientos de África central y oriental, con una antigüedad que oscila entre los seis y los siete millones de años. Destaca el hecho de que todos estos fósiles comparten (en su mayor parte por inferencia) la postura erecta, el rasgo que por lo general se considera el más característico de nuestros primeros antepasados, dado que todo lo que ocurrió a continuación derivó de este cambio básico en la postura. Los fósiles disponibles de este periodo constituyen un surtido variado, por lo que esta propensión postural poco común se infiere a partir de diversos tipos de evidencias. La especie homínida primitiva más antigua que se reivindica es *Sahelanthropus tchadensis*; procede de Chad, un país del África central, y se ha descrito a partir de un único cráneo que se encontró muy aplastado. Sus propensiones posturales se infirieron a partir del hecho – confirmado por una reconstrucción «virtual» gracias a sofisticadas técnicas de visualización– de que el foramen magnum, el gran orificio situado en la base del cráneo a través del cual la médula espinal sale de la cavidad cerebral, está rotado ligeramente hacia abajo. Esto es revelador: en un cuadrúpedo, el

cráneo cuelga de la parte anterior de una columna vertebral más o menos horizontal, por lo que el foramen magnum está dirigido hacia atrás, mientras que en los bípedos como nosotros se encuentra en un delicado equilibrio sobre una columna vertical, por lo que el foramen magnum está escondido debajo y se abre hacia abajo.

Por el contrario, el *Ardipithecus kaddaba* etíope, de 5,8 millones de años, se conoce sólo a partir de unos retazos de fragmentos, y la evidencia de su bipedalismo se deduce únicamente de un hueso del pie. Sin embargo, se cree que esta especie está relacionada con el *Ardipithecus ramidus*, muy posterior (4,4 millones de años de antigüedad), del que se describió un esqueleto casi completo en 2009 y que presenta indicios de la postura erecta en varios elementos óseos, entre los se cuenta un cráneo fragmentado a partir del cual se ha inferido un foramen magnum vuelto hacia abajo. Pero este *Ardipithecus* no era un bípedo convencional, ya que presentaba, entre otras características curiosas, un pie prensil, una adaptación para trepar a los árboles que no aparece en ningún otro homínido primitivo. En el caso de *Orrorin tugenensis*, encontrado en Kenia y de seis millones de años de antigüedad, se ha deducido su bipedalismo a partir de algunos huesos incompletos de la pierna; no se ha encontrado el cráneo asociado a estos restos, aunque sí algunos fragmentos de mandíbulas con dientes.

Todos estos presuntos homínidos primitivos comparten asimismo, en mayor o menor grado, una configuración común de los dientes delanteros que implica la reducción de los caninos y la modificación de la relación entre el canino superior y el premolar inferior anterior con el que ocluye. En los simios los caninos son grandes, sobre todo en los machos, y la superficie trasera del canino superior se afila contra la superficie delantera del premolar inferior anterior cuando la mandíbula se cierra; en los homínidos los caninos tienen una menor longitud y el mecanismo de afilado desaparece, lo que origina un cambio en la forma de las filas de dientes, que pierden el perfil en forma de U por uno más redondeado. Este cambio aparece asociado a una reducción en la longitud del rostro. No obstante, los homínidos primitivos constituyen en términos generales un grupo bastante heterogéneo. Sus fósiles aparecen en rocas depositadas en una época en la que el clima del continente

que daría lugar a África estaba experimentando un cambio hacia una mayor sequedad y estacionalidad, un desarrollo que condujo a la fragmentación de las selvas y la expansión de los bosques y las sabanas. La reconstrucción de los hábitats de los primeros homínidos sugiere que estaban explotando todos los nuevos entornos, y concuerda con la hipótesis de que periódicamente bajaban a tierra para aprovechar los nuevos recursos que se podían encontrar allí. Los homínidos posteriores han destacado por sus tendencias alimentarias generalistas, y las pruebas que poseemos sugieren que esto fue así desde el inicio: mientras que, cuando dejan la selva, los chimpancés modernos suelen ceñirse a la dieta que prefieren, compuesta por frutas blandas y carnosas, *Sahelanthropus* y sus parientes eran probablemente mucho más adaptables y subsistían a base de todo lo que hubiera disponible. El grueso esmalte de los molares parece sin duda indicar el procesamiento de alimentos mucho más duros de lo que los simios están dispuestos a llevarse a la boca.

El motivo de que los primeros homínidos adoptaran la postura erecta al llegar al suelo es algo sobre lo que existe un gran debate, pero la simple realidad parece ser que nunca lo habrían hecho si no se hubieran sentido ya cómodos moviéndose por los árboles ancestrales con el tronco erguido. Existen varios simios silvícolas fósiles que parecen haber mostrado adaptaciones a la postura erecta en sus esqueletos corporales, y no resulta descabellado que, bajo la presión del aumento de los nuevos hábitats abiertos, más de un linaje de los simios se adaptara parcialmente a la vida terrestre desplazándose en tierra de forma bípeda: ello ayudaría a explicar la relativa heterogeneidad de los presuntos homínidos primitivos, ninguno de los cuales era especialmente ligero de pies.

También existe una hipótesis alternativa, la de que podamos estar observando aquí, justo al comienzo, un ejemplo de una fuerte tendencia que ha marcado desde entonces a la familia de los homínidos: es decir, que su historia no ha sido en absoluto una marcha lenta y resuelta desde el estado primitivo hasta la perfección bajo la guía benigna de la selección natural. Desde su comienzo, la historia de los homínidos ha sido más bien una historia de experimentación evolutiva dinámica, una exploración de las muchas formas que evidentemente existen de ser un homínido. Las especies de homínidos han

surgido, han salido a luchar en el circo ecológico, y con mucha frecuencia se han extinguido durante el proceso.

De todos los homínidos que conocemos, sólo dos nos ofrecen alguna pista sobre cómo eran sus cerebros. Al no existir un esqueleto corporal (por lo menos no se ha descrito), no se sabe cuál habría sido la proporción cuerpo-cerebro de *Sahelanthropus*, pero se calcula que su volumen cerebral bruto se encontraba entre los 320 y los 380 centímetros cúbicos (cc), más o menos el tamaño de una pelota de tenis. Esto lo sitúa en línea con el chimpancé medio, y contrasta de forma drástica con los 1.350 cc de media de los humanos modernos (que muestran una amplia gama de tamaños cerebrales «normales», desde los aproximadamente 900 a los 2.000 cc). Merece la pena señalar que en nuestra especie el tamaño absoluto del cerebro no presenta en modo alguno una correlación estrecha con la inteligencia, independientemente de la forma en que se mida: así, por ejemplo, parece ser que el cerebro de Anatole France, el novelista e intelectual francés ganador de un premio Nobel, estaba en la parte más baja de la franja. Por otra parte, es muy probable que el tamaño medio cerebral de una *especie* nos esté indicando, en efecto, algo sobre el grado de inteligencia de sus miembros, aunque ese algo no sea muy específico. Y si ello es así, parece que una vez más podemos utilizar a los chimpancés como indicador general de la inteligencia de los primeros homínidos. Desde esta perspectiva, no parece aventurado afirmar que *Sahelanthropus* (y cualquier otro primate aún no descubierto que pueda haberse parecido a él) era probablemente la criatura más inteligente de su época; en ausencia de algún dato disponible sobre el aspecto real de su cerebro, resulta difícil ser más específico.

Sin embargo, lo que sabemos de *Sahelanthropus* coincide bastante con nuestros conocimientos rudimentarios de *Ardipithecus ramidus*, que poseía, si acaso, un cerebro aún más pequeño (se calcula que de entre 300 y 350 cc). En este caso sí tenemos un esqueleto corporal junto a la capacidad craneal, por lo que sabemos que la proporción entre los dos era más o menos similar a la del chimpancé. Además, aquellos que describieron los fósiles de *Ardipithecus* señalaron que la «marcada inclinación del hueso sobre el que descansa el tallo cerebral sugiere que la base del cerebro de *Ar.ramidus* debía de estar más

flexionada que en los simios». A continuación indican que en los homínidos algo posteriores «una base del cráneo flexionada aparece junto a la expansión de la corteza parietal posterior, una parte del cerebro humano moderno que se ocupa de aspectos de la percepción visual y espacial». Es posible que en esta fase temprana de la evolución de la familia de los homínidos ya se estuvieran produciendo cambios en el ámbito de la percepción.

No hay mucho más que decir sobre nuestros predecesores más antiguos a partir de la evidencia directa de los cerebros fósiles, pero podemos inferir algo a partir de su contexto ecológico. El hecho de que descendieran de los árboles para vivir en tierra, por lo menos a tiempo parcial, supone que los bípedos primitivos estaban expuestos a un medio nuevo peligroso. La reducción de la superficie de las selvas por la invasión de las zonas más herbosas trajo consigo la incursión en el territorio de los homínidos primitivos de gran número de mamíferos que pastaban, junto a la inmensa variedad de carnívoros que se alimentaban de ellos. Al compartir el nuevo hábitat, los homínidos, lentos y de cuerpo relativamente pequeño, estaban expuestos a estos nuevos daños, lo cual tiene vastas implicaciones, no sólo en lo relativo al tamaño y organización de los grupos en que vivían, sino también para la complejidad de su interacción social. Se ha dado habitualmente por hecho que los homínidos primitivos vivían en grupos sociales más bien pequeños, como lo hacen los simios que viven fundamentalmente en las selvas. Sin embargo, se ha apuntado que la analogía más apropiada sería, no con los parientes genealógicos más cercanos de nuestros antepasados, sino con sus equivalentes ecológicos más próximos, y entre los primates vivos no son los simios, sino los babuinos y los macacos los que mejor encajan en esta definición.

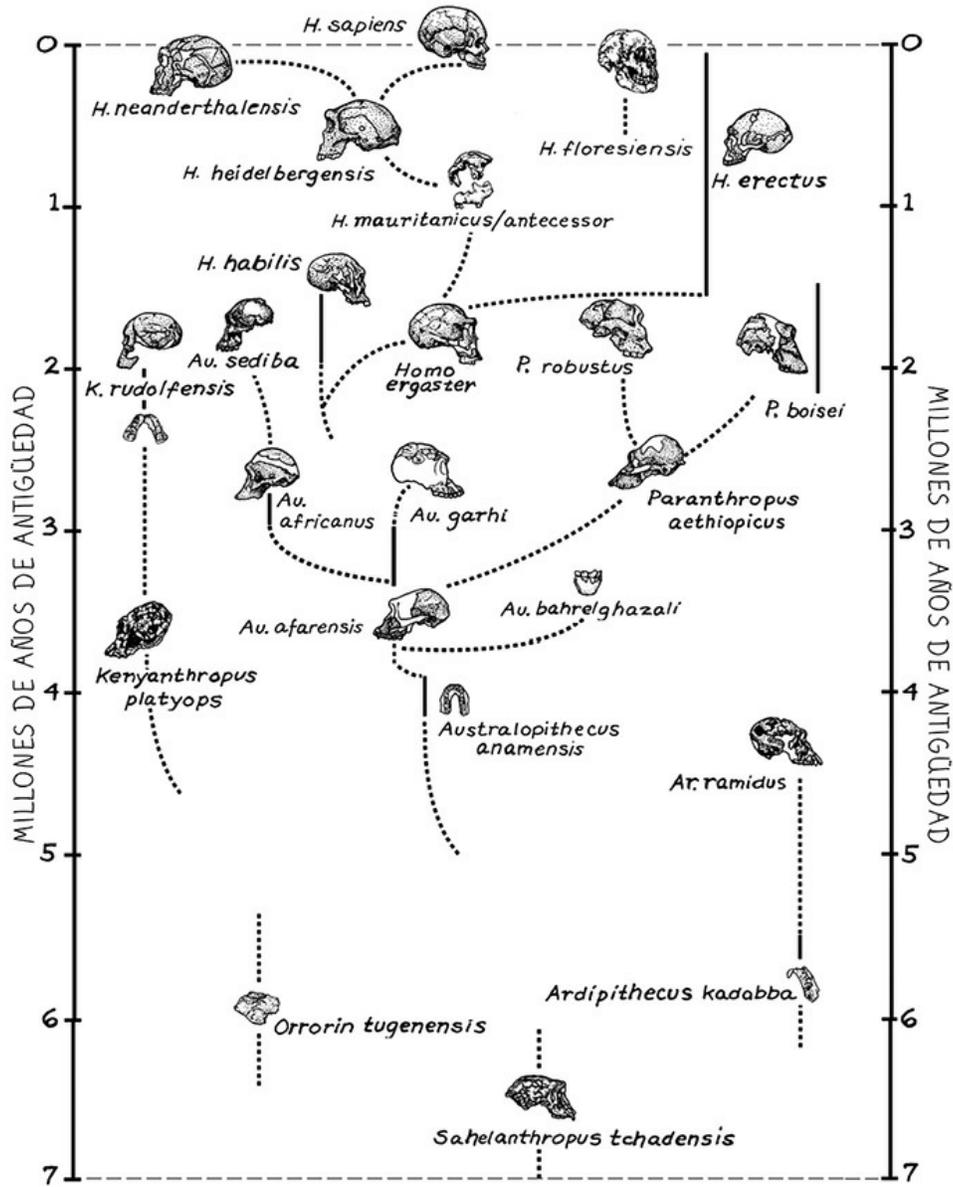
Al pasar mucho tiempo alejados de la protección que ofrecen las selvas, los macacos y los babuinos están sometidos a una fuerte depredación, y por lo tanto presentan muchas de las características generales de las especies depredadas. Ambos viven por seguridad en grupos grandes, con una cuidadosa disposición espacial, de forma que las hembras y sus crías estén en el centro, protegidas por una periferia de machos jóvenes más prescindibles desde el punto de vista reproductivo. También son especies que se «refugian» y buscan de noche, cuando los peligros son mayores, el cobijo de los riscos y los

árboles. No resulta descabellado pensar que los primeros homínidos, igualmente cercanos a un antepasado que viviera de forma más o menos exclusiva en los árboles, habrían respondido a su nuevo medio de un modo similar, viviendo y refugiándose en grandes grupos, dentro de los que las interacciones entre individuos habrían sido tanto extensivas como intensivas. Un medio social de este tipo habría premiado la capacidad cognitiva para captar los llamados «niveles superiores de intencionalidad» (la capacidad de un individuo para comprender que otro individuo es consciente del estado mental de un tercero, y así sucesivamente). Cuanto más grande y complejo sea el grupo, más ventajoso resulta ser capaz de leer y predecir lo que ocurre en las mentes de otros miembros del grupo. Los especialistas han argumentado hasta la saciedad el grado en que los simios exhiben los rudimentos de esta habilidad, que el *Homo sapiens* ha llevado en la actualidad a su máxima expresión, pero, en cualquier caso, quizá podamos buscar los primeros indicios de esta extraordinaria capacidad cognitiva en el sin duda complejo grupo de los primeros homínidos.

#### «SIMIOS BÍPEDOS»

Poco después de la aparición de *Ardipithecus ramidus* comenzamos a encontrar rastros de los primeros homínidos sobre quienes podemos afirmar conocer muchas cosas. Estos son los australopitecos, miembros del género *Australopithecus*, y las formas estrechamente relacionadas con él, que prosperaron en África desde hace cuatro millones de años hasta hace un millón de años, aproximadamente, como resulta evidente por el árbol familiar de la ilustración. La especie más primitiva es *Australopithecus anamensis*, de la que se sabe que vivió en Kenia, y quizá en la cercana Etiopía, hace entre 4,2 y 3,9 millones de años. Esta especie, sólo un poco más joven que *Ardipithecus ramidus*, constituye un predecesor mucho más apropiado para los australopitecos posteriores que *A. ramidus*. Una tibia rota, con porciones de la rodilla y el tobillo, confirma más allá de toda duda razonable que era un bípedo erecto, y lo que es más, a pesar de ciertas diferencias *Australopithecus*

*anamensis* presenta un parecido reconfortante en lo que se sabe de sus dientes y mandíbulas con la especie inmediatamente posterior, *Australopithecus afarensis*, a la que pertenece *Lucy*, probablemente el fósil más famoso que se haya encontrado.



Árbol familiar provisional de los homínidos, en el que se sugieren algunas relaciones posibles entre especies y se muestra cómo han coexistido numerosas especies de homínidos hasta la aparición del *Homo sapiens*. Diagrama de Jennifer Steffey, © Ian Tattersall.

*Lucy* es un esqueleto parcial de un individuo muy pequeño que vivió hace aproximadamente 3,2 millones de años y que en vida apenas superaba el metro

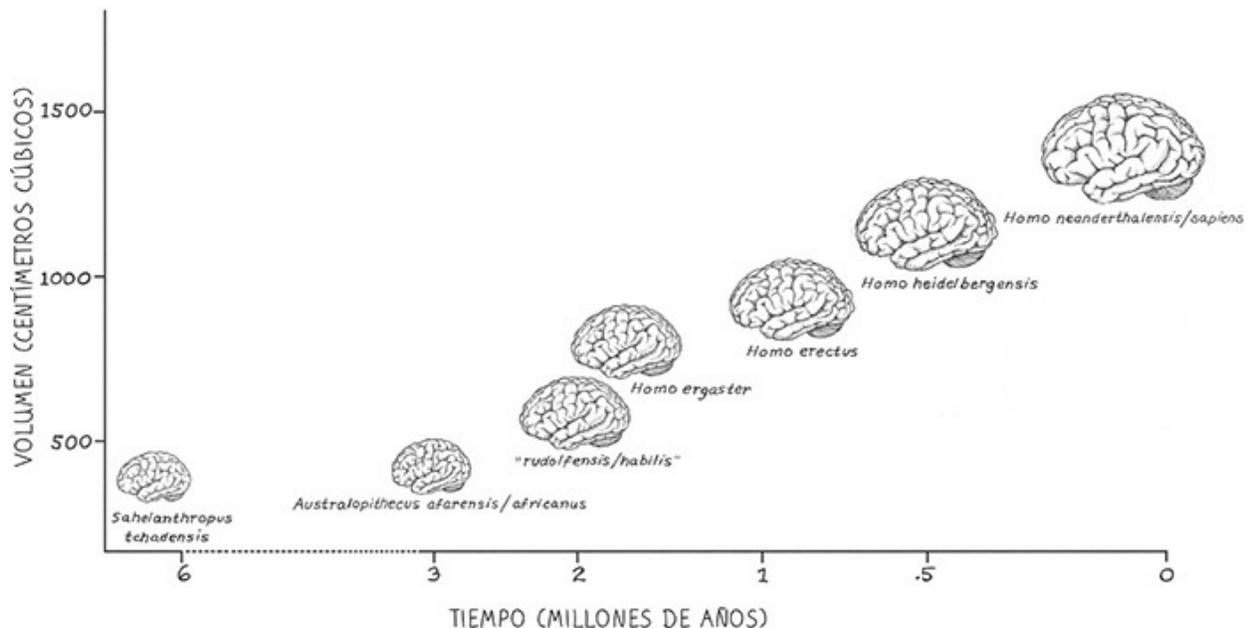
de altura. Descubierta en unos depósitos etíopes procedentes de un río que serpenteaba a través de un mosaico de hábitats que iban desde la selva hasta los bosques y la sabana, *Lucy* se ha visto complementada, tanto aquí como en otras partes de África oriental, por cientos de fósiles, desde dientes aislados hasta cráneos más o menos completos, que nos proporcionan una imagen incomparable de lo que era una especie homínida en aquella época tan alejada de la nuestra.

¡Y qué imagen! En lo que se refiere a las características de su dentadura y a su bipedalismo, no hay duda de que *Australopithecus afarensis* era claramente un homínido, pero no era simplemente una versión nuestra de cuerpo más pequeño. Esta especie andaba erecta, aunque su bipedalismo no llegaba al grado del nuestro. *Lucy* y sus parientes tenían las piernas mucho más cortas y las pelvis más anchas que las nuestras, y se moverían de un modo mucho menos eficiente en terreno abierto a pesar de sus pies que, aun siendo más bien alargados, eran no obstante apropiados para sujetar el peso en tierra. Y lo que ha desaparecido de forma radical son los pies prensiles de *Ardipithecus*. Pero al mismo tiempo estos australopitecos conservaban una serie de características que les habrían resultado muy útiles para moverse por los árboles: hombros estrechos con articulaciones móviles, cuerpos ligeros de brazos largos, manos con dedos largos, finos y curvados, ideales para agarrar ramas de árboles. Tenemos aquí una criatura perfectamente adaptada para explotar el mosaico emergente de los hábitats africanos, y para aprovecharse tanto de la protección que le ofrecían las selvas como de los nuevos recursos disponibles en los límites de la selva y en las zonas boscosas más abiertas.

Estos primeros homínidos no eran ni simios ni humanos, sino que habían conseguido un equilibrio sin precedentes entre lo viejo y lo nuevo, tanto en su estructura anatómica como en sus preferencias ecológicas. Esta estrategia vital, consistente en aprovecharlo todo, resultó ser una adaptación sorprendentemente estable y exitosa que proporcionaría la base para una amplia expansión –documentada por toda el África subsahariana– de las especies de australopitecos, expansión cuyo ímpetu no se frenaría hasta mucho después de la aparición de los homínidos de aspecto moderno. Evidentemente eran unos oportunistas resistentes, capaces de superar las oleadas sucesivas de

cambio ecológico.

Y, sin embargo, por encima del cuello el equilibrio entre lo viejo y lo nuevo no resultaba tan evidente. Los australopitecos mostraban (a veces de forma exagerada) las modificaciones de los dientes anteriores que hemos visto en sus predecesores y que anticipaban a sus sucesores, pero solían tener unos molares mucho más grandes que los de los simios o los humanos, y las proporciones de sus cajas craneanas eran claramente simiescas, sobresaliendo en ellas grandes rostros frente a bóvedas craneales que encerraban cerebros de tamaño modesto. Es lógico, por tanto, que los australopitecos reciban con frecuencia el nombre de «simios bípedos». Poseemos un buen registro de moldes endocraneales de estos primeros homínidos: de hecho, el primer australopiteco que se descubrió fue un rostro juvenil unido a un molde natural de un cerebro, y la forma del cerebro proporcionó al neuroanatomista que lo describió por primera vez la pista sobre la condición de homínido de su propietario.



Un diagrama que muestra el aumento del tamaño cerebral medio de los homínidos a lo largo de los dos últimos millones de años, después de no experimentar ningún cambio durante una fase inicial aproximada de cinco millones de años. Diagrama de Gisselle Garcia.

Los cerebros de los australopitecos tienen aproximadamente la forma de un pomelo, y su capacidad puede variar desde los 310 cc hasta incluso los 575

cc. Se cree que los más grandes pertenecían a miembros más corpulentos de la especie, aunque la escasez de esqueletos en buenas condiciones hace difícil que se pueda demostrar con seguridad. Desgraciadamente, no disponemos de los suficientes fragmentos del cráneo de *Lucy* para poder realizar un cálculo realista del tamaño de su cerebro, pero a primera vista no parece probable que, como se puede apreciar en la ilustración, ninguna especie de australopiteco tuviera un cociente de encefalización (EQ, por sus siglas en inglés, una cifra que refleja la relación entre el tamaño del cerebro y el del cuerpo) significativamente diferente del de un bonobo. De hecho, con uno de los sistemas de cálculo se obtienen idénticos EQ en el *Australopithecus afarensis* y en los bonobos, 2,44, aunque los de australopitecos posteriores suelen ser algo mayores (y los de los chimpancés normales algo más bajos). Pero si en vez de ello, estudiamos el cerebro propiamente dicho, la historia cambia un poco.

