

INVESTIGACION *y* CIENCIA

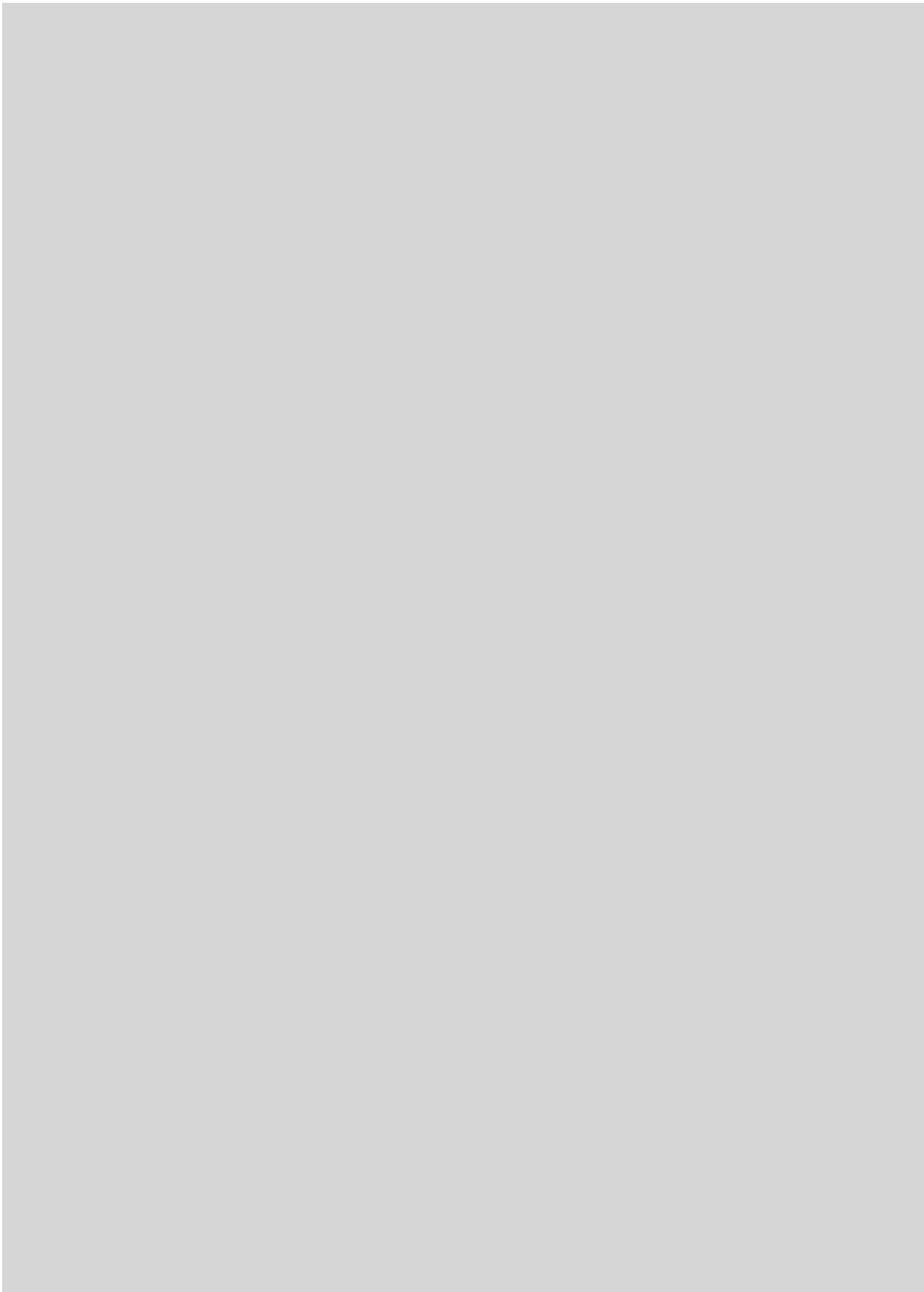
ABRIL 2002
5 EURO

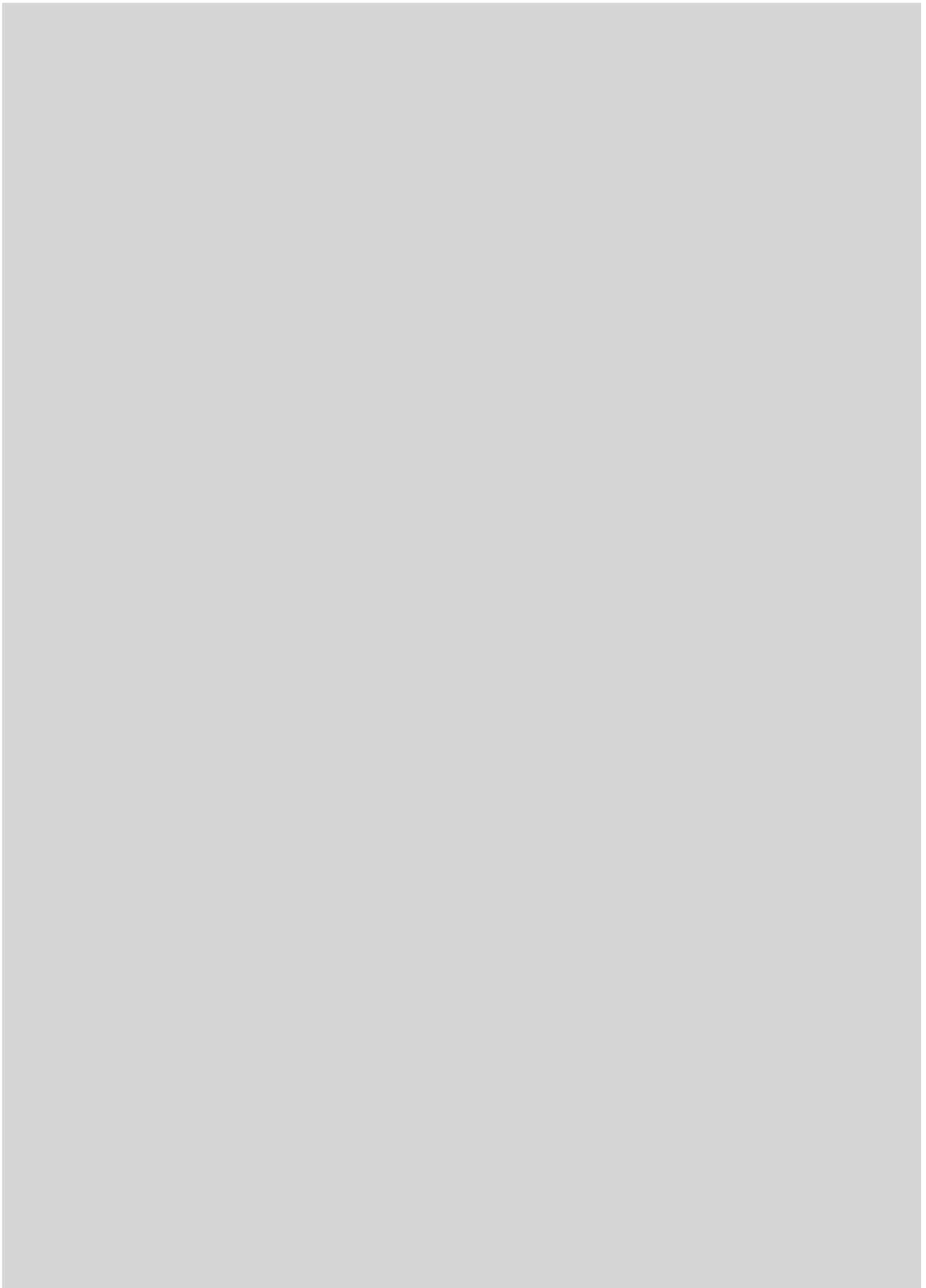
Edición española de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

EL CEREBELO

EL UNIVERSO DE GEORGES LEMAÎTRE
ASTRONOMIA OTOMANA
MESOZOICO DE MADAGASCAR
VITRIFICACION DE RESIDUOS
RADIATIVOS
ADICCION TELEVISIVA







SECCIONES

5

HACE...