El rasgo del cerebro del que se dedujo que los australopitecos eran parientes de los seres humanos fue la posición del surco semilunar, una cisura situada en la parte lateral del lóbulo occipital que señala el frente del área visual. Este pliegue, por lo general muy marcado en los cerebros de los simios, resulta más difícil de identificar en los seres humanos: cuando se puede ver, está situado más hacia el interior que en los primeros. Ello indica una reducción en el área superficial de nuestro córtex visual primario en relación al cerebro en su conjunto, si bien no implica, por supuesto, una reducción absoluta, dado el gran tamaño de nuestros cerebros. En el primer molde endocraneal de australopiteco se describió un surco semilunar situado hacia atrás, muy similar al de los seres humanos, lo cual desencadenó una discusión que se prolongó durante tres cuartos de siglo, debido en parte quizá a la pobre definición de los surcos en esa región del molde antiguo. En la actualidad, y basándonos en nuevas pruebas, la interpretación original parece haber sido reivindicada, y confirma indicios procedentes de estudios comparativos sobre la importancia de la reorganización del sistema visual en la evolución humana.

La época a la que se remontan los australopitecos sugiere, por supuesto, que esta tendencia tuvo un inicio temprano. De acuerdo con los

neurocientíficos, estas modificaciones reflejan una mejora en la capacidad de los homínidos para analizar estímulos visuales que se movieran rápidamente, lo cual parece razonable. En cambio, la otra teoría, más específica, según la cual podrían estar relacionadas con la descodificación del movimiento de los labios asociado al habla resulta inverosímil, si es que acaso esta tendencia existía entre los australopitecos, casi con certeza carentes de lenguaje.

La pobre definición de las cisuras cerebrales en los moldes endocraneales, junto con la agria naturaleza del debate sobre el surco semilunar, han actuado como elementos disuasorios de la especulación en profundidad sobre la presunta reorganización del cerebro entre los primeros homínidos. Existe, sin embargo, otra posible característica temprana de dicho proceso que ofrece un mayor grado de certeza: un aumento relativo del tamaño de la corteza parietal posterior. Esta región cortical integra informaciones procedentes de los sistemas visual, auditivo y somatosensorial (tacto) para colaborar en la planificación y ejecución de movimientos voluntarios deliberados, colaboración que una serie de trabajos nuevos ha aclarado. En respuesta a estímulos externos, es el área «premotora» de la corteza frontal la que genera la «necesidad» de moverse a partir de la cual actúa la corteza motora primaria; sin embargo, es la parte inferior de la corteza parietal posterior la que produce «representaciones sensoriales de las consecuencias predichas del movimiento». Así, esta última parece «participar en la experiencia de la intención consciente... [y]... contribuye a la sensación de que controlamos nuestras acciones». Es un componente esencial de nuestros sentimientos subjetivos de «libre arbitrio». Se desconoce el modo exacto en que este modesto aumento en el tamaño de dicha parte del córtex se habría expresado en los primeros homínidos, pero se ha especulado con todo tipo de posibilidades, desde la mejora en la capacidad de lanzar objetos a la creación de mapas mentales más detallados de las zonas que ocupaban, pasando por el reconocimiento facial. En cualquier caso, esta expansión por lo menos apunta, al igual que ocurría con la corteza visual primaria, al comienzo de la reorganización arquitectónica funcional (y a un aumento en la complejidad conductual) mucho antes de que el cerebro de los homínidos comenzara a expandirse.

## LA FABRICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE PIEDRA

Uno de los grandes problemas a los que nos enfrentamos a la hora de interpretar el patrón de la evolución del cerebro de los homínidos reside en la falta de un esquema taxonómico firme en el que podamos situar las observaciones que realicemos. Durante el último medio siglo, los paleoantropólogos han reconocido únicamente un número mínimo de especies, pero ahora admiten de forma prácticamente universal que es imposible disponer las especies homínidas fósiles que conocemos en una progresión ordenada que culmine en nuestro *Homo sapiens*. De hecho, la historia de nuestra familia es la de una dinámica exploración evolutiva del potencial de los homínidos, expresado al estilo de los australopitecos o al nuestro. Como resultado de todo ello, conocemos muchas especies fósiles de homínidos, pero no podemos especificar cuántas había o en qué épocas vivieron; tampoco sabemos el rango de tamaño de sus cerebros, y (como hemos mencionado con anterioridad) la variación en este rasgo dentro de la especie que sí conocemos (la nuestra) es enorme. Todo esto hace que resulte complicado saber cómo interpretar el hecho indiscutible de que, en algún momento hace aproximadamente dos millones de años, los cerebros de los homínidos comenzaron a expandirse tras haber permanecido esencialmente iguales durante varios millones de años. Los australopitecos habían logrado sobrevivir perfectamente con sus cerebros del tamaño de un simio y los repertorios conductuales que llevaran asociados, fueran los que fueran; y las pruebas de que el australopiteco más moderno tuviera un cerebro significativamente mayor o comportamientos más complejos que el más primitivo son, con una importante excepción, como mínimo débiles.

Esta excepción es la fabricación de herramientas de piedra, quizá la innovación más trascendental de la historia de los homínidos. Sin herramientas de piedra, se hallaban limitados esencialmente por los mismos factores que circunscribían la existencias de todas las demás especies de primates; con ellas, todo cambió. No sabremos nunca a quién se le ocurrió por primera vez la idea de hacer chocar dos trozos de piedra entre sí de la forma exacta

requerida para conseguir una lasca afilada y cortante. Las pruebas que poseemos ahora mismo son muy sugerentes, pero frustrantes al mismo tiempo. La primera prueba de que podría haberse descuartizado a un animal con estas lascas no proviene de las mismas lascas, sino de los huesos de animales que presentan unas incisiones profundas y estrechas del tipo de las que se sabe producen únicamente estas herramientas cortantes. Estos huesos marcados, de unos 3,4 millones de años de antigüedad, proceden de un lugar en Etiopía llamado Dikika, en el mismo río Awash donde se encontró a *Lucy*, pero en la orilla opuesta. Y es más: en Dikika también se han hallado huesos de *Australopithecus afarensis*, y esta es la única especie de homínido a la que con cierta lógica podemos atribuir el descuartizamiento. Por supuesto, y dado que las primeras herramientas de piedra que se conocen son aproximadamente un millón de años más recientes, se ha discutido la naturaleza de los cortes de Dikika, y es posible que sean el resultado de lascas afiladas naturales, no artificiales. Pero sin duda resulta significativo que el siguiente caso que se conoce, también en Etiopía, esté asimismo relacionado con un australopiteco fabricante de herramientas, en esta ocasión el *Australopithecus garhi*, un pariente cercano de *Lucy* de 2,5 millones de años de antigüedad. En este caso las pruebas son muy similares a las de Dikika, pero no se cuestionan tanto porque proceden de una época de la que se han encontrado herramientas de piedra en varios yacimientos de África oriental. Por lo tanto, tenemos la práctica certeza de que el primer fabricante de herramientas de piedra fue un australopiteco.

Lo más destacado de esta nueva práctica es el hecho de que, como hemos visto, la fabricación de herramientas de piedra constituye un avance indudable sobre cualquier cosa que un simio actual pueda hacer. A nosotros puede parecernos muy sencillo obtener una lámina afilada golpeando una piedra, pero en realidad estos objetos de aspecto tan poco llamativo son el resultado de una secuencia conductual compleja que supone identificar las rocas más apropiadas (la mayoría no lo son), transportarlas a distancias a menudo largas donde se ha anticipado su necesidad (porque lo más probable es que se descuartice a los animales donde no existan rocas adecuadas) y desplegar las habilidades tanto cognitivas como motoras necesarias para llevar a cabo la

fabricación de las herramientas y el posterior descuartizamiento (que posiblemente sea donde interviene la corteza parietal posterior). Independientemente de cuáles sean las otras correlaciones cognitivas de estas conductas, constituyen ya de por sí un salto enorme. Desde el momento que aparecieron las herramientas de piedra, las vidas de los homínidos, y su forma de observar el mundo que los rodeaba, cambió para siempre.

Pero aquí no importan únicamente las implicaciones directamente cognitivas de la fabricación de herramientas de piedra por sí misma: también hay que destacar los comportamientos que suponen el uso de estas herramientas. No se sabe si los primeros fabricantes de herramientas buscaban los cadáveres de los animales de gran tamaño que descuartizaban o los cazaban. La búsqueda de cadáveres no es una conducta habitual entre primates, pero los australopitecos eran criaturas de cuerpo pequeño no muy especializadas en la vida en espacios abiertos, y no se corresponden en absoluto con la imagen del poderoso cazador. Como hemos visto con anterioridad, se sabe que los chimpancés cooperan para cazar pequeños mamíferos, como por ejemplo los colobos y las crías de potamoqueros y antílopes, y resulta totalmente plausible que los australopitecos no sólo pudieran, sino que hicieran, algo similar. Pero incluso cuando comenzaron a usar las herramientas, sus primeros fabricantes descuartizaban cadáveres de animales de un tamaño que difícilmente habrían podido cazar. Por lo tanto, la conclusión más sencilla a la que se puede llegar es que capturaban pequeñas presas y se aprovechaban de la muerte por otras causas de los mamíferos grandes, si bien esta última actividad debía de entrañar ciertos peligros debido a la fuerte competencia por estos recursos entre los carnívoros profesionales. Se han encontrado numerosos huesos de australopiteco con marcas de dientes que demuestran que estos homínidos primitivos se convertían con cierta frecuencia en la cena de los leopardos y las hienas. Es posible que aquí interviniera su habilidad para lanzar objetos, implícita quizá en sus cortezas parietales posteriores ampliadas, tanto para protegerse como para lanzar rocas con las que alejar de la presa a los depredadores más fuertes.

En cualquier caso, cada vez aparecen más pruebas de que una parte

importante de la ingesta alimenticia de los australopitecos (incluso de aquellos cuyos poderosos dientes trituradores parecerían indicar una dieta a base únicamente de plantas) estaba habitualmente constituida por proteína animal. Estas pruebas proceden de estudios para determinar la alimentación por medio de porcentajes de isótopos de carbono conservados en el esmalte de los dientes de australopitecos. En los tejidos vivos, el porcentaje entre los isótopos de carbono más ligeros y los más pesados viene determinado por la dieta, y las mayores diferencias se dan entre animales que ramonean y los que pastan. El esmalte de los dientes de los australopitecos presenta una concentración sorprendentemente elevada, correspondiente a los pastadores, y dada la imposibilidad de que los australopitecos la hubieran obtenido directamente comiendo hierba, es mucho más probable que en realidad comieran pequeños herbívoros pastadores, de quienes habrían tomado esta concentración. En este escenario, una de las víctimas potenciales preferidas de los científicos isotópicos es el damán, que abundaba en los hábitats frecuentados por el australopiteco.

La complejidad del estilo de vida tiene por supuesto importantes consecuencias para la cognición, pero en este caso quizá resulten más destacables las implicaciones energéticas de la alimentación a base de carne, dado que el cerebro es un órgano que requiere mucha energía. En el *Homo sapiens* el cerebro supone sólo un 2 % de nuestra masa corporal, pero gasta entre un 20 y un 25 % de toda la energía que consumimos, lo cual es muchísimo. Cuanto más grande es el cerebro, más energía gasta, por supuesto, y resulta inevitable que cualquier especie de primate que desarrolle un cerebro más grande encuentre alguna manera de pagarlo: el cerebro tendrá que reducir su consumo de energía, o su dueño tendrá que cortar el gasto en alguna otra parte. Parece ser que nuestros antepasados hicieron un poco de ambas cosas. Lo que sí sabemos con seguridad es que, sin un aumento en la calidad de su dieta, los homínidos no habrían podido embarcarse jamás en la trayectoria de expansión del cerebro que constituye una característica tan llamativa de la familia desde hace dos millones de años: en la evolución, para que la innovación progrese tienen que darse las condiciones necesarias. Un requisito previo de los cerebros más grandes era una dieta de mayor calidad

que la ingesta basada en frutas típica de los chimpancés que viven tanto dentro como fuera de su hábitat preferido, la selva. Por lo tanto, y basándonos solamente en las pruebas físicas, parece bastante probable que una dieta enriquecida con grasas y proteínas animales precediera tanto a la fabricación de herramientas de piedra como a la inflexión hacia arriba de la curva correspondiente al aumento del cerebro humano.

## LA PRESENTACIÓN EN SOCIEDAD

Se han descrito como «*Homo* primitivo» varios fósiles fragmentarios pertenecientes al medio millón de años transcurrido tras la aparición de las herramientas de piedra, hace aproximadamente 2,5 millones de años, aunque su derecho a este título es bastante dudoso y ninguno de ellos posee las suficientes piezas del cráneo como para poder deducir información alguna sobre sus cerebros. En este grupo se podrían incluir también los fragmentos de entre 1,8 y 1,6 millones de años de antigüedad procedentes de la garganta de Olduvai en Tanzania, que han recibido el nombre de *Homo habilis*; aunque se han atribuido a *Homo*, estos fósiles difuminan la diferencia entre los australopitecos y nuestro género. Sin embargo, dos millones de años después comenzamos a encontrar pruebas de nuevos homínidos que justifican su inclusión en el género *Homo*. No existe nada en el registro fósil que anuncie su llegada, y no son prueba de nada que podamos calificar como «transición» entre ningún *Australopithecus* y *Homo*: por el contrario, parece más verosímil atribuir la aparición de nuestro género a una importante reorganización del desarrollo a corto plazo debida a un cambio en la regulación génica.

Los primeros fósiles que podemos asignar con certeza al género *Homo* proceden de Kenia, y el mejor conservado es una hermosa caja craneana completa (sin la mandíbula) con una capacidad interna de 850 cc. Esto constituye un importante aumento de tamaño comparado con cualquier australopiteco, y el mismo cráneo tiene un aspecto mucho más moderno, con un rostro y un paladar considerablemente menores y una bóveda más elevada. Desgraciadamente, carecemos de los huesos del esqueleto correspondiente

que nos pudieran demostrar la relación entre el tamaño del cerebro de este individuo y el corporal; pero, tomado en conjunto con otras pruebas, nos confirma que la tendencia de los homínidos a un tamaño relativo grande del cerebro ya se había puesto en marcha hace 1,8 millones de años. Si bien a algunos tradicionalistas les gusta adjudicar este espécimen a la especie *Homo erectus*, descrita a partir de un fósil muy posterior procedente de Java que en el siglo XIX adquirió la categoría de la forma primitiva de *Homo*, hoy en día se considera mucho más probable que pertenezca a la especie *Homo ergaster*. Y, sin duda, el miembro más conocido de esta especie es el «niño de Turkana», un esqueleto masculino adolescente casi completo procedente del norte de Kenia y con una antigüedad aproximada de 1,6 millones de años. Este maravilloso espécimen nos proporciona la oportunidad sin igual de observar la existencia de los homínidos en el momento en que, por primera vez, se lanzaban a la vida en el ambiente de la sabana que durante aquella época aparecía y se extendía por África.

El niño de Turkana supone un contraste total con los «simios bípedos». Dado que ya no intentaba minimizar los riesgos, el adolescente era alto, delgado y de miembros largos, perfectamente aclimatado a la vida lejos del cobijo de las selvas. Las adaptaciones para trepar de los australopitecos habían desaparecido, sustituidas por unas proporciones corporales que en esencia eran como las nuestras. Resulta llamativo que, a pesar de que cuando murió –en lo que correspondería a la fase de desarrollo de un adolescente moderno de catorce años– el chico había alcanzado ya prácticamente el tamaño de su cuerpo adulto, sólo había vivido ocho, lo que supone una maduración mucho más rápida que la de cualquier chico moderno. Esta infancia limitada tiene implicaciones para la cognición en el *Homo ergaster*, dado que la infancia prolongada (y el periodo de indefensión) del *Homo sapiens* proporciona más tiempo para el aprendizaje y la absorción de información esencial para la vida económica y social.

En su caso, el tamaño del cerebro del niño de Turkana, de aproximadamente 900 cc, era prácticamente el que habría alcanzado si hubiera sobrevivido hasta la madurez, y dado que poseemos su esqueleto, podemos afirmar con seguridad que su EQ mostraba un claro aumento con respecto a

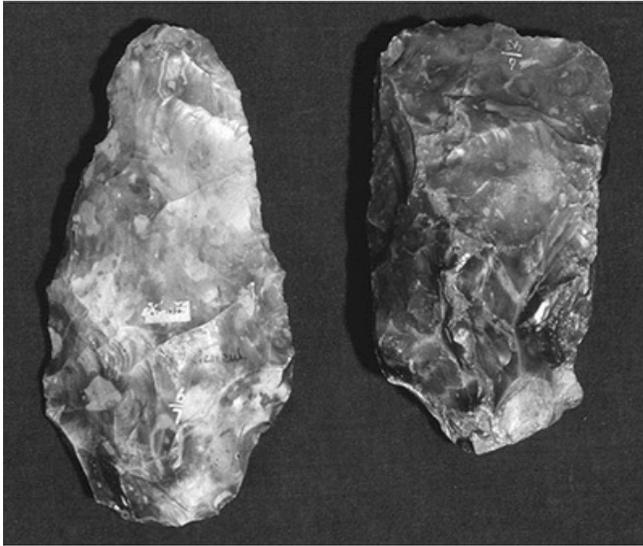
cualquier cifra que se haya podido obtener de los australopitecos: dependiendo de cómo se haga el cálculo (la estimación oficial es 4,48), el EQ del niño de Turkana es algo más del doble del del *Australopithecus afarensis*, aunque sigue siendo aproximadamente la mitad del del lector o del nuestro. A los científicos que estudiaron su molde endocraneal les impresionó la presencia de una «concauidad de Broca» más grande, esa área en la superficie del lóbulo frontal izquierdo asociada tradicionalmente con la producción del habla en los seres humanos modernos. Por sí solo, esto podría sugerir el origen al menos del potencial para el habla, pero los que describieron el esqueleto observaron que la parte torácica del foramen intervertebral (el tubo óseo a través del cual pasa la médula espinal para distribuir los nervios por el cuerpo) era bastante estrecha, lo que les llevó a pensar que tenía menos nervios que controlaran la zona del pecho. Y ello a su vez supone que carecía del delicado control de la respiración del que dependemos para producir los sonidos del habla. Pero hoy en día se cree que el área de Broca se ocupa del control motor fino de la mano derecha y de los componentes del aparato vocal, más que del habla específicamente, por lo que en ese caso resultaría verosímil que el aumento de esta área cortical que aparecía expresado en el molde del niño de Turkana estuviera asociado sobre todo con la destreza y el buen control motor de la mano derecha. Las probabilidades de que esto fuera así aumentan al comprobarse las notables asimetrías entre los dos hemisferios del cerebro, del tipo de las que se asocian en seres humanos con los diestros.

Esto quizá no debería sorprendernos, ya que los arqueólogos experimentales han demostrado que, desde el inicio, los fabricantes de herramientas de piedra eran habitualmente diestros, no zurdos. Lo que puede resultar más sorprendente es el hecho de que no surgieran nuevos tipos de herramientas en coincidencia con la aparición del nuevo y perfeccionado modelo de homínido que representaba el niño de Turkana. A pesar de sus cerebros más grandes y de otras innovaciones físicas, el niño de Turkana y los otros miembros de su especie continuaron tallando toscas herramientas para cortar y machacar más o menos idénticas a las que sus predecesores, de proporciones más arcaicas, habían estado haciendo durante más de un millón de años. Hubo que esperar a hace un millón y medio de años para que se

adoptara de forma generalizada un nuevo concepto en la fabricación de herramientas de piedra, aunque un artículo reciente lo fecha antes, hace 1,78 millones de años. Esta innovación fue el hacha de mano o bifaz, un instrumento más grande (habitualmente de 20 centímetros o más de longitud) que se trabajaba minuciosamente por ambos lados hasta conseguir un forma estándar simétrica de lágrima. Estas herramientas se producían en enormes cantidades, a veces en «talleres» situados junto a depósitos de piedra de calidad excepcional.

Tanto en el bifaz como en su proceso de fabricación se puede apreciar un inmenso salto conceptual. Los primeros fabricantes de herramientas de piedra sólo buscaban un atributo, el filo cortante, pero evidentemente no les importaba el aspecto de las lascas que obtenían. En cambio, con las hachas de mano se aprecia el deseo de imponer una forma al mundo exterior, así como la utilización de una serie compleja de procedimientos para obtener un modelo que había existido en la mente de su autor antes de que comenzara a tallar. Además, la existencia de los yacimientos de los talleres representa un poderoso indicio de un cierto grado de especialización económica, así como de la diferenciación de los roles sociales. Desgraciadamente, sólo poseemos atisbos de todo ello, dado que carecemos de pruebas materiales de los cambios y posibles aumentos de complejidad en las vidas de los fabricantes de los bifaces.

La nueva manera de observar el mundo que representaba el bifaz fue posible gracias al aumento del cerebro del *Homo sapiens* y a la mejora en las habilidades motoras que ello supuso, pero es evidente, dado el prolongado retraso en la invención de la nueva tecnología, que no fue dictada por estas nuevas adquisiciones. Como cualquier otra tecnología nueva, el hacha de mano tuvo que ser inventada por homínidos que ya poseyeran los recursos cognitivos para concebirla y ejecutarla; dicho de otra manera, el potencial para este nuevo comportamiento tenía que existir *antes* de que se concretara, en un contexto «exaptativo» más que «adaptativo», como algo simplemente *disponible* para darle, o no, un nuevo uso.



Un bifaz (izquierda) y un cuchillo procedentes del yacimiento achelense de Saint-Acheul, en Francia. Fotografía de Willard Whitson.

Este concepto nos lleva de nuevo al papel del azar en el proceso evolutivo, y nos ayuda a entender un patrón que se repite en la evolución cognitiva de los seres humanos: la aparición de un nuevo tipo de homínido no explica nunca por sí sola el origen de una nueva conducta o tecnología. Esto fue aplicable desde el comienzo del proceso, ya que la clase de simios bípedos que fabricaron por primera vez herramientas de piedra existía hacía mucho tiempo, y subraya un hecho importante: la evolución de la cognición humana no se ha producido de forma gradual y progresiva a lo largo de los eones, sino que ha consistido en un conjunto aleatorio de adquisiciones biológicas, obtenidas de forma esporádica a lo largo de varios millones de años y cuya ventaja competitiva sólo se descubre retrospectivamente. Ello contribuye en gran manera a explicar el aspecto «desordenado» de nuestros cerebros humanos modernos, algo que tratamos en profundidad en capítulos anteriores.