50, 100 y 150 años.

30

PERFILES

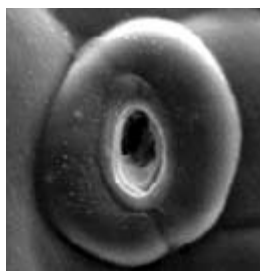
Richard Borchers:
un disparate monstruoso
pero verdadero.



32

CIENCIA Y SOCIEDAD

Biología vegetal,
plantas y CO₂...
Infancia de las estrellas,
burbujas... Terapia
antitrombótica... Cáncer
de piel, la función
de la telomerasa.



38

DE CERCA

De lenteja a placa:
la formación de la banquisa.

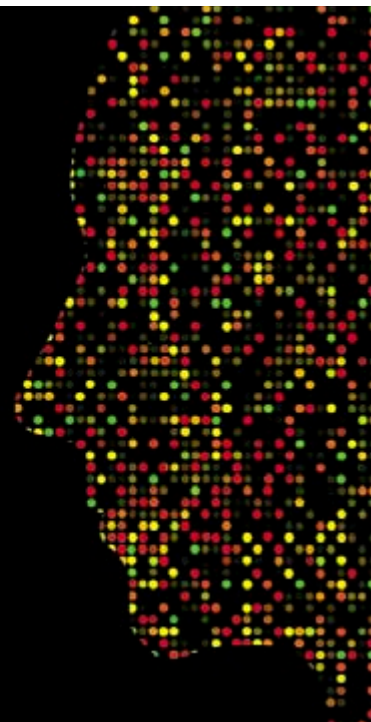


50

Micromatrices de ADN

*Stephen H. Friend
y Roland B. Stoughton*

Con unas ingeniosas
herramientas de
investigación llamadas
micromatrices de ADN,
la ciencia se está
adentrando en las raíces
moleculares de la salud
y la enfermedad,
al tiempo que acelera
el paso en el descubrimiento
de nuevos fármacos.



El cerebelo

Detlef Heck y Fahad Sultan

El cerebelo, que coordina los movimientos delicados, interviene en la audición de las palabras y en otras actividades psíquicas. La disposición geométrica de sus neuronas le permite reconocer mínimas diferencias de tiempo entre las señales que le llegan.



16



Informatización del hogar

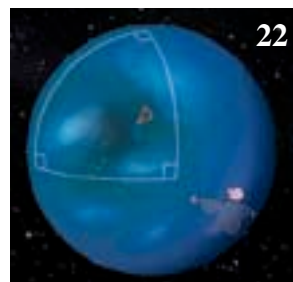
W. Wayt Gibbs

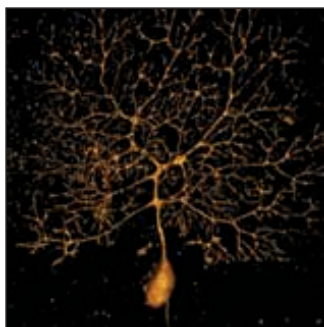
Gracias a unas ingeniosas técnicas,
ya pueden comunicarse los ordenadores
y los electrodomésticos por medio
del cableado eléctrico de la casa.

El universo de Georges Lemaître

Dominique Lambert

Sacerdote y físico, Georges Lemaître fue uno de los fundadores de la teoría de la gran explosión. Algunas de sus intuiciones, que defendió incluso contra el mismo Einstein, se han revelado, cincuenta años más tarde, de una importancia capital.