## LA APROPIACIÓN DEL VIEJO MUNDO

Mucho antes de que apareciera en escena el bifaz –de hecho, sólo poco después del surgimiento de *Homo ergaster*– se había producido otro acontecimiento crucial: los homínidos se extendieron por primera vez más allá

de las fronteras de África, el continente que les había visto nacer. La primera prueba fiable que tenemos de ello procede de la inesperada localidad de Dmanisi, en la República de Georgia, entre los mares Negro y Caspio. En los sedimentos de agua dulce de este lugar, depositados por una colada de lava hace aproximadamente 1,8 millones de años, se ha obtenido un conjunto extraordinario de fósiles homínidos de esta época, así como abundantes artefactos primitivos, en su totalidad lascas cortantes y las piedras a partir de las cuales se obtuvieron. Por tanto, quizá no nos debería sorprender que los cuatro cráneos procedentes de Dmanisi que se han descrito hasta ahora exhiban cerebros muy pequeños, con tamaños que van desde los 600 a los 775 cc. Todavía no se han descrito sus moldes endocraneales, pero un par de esqueletos parciales sugieren que estos homínidos eran considerablemente más bajos que el niño de Turkana, aunque los huesos parecen apuntar a una estructura corporal relativamente moderna. Resulta por ello verosímil la hipótesis de que la expansión de los homínidos más allá de África fue posible gracias a la aparición de la forma corporal básicamente moderna, y se vio facilitada por la extensión de hábitats más abiertos en Asia occidental, al igual que estaba ocurriendo en África durante ese mismo periodo. Los cráneos de Dmanisi tienen un aspecto extrañamente primitivo, y es posible que correspondan a los descendientes de los primeros emigrantes africanos del género *Homo* de cuerpo moderno, si bien se suelen adjudicar al *Homo erectus* en su interpretación más amplia (lo que no es más que una manera muy útil de evitar un posible problema taxonómico).

En lo que se refiere al comportamiento, resulta curioso comprobar que uno de los homínidos de Dmanisi, un varón anciano, había perdido prácticamente todos sus dientes antes de morir. Cuando un individuo pierde un diente, el hueso de la mandíbula donde se alojaba su raíz acaba perdiéndose también, en un proceso que puede durar mucho tiempo, y dado que a este individuo le quedaba muy poco hueso con el que sujetar las raíces, sabemos que carecía de dentadura mucho antes de morir. Esto ha llevado a pensar que podría haber necesitado la ayuda de sus compañeros para procesar la comida que tomaba; aunque no hay forma de comprobarlo, la falta de dientes sugiere con fuerza la existencia de un apoyo social, lo cual a su vez supone unos poderosos

sentimientos de empatía, y posiblemente también una complejidad considerable en la organización social de los homínidos de Dmanisi.

Poco tiempo después de la época de Dmanisi los homínidos se habían expandido ya hasta Asia oriental, donde se ha comprobado la presencia del *Homo erectus* hace por lo menos 1,6 o 1,7 millones de años. Lo que sabemos de estos pobladores y sus cerebros no añade mucho a lo que sabemos del *Homo ergaster* en África, donde hallazgos esporádicos del periodo comprendido entre hace 1,5 y un millón de años parecen apuntar a que el tamaño del cerebro de los homínidos seguía aumentando de forma moderada. No sabemos exactamente qué quiere decir esto, en parte debido a las deficiencias de nuestro esquema taxonómico actual. Como hemos visto, si se representa el tamaño del cerebro de los homínidos en relación al tiempo, la curva permanece prácticamente plana hasta hace aproximadamente dos millones de años, cuando su inclinación aumenta de forma drástica. Hace dos millones de años, los cerebros tenían más o menos el tamaño del de los simios; hace un millón de años su tamaño se duplicó, y hace aproximadamente doscientos mil años se volvió a duplicar. Resulta tentador unir los puntos con una línea recta que dé a entender un incremento inexorable en el linaje de los homínidos desde hace dos millones de años, pero también sabemos que existe una gran variedad anatómica entre los homínidos de este periodo, y que el hecho de agrupar toda esta diversidad en una única especie, *Homo erectus*, como les gusta hacer a muchos paleontólogos, resulta casi con seguridad engañoso.

Si, como nosotros, uno prefiere identificar varias especies de homínidos en este periodo, la imagen cambia mucho. Por lo que podemos deducir a partir de una muestra bastante irregular de cráneos de homínidos, en todo momento se observa un rango relativamente amplio de tamaños de cerebros. Si este rango se contempla a través de la lente de la diversidad de especies, adquiere mucha más fuerza la hipótesis del aumento medio del tamaño del cerebro en miembros de la familia de los homínidos debido a la ventaja competitiva de las especies de cerebro más grande, y no la que propone un aumento del cerebro inexorable en un único linaje central.

Hasta que el panorama taxonómico no se resuelva de forma satisfactoria

para todo el mundo, no habrá forma de saber cuál ha sido el patrón real de aumento del tamaño del cerebro de los homínidos durante los últimos dos millones de años. Pero, sin duda, es importante el hecho de que *podamos* demostrar que los cerebros aumentaron de tamaño en por lo menos tres linajes independientes (el longevo grupo de *Homo erectus* en Asia, así como los linajes que llevan hasta los neandertales en Europa y al *Homo sapiens* en África: de estos dos últimos grupos volveremos a hablar muy pronto). El hecho de que el aumento de tamaño se produjera de forma independiente en todos estos linajes, y quizá en alguno más, sugiere con fuerza que había algo en la pertenencia al género *Homo* que contribuyó de forma decisiva a que sus miembros estuvieran predispuestos a este aumento. Ese algo puede estar relacionado con el estilo de vida general que apareció hace aproximadamente dos millones de años en las sabanas africanas en expansión, donde tenemos la práctica certeza de que los homínidos eran a la vez cazadores y presas; pero, sean cuales sean los elementos comunes, tendremos que identificarlos antes de pretender comprender en su totalidad nuestra evolución neural y cognitiva.

#### EL PRIMER HOMÍNIDO COSMOPOLITA

El panorama evolutivo –que no el cognitivo– comienza a aclararse un poco hace aproximadamente seiscientos mil años, cuando empezamos a encontrar fósiles de la primera especie de homínido indiscutiblemente cosmopolita, *Homo heidelbergensis*. Esta especie, cuyo nombre se debe al primer miembro que se conoció (también el más antiguo, como se sabe ahora), se ha descubierto en yacimientos del este y el sur de África, en Europa y en China, por lo que cubre la mayor parte del Viejo Mundo habitable. La mayoría de estos yacimientos no están datados con precisión, pero algunos pueden tener sólo 200.000 años de antigüedad. En lo que se refiere a la estructura del cráneo, *Homo heidelbergensis* anticipaba el futuro en un grado mucho mayor que *Homo ergaster*, y a pesar de que su esqueleto facial era bastante grande, tenía un cerebro significativamente más grande que el de sus predecesores. Los moldes endocraneales que se han podido medir oscilan entre los 1.150 y

los 1.325 cc; todos ellos están en el rango del *Homo sapiens*, y el más grande no se encuentra muy por debajo de la media actual. Por tanto, los EQ se acercan a los valores modernos, y el valor medio de la especie se sitúa por encima del 80 % de la media actual.

Los paleoneurólogos han preferido fijarse en las similitudes, y no en las diferencias, de los moldes endocraneales de *Homo heidelbergensis* con los modernos, quizá porque no saben con seguridad lo que pueden indicar esas diferencias, si es que indican algo. Todos los moldes de esta especie que se han descrito hasta ahora poseen áreas de Broca expandidas, pero en los demás aspectos, aparte de los datos habituales, como las asimetrías cerebrales y unos lóbulos frontales por lo general anchos y planos, la literatura es muy decepcionante y no ofrece prácticamente información. Aquí es donde nuestra falta de conocimientos sobre la organización interna de las distintas zonas corticales visibles en los moldes endocraneales se convierte en algo muy frustrante: cuanto más grande es el cerebro de nuestros parientes fósiles, y cuanto más cercano es su aspecto al nuestro, más difícil nos resulta especular sobre las posibles diferencias cognitivas basándonos en la forma exterior. Así, en el caso del *Homo heidelbergensis* nadie parece saber qué nos indican características como la forma exacta de los lóbulos frontales. ¿Tenían estos homínidos lo que tenemos nosotros, sólo que en un porcentaje más bajo? ¿Eran sus cerebros diferentes en algún aspecto cualitativo, como su estructura interna o su funcionamiento? Después de todo, estaban albergados en cajas craneales de aspecto considerablemente diferente. ¿O lo que vemos no representa diferencias estructurales significativas? Las respuestas a estas preguntas no se encontrarán en los moldes endocraneales, por lo menos no en esta etapa de nuestra capacidad para interpretarlos. Ello significa que el único camino a nuestro alcance para desarrollar una imagen de cómo eran en realidad el *Homo heidelbergensis* y sus parientes extinguidos posteriores, en cuanto seres activos desde el punto de vista cognitivo, es estudiar el registro material que nos queda de su comportamiento. Afortunadamente, este registro es bastante sugerente.

Los registros arqueológicos asociados a los primeros fósiles conocidos del *Homo heidelbergensis* decepcionan por su escasez, y allí donde existen

son bastante insignificantes, pero es, sin embargo, durante la etapa de *Homo heidelbergensis* cuando comenzamos a encontrar pruebas de interesantes adiciones al repertorio conductual de los homínidos. Entre ellos se cuentan los primeros indicios de casas construidas de forma deliberada, desgraciadamente (para nosotros) sin restos fósiles de sus ocupantes. En un lugar llamado Terra Amata, en la costa mediterránea de Francia, se excavaron los restos de un campamento en la playa, ocupado de forma estacional, cuya antigüedad se remonta a hace cuatrocientos mil años. Entre las características del lugar se cuentan lo que parecen ser los cimientos de varias cabañas grandes, como indican los grandes anillos ovales de piedras utilizados para reforzar las filas de plantones de sauce clavados en la tierra. Se cree que la parte superior de los plantones se unía para crear un espacio cerrado y que las interrupciones en las filas de piedra indicaban entradas a las chozas. Dentro de éstas se hacía fuego en hogares cavados en la tierra, como demuestran los cantos y los huesos animales ennegrecidos.

Esta prueba de la domesticación del fuego, y de su uso para cocinar, era hasta hace poco tiempo uno de los registros más antiguos de estas actividades, pero en 2004 se informó de un yacimiento en Israel, de casi ochocientos mil años de antigüedad, que mostraba signos claros de la utilización repetida de hogares, tal como indicaban las espesas capas de carbono en los depósitos. Esto resulta curioso, ya que la domesticación del fuego debe de haber constituido un acontecimiento de gran importancia formativa para la vida de los homínidos, por lo que sorprende que semejante innovación no se extendiera rápidamente. Y sin embargo no se han encontrado todavía pruebas de la existencia de hogares en ningún lugar entre esa aparición temprana y el periodo de Tierra Amata, momento a partir del cual empiezan a aparecer pruebas del uso habitual del fuego. Sin embargo, el registro arqueológico es curiosamente selectivo, y algunos científicos creen que el compromiso del *Homo* primitivo con la sabana sólo fue posible gracias al control del fuego, con todas las implicaciones cognitivas que cualquiera puede imaginar. En ausencia de indicaciones indiscutibles del uso del fuego por parte de los homínidos antes de su aparición en Israel, las pruebas de esta hipótesis son inevitablemente circunstanciales, pero sin duda poseen aspectos atractivos.

Por un lado, la sabana abierta es un lugar peligroso para un homínido lento y relativamente indefenso, sobre todo de noche, cuando el fuego habría resultado de gran utilidad para disuadir a la gran variedad de depredadores que abundaban en ese hábitat. Por otro, dado que en la sabana existirían muchos menos recursos vegetales para los homínidos primitivos que en las selvas, estas criaturas dependerían en gran medida de las proteínas animales, más aún si se tienen en cuenta las exigencias energéticas de sus cerebros cada vez más grandes. Se ha argumentado que la necesidad de energía adicional podría haberse visto disminuida por lo menos en parte por una reducción compensatoria en los tejidos digestivos, igualmente costosos desde el punto de vista metabólico; en efecto, los indicios anatómicos nos dicen que los australopitecos tenían los grandes estómagos de los comedores de frutas, mientras que en los primeros *Homo* el tamaño del intestino se había reducido, como el nuestro hoy en día. Esta reducción física sólo podría haber funcionado aumentando el componente animal de la dieta, y en ausencia de un aparato digestivo especializado en la ingestión de carne, la mejor manera de hacer comestible la carne cruda habría sido cocinarla. En conjunto, es una teoría atractiva, pero no es menos cierto que seguimos sin hallar pruebas reales del uso rutinario del fuego hasta el periodo de Terra Amata y después.

Ese momento en el tiempo, hace cuatrocientos mil años, es asimismo el momento en el que encontramos las primeras pruebas de la fabricación de lanzas de madera en el yacimiento de Schöningen, en el norte de Alemania. Entramos, por supuesto, en un terreno delicado: la madera se conserva únicamente en condiciones excepcionales, y el desgaste característico de las herramientas de piedra nos ha demostrado que los homínidos llevaban mucho más tiempo cortando madera; además, como veremos, *Homo heidelbergensis* no es, en esta coyuntura crítica, el único candidato posible para la fabricación de estas herramientas. Sin embargo, las lanzas de Schöningen son excepcionales, más aún si se tiene en cuenta que se encontraron junto a los restos descuartizados de caballos. Varios de estos extraordinarios útiles, en su mayoría de más de dos metros de longitud, se conservaron en un turbera, y están cuidadosamente trabajados para darles la forma de jabalinas, con el peso concentrado en la parte delantera, por lo que se parecen más a una lanza

que a algo que se clavara directamente. Si es cierto que se *lanzaban*, ello da a entender que sus responsables se dedicaban a la compleja actividad –desde el punto de vista cognitivo– de la caza por medio de emboscadas, una sofisticada actividad que, en opinión generalizada, los homínidos no habrían inventado hasta mucho más tarde. Existen por supuesto, como siempre, complicaciones: las lanzas están afiladas, no rematadas con piedra, y se ha argumentado que, si se hubieran arrojado desde cualquier distancia, habrían rebotado inútilmente en cualquier mamífero de piel gruesa. Sin embargo, resultan igualmente sugerentes unas piezas de madera más modestas que parecen haber sido trabajadas como mangos para lascas de pedernal, lo que las convertiría en las herramientas compuestas más primitivas que se conocen y en prueba de otro avance conceptual más.

La siguiente innovación importante en lo que se refiere al trabajo de la piedra también se dio en el periodo de *Homo heidelbergensis*, y fue la invención de las herramientas por el método de «preparación del núcleo», que apareció en Europa hace aproximadamente trescientos mil años, si bien en ocasiones pueden incluso encontrarse variantes anteriores en África. Con este método se da cuidadosamente forma a un núcleo de piedra hasta que un golpe final separa una herramienta más o menos rematada, de forma predeterminada y con la ventaja de un filo continuo a su alrededor. Sin duda, una vez más estamos siendo testigos de un nivel de complejidad completamente nuevo, el que representa conceptualizar lo que se puede hacer con un trozo de piedra, innovación que encaja perfectamente con la imagen que nos vamos formando de la vida de los homínidos durante dicho periodo. Esta fue la era de las glaciaciones, en la que olas de frío extremo castigaron el hemisferio norte en intervalos aproximados de cien mil años, provocando el avance y posterior retirada de los casquetes polares. Debido a ello, los homínidos europeos y asiáticos tuvieron que enfrentarse a periodos intermitentes (y en ocasiones con oscilaciones muy rápidas) de un clima extremadamente frío, mientras que sus parientes del África tropical sufrían sequías y periodos de la misma inestabilidad climática. Al ser una especie distribuida por todo el Viejo Mundo, *Homo heidelbergensis* tuvo que afrontar una gama de condiciones ambientales excepcionalmente amplia, y está claro que la adaptación cultural a

los extremos debe haber formado parte del equipamiento utilizado por sus miembros para sobrellevarlo.

Y sin embargo, en todo el tiempo y el espacio que ocupó el *Homo heidelbergensis*, no dejó restos de artefactos o conductas que podamos interpretar convincentemente como simbólicos. A pesar de su indudable sofisticación a la hora de explorar y enfrentarse al mundo que lo rodeaba, no existe indicio alguno de que los miembros de esta especie procesaran información sobre éste como lo hacemos en la actualidad. Con ello no los estamos menospreciando: los procesos mentales intuitivos, no simbólicos, pueden dar lugar a respuestas complejas y matizadas a estímulos procedentes del ambiente, y no hay ninguna duda de que el *Homo heidelbergensis* era capaz de este tipo de respuestas. Seguramente sus capacidades cognitivas eran tan impresionantes como las motoras, pero por mucho que los paleoneurólogos traten de interpretar sus moldes endocraneales, no existe prueba alguna de que estos homínidos rehicieran el mundo en sus mentes. Esa peculiar aptitud no se había materializado todavía.

## NEANDERTALES Y CROMAÑONES

El *Homo neanderthalensis*, una especie diferenciada de homínido que vivió en Europa y Asia occidental en un periodo que va de los 200.000 a los 30.000 años de antigüedad, estaba todavía más dotado que el *Homo heidelbergensis*. Descendiente de un linaje europeo endémico cuyas raíces se remontaban a 600.000 años atrás (y que al parecer había coexistido durante un largo periodo con el *Homo heidelbergensis*, vencién-dole finalmente en la competición evolutiva), presumía de un cerebro tan grande como el nuestro: de hecho, los 1.740 cc del fósil de homínido con el cerebro más grande que conocemos pertenecen a un neandertal, y no a un *Homo sapiens* primitivo. Sus grandes masas neurales les proporcionaban un EQ que se ha calculado corresponde a más de un 99 % de su equivalente humano moderno, dado que por término medio eran algo más bajos pero más corpulentos de lo que somos hoy en día. No obstante, los grandes cerebros de los neandertales se alojaban en un cráneo

claramente diferente encaramado sobre un cuerpo de proporciones también características, prueba de un largo periodo de evolución independiente desde que su linaje y el nuestro compartieran un antepasado (probablemente africano) común.

A diferencia de la alta caja craneana abovedada del *Homo sapiens*, que se dobla para esconder un rostro pequeño bajo su frente, la del neandertal adulto es larga, ancha y baja, y el cerebro que se aloja en su interior adopta la misma forma. Una vez más, los paleoneurólogos no han observado nada en los moldes endocraneales que sugiera grandes diferencias funcionales, pero ya se ha demostrado que las discrepancias en la forma del cerebro adulto entre las dos especies son el resultado de trayectorias muy distintas en su desarrollo. Al igual que otros homínidos extinguidos, parece ser que los neandertales maduraban más deprisa que los niños modernos, limitando el tiempo del que disponían para desarrollar sus capacidades sociales y económicas. Pero en el caso concreto del cerebro, los seres humanos actuales se diferencian rápidamente en el desarrollo temprano postnatal.



Comparación de un esqueleto neandertal reconstruido (izquierda) con el de un ser humano moderno de estatura similar. Aparte de las diferencias en el cráneo, obsérvense sobre todo las estructuras de las regiones torácica y pélvica, muy distintas. Fotografía de Ken Mowbray.

Al parecer, los cerebros de los recién nacidos neandertales y los de los actuales compartían prácticamente la misma forma, lo que ayudaba a ambas especies a solucionar su problema común de hacer pasar las grandes cabezas de sus descendientes a través del canal del parto. Sin embargo, en su primer año de vida postnatal los bebés del *Homo sapiens* se apartan bruscamente del

patrón estándar de desarrollo que evidentemente conservaron los neandertales. En esta fase temprana, los bebés humanos experimentan, a medida que se alcanzan las proporciones craneales características modernas, una «globularización» muy rápida en la forma del cerebro. No se sabe exactamente qué ha podido significar esta diferencia ontogenética entre las dos especies en términos de desarrollo cognitivo, o en la organización de su cerebro adulto, pero una discrepancia tan característica en el desarrollo contribuye sin duda a subrayar el hecho de que el *Homo sapiens* ha adquirido muy recientemente una anatomía adulta completamente nueva, que le diferencia drásticamente de todos los demás primates, incluidos sus parientes más cercanos extinguidos.

Como resulta muy difícil interpretar las indudables diferencias en proporción entre los moldes endocraneales neandertales y los modernos, de igual tamaño, tenemos que abandonar la paleoneurología y buscar otro tipo de pruebas si queremos hacer inferencias sobre la forma en que los poseedores de estos cerebros veían y respondían al mundo. Afortunadamente, los neandertales nos han dejado abundantes vestigios de sus actividades; y lo que es incluso mejor, el hecho de que el *Homo neanderthalensis* y el *Homo sapiens* compartieran, aunque fuera de modo transitorio, la misma región del mundo nos permite adivinar algunos aspectos de las diferentes formas en que las dos especies se enfrentaron a circunstancias ambientales parecidas. Hay que destacar que, desde el punto de vista cognitivo, el *Homo neanderthalensis* era muy complejo, en sus comienzos posiblemente la especie homínida más dotada que hubiera existido hasta entonces. Los neandertales eran unos artesanos muy competentes, quizá los mayores expertos conocidos en la preparación del núcleo. En lo que se refiere a las capacidades motoras, lo tenían todo.

Poseía asimismo flexibilidad y recursos para explotar su hábitat o, más bien, sus hábitats, porque prosperó en una extensa zona que abarcaba Europa y Asia occidental durante un largo periodo en el que las condiciones climáticas fluctuaron enormemente. Los neandertales fueron, por lo menos en determinadas épocas y lugares, cazadores especializados en algunos de los animales más temibles de ese momento, entre los que se contaban el mamut lanudo y el rinoceronte lanudo; en otros sobrevivieron a base de recursos

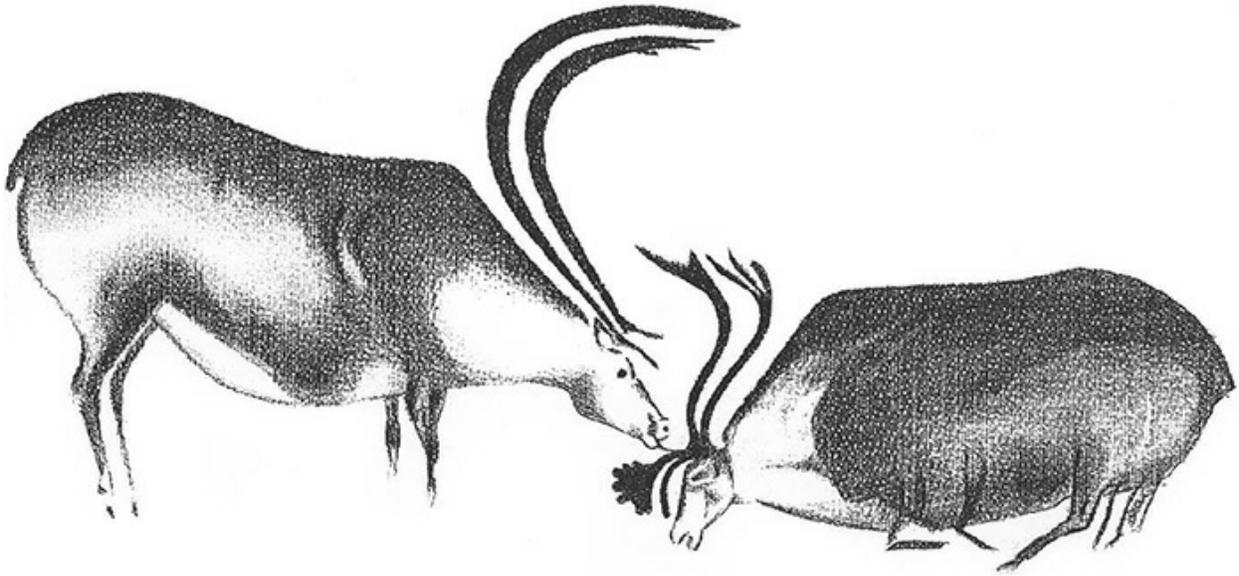
mucho más humildes. Enterraban a sus muertos, por lo menos ocasionalmente; construían refugios para protegerse de los elementos; utilizaban el fuego como parte de su rutina diaria, y no hay duda de que sus respuestas culturales frente a algunas condiciones ambientales de extrema dificultad fueron muy notables. La invención de la vestimenta debió de ser una de ellas, ya que se ha calculado que sin ella y otros accesorios culturales no habrían podido sobrevivir a las inclemencias del frío más severo de la última glaciación: para lograr esta hazaña añadiendo físicamente capas de grasa corporal subcutánea habrían tenido prácticamente que duplicar su peso corporal, algo imposible de realizar.

Pero, por muy impresionantes que resulten, estas compensaciones culturales se habrían podido alcanzar ejercitando una poderosa inteligencia intuitiva. Y, a pesar de todos sus indiscutibles logros, los neandertales no mostraron en ningún momento la chispa creativa que claramente animó las vidas de los cromañones, los modernos *Homo sapiens* que comenzaron a llegar poco a poco al corazón de la Europa de los neandertales hace aproximadamente cuarenta mil años. Hace unos diez mil años los neandertales habían desaparecido, y aunque se ha sugerido que las poblaciones de esta especie estaban ya en declive antes de la llegada de los cromañones, no es muy probable que esto fuera pura coincidencia. Resulta mucho más verosímil que la sustitución se debiera, por lo menos en parte, a las poco comunes cualidades de los recién llegados. Los neandertales se limitaban a hacer lo que habían hecho sus predecesores, quizá un poco mejor; evidentemente, no habían dado el salto cualitativo hasta las formas simbólicas de procesar la información que transformaron de una manera tan radical la relación de los cromañones con el mundo que los rodeaba.

Está claro que no podemos observar directamente la cognición simbólica en ninguna especie extinta: la debemos inferir a partir de las pruebas indirectas que *sí* se conservan en el registro real, y ello constituye sin duda un factor limitante respecto al alcance de nuestros conocimientos. Pero aunque muy pronto veremos que quizá es ir demasiado lejos afirmar que ninguna de las tecnologías de la era de las glaciaciones, por muy diestramente que se ejecutara, puede tomarse por sí misma como evidencia indirecta de los

procesos mentales simbólicos, no deja de ser cierto que una tecnología como la que poseían los neandertales no puede en absoluto aceptarse como prueba de ello. Por ejemplo, las herramientas del Musteriense de los neandertales poseen, cuando están bien trabajadas, una belleza tal que a algunas personas les cuesta trabajo creer que la tecnología necesaria para producirlas se haya podido transmitir a través de las generaciones en ausencia del lenguaje. Pero cuando unos investigadores japoneses intentaron enseñar a sujetos inexpertos (*Homo sapiens* simbólicos, por supuesto) a hacer estos objetos con y sin la ayuda de las explicaciones lingüísticas, descubrieron que el añadido del lenguaje no suponía diferencia alguna.

El resultado opuesto habría sido revelador, dado que el lenguaje es sin duda la actividad simbólica máxima, al llevar asociada la representación abstracta del medio en forma de un vocabulario de símbolos específicos, cuya recombinación en la mente es la fuente del proceso creativo de los seres humanos. Es la capacidad para crear así nuevas asociaciones mentales lo que nos convierte en las extraordinarias criaturas que somos, y los neandertales no dejaron prácticamente nada que pueda ser inequívocamente interpretado como un objeto simbólico. Recientemente se ha demostrado que la asociación con el *Homo neanderthalensis* de algunos objetos muy tardíos procedentes de un yacimiento en Francia, que parecen haber sido legítimamente interpretados como simbólicos y se consideraban obra, o por lo menos posesión, de los neandertales, es bastante dudosa. Si se restan estos elementos de la obra de los neandertales, no nos queda prácticamente nada que demuestre el simbolismo en esta especie.



Representación monocroma de una pintura rupestre policroma, en la actualidad muy descolorida, de aproximadamente veinte mil años de antigüedad, procedente de la cueva de Font-de-Gaume, en Francia. Un reno hembra se arrodilla frente a un macho que está inclinado hacia delante y le lame con delicadeza la frente. Dibujo de Diana Salles siguiendo una interpretación de Henri Breuil.

Incluso admitiendo los casos discutibles, una golondrina no hace verano, y no hay ninguna duda de que el simbolismo nunca fue una característica habitual de la vida de los neandertales, en ninguno de los múltiples lugares y tiempos que habitaron estos homínidos. Todo ello presenta un contraste radical con las vidas de los cromañones, que estaban literalmente impregnadas de simbolismo. Este fue el pueblo, moderno en todos sus aspectos, que hace aproximadamente treinta y cinco mil años (varios miles de años antes de la extinción de los neandertales) comenzó a crear las grandes pinturas de cuevas tan famosas de la era de las glaciaciones como Chauvet, Lascaux y Altamira, un arte tan poderoso y sofisticado como todo lo que se ha alcanzado desde entonces. Al mismo tiempo, los cromañones fabricaban instrumentos musicales, pequeñas tallas elegantes y a veces obscenas, grabados de animales delicados y perfectamente observados, y sistemas de notación registrados tanto en las paredes de las cuevas como en diminutas placas de hueso. Quizá resulta igualmente revelador de una nueva sensibilidad la aceleración súbita en el ritmo de la innovación. Con anterioridad, las innovaciones materiales destacadas estaban separadas por amplias extensiones de tiempo; ahora, las

tecnologías se sucedían a un ritmo cada vez mayor. Lo que esto parece reflejar es un enfoque totalmente nuevo en la forma de enfrentarse a los problemas de la vida. Hasta ese momento los homínidos solían utilizar las herramientas antiguas de nuevas maneras cuando se producían cambios en las circunstancias ambientales, pero ahora el *Homo sapiens* estaba reaccionando ante las nuevas exigencias inventando tecnologías completamente nuevas. Este cambio tenía amplias ramificaciones económicas: los neandertales no abundaban en su medio, mientras que los cromañones lo poblaron con mucha mayor densidad, claro indicio de que estaban explotando el paisaje que les rodeaba de una forma mucho más intensiva.

Todas estas innovaciones materiales de los cromañones representan una prueba contundente de la aparición de una sensibilidad completamente nueva: el surgimiento de una mente capaz de procesar estímulos del ambiente con un mecanismo sin precedentes. En resumen, el inmenso contraste entre los neandertales y los cromañones no refleja simplemente el tipo de diferencias que podría esperarse entre dos especies de homínidos promedio. En cambio, vemos un contraste entre cerebros que, a pesar de tener un tamaño idéntico, *funcionaban* de maneras fundamentalmente diferentes. Los cromañones no eran una simple mejora del patrón homínido más primitivo, sino que representaban un modelo cognitivo sin precedentes. Si estas diferencias pudieron estar relacionadas con las diferencias mínimas en las proporciones externas de su cerebro que los paleoneurólogos suelen despreciar, es algo que examinaremos en breve.

#### LA APARICIÓN DE LA CONDUCTA MODERNA

La nueva sensibilidad que vemos reflejada en el gran arte rupestre de la era glacial en Francia y España no se desarrolló en esos lugares: los cromañones lo trajeron con ellos, tras haberlo adquirido en otro lugar completamente distinto. Este otro lugar fue probablemente África, el continente que desde el comienzo había sido la principal fuente de innovación en la evolución de los homínidos.

Los fósiles más antiguos que tenemos con la marca de la característica morfología moderna proceden de los yacimientos de Omo Kibish y Herto en Etiopía. Se cree que un cráneo fragmentario de Omo Kibish tiene una antigüedad aproximada de ciento noventa y cinco mil años, mientras que una caja craneana de un adulto y otra de un niño procedentes de Herto datan con seguridad de hace 160.000 años. Ambas corresponden a formas de aspecto básicamente moderno, con rostros diminutos escondidos bajo cajas craneanas globulares y abovedadas, parecidas a las del *Homo sapiens*. Y a pesar de que no se han descrito sus moldes endocraneales, no hay duda de que los cráneos contenían cerebros de proporciones externas completamente modernas: el adulto de Herto tenía, según los datos publicados, un volumen craneal de 1.450 cc, holgadamente por encima de la media actual. Estos fósiles, considerados en conjunto, proporcionan las pruebas de la aparición de los homínidos con una anatomía totalmente moderna en un periodo bastante alejado en el tiempo y, sin embargo, a pesar de todas sus innovaciones anatómicas, los hallazgos arqueológicos asociados a ellos resultan de una sorprendente mediocridad: lascas de piedra «anodinas» en el caso del espécimen de Omo y algunos de los últimos bifaces africanos conocidos en el caso de Herto. Independientemente del aspecto o potencial del cerebro de estos individuos, no parecen presentar novedades detectables en su forma de trabajar.

Lo mismo se puede decir de la primera aparición conocida fuera de África del anatómicamente diferente *Homo sapiens*. Ésta se dio en Israel, donde numerosos yacimientos atestiguan la presencia, por lo menos intermitente, tanto del *Homo neanderthalensis* como del *Homo sapiens* durante los 100.000 años que precedieron al último registro encontrado allí de un neandertal, que data de hace poco más de cuarenta mil años. En el yacimiento de Jebel Qafzeh se han hallado los restos de un individuo anatómicamente moderno, de aproximadamente cien mil años de antigüedad, asociados de forma inequívoca a un juego de herramientas musterienses que eran, de hecho, idénticas a las que los neandertales estaban fabricando en la misma región. Lo que es más, un estudio en profundidad del Musteriense fabricado por las dos especies en Israel no ha permitido descubrir pruebas sólidas de ninguna diferencia

funcional entre los dos juegos. Al parecer, durante todo el largo periodo en el que lograron compartir el paisaje levantino, los neandertales y los homínidos modernos se comportaban de un modo muy similar. Esto contrasta mucho con lo que vemos en Europa, donde los humanos modernos de comportamiento diferenciado sustituyeron a los neandertales en el plazo de unos pocos miles de años, y apunta con fuerza a la hipótesis de que el *Homo sapiens* logró su «ventaja» sólo cuando alcanzó la modernidad conductual.

Muchos expertos consideran ahora –en parte debido a estos datos– que el primitivo *Homo sapiens* israelí representa una primera incursión «fallida» fuera del continente de origen, y que la residencia permanente fuera de África no se consiguió hasta mucho más tarde, siendo sus responsables los primeros seres humanos modernos desde el punto de vista cognitivo. Esto se corresponde con lo que estamos averiguando gracias a un registro arqueológico en pleno crecimiento. Aunque se han encontrado en ocasiones herramientas «avanzadas» en yacimientos africanos de varios cientos de miles de años de antigüedad, como por ejemplo láminas de piedra largas y finas comparables a las producidas por los cromañones, los indicios de un enfoque claramente nuevo de la vida no aparecen hasta que el periodo tecnológico conocido como Mesolítico estaba muy avanzado. Durante mucho tiempo se creyó que el Mesolítico era el equivalente africano del Paleolítico medio contemporáneo de los neandertales en Europa. Pero, a pesar de la existencia de elementos comunes, entre los que destaca el uso de técnicas de preparación del núcleo, resulta evidente que en esa época había mucha más actividad en África que en Europa, algo especialmente cierto del periodo que comenzó hace 100.000 años.

Los dos yacimientos más conocidos del Mesolítico son dos cuevas situadas en la costa sur de África: Blombos y Pinnacle Point. Blombos debe su fama al hecho de que allí se encontraron los primeros objetos abiertamente simbólicos (un par de placas alisadas de color ocre con grabados de patrones geométricos) en depósitos de aproximadamente setenta y siete mil años de antigüedad. El molido del ocre es una práctica más antigua, y aparece también entre los neandertales, pero el dibujo planificado y simétrico es evidentemente el producto de un proceso de pensamiento simbólico. Esta interpretación se ve

reforzada por el hecho de haberse encontrado en depósitos de Blombos de aproximadamente la misma época unas herramientas de hueso fruto de un trabajo minucioso (que se convertirían más tarde en una especialidad de los cromañones), y numerosas conchas de pequeños caracoles marinos, con trazas de ocre, agujereadas para ensartarlas. Si se confirmara que con estas conchas se fabricaban collares o algún otro tipo de adorno corporal, sería un dato muy significativo, porque los adornos corporales en todas las sociedades humanas modernas son simbólicos por excelencia, cargados por regla general de connotaciones de estatus, ocupación y clase. El hecho de que estas «cuentas» no eran algo excepcional para la época ha quedado demostrado por hallazgos similares, e incluso más antiguos, en lugares tan alejados como Marruecos e incluso el Levante. En el frente tecnológico, en 2010 se informó de que algunas de las puntas de lanza procedentes de Blombos parecían haberse obtenido por medio de la «talla por presión», utilizando una compleja técnica para trabajar la piedra que ni siquiera los cromañones emplearon hasta hace aproximadamente veinte mil años.

Las pruebas de los avances tecnológicos procedentes de los depósitos de más de setenta mil años de antigüedad de Pinnacle Point son aún más espectaculares. Aquí se han obtenido herramientas fabricadas a partir de silcreta cocida, un subproducto de la formación de suelos rico en sílice que en condiciones normales no sirve para fabricar herramientas. Pero sus cualidades mejoran de forma milagrosa cuando se le somete a un elaborado proceso de calentamiento y enfriamiento en varias etapas, un proceso que requiere el tipo de planificación y conceptualización que sólo una mente simbólica puede contemplar. Si hay una técnica del Paleolítico que pueda servir como equivalente del pensamiento simbólico, sin duda es ésta. Es probable que haya habido pobladores que trataran la silcreta con calor en Pinnacle Point hace 164.000 años –todavía en el rango del *Homo sapiens* anatómico–, pero no existen pruebas concluyentes de ello. Y, sin embargo, no hay duda de que en esa época tan temprana los antiguos habitantes de Pinnacle Point se alimentaban de productos marinos, incluida una amplia variedad de moluscos, escasos o ausentes hasta ese momento en la dieta de los homínidos, cuya explotación indica un nuevo nivel de sofisticación en la tradición cazadora y

recolectora. Desgraciadamente, no se han encontrado fósiles en Pinnacle Point que atestigüen la identidad de los homínidos participantes en estos procesos, y los escasos dientes de homínidos que se han descubierto están demasiado fragmentados como para darnos mucha información. Sin embargo, no hay nada en ellos que nos haga pensar que no se pueden atribuir de una forma perfectamente lógica al *Homo sapiens*.

El cuadro que surge al juntar todas estas pruebas nos permite proponer que, tras la aparición en África del *Homo sapiens* como entidad anatómica, pasaron muchos miles de años antes de que la nueva especie comenzara, con paso vacilante, a «descubrir» su nuevo potencial cognitivo. Evidentemente, esto no se produjo de una vez. Poco después de que se grabaran las placas de Blombos, toda la zona sur de África sufrió una tremenda sequía y se despobló parcial o totalmente en lo que a los seres humanos se refiere; por tanto, parece poco probable que este fuera el centro desde el que una irresistible onda expansiva de homínidos con su recién ganado simbolismo surgiera para apropiarse del mundo. Pero, sea como fuera, estas manifestaciones sudafricanas son emblemáticas de que algo de una importancia cognitiva sin precedentes estaba teniendo lugar entre los homínidos del Mesolítico, periodo en el que existen pruebas del desarrollo de otros comportamientos complejos como la obtención de sílex, el comercio o intercambio de materiales de valor a larga distancia y la decoración de objetos.

Resulta lógico concluir que la aparición de la cognición simbólica compleja fue posible gracias a algún tipo de reconfiguración interna del cerebro: un cambio que probablemente se adquirió en la reorganización del desarrollo, sin duda de gran importancia, que tuvo lugar en el origen del *Homo sapiens* anatómicamente reconocible. Lo que parecen sugerir estos indicadores es que, en el periodo que comenzó (e incluso antes) hace unos cien mil años, la recién llegada especie de homínido empezó a experimentar con su nuevo potencial cognitivo, proceso que de hecho continúa hoy en día. Dado que las bases biológicas de la nueva capacidad tenían que existir ya, la expresión de aquel potencial debe haber sido causada por un estímulo cultural de algún tipo.

Se han propuesto varios estímulos como candidatos, la mayoría

relacionados con la creciente complejidad de las vidas de los homínidos: el aumento en los niveles de intencionalidad (la capacidad de *leer* la mente de los demás) es uno de los preferidos. Pero los estímulos basados en este tipo de presiones sociales supondrían un proceso gradual de adquisición, y los indicios que poseemos apuntan a que la adquisición de la conciencia simbólica en el *Homo sapiens* fue prácticamente instantánea en términos evolutivos. Por lo tanto, el lenguaje sería un candidato mucho mejor, ya que, como hemos dicho, es la máxima actividad mental simbólica, sabemos que puede generarse de forma espontánea y habría sido necesariamente un acontecimiento que se produjo en un plazo breve. Una vez que la población humana hubiera alcanzado el lenguaje, no sería difícil ver cómo su uso se habría extendido rápidamente entre las poblaciones próximas que, después de todo, ya poseían el potencial biológico para adquirirlo. Y situar el lenguaje en este contexto nos proporciona la ventaja de no tener que buscar explicaciones para la adquisición del aparato periférico que permitía el habla y su expresión: está demostrado que la anatomía necesaria ya existía desde el origen de *Homo sapiens*, al haber sido adquirida en un principio en un contexto totalmente «exaptativo».

Un escenario de este tipo encaja muy bien con lo que los biólogos moleculares han deducido del patrón de expansión humana en el mundo basándose en las comparaciones genómicas entre las poblaciones modernas. Se ha calculado, a partir de los patrones de variación en los genomas de los cromosomas mitocondriales y del cromosoma Y, que la especie humana sufrió una contracción drástica –en la jerga genética, un «cuello de botella»– en un periodo aproximado que comenzó hace 80.000 años y terminó hace 60.000. Toda la especie *Homo sapiens* se vio reducida a una población cuyo número oscilaba entre unos cientos y unos pocos miles de individuos, debido muy posiblemente a los daños provocados por las circunstancias ambientales en los hábitats africanos de este periodo, sujetos a cambios extremadamente bruscos. Si esta población remanente había adquirido el lenguaje y el pensamiento simbólico, como un acontecimiento fortuito e incipiente y no como uno adaptativo, ello explicaría la consiguiente expansión explosiva de nuestra especie más allá de África, por todo el Viejo Mundo y finalmente en el

Nuevo. La expansión inicial podría haberse visto facilitada por la mejora de las condiciones climáticas, pero es más probable que se debiera al nuevo tipo de reacciones a las circunstancias que este estilo cognitivo completamente nuevo permitía. No obstante, el hecho de que las primeras y tímidas exploraciones de la nueva capacidad acabaran probablemente en fracaso, dado que las fluctuaciones climáticas hacían periódicamente inhabitables extensas zonas de África, nos indica que las condiciones externas jugaron un papel importante.

El salto cognitivo final (la transición desde un estado no simbólico y no lingüístico a uno simbólico y lingüístico) representa un cambio absolutamente impresionante de las condiciones mentales. Y, de hecho, el único motivo que tenemos para pensar que ese cambio *pudo* conseguirse es que, evidentemente, se *consiguió*. Es concebible que el simple aumento final de la masa cerebral hasta proporciones modernas permitiera el cambio. Pero, teniendo sobre todo en cuenta el amplio rango de tamaños cerebrales en los seres humanos modernos cognitivamente normales, es mucho más probable que las modificaciones internas del cerebro tuvieran algo que ver. ¿Cuáles pudieron ser éstas?

### ¿CÓMO OCURRIÓ?

Por mucho que innovaciones tecnológicas como las técnicas de neuroimagen en tiempo real nos hayan enseñado lo que ocurre en nuestros cerebros mientras realizamos diversas tareas cognitivas, nos sigue resultando un misterio absoluto cómo una masa de señales electroquímicas en el cerebro dan lugar a lo que experimentamos de forma individual como conciencia. Y sin saber esto, sólo podemos especular a la hora de averiguar cuál fue exactamente el ingrediente físico que, adquirido pero todavía no explotado al comienzo de la aparición de nuestra especie, permite nuestro estilo singular de cognición. Como hemos visto, hay pocas probabilidades de que este nuevo ingrediente sea cuantitativo, el resultado pasivo de un simple aumento de masa cerebral. Los neandertales tenían unos cerebros tan grandes como los nuestros, pero

evidentemente trataban los estímulos externos de un modo muy diferente. Sigue siendo posible que un neandertal joven, enfrentado al medio cultural apropiado, hubiera podido adquirir una condición cognitiva moderna, pero si en ello estaban involucrados nuevas rutas neurales, es poco probable. Se cree más bien que los neandertales poseían una inteligencia puramente intuitiva, aunque muy poderosa; al carecer de la cognición simbólica, también habrían carecido del lenguaje tal como nos resulta familiar, si bien utilizaban una sofisticada comunicación vocal complementada por los tipos de comunicación gestual y de lenguaje corporal que seguimos usando hoy en día, aun no siendo habitualmente conscientes de ello.

El gran neurólogo Norman Geschwind propuso, en la década de los sesenta del siglo pasado, que fue el hecho de nombrar las cosas (su identificación mental individual) lo que permitió el lenguaje y, a través de la asociación que establecemos con ello, la cognición simbólica. Geschwind creía que esta asociación era posible gracias a una capacidad anatómica para establecer relaciones directas entre representaciones formadas en diferentes áreas del córtex sin la intermediación del sistema límbico y el añadido resultante de respuestas emocionales. Él identificó la estructura que participaba, el giro angular, una sección del córtex que se encuentra en el lóbulo parietal junto al punto donde se une con las áreas temporal y occipital. El giro angular es grande en los humanos, mientras que es pequeño o no existe en otros primates, y la investigación ha demostrado que en humanos es importante para la comprensión de las metáforas. Una metáfora es por supuesto una destilación del concepto de lenguaje: hacer conexiones, y lo que es más, hacerlas de acuerdo a reglas, no emociones. Desgraciadamente, el famoso paleoneurólogo Ralph Holloway afirma que esta región resulta difícil de detectar en los moldes endocraneales porque los surcos que la definen en el cerebro vivo no se imprimen casi nunca en el interior de la caja cerebral. Tal como lo describe, a pesar de que «lo puedes *ver*» en los moldes, no puedes «*trazarlo*». Por lo tanto no existe ninguna técnica adecuada para detectar si esta región tan importante se había expandido en algún fósil de homínido.

El lingüista Philip Lieberman cree que el lenguaje completamente moderno fue una adquisición muy reciente en el linaje humano, hace quizá entre 90.000

y 50.000 años. De acuerdo con su teoría, el control preciso de las estructuras que permiten el habla debió de obtenerse por medio de la apropiación de estructuras motoras preexistentes en el cerebro que incluían áreas, no sólo de la corteza prefrontal, sino también de los ganglios basales y el cerebelo, situados por debajo. La lógica de este planteamiento en términos del mecanismo evolutivo es total. El neuropsicólogo Frederick Coolidge y el antropólogo Thomas Wynn consideran que la cognición moderna pudo alcanzar su nivel actual incluso en épocas más recientes. Ellos se remontan al caso clásico de Phineas Gage (que como el lector recordará perdió la capacidad de controlar sus emociones cuando la barra de hierro le atravesó los lóbulos frontales) para seguir la pista de las extraordinarias capacidades cognitivas de la humanidad hasta las mejoras en las funciones «ejecutivas» de la corteza prefrontal que controla la toma de decisiones, la formación de objetivos, la planificación y demás procesos. La porción prefrontal del córtex, con sus amplias conexiones con otras regiones del cerebro, coordina más que ninguna otra parte del mismo lo que el cerebro en su conjunto está haciendo en un momento dado. Coolidge y Wynn consideran fundamental para alcanzar una función ejecutiva superior un aumento en la «memoria de trabajo»: ese conjunto de sistemas, situados principalmente en los lóbulos frontales, que gobiernan la capacidad de mantener e integrar secuencias de estímulos recibidos en un instante concreto del tiempo.

A partir de un análisis del registro fósil, Coolidge y Wynn distinguen dos saltos cognitivos principales en la evolución humana. El primero se produjo cuando el *Homo ergaster* y sus congéneres se embarcaron en una aventura ecológica totalmente nueva que exigió un enfoque totalmente diferente frente a las exigencias de la vida. El otro ocurrió cuando se alcanzó el «pensamiento completamente moderno» gracias a un aumento espectacular de la memoria de trabajo, manifestado en sus formas más llamativas en la impresionante producción artística de los cromañones. De acuerdo con su teoría, si se siguen los estándares más rígidos aplicables, la cognición plenamente moderna sólo se puede reconocer de forma universal en épocas mucho más recientes. Pero una vez más Coolidge y Wynn, como Liebermann, sólo disponen de pruebas indirectas; y no es de imaginar que los cambios que según los tres autores

subyacen a la modernidad cognitiva se mostraran en los cambios de características físicas que reflejan los moldes endocraneales. No sólo eso: a pesar de que la mejora en la memoria de trabajo es sin duda una condición necesaria para nuestro estilo de cognición, resulta más difícil aducir que era suficiente.

Es, por supuesto, muy entretenido especular sobre qué elemento físico concreto convierte al cerebro humano, y por lo tanto a nuestra cognición, en algo exclusivo. Pero existe un límite muy rígido –por lo menos por ahora– a lo que podemos observar directamente en el registro histórico; además, y a pesar de todos los avances que se han producido a la hora de visualizar exactamente lo que pasa en el cerebro cuando realiza actividades diversas, somos todavía incapaces de explicar cómo se integra toda esa actividad para dar forma a la conciencia de nosotros mismos y del mundo que nos rodea.

Hemos visto que el cerebro es un tejido vivo en transformación, sometido a un proceso constante de reconfiguración como respuesta a la experiencia. No es impensable que los estímulos culturales cambiantes, a medida que la vida humana se ha hecho más compleja, hayan contribuido a provocar cambios generalizados en el cerebro humano moderno. Y sin embargo, algún ingrediente biológico nuevo tiene que condicionar todas las respuestas del cerebro a lo largo de la vida. Lo más probable es que este nuevo elemento físico fuera adquirido hace aproximadamente doscientos mil años, junto con los demás elementos correlacionados de nuestra modernidad. Pero todavía no tenemos la certeza de cuál fue exactamente.

## Epílogo

El origen último de nuestro extraordinario cerebro se remonta sin duda muy atrás en el tiempo, y se desvanece en una sucesión casi infinita de niveles de complejidad. La física que subyace al funcionamiento del cerebro en el más básico de estos niveles se puede rastrear hasta el origen de nuestro universo; la química que hace de los cerebros tejidos vivos nació muy poco después que la misma Tierra; y los primeros indicios de que lo que estaba a punto de convertirse en células cerebrales poseía algo especial se remontan por lo menos a nuestro antepasado común, la esponja. Las estructuras que miembros (como nosotros) de una especie vertebrada podrían reconocer de forma intuitiva como algo parecido a un cerebro surgieron hace nada menos que 500 millones de años, y entre la inmensa variedad de vertebrados que comparten el planeta con nosotros hoy en día podemos identificar numerosas formas de vida con cerebros, o estructuras similares, que se aproximan bastante a las diversas «etapas» de la complejidad neuronal que nuestros antepasados debieron atravesar. En lo que se refiere a la comprensión de la arquitectura y el funcionamiento generales del cerebro, el estudio del Árbol de la Vida del que formamos parte integral nos permite especular con cierta confianza, y mucho detalle, sobre su larga historia, hecha de añadidos. Pero seguimos sintiéndonos bastante impotentes al reflexionar sobre cómo adquirimos el mayor regalo que nos hizo el cerebro: nuestra forma única de conciencia.

Tras examinar todo lo que sabemos de nuestra larga lista de antepasados, sean hipotéticos o comparables a alguna forma viva, o bien conocidos a través del registro fósil, seguimos ignorando cómo surgió nuestra conciencia simbólica o cómo la configuración especial de nuestros cerebros la hace

posible. Sabemos aproximadamente cuándo se produjo la transición al pensamiento simbólico, y tenemos mucha información sobre la larga secuencia de acontecimientos que llevó hasta ella. Podemos incluso inventar escenarios históricos para su origen (véase el capítulo 10), pero el gran misterio funcional sigue ahí. Estamos todavía muy lejos de comprender cómo se suman todas las señales electroquímicas de nuestro cerebro para dar lugar a lo que nosotros (o cualquier otro organismo, sea cual sea su complejidad) experimentamos a diario como nuestra conciencia, lo que resume nuestra experiencia individual, subjetiva, del mundo. El resultado es que desconocemos qué hace nuestro cerebro que le diferencia de lo que sucede en los cerebros de otras formas cognitivamente complejas que no comparten nuestra capacidad simbólica. Lo único que sabemos es que el cerebro humano presenta un patrón de ampliación diferente en determinadas regiones comparado con el de sus parientes más cercanos, vivos y fósiles; que algunos de sus tejidos también muestran diferencias arquitectónicas con los de sus equivalentes en sus primos vivientes más próximos; y que, por lo menos en algunos aspectos, nosotros los seres humanos procesamos la información procedente de nuestros sentidos de una forma intrínsecamente distinta de lo que vemos en otros organismos, incluidos incluso aquellos parientes cercanos.

Pero, independientemente de cuáles sean las bases biológicas de nuestra singularidad cognitiva, los resultados de estas diferencias son espectaculares. De hecho, pensamos de una forma tan característica que nada de lo que sabemos sobre las tendencias biológicas y conductuales que precedieron a nuestra «transición» al pensamiento simbólico habría permitido jamás a un espectador predecir que esta transición iba a ocurrir. Los seres humanos se enfrentan a lo que perciben del mundo que los rodea de una forma tan absolutamente nueva que, como hemos señalado, la única razón para pensar que cualquier forma viviente *podría* haber adquirido la conciencia simbólica es que nuestra especie evidentemente lo *hizo*.

Al ser la única especie de homínidos existente actualmente en el mundo, los *Homo sapiens* sentimos la tentación de reconstruir nuestra historia proyectándonos hacia el pasado remoto, lo que hace que veamos a nuestros predecesores evolutivos como versiones cada vez más inferiores de nosotros a

medida que nos alejamos en el tiempo. Después de todo, no hay en la actualidad conflictos con otras especies de homínidos, y no existen otros actores en el espectáculo evolutivo que nos amenacen, o que nos obliguen a medirnos con ellos, a menos que sea para determinar nuestro lugar en el Árbol de la Vida. Son estas extraordinarias circunstancias las que nos permiten el lujo de observarnos desde la perspectiva de una mejora progresiva a lo largo del tiempo, un punto de vista que nos resulta especialmente atractivo por razones que van más allá de la simple satisfacción del ego. Como miembros de una especie que cuenta historias, reaccionamos de inmediato a cualquier explicación de nuestros orígenes que emplee un vocabulario directamente relacionado con nuestra propia experiencia. No tenemos que salir de nuestra singular mentalidad humana para considerar a nuestros antepasados menos inteligentes que nosotros en diversos grados; desde esta perspectiva, lo único que tenemos que hacer es quitar unos cuantos puntos del cociente intelectual. En cambio, nos resulta prácticamente imposible imaginar los estados cognitivos cualitativamente ajenos que sin duda nuestros antepasados vivieron en etapas anteriores de la historia evolutiva humana. No sólo eso: vivimos además en una época de avance tecnológico rápido y constante sin precedentes, lo que ciertamente sugiere nociones *progresistas* del pasado. Una vez más, lo que nos resulta familiar nos tienta a extrapolar nuestra experiencia personal hacia nuestra historia.

Pero, por muy atractiva que sea la imagen resultante de nosotros mismos como entidades provisionalmente perfeccionadas, este libro nos revela, no sólo que el cerebro humano no es en absoluto un producto perfecto, sino que la noción equivocada de la evolución como un proceso de mejora inexorable bajo la guía benévola de la selección natural distorsiona enormemente cómo entendemos nuestro lugar en la naturaleza. Cada especie viviente, por muy simple que pueda parecer desde nuestro punto de vista, es en realidad un punto final, una rama terminal en el Árbol de la Vida. Ninguna especie que viva y sobreviva en el momento *va* a ninguna parte. Después de todo, en la vida lo que cuenta es tratar de arreglárselas hoy, porque si no se tiene éxito en el momento, no hay futuro. Las tendencias evolutivas sólo se ven retrospectivamente, y en muchos casos son el resultado del éxito diferencial de

especies enteras, más que del perfeccionamiento de linajes a lo largo de grandes periodos de tiempo. A pesar de sus muchas características especiales, el *Homo sapiens* no es más que uno de los miles de puntos finales en el Árbol de la Vida, como lo fue cada uno de sus predecesores.

Como hemos visto, la evolución no puede ser siempre el proceso de optimización que implica el modelo de cambio gradual en el que la adaptación de las especies a sus entornos es cada vez más perfecta. En primer lugar, los entornos tienden a cambiar bruscamente en muy poco tiempo, a lo que la selección natural no tiene posibilidad de responder. Y si nuestro entorno cambia de súbito, tenemos más probabilidades de trasladarnos a otro lugar más conveniente, o si esto resulta imposible de extinguirnos, que de permanecer inmóviles y cambiar *in situ*. De hecho, cuanto menos firme sea nuestra adaptación a un medio, más flexibles somos y es menos probable que el medio nos agreda con fuerza al cambiar. La optimización tiene un precio, como vemos en el hecho de que los índices de extinción son mucho mayores entre las especies muy especializadas que entre las generalistas.

El «desordenado» cerebro humano es un ejemplo extraordinario del tipo de historia «desaliñada» que esta visión de la evolución refleja. Ya hemos mencionado que Gary Marcus describió con mucho acierto nuestros cerebros como «apaños»: soluciones torpes pero efectivas para un problema. Nuestro cerebro, al ser el producto de un largo proceso evolutivo con muchos quiebros, en el que participaron antepasados cuyas circunstancias vitales eran muy diferentes a las nuestras, son unas estructuras magníficamente chapuceras que ningún ingeniero habría diseñado jamás. De hecho, gracias a que el cerebro humano *no* está optimizado para nada es el órgano tan creativo, y al mismo tiempo lógico e irracional, que conocemos.

Por tanto necesitamos tomar algo de perspectiva. Necesitamos vernos, más que como el resultado perfecto de un largo proceso de mejora a lo largo de los milenios, como los afortunados vencedores de un largo torneo evolutivo en el que las reglas nos favorecieron de forma fortuita. De hecho, hace apenas 100.000 años la situación de nuestra especie era muy diferente y habría exigido una perspectiva diferente sobre los orígenes humanos. En aquella época compartíamos el mundo con otras especies de homínidos, al igual que

nuestros antepasados, y no parece que la conducta del *Homo sapiens* presentara en ese momento diferencias significativas con las de sus contemporáneos. Pero una vez que nuestra especie adquirió –en ese momento, por lo menos, como resultado de un estímulo puramente *cultural*– la capacidad de razonar simbólicamente, todo cambió. Había aparecido una entidad cognitiva completamente nueva, y fueran cuales fueran las circunstancias de la desaparición de los neandertales y del *Homo erectus* (y de cualquier otro homínido de la época), el hecho es que se demostraron incapaces de competir eficazmente con el simbólico *Homo sapiens*. Seguramente estos otros homínidos de la era de las glaciaciones, los desafortunados que tuvieron que enfrentarse al nuevo fenómeno del *Homo sapiens* cognitivamente moderno que se extendía rápidamente, eran sofisticados e interactuaban de un modo sutil con los medios en que vivían, pero eran los últimos homínidos del «viejo estilo». El *Homo sapiens* cognitivamente moderno tenía, sin duda, una ventaja relativa, por lo menos en el terreno de la planificación y la capacidad para intensificar la explotación del medio. Y, hubiera o no un conflicto directo, la ventaja económica proporcionada por estas capacidades cognitivas resultó ser sencillamente demasiado grande y los homínidos rivales no pudieron hacerles frente.

Todos somos conscientes de que a veces las conductas humanas son extrañas; de hecho, la especialidad de «psicología evolutiva» ha prosperado por haber elaborado una serie de explicaciones lógicas y atractivas de nuestros defectos de conducta. La idea básica, nacida del concepto simplista de que la evolución es un proceso de ajuste, es que nuestro cerebro no está en armonía con el mundo moderno porque se formó expresamente mediante selección natural para hacer frente a un «entorno de adaptatividad evolutiva» que ya no existe. Actuamos de un modo inadecuado porque nos encontramos en un mundo moderno y urbanizado mientras cargamos todavía con una mentalidad ajustada a las exigencias de la vida de los cazadores-recolectores en pequeños grupos de pocos miembros, dispersos por el hábitat de las glaciaciones. En opinión de los psicólogos evolutivos, una desconexión entre el mundo en el que vivimos y el mundo al que nos adaptamos para ocuparlo explica lo extraño que a veces es nuestro comportamiento. Esta es una historia

estupenda y con un fuerte atractivo innato para los miembros de lo que en realidad es una especie cuentacuentos. Pero lamentablemente –o más bien afortunadamente– es errónea. Sin duda, los psicólogos evolutivos han desempeñado un valioso papel documentando nuestros patrones de conducta recurrentes, patrones que desde luego reflejan la estructura común del material neuronal que reside en la cabeza de todos los seres humanos cognitivamente normales. Pero culpar de nuestras debilidades a los cerebros actuales mal ajustados es no entender en absoluto lo esencial. Nuestras mentes nunca estuvieron ajustadas. Nuestro cerebro y las conductas extrañas que en ocasiones produce son fruto de una larga historia de desorden supremo: una historia que casualmente dio lugar a un producto maravillosamente excéntrico y creativo. Nuestras estupideces e imperfecciones no son más que la cruz de nuestra brillantez.

Uno de los productos secundarios de nuestra cognición simbólica es la afición humana a la narración que ya hemos señalado. La narración de historias está profundamente arraigada en nuestra psique, y es una de las características principales que evita el aburrimiento (otro de esos productos secundarios). La ciencia es, por supuesto, una forma de contar historias, pero es una forma especial: exige, como hemos visto, que las historias que contamos se puedan comprobar frente a lo que podemos observar en la naturaleza. Los cuentos de «así fue como...», por muy entretenidos que resulten, no necesitan ceñirse a la realidad y no se pueden clasificar como ciencia. Esto significa que debemos recelar sobre todo de las elaboradas explicaciones adaptativas que los científicos pergeñan con frecuencia para justificar las numerosas imperfecciones de nuestra especie. El supuesto de que la evolución y el perfeccionamiento van juntos hace irresistible la tentación de encontrar explicaciones especiales de este tipo. E incluso a pesar de que el supuesto en sí mismo resulta engañoso, no se puede sin embargo negar que, al margen de su inteligencia y sus excepcionales capacidades, la especie humana es bastante defectuosa: desde su tendencia física a los pies planos, hernias y problemas con las vértebras, hasta los comportamientos estúpidos de que hacemos gala, por muy inteligentes que seamos. Tenemos creencias irracionales; somos desastrosos a la hora de evaluar riesgos (sobre todo –algo

que es muy peligroso para la especie y el planeta— el riesgo a largo plazo); tenemos tendencia a una disonancia cognitiva extrema; y más conductas autodestructivas de las que podríamos enumerar aquí. Nada de todo esto se puede negar, y es algo que debemos abordar de forma consciente en nuestras vidas individuales y en comunidad. Sin embargo, nuestra extraña condición se explica mejor por el «desorden» inherente a la evolución que por una defensa especial de casos particulares. De hecho, los seres humanos somos exactamente el tipo de producto que cabría esperar de un proceso oportunista que no tiene nada que ver con la optimización.

Por supuesto, y a pesar de todos nuestros defectos, podemos autodescribirnos con razón como los seres más inteligentes del planeta, capaces de manipular información en nuestras mentes e implementar, gracias a nuestras maravillosamente diestras manos, nuestras conclusiones para influir en el mundo exterior. Pero no debemos olvidar nunca que «inteligente» es un término relativo. Hay criaturas que nos superan en muchas áreas de la función cerebral. En un sentido profundo, cada rama terminal de ese gran Árbol de la Vida tiene el mismo grado evolutivo. Las rapaces son capaces de detectar movimientos en el paisaje a mucha más distancia que nosotros, y un perro experimenta un mundo olfativo mucho más rico que el nuestro. De hecho, no es descabellado decir que, en un sentido muy real, los perros y los humanos vivimos en mundos completamente diferentes (aunque se solapan), en los que las dos especies responden a conjuntos de señales completamente diferentes. El modo en que nosotros experimentamos el mundo es sólo uno de los muchos posibles, y eso nos lleva de vuelta a la importancia de la metáfora. Al comparar tipos, o incluso grados de inteligencia, nos vemos limitados a hacerlo al nivel de la metáfora, lo cual es un mecanismo puramente heurístico para ayudarnos a entender nuestro lugar en el mundo. Cuando describimos al hombre como la criatura más inteligente del planeta nos limitamos a decir que hacemos lo que hacemos mejor que otras criaturas. De hecho, para bien o para mal, somos la única criatura que lo hace.

Cuando damos charlas sobre la evolución humana, hay una pregunta recurrente. Y además es muy buena. Los que preguntan señalan que, en la historia del género *Homo*, el tamaño medio del cerebro de las especies de

homínidos experimentó un aumento espectacular con el paso del tiempo, lo cual significaba que los homínidos eran cada vez más inteligentes (en el sentido metafórico, hay que subrayar). Y quieren saber si, como resultado de esta poderosa e innegable tendencia primitiva, es razonable esperar que en el futuro nuestro cerebro, y por lo tanto nuestra inteligencia, sigan aumentando. La respuesta tiene dos partes. Una está relacionada con la *calidad* de la inteligencia de la que hablamos. No se puede negar que la inteligencia de estilo intuitivo de nuestros antepasados se volvió con el tiempo más compleja y sutil, como reflejan el tipo de pruebas arqueológicas que esos antiguos homínidos dejaron. Pero hubo un punto de inflexión clave en el origen mismo del pensamiento simbólico, en el que resulta evidente que el cerebro humano empezó a pensar de un modo completamente diferente. Y en este punto de nuestra propia historia estamos todavía al comienzo de la nueva curva: no tenemos antecedentes a partir de los cuales extrapolar. No sólo eso: en todo caso, es posible que los cerebros humanos se hayan reducido ligeramente de media desde los tiempos de los cromañones, lo cual puede indicar que la nueva forma de procesar información no necesita más masa de tejido neuronal de la que existía anteriormente, y no la necesitará.

El otro aspecto que podemos anticipar está relacionado con la naturaleza misma de la evolución. Nuestra especie evolucionó en un mundo en el que las poblaciones de homínidos estaban escasamente repartidas sobre inmensas extensiones de la superficie de la tierra, zarandeados continuamente por los caprichos del clima de las glaciaciones, sometido a rápidos cambios. Estas son las condiciones genéticas ideales en las que las novedades surgidas al azar dentro de las poblaciones se fijan. La inercia genética de las grandes poblaciones es tal que las probabilidades de que se incorpore una innovación importante son muy bajas, como vimos en el ejemplo de la moneda que lanzábamos al aire en el capítulo 1. En poblaciones grandes, las frecuencias genéticas siempre oscilan un poco, pero los ingredientes básicos para el cambio biológico significativo son dos: tamaños de población realmente pequeños y un alto grado de aislamiento entre las poblaciones.

Las condiciones propicias al cambio evolutivo predominaron durante los primeros tiempos del *Homo sapiens*, cuando nuestros antecesores todavía eran

cazadores y recolectores que recorrían los inmensos territorios en grupos pequeños. Pero una vez que los seres humanos comenzaron a llevar existencias sedentarias, en una respuesta (sin precedentes) a la crisis climática del final de la era de las glaciaciones, todo cambió. La plantación de cosechas exigía mano de obra, y desaparecieron las restricciones reproductivas impuestas a las poblaciones humanas por la limitada capacidad de las madres de cargar con más de uno o dos niños de desarrollo lento. Las poblaciones se dispararon, en un proceso que continúa hasta hoy. En la actualidad vivimos en un mundo atestado de gente, en el que se ha ocupado prácticamente cada franja habitable de la tierra, y los individuos pertenecientes a esa inmensa población mundial se mueven más que nunca. Las condiciones no han sido nunca tan poco propicias a la incorporación de novedades biológicas significativas a la especie humana. No hay duda de que los naipes de la genética humana se están barajando enérgicamente a medida que las poblaciones aisladas hasta ahora se mezclan como nunca antes lo habían hecho. Pero las cartas siguen siendo básicamente las mismas: no hay en perspectiva ningún cambio significativo. Podemos ser imperfectos, pero no podemos esperar que la evolución nos rescate de nuestra imperfección.

Por supuesto, siempre existe la posibilidad –una muy remota, esperamos– de que nuestras propias imperfecciones puedan cambiar las reglas fragmentando y reduciendo una vez más nuestra inmensa población en expansión, bien a través de una acción deliberada, bien por la inacción frente a amenazas que ya se ciernen sobre nosotros. Pero si se descarta un acontecimiento apocalíptico (antropogénico o de otro tipo) que, sin duda, la mayoría de nosotros preferiríamos no presenciar, sería mejor que reconociéramos nuestras imperfecciones cognitivas y utilizáramos la inteligencia que poseemos para concebir maneras de enfrentarnos a ellas.

# Cronología

<b>Millones de años atrás</b>	<b>Acontecimiento</b>
15.000-13.700	Gran explosión y secuelas químicas
4.500	Formas terrestres
4.000	Origen más probable del mundo de ARN
3.500	Evolución de la vida celular en la Tierra
3.000-2.500	La fotosíntesis evoluciona y la atmósfera terrestre se oxigena
1.500	Antepasado de las arqueas y las células eucarióticas
1.000	Aparecen en la Tierra los organismos multicelulares
700	Antepasado de los animales simples (poríferos, cnidarios, plazoos, ctenóforos, bilaterales primitivos)
600	Los animales simples empiezan a separarse en grandes grupos
570	Antepasado común de los artrópodos (insectos, miriápodos, onicóforos, crustáceos, etc.)
550	Los animales complejos empiezan a separarse (explosión cámbrica)
500	Los vertebrados empiezan a separarse
475	Las plantas empiezan a separarse
400	Los insectos y las plantas con semillas (espermatofitas) se diversifican
360	Antepasado de los anfibios
300	Antepasado común de reptiles y aves
200	Origen de los mamíferos
150	Origen de las aves

~130	Origen de las plantas con flores (angiospermas)
65	Extinción de los dinosaurios, expansión de los mamíferos
64-60	Antepasado común de los primates
35-30	Antepasado común de los primates superiores
8-6	El linaje humano se separa del chimpancé
4,2	Se asienta el género <i>Australopithecus</i>
2,5	Por primera vez se fabrican herramientas de piedra
2	Aparece el género <i>Homo</i> ; el tamaño del cerebro empieza a aumentar entre los homínidos
1,5	Por primera vez se da forma intencionada a las herramientas de piedra
0,8	Por primera vez se controla el fuego en los hogares
0,4	Se construyen moradas por primera vez
<0,2	Origen del <i>Homo sapiens</i> de anatomía moderna en África
~0,1	Primeros indicios de conductas simbólicas en África
~0,035	Primeras manifestaciones de arte rupestre
0,001	Comienza la domesticación de plantas y animales
0,0005	Sistemas de escritura primitivos

## Glosario

**acetilcolinesterasa:** Enzima que degrada la pequeña molécula del neurotransmisor acetilcolina.

**achelense:** Industria del tallado de instrumentos de piedra caracterizada por hachas en forma de lágrima y talla simétrica que empezaron a producirse en África hace unos 1,5 millones de años. Llamadas así porque se identificaron por primera vez en Saint-Acheul (Francia).

**ácido gamma-aminobutírico (GABA):**<sup>1</sup> Aminoácido no alfa que actúa como ligando en el sistema nervioso. El GABA es el principal neurotransmisor inhibitorio del sistema nervioso central de los mamíferos.

**ácidos nucleicos:** Compuestos bioquímicos complejos que se encuentran en todas las células vivas y también en los virus. Son «complejos» porque están compuestos de purinas, pirimidinas, hidratos de carbono y ácido fosfórico. Los dos ácidos nucleicos más comunes en las células vivas y los virus son el ácido desoxirribonucleico (ADN) y el ácido ribonucleico (ARN).

**ADAR (adenosina desaminasa que actúa sobre el ARN):** Enzima que regula el proceso de edición del ARN. Se ha demostrado que la edición del ARN es un proceso importante en la regulación de la expresión de los genes.

**afasias:** Trastornos de la capacidad para expresar y comprender el lenguaje que incluyen diversos síndromes como la dispraxia verbal, que altera la coordinación de los movimientos del sistema que produce el habla.

**agonista:** Sustancia química o molecular que puede unirse a una proteína receptora específica y, en consecuencia, generar una respuesta celular. Tres agonistas de los que hablamos en este libro son AMPA, NMDA y kainite, que influyen en los receptores con los que también interacciona el glutamato. Estos tres productos químicos son análogos al glutamato y por ello pueden interferir con la actividad normal del glutamato en las sinapsis nerviosas. Los receptores con los que interaccionan estos agonistas son

ionotrópicos en la sinapsis.

**amígdalas:** Par de estructuras de simetría bilateral situada en el interior del cerebro y considerada parte del sistema límbico. Se cree que esta región del cerebro es importante para procesar la información que resulta desagradable al organismo, como el miedo o la infelicidad.

**análisis de isótopos estables:** Método químico para determinar las dietas de los primeros homínidos utilizando formas estables de oxígeno y nitrógeno que con frecuencia se conservan en sus tejidos duros fosilizados.

**anatomía de una neurona:** Las neuronas varían en forma y tamaño. El soma, o parte central, ocupa la mayor parte de la neurona y contiene el núcleo de la célula. Las dendritas de las neuronas varían en diámetro y son extensiones celulares de la neurona que confieren a la célula su aspecto arbóreo. Gran parte del potencial de acción que entra en la célula tiene lugar a través de las dendritas. El axón es una extensión de la célula en forma de cable y es la parte de la neurona que transmite el potencial de acción (o impulso nervioso) desde el soma. Los axones realizan las conexiones con otras neuronas a través de las sinapsis.

**apaño:** Solución torpe o poco elegante –pero eficaz– a un problema. El psicólogo de la Universidad de Nueva York Gary Marcus ha aplicado recientemente este término al cerebro.

**área de Broca:** Pequeño fragmento de corteza cerebral en el interior del lóbulo frontal izquierdo que realiza funciones motoras, entre ellas el control del centro del lenguaje.

**área de Wernicke:** Parte de la corteza cerebral en la parte inferior del lóbulo parietal del cerebro que está asociada a la comprensión del lenguaje.

**ARN pequeño:** Pequeños tramos de ARN que son importantes en la regulación de los genes. En ellos se incluyen los microARN (miRNA), ARN interferentes pequeños (siRNA), ARN asociados a Piwi (piRNA) y ARN asociados a promotores (PASR)

**Artrópodos:** Los artrópodos, entre los que figuran los quelicerados, crustáceos, miriápodos y hexápodos, son animales sin vértebras pero que poseen un esqueleto externo (exoesqueleto) y cuerpos segmentados con apéndices articulados. Los artrópodos pertenecen al filo *Arthropoda* del cual los quelicerados, crustáceos, miriápodos y hexápodos son subfilos. Los quelicerados incluyen las arañas, los cangrejos herradura y los escorpiones. Los miriápodos comprenden los ciempiés y milpiés. Entre los crustáceos figuran organismos como la gamba, los cangrejos y la langosta, y los hexápodos incluyen los insectos. Los onicóforos y tardígrados (osos de agua) son parientes cercanos de los artrópodos; el conjunto de los tres grupos forman lo que los taxonomistas llaman los panartrópodos.

***Australopithecus***: Género que incluye los primeros parientes humanos extintos y bien documentados. Consta de diversas especies africanas conocidas de un periodo que va desde hace cuatro millones de años hasta hace 1,5 millones. Estos primeros homínidos eran bípedos erectos cuando pisaban tierra, pero eran de estatura muy pequeña, tenían las piernas cortas y conservaban rasgos, sobre todo en la parte superior del cuerpo, que indican que eran ágiles en los árboles. Es probable que los primeros homínidos de este tipo general fueran los que empezaron a fabricar utensilios de piedra hace unos 2,5 millones de años. Varias especies de entre ellos desarrollaron grandes dentaduras para masticar y a menudo se asignan alternativamente al género *Pananthropus*.

**auxina**: Categoría de pequeñas moléculas conocidas también como hormonas vegetales. Las auxinas son sustancias que regulan el crecimiento vegetal y son importantes para el desarrollo.

**bacteriorodopsina**: Proteína transmembrana que se encuentra fundamentalmente en las arqueas conocidas como halobacterias. El papel principal de la proteína es actuar como una bomba de protones impulsada por la luz. Estas proteínas utilizan la luz para transportar protones a través de la membrana hacia el exterior de la célula, produciendo un gradiente que se convierte en energía química.

**bilaterales**: Categoría de animales metazoos con simetría bilateral. Dentro de los bilaterales existen dos grandes linajes, definidos por el tipo de división que tiene lugar durante el desarrollo embrionario. En los embriones de protóstomos la segmentación es espiral, y en los de deuteróstomos la segmentación es radial. A su vez, los protóstomos se dividen en dos linajes principales, los ecdisozoos (animales que mudan como los insectos) y los lofotrocozoos (animales con un tipo específico de aparato bucal, como los moluscos).

**cámara de coanocitos**: Los coanocitos constituyen un tipo de células que se encuentran en las esponjas y están provistas de flagelos. Estas células tapizan las cavidades, conocidas como cámaras de coanocitos, del cuerpo de la esponja.

**canales iónicos**: Son proteínas ancladas en la membrana celular que forman pasadizos o poros que determinan y controlan el gradiente eléctrico a través de la membrana de las células vivas. Controlan el flujo de iones que salen y entran de la célula. Los canales iónicos se clasifican por el modo en que se abren y se cierran en un proceso llamado *gating* (activación de apertura y cierre de compuertas). Existen tres categorías principales de *gating*: *gating* por iones, *gating* por un ligando y otras formas más complicadas (pero menos comunes). Los canales activados por iones están controlados por la concentración iónica dentro y fuera de la célula. Los canales activados por un ligando utilizan moléculas pequeñas (ligandos) que se unen a receptores de membrana

que a su vez activan la apertura del canal.

**canal iónico receptor de potencial transitorio (TPR):** Categoría de canales iónicos situados en las membranas de muchos tipos de células diferentes. Los TPR intervienen en una gran variedad de estímulos y sensaciones.

**celoma:** Cavidad llena de fluido que se encuentra en el cuerpo de algunos animales. Las células que tapizan el celoma derivan del mesodermo embrionario. Un celomado es un animal provisto de celoma.

**célula glial:** El sistema nervioso está compuesto de dos tipos básicos de células, neuronas y células gliales. Las células gliales componen alrededor de la mitad de las células del sistema nervioso y se cree que proporcionan soporte mecánico, aislamiento y protección a las neuronas. Los últimos datos indican que las células gliales pueden transmitir impulsos y que son capaces de comunicarse con otras células del cerebro.

**cianobacterias:** Antiguo grupo del dominio Bacteria que utilizan la fotosíntesis para obtener energía del entorno. Se cree que las cianobacterias han sido las responsables de convertir la primera atmósfera reductora de la Tierra en una atmósfera oxidante y que se originaron hace alrededor de dos mil millones de años. Las cianobacterias son también el linaje de bacterias que dieron lugar a los cloroplastos de las plantas, mediante un proceso por el cual el linaje eucariota que finalmente dio lugar a las plantas se tragó antiguas cianobacterias.

**cícadas:** Las plantas superiores que portan semillas se dividen en dos grandes linajes: angiospermas (plantas con flores) y gimnospermas (plantas sin flores). Las cícadas pertenecen al grupo de las gimnospermas, como los ginkgos.

**circuitos neuronales sensomotrices:** Circuitos de células nerviosas que forman los sistemas neuronales sensoriales (llevan información al cerebro) y motores (llevan información del cerebro a los músculos).

**circunvolución angular:** Área de asociación del lóbulo parietal (cerca de la intersección de las áreas temporal y occipital) que Norman Geschwing identificó como un área clave en la que pueden realizarse conexiones cortico-corticales sin una intermediación límbica, y que por lo tanto está conectada posiblemente con la denominación de objetos y el lenguaje. Lamentablemente, cuesta visualizar esta área en los endomoldes fósiles.

**coeficiente de encefalización (EQ):** Cifra que mide el tamaño del cerebro de un animal en comparación con su tamaño corporal. Técnicamente es la proporción entre la masa real del cerebro y el tamaño previsto estadísticamente en un animal de masa corporal similar, aunque las técnicas para realizar esta estimación difieren.

**complejo silenciador inducido por microARN (RISC):** Complejo de proteínas

producidas por una célula que se unen unas a otras para procesar ARN interferente pequeño (siRNA).

**córtex cingulado:** Esta parte del cerebro, considerada componente del sistema límbico, coordina la información procedente del tálamo y el neurocórtex y es importante para procesar la emoción, el aprendizaje y la memoria.

**cortisol:** hormona esteroidea secretada al torrente sanguíneo por las glándulas suprarrenales. Es una molécula pequeña que actúa como agonista en muchas funciones del cerebro y el cuerpo. Se la conoce también como neurotransmisor del estrés.

**criptomonas:** Grupo de eucariotas unicelulares que forman parte de las algas generalmente de agua dulce. La mayoría de las criptomonas tienen unos orgánulos intracelulares llamados plastos que se caracterizan por la presencia de extrusomas. Éstos son pequeñas estructuras en espiral que la célula mantiene en tensión. Cuando se ven perturbadas, estos extrusomas se expanden, lo que hace que la célula se aleje de la perturbación.

**deriva genética:** Cambios aleatorios en la frecuencia de los alelos como consecuencia de un error de muestreo. La deriva es un proceso estocástico que lleva a menudo a resultados ilógicos.

**diencéfalo:** Junto con el telencéfalo, esta región del cerebro de los vertebrados forma el prosencéfalo. Linda con el mesencéfalo (cerebro medio) y está situado entre éste último y el telencéfalo. Se compone principalmente del tálamo, el hipotálamo y el pretectum.

**Dmanisi:** Yacimiento de 1,8 millones de años de antigüedad situado en el Cáucaso (República de Georgia) donde se han identificado los homínidos no africanos más antiguos.

**dominios de vida:** Los tres dominios de vida más importantes son Eucarya, Bacteria y Archaea. En la actualidad, los científicos sitúan todas las formas de vida del planeta en uno de estos tres dominios. Los eucariotas son organismos caracterizados por poseer un núcleo contenido dentro de una membrana. Las arqueas se caracterizan por la estereoquímica inversa del glicerol, mientras que en las bacterias los genes carecen de intrones.

**dopamina:** Pequeña molécula endógena, es un neurotransmisor que se libera en partes específicas del cerebro. Es importante principalmente para la regulación de la hormona prolactina, pero también desempeña un papel en la forma en que el cerebro percibe la motivación, el castigo y la recompensa. También influye en el movimiento voluntario y la cognición.

**Edad de Piedra Intermedia (EPI):** Fase cultural africana (periodo que va desde hace

200.000 a 30.000 años) durante la cual se pueden detectar los primeros indicios del espíritu simbólico.

**endomolde:** El cerebro se desarrolla en estrecha relación con el interior del cráneo, que de ese modo conserva un registro bastante exacto de su forma externa. Una huella (tanto natural como artificial) del interior de un cráneo fósil reproducirá así con bastante exactitud el tamaño y la forma del cerebro que había contenido la bóveda craneal. Los científicos que estudian los endomoldes cerebrales de especies extinguidas se conocen como paleoneurólogos, y por lo general son muy prudentes en sus declaraciones porque la labor del cerebro es más una función de sus conexiones internas que de su forma externa exacta.

**endorfinas:** Pequeños péptidos endógenos producidos por la glándula pituitaria y el hipotálamo. Actúan como neurotransmisores y participan en una gran cantidad de funciones cerebrales, incluidos el amor, el orgasmo, y la excitación en general. Los opiáceos como la heroína y la morfina se asemejan a las endorfinas y por ello pueden interferir con el normal funcionamiento de las endorfinas endógenas.

**estimulación magnética transcraneal (EMT):** Técnica utilizada para estimular regiones específicas del cerebro. Mediante la aplicación rápida de un campo magnético *en el exterior* de la cabeza, la EMT puede crear pulsos eléctricos en el *interior* del cerebro. Estos pulsos eléctricos producen actividad neuronal sólo en las zonas seleccionadas.

**estructura del cerebro de los vertebrados:** A nivel macroscópico el cerebro se puede dividir en cuatro regiones, que de atrás hacia delante son: médula espinal, rombencéfalo, mesencéfalo y prosencéfalo. La médula espinal es responsable de respuestas automáticas al entorno muy primitivas. El rombencéfalo incluye el cerebelo, la protuberancia y el bulbo raquídeo. El mesencéfalo contiene la sustancia negra, y el prosencéfalo consta del sistema límbico, los ganglios basales y la corteza cerebral.

**exaptación:** Rasgo morfológico o fisiológico que se utiliza en un contexto distinto a aquel en el que se adquirió originalmente.

**exogrupo:** Cuando los taxonomistas descifran las relaciones de un grupo de organismos, utilizan un exogrupo para «polarizar» esas relaciones. Los exogrupos se definen sencillamente como un grupo de organismos que no pertenece al grupo objeto del estudio taxonómico, aunque por lo general estará estrechamente relacionado. Por ejemplo, si se examinan un ave, un murciélago y un ser humano teniendo en mente una filogenia, un buen exogrupo sería un pez (que no está ni en el grupo de las aves ni en el de los mamíferos).

**expresión génica:** Los genes están compuestos de ADN que es necesario transcribir en ARN mensajero y luego traducir en cadenas de aminoácidos para producir proteínas.

Tanto la transcripción como la traducción son productos de la expresión génica, y los científicos utilizan tanto el ARN mensajero como los métodos de detección de proteínas para observarla.

**extremófilos:** Organismos como bacterias y arqueas que se han adaptado a medios extremos, como los muy ácidos o muy básicos, los sumamente cálidos o fríos, o los sometidos a altas presiones.

**fenómeno del cerebro escindido:** El tratamiento de la epilepsia se acompaña a veces de una operación llamada comisurotomía, un procedimiento quirúrgico en el que el cuerpo calloso (región del cerebro que conecta los hemisferios izquierdo y derecho) se secciona por la mitad. Este procedimiento quirúrgico resulta eficaz para la limitación de la conectividad de los dos lados del cerebro y el alivio de la epilepsia; sin embargo, en el proceso, los hemisferios izquierdo y derecho se desconectan dando lugar al llamado fenómeno del cerebro escindido.

**fisuras cerebrales:** Son pliegues de la superficie del cerebro debidos al plegamiento del córtex para adaptarse al interior del cráneo. Se cree que los principales repliegues definen áreas funcionales importantes.

**fosfolípido:** Un lípido con al menos un grupo fosfato unido a él. Los fosfolípidos tienen una «cabeza» *hidrófila* (afinidad por el agua) y una «cola» *hidrófoba* (repulsión por el agua). Los fosfolípidos constituyen el componente fundamental de las membranas celulares.

**fosforilación:** Es la adición de un grupo o grupos fosfato a una proteína diana. Estas adiciones alteran la función de la proteína diana de una de estas tres maneras: cambiando la actividad de una enzima, cambiando la ubicación de la célula o produciendo un cambio en la asociación de la proteína fosforilada con otras proteínas.

**fósil:** Técnicamente, cualquiera de los rastros de vida pasada; por lo general, huesos y dientes mineralizados de animales antiguos que normalmente se han conservado incompletos.

**FOXP2:** Proteína, hallada en los animales, que se cree necesaria para algunos aspectos del habla y por lo tanto involucrada en la producción del lenguaje.

**genes homeóticos:** Categoría de genes que participan en el proceso de desarrollo y que reciben este nombre porque producen transformaciones de una parte o región del cuerpo en otra. Las plantas y los animales tienen genes homeóticos. El complejo homeótico es un subconjunto de los genes homeóticos (es decir, no todos los genes homeóticos son genes HomC). Los genes HomC controlan la identidad de los segmentos en animales y contienen un motivo conservado de 61 aminoácidos llamado homeobox.

**globo pálido:** Región subcortical del cerebro asociada al tálamo. Forma parte de los ganglios basales y tiene relaciones complejas con otras partes del cerebro interno (el estriado y la sustancia negra). Está involucrado en el procesamiento y la regulación de funciones motoras.

**glomérulos:** Estructuras de células nerviosas que se encuentran en el bulbo olfatorio del cerebro de los vertebrados. Un único glomérulo es una maraña globular de axones que emanan de las neuronas olfativas que actúan como receptores.

**habituación:** Forma de aprendizaje no asociativo que tiene lugar tras la exposición repetida a un estímulo externo durante un largo periodo de tiempo. Un organismo disminuirá su respuesta conductual a un estímulo si no se produce un daño como consecuencia del mismo.

**habla:** Es el medio por el cual los seres humanos modernos expresan (normalmente) el lenguaje. Depende de la habilidad para modular la vibración de la columna de aire en el tracto vocal superior y producir una amplia gama de sonidos que corresponden a los símbolos mentales. En cierto modo, se cree que esta habilidad es una función del rostro retraído y la laringe bajada típica de los seres humanos adultos.

**heterocronía:** Cambio en ritmo del desarrollo que conduce a las variaciones de tamaño o forma de los organismos, órganos o tejidos. Al alterar el ritmo del proceso de desarrollo se pueden llevar a cabo cambios totales en el tamaño y la forma de un organismo.

**hipocampo:** Región pareada del cerebro de simetría bilateral relacionada comúnmente con el sistema límbico. Debe su nombre a su forma, muy parecida a la del caballito de mar. El hipocampo se ubica cerca de la línea media del cerebro, y es responsable del procesamiento y consolidación de nueva información, de ahí que esté involucrado en la memoria a corto y largo plazo.

**homínidos/homíninos:** Miembros del grupo que comprende a los seres humanos más todos sus parientes extinguidos que no eran más cercanos a los grandes monos vivos. Cada vez es más común que los paleoantropólogos identifiquen a este grupo como una subfamilia (*Homininae*) en vez de una familia (*Hominidae*), pero en la práctica no hay mucha diferencia. Aquí utilizamos «homínido» en gran parte por costumbre.

**Homo:** Género al que pertenecen los humanos modernos. No está muy bien definido, ya que a menudo se le asignan algunos fósiles fragmentarios de más de dos millones de años de antigüedad. Sin embargo, la forma corporal característica, alta, esbelta, del *Homo* que camina se estableció con seguridad bastante después, hace alrededor de 1,8 a 1,6 millones de años. Con posterioridad, el género se diversificó considerablemente y en varios linajes empezó una trayectoria de aumento del tamaño del cerebro, en apariencia

de modo independiente. Resulta sumamente raro que nuestra especie, *Homo sapiens*, sea el único homínido del planeta.

**homoplasia:** Convergencia biológica que tiene como resultado que dos organismos que no están relacionados compartan el mismo rasgo. Las homeoplasias pueden ser engañosas: si concluyéramos que las aves y los murciélagos están más estrechamente relacionados entre sí que con los seres humanos porque ambos tienen alas, estaríamos muy equivocados.

**lenguaje:** Forma de comunicación exclusiva de los seres humanos modernos (y normalmente hablada) que depende de la creación de un vocabulario finito de símbolos (hablados o comunicados por señas) que se pueden combinar según unas normas para realizar una cantidad infinitamente grande de afirmaciones sobre el mundo.

**L-Dopa:** Conocida también como levodopa, esta pequeña molécula es el precursor de diversos compuestos llamados catecolaminas. Entre estas figuran los neurotransmisores dopamina, norepinefrina y epinefrina.

**ligando:** Un ion, una molécula o un grupo más complejo de moléculas que se unen a sustancias químicas como las proteínas (por ejemplo, receptores de neurotransmisores) para formar moléculas más grandes que por lo general provocan un cambio en el estado de la sustancia química.

**lípidos:** Compuestos bioquímicos que están mejor caracterizados como grasa o aceite. Los lípidos se disuelven en alcohol pero permanecen intactos en agua.

**mecanorreceptor:** Receptor que responde a la presión mecánica o a las distorsiones. La mayor parte de los mecanorreceptores se ubican en la piel.

**memoria, tipos de:** La memoria es una entidad compleja que se puede catalogar de muchas maneras. La forma más común es en memoria declarativa y memoria procedimental, que equivalen más o menos a las memorias explícita e implícita, respectivamente. Los recuerdos procedimentales (implícitos) son los que ayudan a realizar tareas que no requieren una conciencia consciente, como montar en bicicleta o lavarse los dientes. Los recuerdos declarativos (explícitos) son aquellos que incorporamos a nuestro conocimiento consciente del presente. La memoria declarativa puede dividirse además en episódica y semántica. La memoria episódica atañe a los nombres, los lugares y las experiencias del pasado, y la memoria semántica es la que atañe a las definiciones o los conceptos. La memoria también se puede catalogar en memoria a largo o corto plazo. Estas dos categorías se refieren al almacenamiento, ya que los recuerdos a largo plazo son los que el cerebro juzga dignos de mantener mucho tiempo y los recuerdos a corto plazo son los que el cerebro retendrá sólo durante un corto periodo de tiempo.

**metazoos:** Gran grupo de organismos integrado por los animales multicelulares. La

filogenia de los metazoa es controvertida, pero el grupo se compone de los siguientes linajes animales: poríferos (esponjas), cnidarias (avispas de mar, medusas, corales e hidras), placozoos, ctenóforos (medusas peine) y bilaterales como nosotros.

**microcefalia:** Trastorno anatómico en el que el tamaño del cráneo se reduce drásticamente. Últimamente, la investigación genética ha localizado varios genes involucrados en este síndrome.

**Musteriense:** Industria de las herramientas de piedra asociada normalmente a los neandertales (pero a veces a los primeros humanos modernos).

**mutualista:** Tipo de interacción entre especies que beneficia a las dos especies que intervienen en la interacción.

**neocórtex:** parte de la corteza cerebral que ha aumentado en los mamíferos. Consta de seis capas celulares (numeradas del I al VI) y participa en funciones superiores tales como la toma de decisiones, la determinación de la localización espacial, el pensamiento consciente, la percepción sensorial y el lenguaje (en humanos).

**neuroeconomía:** Es el estudio de los aspectos neuronales de las interacciones humanas implicadas en las decisiones económicas. Este nuevo campo incorpora la teoría económica, la psicología y la neurobiología para estudiar el proceso de toma de decisiones.

**neuromodulación:** Proceso del sistema nervioso en el cual múltiples clases de neurotransmisores liberados en estrecha concordancia afectan la regulación de varias neuronas o grupos de neuronas.

**neurotransmisor:** Los neurotransmisores más comunes son moléculas pequeñas, como el glutamato, que transmiten señales desde una célula presináptica a una postsináptica a través de una sinapsis. Están contenidos en las llamadas vesículas sinápticas de la célula presináptica y se liberan en el espacio entre dos células que forman la sinapsis. Al liberarse se unen a los receptores de la superficie de la célula postsináptica. La liberación y posterior unión del neurotransmisor viene acompañada por lo general de los potenciales de acción.

**nocicepción:** El procesamiento neuronal de los estímulos nocivos.

**norepinefrina:** Pequeña molécula que tiene función de hormona en el cuerpo y de neurotransmisor en el cerebro. Está involucrada en las reacciones ante el estrés.

**núcleo caudado:** Estructura del cerebro que forma parte de los ganglios basales. Interviene en el aprendizaje y la memoria.

**«núcleo» lítico:** Trozo de roca de la que se extraen lascas usando un «martillo» de piedra (o hueso, o alguna sustancia «blanda» similar) para producir una herramienta con un filo cortante.

**núcleo preparado:** Método de fabricación de herramientas de piedra en el que un canto se preparaba laboriosamente dándole múltiples golpes hasta obtener una lasca más o menos pulida (o una serie de ellas) de un golpe (o una sucesión de ellos).

**olduvayense:** Nombre que se aplica en general a los primeros tipos de herramientas de piedra, que consistían en simples lascas afiladas que se obtenían golpeando piedras. El nombre procede de la garganta de Olduvai, en Tanzania, donde se hallaron originalmente estas herramientas. Las primeras que se conocen datan de hace 2,5 millones de años y empezaron a sustituirse por formas más elaboradas un millón de años después.

**onicóforos:** Estos invertebrados, conocidos vulgarmente como orugas de terciopelo, integran un filo llamado protraqueados. Se cree que están estrechamente emparentados con los artrópodos, por lo que se sitúan en una unidad taxonómica mayor, panartrópodos, junto con los artrópodos y los tardígrados.

**opsinas:** Estas proteínas se presentan en dos tipos, I y II. Las opsinas Tipo I se hallan en bacterias y tienen muchos nombres distintos como bacteriorodopsina y proteorodopsina. Las opsinas Tipo II se encuentran en todos los animales excepto en las esponjas. Incluso se encuentran en placozoos y en todos los cnidarios examinados hasta la fecha. La mayoría de las opsinas Tipo II desempeñan un papel en la visión, pero por extraño que parezca algunas actúan en la determinación del ritmo circadiano o los ritmos innatos de aproximadamente veinticuatro horas que regulan gran parte de la fisiología de los organismos. Una pequeña clase de opsinas toma parte también en la contracción de la pupila del ojo. La existencia de las opsinas Tipo I y Tipo II en grupos tan diferentes, y su ausencia en plantas, gran parte de los hongos y muchos protistas, nos lleva a hacer la afirmación más interesante posible acerca de las opsinas: ¡evolucionaron dos veces!

**ósmosis:** El paso de moléculas de un solvente a través de una membrana semipermeable de modo que se iguale la concentración de moléculas a ambos lados de la membrana.

**paedomorfosis o neotenia:** Proceso heterocrónico en el que el ritmo del desarrollo se ve alterado de tal manera que una forma juvenil se mantiene en la vida adulta. El resultado es un individuo de aspecto juvenil pero maduro desde un punto de vista reproductivo. Un ejemplo excelente de paedomorfosis es el ajolote, una salamandra que mantiene la morfología de renacuajo en su etapa adulta.

**Paleolítico superior:** Industria asociada a los cromañones, los primeros humanos modernos que ocuparon Europa y creadores del primer «arte».

**potencial de acción:** Los potenciales de acción se producen cuando las células nerviosas se excitan, y se caracterizan por un cambio en la carga eléctrica o potencial de la superficie de una célula nerviosa o muscular. Los potenciales de acción duran muy

poco y ocurren cuando la membrana de una neurona se abre para dejar que los iones positivos pasen al interior de la célula y los iones negativos al exterior. Los potenciales de acción llevan a cabo cambios en la carga de las células nerviosas. Los impulsos nerviosos son el resultado de una serie de potenciales de acción que viajan a lo largo de una célula nerviosa.

**primeros homínidos:** Antiguos parientes humanos del periodo comprendido entre unos siete y cuatro millones de años atrás. En la actualidad incluyen únicamente a las especies africanas asignadas a los géneros *Sahelanthropus*, *Orrorin* y *Ardipithecus*.

**procaria:** La agrupación clásica de los organismos que carecen de un núcleo rodeado de membrana (Bacterias y Arqueas). Aunque se ha usado durante décadas, esta agrupación es «poco natural» porque las Arqueas y las Bacterias no están estrechamente emparentadas entre ellas.

**propioceptores:** Sensores que informan acerca de la posición en el espacio de diversas partes del cuerpo.

**proteínas 14-3-3:** Familia de moléculas extraordinariamente conservadas que regulan la expresión génica. Se encuentran en todas las células eucarióticas y son multifuncionales en el sentido de que pueden unirse a una gran variedad de proteínas de señalización y regularlas.

**proteínas G:** También conocidas como las proteínas que se unen a nucleótidos de guanina. Esta gran familia de proteínas ayuda a la transmisión de señales desde el exterior de la célula al interior. Al hacerlo alteran el estado del interior celular. Las hormonas y los neurotransmisores constituyen la fuente de muchas de las señales que las proteínas G comunican.

**proteínas G, interacciones del complejo:** Las proteínas G interaccionan con los guanosín tri- y difosfatos (GTP y GDP, respectivamente), moléculas comunes que son importantes para el metabolismo de la célula. El complejo proteína G se activa cuando forma complejo con el GTP y se desactiva cuando lo hace con el GDP. Pero para lograr que los GTP y GDP interaccionen con las proteínas G, algo del exterior de la célula, como un receptor de neurotransmisor, ha de formar un complejo con el propio GPCR.

**proteínquinasas (PK):** Enzimas que llevan a cabo la adición química de grupos fosfato a otras proteínas (en un proceso denominado fosforilación). Más de quinientos genes del genoma humano poseen actividad proteínquinasa.

**proteorodopsina:** Proteína homóloga a la bacteriorodopsina pero que se halla en el bacterioplancton y los eucariotas marinos.

**putamen:** Parte de los ganglios basales. Junto al núcleo caudado forma el núcleo estriado. Esta parte del cerebro es importante en la regulación de las conductas del movimiento y

el aprendizaje.

**receptores acoplados a proteínas G (GPCR):** Esta gran familia de proteínas posee siete dominios transmembrana. Como su nombre indica, se acoplan a proteínas G. Su función es interaccionar con moléculas en el exterior de la célula y por lo tanto «detectarlas». Luego activan la transducción de señales en el interior de la célula que a su vez desencadenan una respuesta celular.

**receptores ionotrópicos:** Receptores que actúan con rapidez y funcionan como compuerta de un canal iónico. El GABA actúa como ligando en este tipo de receptores, y cuando el GABA se une al receptor se abre la compuerta del canal.

**receptores metabotrópicos:** Estos receptores actúan de manera muy distinta a los receptores ionotrópicos mediante la utilización de segundos mensajeros. Producen una respuesta lenta y utilizan una clase de proteínas intracelulares llamadas proteínas G acopladas.

**receptores opioides:** Familia de receptores transmembrana acoplados a proteínas G (GPCR) a los que se unen ligandos opiáceos. Hay cuatro tipos principales de receptores opioides: kappa, mu, delta y nociceptina.

**regiones promotoras:** Regiones de un gen que regulan su expresión. Los genes tienen «regiones codificadoras» que se traducen en proteínas así como regiones que no se traducen (llamadas «regiones no traducidas» o UTR, del inglés «*untranslated regions*»). A menudo las UTR llevan a cabo la regulación del gen promoviendo o impidiendo su expresión.

**rescate transfilético:** El rescate de un fenotipo natural en un organismo que carece de un gen funcional para dicho fenotipo mediante la transferencia de un gen de otro organismo perteneciente a un grupo diferente. Por ejemplo, la mutación «*eyeless*» en *Drosophila* puede ser rescatada transfiriendo el gen Pax6 de los ratones al genoma de la mosca.

**resistencia:** Oposición al paso de una corriente eléctrica. En el contexto de las neuronas, la resistencia es la oposición al paso de los potenciales de acción. Lo contrario a la resistencia es la conductancia o aumento del paso de la corriente eléctrica.

**ribosomas:** Estructuras celulares compuestas de ARN y proteínas. Constan de dos subunidades (grande y pequeña). El ribosoma es el lugar de la célula donde se realiza la síntesis de proteínas.

**scala naturae:** Una forma cuestionada de clasificar y catalogar la vida en el planeta, ideada en un primer momento por Aristóteles. En esta clasificación, la vida se ordena desde la más sencilla a la más compleja, forzando una clasificación lineal donde los seres humanos se hallan en lo más alto.

**sensibilización:** Forma de aprendizaje no asociativo que ocurre después de la administración reiterada de un estímulo y produce una respuesta amplificada ante ese estímulo.

**serotonina:** Pequeña molécula que actúa tanto en el tracto gastrointestinal como en el sistema nervioso central (SNC). En el SNC actúa como neurotransmisor y es responsable de la sensación de bienestar cuando se secreta en grandes cantidades en el cerebro.

**sinapsis:** El espacio entre dos neuronas donde una envía mensajes a la otra. Las neuronas pueden tener *miles* de sinapsis, lo que les permite comunicarse con miles de neuronas distintas a la vez. Y cada neurona puede recibir muchos *tipos* diferentes de mensajes químicos simultáneos a través de las sinapsis. La neurona que transmite la señal se denomina neurona presináptica y la célula que recibe el impulso se llama neurona postsináptica.

**síntesis evolutiva:** Conjunto de la obra realizada por los biólogos evolutivos del siglo xx que aunaba el pensamiento evolutivo darwiniano con la genética y la biología modernas. La fase genética matemática de la síntesis la llevaron a cabo Sewall Wright, R.A. Fisher y J.B.S. Haldane. La fase empírica de la síntesis la realizaron principalmente tres biólogos, Ernst Mayr, Theodosius Dobzhansky y George Gaylord Simpson. En su forma «inflexible», la síntesis equipara más o menos la evolución con un cambio gradual.

**sistema del segundo mensajero:** Sistema mediante el cual las moléculas segundos mensajeros transmiten señales desde la superficie celular, a través de receptores que residen en dicha superficie, a las moléculas diana que se hallan en el interior de la célula (bien en el citoplasma o en el núcleo).

**sistema somatosensorial:** Sistema diverso que comprende los receptores y las partes procesadoras del sistema nervioso que producen respuestas sensoriales tales como el tacto, la temperatura, el reconocimiento de la postura corporal y el dolor. Los receptores sensoriales de dicho sistema se hallan en los huesos y las articulaciones, incluida la piel, en los músculos estriados y en los órganos internos y el sistema cardiovascular.

**tálamo:** Estructura pareada interna del cerebro de simetría bilateral que se halla entre la corteza cerebral y el mesencéfalo. Algunos consideran que esta región cerebral forma parte del sistema límbico y es esencial para transmitir sensaciones, cognición espacial y señales motrices a la corteza cerebral. Esta región del cerebro también regula la alerta y el sueño.

**técnicas para obtener imágenes del cerebro:** En las últimas décadas se han desarrollado varios métodos novedosos para obtener imágenes del cerebro. Entre ellos está la

imagen por resonancia magnética funcional (fMRI), la tomografía por emisión de positrones (PET), la magnetoencefalografía (MEG), y la resonancia magnética de difusión (DMT). Estos métodos utilizan algún subproducto de la actividad cerebral detectable por medio de un sensor, unido a un ordenador de gran potencia, para reconstruir en qué parte del cerebro tiene lugar una actividad. La fMRI utiliza la variación de oxígeno en sangre para detectar funcionalidad en el cerebro. La diferencia entre la fMRI tradicional y la fMRI funcional es que la primera se efectúa en sujetos en reposo absoluto, mientras que la segunda se lleva a cabo en sujetos que realizan tareas específicas relacionadas con el cerebro. La PET requiere la introducción de radionucleidos unidos a una molécula biológicamente activa que participe en la función cerebral. La PET detecta entonces la actividad de la molécula activa a través de la emisión de radioactividad. La MEG registra el campo magnético que produce la actividad cerebral. La DMT mide de qué manera el agua y los neurotransmisores fluyen, o se difunden, por el cerebro. Los patrones de difusión revelan las sendas de las conexiones neuronales en el cerebro.

**telencéfalo:** Conocido también como palio. Junto con el diencefalo, esta región del cerebro de los vertebrados forma el prosencefalo. Constituye la parte más anterior del cerebro y se compone de tres áreas principales conocidas como el cerebro (la corteza cerebral y la corteza prefrontal), los ganglios basales y el sistema límbico.

**tetrápodos:** Animales vertebrados con cuatro extremidades, entre los que figuran los mamíferos, las aves, los anfibios, todos los reptiles (incluidos los que carecen de extremidades como las serpientes), y las tortugas. Los antepasados marinos de estos vertebrados técnicamente pertenecen también a este grupo.

**etiquetado de anticuerpos:** Procedimiento que utilizan los biólogos experimentales para localizar el lugar exacto de producción de un producto génico en células específicas. Los genes producen proteínas, y los anticuerpos pueden reconocer proteínas. Los científicos han aprendido a acoplar moléculas marcadoras como «señales luminosas fluorescentes» a los anticuerpos. Cuando las señales luminosas se unen a tejidos en los que se produce una proteína de interés, la luz fluorescente indica exactamente el lugar del tejido donde se ubica la proteína.

**transducción de señales:** Es la conversión de un tipo de señal molecular en otro. En neuroquímica, un buen ejemplo de transducción de señales es la conversión en un potencial de acción de reacciones químicas tales como la reacción de las moléculas olfativas con transmisores olfativos.

**umwelt:** Los factores medioambientales que influyen en la conducta de un organismo. Recientemente, la periodista Carol Yoon ha aplicado este término a los seres humanos

y su costumbre de dar nombre a las cosas.

---

<sup>1</sup> Las siglas entre paréntesis aluden en prácticamente todos los casos a la expresión inglesa del término correspondiente (*N. de las T.*).

## Bibliografía citada y otras lecturas

A continuación damos una lista de las principales obras consultadas durante la redacción de este libro, incluidas aquellas de las que se extrae una cita o las que se mencionan. Para mayor comodidad están agrupadas por capítulos.

### CAPÍTULO 1. LA NATURALEZA DE LA CIENCIA: EL FUNCIONAMIENTO DE NUESTRO CEREBRO

- BOAKE, C. R., PRICE, D. K. y ANDREADIS, D. K., «Inheritance of Behavioural Differences between Two Interfertile, Sympatric Species, *Drosophila silvestris* and *D. heteroneura*», *Heredity* 80, 1998, pp. 642–650.
- ELDRIDGE, N. y GOULD, S. J., «Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism», en T. J. M. Schopf (ed.), *Models in Paleobiology*, San Francisco, Freeman, Cooper, 1972, pp. 82–115.
- GOULD, S. J. y LEWONTIN, R. C., «The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme», *Proceedings of the Royal Society*, Londres, Ser. B, 205, 1979, pp. 581–598.
- MARCUS, G., *Kluge: The Haphazard Evolution of the Human Mind*, Nueva York, Houghton Mifflin, 2008.
- MEDAWAR, P., *Induction and Intuition in Scientific Thought*, Londres, Methuen, 1969.
- POPPER, K., *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*, Nueva York, Basic Books, 1965. [*Conjeturas y refutaciones: el desarrollo del conocimiento científico*, Barcelona, Paidós, 2008.]
- YOON, C. K., *Naming Nature: The Clash between Instinct and Science*, Nueva York, W. W. Norton, 2009.

## CAPÍTULO 2. LOS PORMENORES DEL SISTEMA NERVIOSO

- ARENDRT, D., «The Evolution of Cell Types in Animals: Emerging Principles from Molecular Studies», *Nature Reviews: Genetics* 9, 2008, pp. 868–882.
- BRAY, D., *Wetware*, New Haven, Yale University Press, 2009.
- CHU, N. S., «Centennial of the Nobel Prize for Golgi and Cajal — Founding of Modern Neuroscience and Irony of Discovery», *Acta Neurologica Taiwanica* 15, 2006, pp. 217–222.
- CRICK, F. H. C., *The Astonishing Hypothesis: The Scientific Search for the Soul*, Nueva York, Scribner, 1995. [*La búsqueda científica del alma: una revolucionaria hipótesis para el siglo XXI*, Madrid, Debate, 1994.]
- y ORGEL, L. E., «Directed Panspermia», *Icarus* 19, 1973, pp. 341–348.
- GILBERT, W., «The RNA World», *Nature* 319, 1986, p. 618.
- GOMPERTS, B. D., KRAMER, I. y TATHAM, M., *Signal Transduction*, Santa Barbara, CA: Academic Press, 2002.
- HELLMAN, H., *Great Feuds in Medicine: Ten of the Liveliest Disputes Ever*, Nueva York, Wiley, 2001.
- SEUNG, H. S., «Reading the Book of Memory: Sparse Sampling versus Dense Mapping of Connectomes», *Neuron* 62, 2009, pp. 17–29.

## CAPÍTULO 3. EL LUGAR DE NUESTRO CEREBRO EN EL ÁRBOL DE LA VIDA

- BALUŠKA, F. y MANCUSO, S., «Deep Evolutionary Origins of Neurobiology: Turning the Essence of “Neural” Upside–Down», *Communicative and Integrative Biology* 2, 2009, pp. 60–65.
- BEAR, M. F., CONNORS, B. W. y PARADISO, M. A., *Neuroscience: Exploring the Brain*, Filadelfia, Lippincott Williams and Wilkins, 2007. [*Neurociencia: explorando el cerebro*, Barcelona, Masson–Williams & Wilkins España, 1999. / *Neurociencia, la exploración del cerebro*, Madrid, OVID, 2012 (libro electrónico)]
- BRUCE, L. L. y NEARY, T. J., «The Limbic System of Tetrapods: A Comparative Analysis of Cortical and Amygdalar Populations», *Brain Behavior and Evolution* 46, 1995, pp. 224–234.
- CHIANG, A.–S. *et al.*, «Three–Dimensional Reconstruction of Brain–Wide Wiring Networks in *Drosophila* at Single–Cell Resolution», *Current Biology*, 2010,

doi:10.1016/j.cub.2010.11.056.

- CHIU, J. *et al.*, «Molecular Evolution of Glutamate Receptors: A Primitive Signaling Mechanism That Existed before Plants and Animals Diverged», *Molecular Biology and Evolution* 16, 1999, pp. 826–838.
- DARWIN, C., *The Power of Movement in Plants*, Londres, John Murray, 1880.
- DAVIES, E., «Electrical Signals in Plants: Facts and Hypotheses», en A. G. Volkov (ed.), *Plant Electrophysiology: Theory and Methods*, Nueva York, Springer, 2006, pp. 407–422.
- DE ROBERTIS, E. M. y SASAI, Y., «A Common Plan for Dorsoventral Patterning in Bilateria», *Nature* 380, 1996, pp. 37–40.
- DUNN, C. W. *et al.*, «Broad Phylogenomic Sampling Improves Resolution of the Animal Tree of Life», *Nature* 452, 2008, pp. 745–749.
- EITEL, M. y SCHIERWATER, B., «The Phylogeography of the Placozoa Suggests a Taxon–Rich Phylum in Tropical and Subtropical Waters», *Molecular Ecology* 19, 2010, pp. 2315–2327.
- ELLIOTT, G. R. D. y LEYS, S. P., «Coordinated Contractions Effectively Expel Water from the Aquiferous System of a Freshwater Sponge», *Journal of Experimental Biology* 210, 2007, pp. 3736–3748.
- EMES, R. D. *et al.*, «Evolutionary Expansion and Anatomical Specialization of Synapse Proteome Complexity», *Nature Neuroscience* 11, 2008, pp. 799–806.
- FITCH, W. M., «Distinguishing Homologous from Analogous Proteins», *Systematic Biology* 19, 1970, pp. 99–113.
- HEIMBERG, A. M. *et al.*, «MicroRNAs Reveal the Interrelationships of Hagfish, Lampreys, and Gnathostomes and the Nature of the Ancestral Vertebrate», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 107, 2010, pp. 19379–19383.
- HOLLAND, N., «Early Central Nervous System Evolution: An Era of Skin Brains?», *Nature Reviews: Neuroscience* 4, 2004, pp. 617–627.
- LAU, S., JÜRGENS, G. y DE SMET, I., «The Evolving Complexity of the Auxin Pathway», *Plant Cell* 20, 2008, pp. 1738–1746.
- MEECH, R., «Non–Neural Reflexes: Sponges and the Origins of Behaviour», *Current Biology* 18, 2008, R70–R72.
- MEYERS, P. Z., «Reinventing the Worm.» ScienceBlogs.com/Pharyngula, 2010.
- MILLER, M. B. y BASSLER, B. L., «Quorum Sensing in Bacteria», *Annual Review of Microbiology* 55, 2001, pp. 165–199.
- NIEUWENHUYNS, R., «Deuterostome Brains: Synopsis and Commentary», *Brain Research Bulletin* 57, 2002, pp. 257–270.

- TREWAVAS, A. J., «Response to Alpi et al.: Plant Neurobiology—All Metaphors Have Value», *Trends in Plant Science* 12, 2007, pp. 231–233.
- WADE, N., «Decoding the Human Brain, with Help from a Fly», *New York Times*, December 13, 2010.
- WATERS, C. M. y BASSLER, B. L., «Quorum Sensing: Cell to Cell Communication in Bacteria», *Annual Review of Cell and Developmental Biology* 21, 2005, pp. 319–346.
- WESTFALL, J. A., «Ultrastructure of Synapses in the First-Evolved Nervous Systems», *Journal of Neurocytology* 25, 1996, pp. 735–746.

#### CAPÍTULO 4. DAR SENTIDO A LOS SENTIDOS

- BOETTIGER, A., ERMENTROUT, B. y OSTER, G., «The Neural Origins of Shell Structure and Pattern in Aquatic Mollusks», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 106, 2009, pp. 6837–6843.
- BOURNE, A. G., «Sense of Taste or Smell in Leeches», *Nature* 36, 1887, pp. 125–126.
- DAMANN, N., VOETS, T. y NILIUS, B., «TRPs in Our Senses», *Current Biology* 18, 2008, R880–R889.
- DE BRUYNE, M., FOSTER, K. y CARLSON, J. R., «Odor Coding in the *Drosophila* Antenna», *Neuron* 30, 2001, pp. 537–552.
- GREGORY, R. L., *Eye and Brain: The Psychology of Seeing*, Londres, Weidenfeld and Nicolson, 2005. [*Ojo y cerebro*, Barcelona, Ediciones Guadarrama, 1966.]
- KELLER, A. y VOSSHALL, L. B., «A Psychophysical Test of the Vibration Theory of Olfaction», *Nature Neuroscience* 4, 2004, pp. 337–338.
- LEE, Y. *et al.*, «Pyrexia Is a New Thermal Transient Receptor Potential Channel Endowing Tolerance to High Temperatures in *Drosophila melanogaster*», *Nature Genetics* 37, 2005, pp. 305–310.
- MESHBERGER, F. L., «An Interpretation of Michelangelo's "Creation of Adam" Based on Neuroanatomy», *Journal of the American Medical Association* 264, 1990, pp. 1837–1841.
- SHERKHELI, M. A., «Selective TRPM8 Agonists: A Novel Group of Neurophathic Analgesics», *FEBS Journal* 274 (s1), 2007, p. 232.
- SHICHIDA, Y. y MATSUYAMA, T., «Evolution of Opsins and Phototransduction», *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, Ser. B, 364, 2009, pp. 2881–2895.
- SUK, I. y TAMARG, R. J., «Concealed Neuroanatomy in Michelangelo's "Separation of Light

- from Darkness” in the Sistine Chapel», *Neurosurgery* 66, 2010, pp. 851–861.
- TURIN, L., «A Spectroscopic Mechanism for Primary Olfactory Reception», *Chemical Senses* 21, 1996, pp. 773–791.
- VIANA, F., LA PEÑA, E. y BELMONTE, C., «Specificity of Cold Thermotransduction Is Determined by Differential Ionic Channel Expression», *Nature Neuroscience* 5, 2002, pp. 254–260.
- WAKEFIELD, M. J. *et al.*, «Cone Visual Pigments of Monotremes: Filling the Phylogenetic Gap», *Visual Neuroscience* 25, 2008, pp. 257–264.
- XIANG, Y. *et al.*, «Light–Avoidance–Mediating Photoreceptors Tile the *Drosophila* Larval Body Wall», *Nature* 468, 2010, pp. 921–926.

## CAPÍTULO 5. EL TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

- BEAR, M., CONNORS, B. y PARADISO, W., *Neuroscience: Exploring the Brain*, Chicago, R. R. Donnelly and Sons, 1996. [*Neurociencia: explorando el cerebro*, Barcelona, Masson–Williams & Wilkins España, 1999. / *Neurociencia, la exploración del cerebro*, Madrid, OVID, 2012 (libro electrónico)]
- EMERY, N., CLAYTON, N. y FRITH, C., *From Brain to Culture*, Nueva York, Oxford University Press, 2007.
- MACLEAN, P. D., *The Triune Brain in Evolution: Role in Paleocerebral Functions*, Nueva York, Plenum Press, 1990.
- PRADEL, A. *et al.*, «Skull and Brain of a 300–Million–Year–Old Chimaeroid Fish Revealed by Synchrotron Holotomography», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 106, 2009, pp. 5224–5228.
- PUTNAM, F. W., «The Blind Cave Fishes of the Mammoth Cave and Their Allies», *Nature* 143, 1872, pp. 246–249.
- RAMSEY, E., «The Optic Lobes and Optic Tracts of *Amblyopsis spelaeus* DeKay», *Journal of Comparative Neurology* 11, 1901, pp. 40–47.
- REINER, A., «You Cannot Have a Vertebrate Brain without Basal Ganglia», en H. J. Groenewegen *et al.* (eds.), *The Basal Ganglia IX*, 3–24, Nueva York, Springer, 2009.
- ROSE, J. D., «Do Fish Feel Pain?», <http://www.anglingmatters.com/DrRoseReport.pdf>
- SMITH, J. A., «A Question of Pain in Invertebrates», *ILAR Journal* 33, 1991, pp. 1–2.
- STRAUSFELD, N. J., «The Insect Mushroom Body: A Uniquely Identifiable Neuropil», en J. L. Leonard (ed.), *Identified Neurons in Model Systems*, Cambridge MA, Harvard

University Press, 1998.

TOMER, R. *et al.*, «Profiling by Image Registration Reveals Common Origin of Annelid Mushroom Bodies and Vertebrate Pallium», *Cell* 142, 2010, pp. 800–809.

## CAPÍTULO 6. EMOCIONES Y MEMORIA

DAMASIO, A., *Looking for Spinoza*, Nueva York, Harcourt, 2003. [*En busca de Spinoza: neurobiología de la emoción y los sentimientos*, Barcelona, Crítica, 2005.]

DARWIN, C., *The Expression of the Emotions in Man and Animals*, Londres, John Murray, 1872. [*La expresión de las emociones*, Pamplona, Laetoli, 2009.]

GOBET, F., DE VOOGT, A. y RETSCHITZKI, J., *Moves in Mind: The Psychology of Board Games*, Londres, Psychology Press, 2004.

GOELET, P., CASTELLUCCI, V. F., SCHACHER, S. y KANDEL, E. R., «The Long and the Short of Long-Term Memory – a Molecular Framework», *Nature* 322, 1984, pp. 419–422.

HENKE, K., «A Model for Memory Systems Based on Processing Modes Rather than Consciousness», *Nature Reviews: Neuroscience* 11, 2010, pp. 523–532.

KEPECS, A., «How Addictive Drugs Hijack Your Dopamine System», <http://bigthink.com/videos/how-addictive-drugs-hijack-your-dopamine-systems>

MÜLLER, N. G. y KNIGHT, R. T., «The Functional Neuroanatomy of Working Memory: Contributions of Human Brain Lesion Studies», *Neuroscience* 139, 2006, pp. 51–58.

—, MACHADO, L. y KNIGHT, R. T., «Contribution of Subregions of the Prefrontal Cortex to Working Memory: Evidence from Brain Lesions in Humans», *Journal of Cognitive Neuroscience* 14, 2002, pp. 673–686.

PANSKEPP, J., *Affective Neuroscience: The Foundations of Human and Animal Emotions*, Oxford, Oxford University Press, 1998.

SQUIRE, L. R. y KANDEL, E., *Memory: From Mind to Molecules*, Greenwood Village CO, Roberts, 2<sup>a</sup> ed., 2004.

## CAPÍTULO 7. LA EVO-DEVO DEL CEREBRO

DASEN, J. S. y JESSELL, T. M., «Hox Networks and the Origins of Motor Neuron Diversity», *Current Topics in Developmental Biology* 88, 2009, pp. 1–32.

FINARELLI, J. A. y FLYNN, J. J., «Brain-Size Evolution and Sociality in Carnivora»,

- Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 106, 2009, pp. 9345–9349.
- GOULD, S. J., *Ontogeny and Phylogeny*, Cambridge MA, Harvard University Press, 1977.  
[*Ontogenia y filogenia: la ley fundamental biogenética*, Barcelona, Crítica, 2010.]
- HAECKEL, E., *Anthropogenie oder Entwicklungsgeschichte des Menschen: Gemeinverständliche wissenschaftliche Vorträge über die Grundzüge der menschlichen Keimes–und Stammes–Geschichte*, Leipzig, Engelmann, 1874.
- KHAITOVICH, P., ENARD, W., LACHMANN, M. y PÄÄBO, S., «Evolution of Primate Gene Expression», *Nature Reviews: Genetics* 77, 2006, pp. 693–702.
- KING, M.–C. y WILSON, A. C., «Evolution at Two Levels in Humans and Chimpanzees», *Science* 188, 1975, pp. 107–116.
- LEVINE, J. S. y MILLER, K. R., *Biology: Discovering Life*, Boston D. C., Heath, 1994.
- MATTICK, J. S. y MEHLER, M. F., «RNA Editing, DNA Recoding and the Evolution of Human Cognition», *Trends in Neuroscience* 31, 2008, pp. 227–233.
- MONTGOMERY, S. *et al.*, «Adaptive Evolution of Four Microcephaly Genes and the Evolution of Brain Size in Anthropoid Primates», *Molecular Biology and Evolution* 28, 2010, pp. 625–639.
- PREUSS, T. M., CACERES, M., OLDHAM, M. C. y GESCHWIND, D. H., «Human Brain Evolution: Insights from Microarrays», *Nature Reviews: Genetics* 5, 2004, pp. 850–860.
- SOL, D. *et al.*, «Evolutionary Divergence in Brain Size between Migratory and Resident Birds», *PLoS One* 5(3), 2010, e9617.
- WEISBECKER, V. y GOSWAMI, A., «Brain Size, Life History, and Metabolism at the Marsupial/Placental Dichotomy», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 107, 2010, pp. 16216–16221.

## CAPÍTULO 8. LETRA Y MÚSICA DE . . .

- BOLHUIS, J. J., OKANOYA, K. y SCHARFF, C., «Twitter Evolution: Converging Mechanisms in Birdsong and Human Speech», *Nature Reviews: Neuroscience* 11, 2010, pp. 747–759.
- CARLETON, K. L., SPADY, T. C. y KOCHER, T., «Visual Communication in East African Cichlid Fishes: Diversity in a Phylogenetic Context», en B. G. Kapoor *et al.* (eds.), *Fish Communication*, Enfield NH, Science Publisher, 2005.
- CORBALLIS, P. M., FUNNELL, M. G. y GAZZANIGA, M. S., «Hemispheric Asymmetries for Simple Visual Judgments in the Split Brain», *Neuropsychologia* 40, 2002, pp. 401–410.

ETHNOLOGUE, <http://www.ethnologue.com>

- FEDORENKO, E. y KANWISHER, N., «Neuroimaging of Language: Why Hasn't a Clearer Picture Emerged?», *Language and Linguistics Compass* 3/4, 2009, pp. 839–865.
- GREENHILL, S. J., ATKINSON, Q. D., MEADE, A. y GRAY, R. D., «The Shape and Tempo of Language Evolution», *Proceedings of the Royal Society, London, Ser. B.*, 277, 2010, pp. 2443–2450.
- GRODZINSKY, Y., «The Picture of the Linguistic Brain: How Sharp Can It Be? Reply to Fedorenko and Kanwisher», *Language and Linguistics Compass* 4, 2010, pp. 605–622.
- HAUSER, M. D., CHOMSKY, N. y FITCH, W. T., «The Faculty of Language: What Is It, Who Has It, and How Did It Evolve? » *Science* 298, 2002, pp. 1569–1579.
- LEVITIN, D., *This Is Your Brain on Music: The Science of a Human Obsession*, Nueva York, Dutton/Penguin, 2006. [*Tu cerebro y la música*, Barcelona, RBA, 2008.]
- MATHGER, L. M., SHASHAR, N. y HANLON, R. T., «Do Cephalopods Communicate Using Polarized Light Reflections from Their Skin?», *Journal of Experimental Biology* 212, 2009, pp. 2133–2140.
- PRICE, C. J., «The Anatomy of Language: A Review of 100 fMRI Studies Published in 2009», *Annals of the New York Academy of Sciences* 1191, 2010, pp. 62–88.
- RIZZOLATTI, G. y CRAIGHERO, L., «The Mirror–Neuron System», *Annual Review of Neuroscience* 27, 2004, pp. 169–192.
- VARGHA–KHADEM, F., GADIAN, G. D., COPP, A. y MISHKIN, M., «FOXP2 and the Neuroanatomy of Speech and Language», *Nature Reviews: Neuroscience* 6, 2005, pp. 131–138.

## CAPÍTULO 9. CONDUCTAS Y CREENCIAS

- DAWKINS, R., *The God Delusion*, Boston, Houghton Mifflin, 2006. [*El espejismo de Dios*, Madrid, Espasa, 2009.]
- DEANER, R. O., KHERA, A. V. y PLATT, M. L., «Monkeys Pay per View: Adaptive Valuation of Social Images by Rhesus Macaques», *Current Biology* 15, 2005, pp. 543–548.
- FORREST, D. V., «Alien Abduction: A Medical Hypothesis», *Journal of the American Academy of Psychoanalysis and Dynamic Psychiatry* 36, 2008, pp. 431–442.
- GLIMCHER, P., DORRIS, M. y BAYER, H., «Psychological Utility Theory and the Neuroeconomics of Choice», documento de trabajo, Universidad de Nueva York, 2005.

- LAVALLEE, C. F., PERSINGER, M. A. y LORET, A., «A Study of Mental Time Travel: Similar and Distinct Electrophysiological Correlates of Re-experiencing Past Events and Pre-experiencing Future Events», *Consciousness and Cognition* 19, 2010, pp. 1037–1044.
- SALLY, D. y HILL, E., «The Development of Interpersonal Strategy: Autism, Theory-of-Mind, Cooperation and Fairness», *Journal of Economic Psychology* 27, 2006, pp. 73–97.
- SANFEY, A. G. *et al.*, «The Neural Basis of Economic Decision-Making in the Ultimatum Game», *Science* 300, 2003, pp. 1755–1758.
- SOLOMON, A., *The Noonday Demon: An Atlas of Depression*, Nueva York, Scribner, 2001.

## CAPÍTULO 10. CEREBRO HUMANO Y EVOLUCIÓN COGNITIVA

- AIELLO, L. y WHEELER, P., «The Expensive-Tissue Hypothesis: The Brain and the Digestive System in Human and Primate Evolution», *Current Anthropology* 36, 1995, pp. 199–221.
- ALLMAN, J., *Evolving Brains*. Nueva York, Freeman, 1999. [*El cerebro en evolución*, Barcelona, Ariel, 2003.]
- AMUNTS, K. *et al.*, «Broca's Region: Novel Organization Principles and Multiple Receptor Mapping», *PLoS Biology* 8, 2010, e1000489.
- ARSUAGA, J.-L., BERMÚDEZ DE CASTRO, J. M. y CARBONELL, E. (eds.), «Special Issue: The Sima de los Huesos Hominid Site», *Journal of Human Evolution* 33, 1997, pp. 105–421.
- BAR-YOSEF, O. y BORDES, J.-G., «Who Were the Makers of the Châtelperronian Culture?», *Journal of Human Evolution* 59, 2010, pp. 586–593.
- BOCHERENS, H. *et al.*, «Isotopic Evidence for Diet and Subsistence Pattern of the Saint-Césaire I Neanderthal: Review and Use of a Multi-Source Mixing Model», *Journal of Human Evolution* 49, 2005, pp. 71–87.
- BRIGGS, A. W. *et al.*, «Targeted Retrieval and Analysis of Five Neanderthal mtDNA Genomes», *Science* 325, 2009, pp. 318–321.
- BROWN, K. S. *et al.*, «Fire as an Engineering Tool of Early Modern Humans», *Science* 325, 2009, pp. 859–862.
- CARBONELL, E. *et al.*, «Cultural Cannibalism as a Paleoeconomic system in the European Lower Pleistocene», *Current Anthropology* 51, 2010, pp. 539–549.
- COHEN, J., *Almost Chimpanzee: Searching for What Makes Us Human in Rainforests*,

- Labs, Sanctuaries and Zoos*, Nueva York, Times Books, 2010.
- COOLIDGE, F. L. y WYNN, T., *The Rise of Homo sapiens: The Evolution of Modern Thinking*, Nueva York, Wiley–Blackwell, 2009.
- COQUEUGNIOT, H., HUBLIN, J.–J., VEILLON, F., HOUËT, F. y JACOB, T., «Early Brain Growth in *Homo erectus* and Implications for Cognitive Ability», *Nature* 431, 2004, pp. 299–302.
- DEAN, C. *et al.*, «Growth Processes in Teeth Distinguish Modern Humans from *Homo erectus* and Earlier Hominins», *Nature* 414, 2001, pp. 628–631.
- DEAN, M. C. y SMITH, B. H., «Growth and Development of the Nariokotome Youth, KNM–WT 15000», en F. E. Grine *et al.* (eds.), *The First Humans: Origin and Early Evolution of the Genus Homo*, Heidelberg, Springer, 2009, pp. 101–120.
- GESCHWIND, N., «The Development of the Brain and the Evolution of Language», *Monograph Series on Languages and Linguistics* 17, 1964, pp. 155–169.
- GIBBONS, A., *The First Human: The Race to Discover Our Earliest Ancestors*, Nueva York, Doubleday, 2006.
- HARCOURT–SMITH, W. E. H., «The Origins of Bipedal Locomotion», en W. Henke e I. Tattersall (eds.), *Handbook of Paleoanthropology*, 3, Heidelberg, Springer, 2007, pp. 1483–1518.
- HART, D. y SUSSMAN, R. W., *Man the Hunted: Primates, Predators, and Human Evolution*, Boulder CO, Westview Press, ed. ampliada, 2009.
- HENSHILWOOD, C. S. *et al.*, «Emergence of Modern Human Behavior: Middle Stone Age Engravings from South Africa», *Science* 295, 2002, pp. 1278–1280.
- , «Middle Stone Age Shell Beads from South Africa», *Science* 304, 2004, p. 404.
- HOLLOWAY, R. L., BROADFIELD, D. C. y YUAN, M. S., *The Human Fossil Record*, vol. 3: *Brain Endocasts—the Paleoneurological Evidence*, Nueva York, Wiley–Liss, 2004.
- KLEIN, R., *The Human Career: Human Biological and Cultural Origins*, Chicago, University of Chicago Press, 3ª ed., 2009.
- LALUEZA–FOX, C. *et al.*, «Genetic Evidence for Patrilocal Mating Behavior among Neandertal groups», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2010, doi/10.1073/pnas.1011533108.
- LIEBERMAN, P., «The Evolution of Human Speech: Its Anatomical and Neural Bases», *Current Anthropology* 48, 2007, pp. 39–66.
- LORDKIPANIDZE, D. *et al.*, «The Earliest Toothless Hominin Skull», *Nature* 434, 2005, pp. 717–718.
- , «Postcranial Evidence of Early *Homo* from Dmanisi, Georgia», *Nature* 449, 2007, pp. 305–310.
- PLUMMER, T., «Flaked Stones and Old Bones: Biological and Cultural Evolution at the Dawn

- of Technology», *Yearbook of Physical Anthropology* 47, 2004, pp. 118–164.
- POVINELLI, D. J., «Behind the Ape's Appearance: Escaping Anthropocentrism in the Study of Other Minds», *Daedalus* 133 (1), 2004, pp. 29–41.
- PRUETZ, J. D. y BERTOLANI, P., «Savanna Chimpanzees, *Pan troglodytes verus*, Hunt with Tools», *Current Biology* 17, 2007, pp. 412–417.
- SCHICK, K. *et al.*, «Continuing Investigations into the Stone Tool–Making and Tool–Using Capabilities of a Bonobo (*Pan paniscus*)», *Journal of Archaeological Science* 26, 1999, pp. 821–832.
- SCHWARTZ, J. H. y TATTERSALL, I., *The Human Fossil Record*, vol. 1: *Terminology and Craniodental Morphology of Genus Homo (Europe)*, Nueva York, Wiley–Liss, 2002.
- SPONHEIMER, M. y LEE–THORP, J., «Hominin Paleodiets: The Contribution Stable Isotopes», en W. Henke e I. Tattersall (eds.), *Handbook of Paleoanthropology*, Heidelberg, Springer, 2007, pp. 555–585.
- TATTERSALL, I., «An Evolutionary Framework for the Acquisition of Symbolic Cognition by *Homo sapiens*», *Comparative Cognition and Behavior Reviews* 3, 2008, pp. 99–114.
- , *The Fossil Trail: How We Know What We Think We Know about Human Evolution*, Nueva York, Oxford University Press, 2ª ed., 2009.
- , «Origin of the Human Sense of Self», en W. van Huyssteen y E. B. Wiebe (eds.), *In Search of Self*, Chicago, Wm. B. Eerdmans, 2011.
- THIEME, H., «Lower Palaeolithic Hunting Spears from Germany», *Nature* 385, 1997, pp. 807–810.
- WALKER, A. C. y LEAKEY, R. E. F., *The Nariokotome Homo erectus Skeleton*, Cambridge MA, Harvard University Press, 1993.
- WOOD, B. y COLLARD, M., «The Human Genus», *Science* 284, 1999, pp. 65–71.
- WRANGHAM, R., *Catching Fire: How Cooking Made Us Human*, Nueva York, Basic Books, 2009.