Portada: Detlef Heck/Fahad Sultan

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

| Página | Fuente |
|--------|---|
| 6 | Instituto Cajal, CSIC |
| 7 | Detlef Heck/Fahad Sultan |
| 9-10 | Thomas Braun/Spektrum der Wissenschaft |
| 11-13 | Detlef Heck/Fahad Sultan |
| 17 | Scott Grimando |
| 19-20 | Xplane (www.xplane.com) |
| 23-26 | Pour la Science |
| 27 | Archives Lemaître |
| 28 | Pour la Science |
| 40-41 | Maria Stenzel, <i>National Geographic Image Collection</i> |
| 42 | John Weinstein, <i>The Field Museum</i> |
| 43 | Sara Chen |
| 44 | Frank Ippolito |
| 45 | John J. Flynn y Susana Magallon |
| 46 | Maria Stenzel |
| 47 | Frank Ippolito |
| 49 | Maria Stenzel |
| 50-51 | Dennis Galante |
| 53 | Jared Schneidman Design |
| 55 | Hongyue Dai, <i>Rosetta Inpharmatics (izquierda)</i> ; Sara Chen (<i>derecha</i>) |
| 56 | Jared Schneidman Design |
| 58-59 | Don Dixon |
| 61-62 | Don Dixon (<i>dibujos</i>); NASA/JPL (<i>imágenes de sonda espacial</i>) |
| 63-64 | Don Dixon |
| 65 | Don Dixon (<i>dibujos</i>); NASA/JPL (<i>imágenes de sonda espacial</i>) |
| 66 | Don Dixon (<i>dibujos</i>); NASA/JPL (<i>izquierda</i>); <i>Nature</i> , vol. 400, n.º 6746, 1999; B. Sicardy et al., Telescopio Canadá-Francia-Hawái (<i>centro</i>) y C. Dumas et al., Telescopio Espacial Hubble, JPL e Instituto Tecnológico de California (<i>derecha</i>) |
| 68-72 | Chip Simons |
| 76-79 | J. M.ª Rincon y M. Romero |
| 83 | Cortesía de ©IMA/photo Philippe Maillard, Museo del Instituto del Mundo Árabe, París |
| 84-85 | Bruno Vacaro |
| 88-89 | George Retseck (<i>dibujos</i>); Universidad de Nueva Orleans y Space Imaging, Inc. (<i>fotografías</i>) |
| 96 | Sara Chen |

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Francesc Asensi: *El cerebro*; Juan Pedro Campos: *El universo de Georges Lemaître*; A. Ferrán: *Reptiles y mamíferos del Mesozoico de Madagascar*; Alfonso Susanna: *Micromatrices de ADN*; M.ª Rosa Zapatero: *Los anillos de los planetas*; José Manuel García de la Mora: *Psicología de la adicción a la televisión*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace...*, *Curiosidades de la física e Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Aventuras problemáticas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
 DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
 EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
 PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
 Bernat Peso Infante
 SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
 ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
 SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
 Olga Blanco Romero
 EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
 Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
 EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
 MANAGING EDITOR Michelle Press
 ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
 NEWS EDITOR Philip M. Yam
 SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
 SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
 EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell,
 Steve Mirsky y George Musser
 PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
 VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
 PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraber
 CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
 Muntaner, 339 pral. 1.ª
 08021 Barcelona (España)
 Teléfono 934 143 344
 Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

| | Un año | Dos años |
|------------|------------|-------------|
| España | 55,00 euro | 100,00 euro |
| Extranjero | 80,00 euro | 150,00 euro |

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,00 euro
 Extraordinario: 6,01 euro
 —El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
 Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
 28108 Alcobendas (Madrid)
 Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
 Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
 Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
 Francisca Martínez Soriano
 Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
 28009 Madrid
 Tel. 914 097 045 – Fax 914 097 046

Cataluña y Baleares:

Sergio Munill
 Valencia, 58 entlo. 2.ª
 08015 Barcelona
 Tel. y fax (34) 932 263 624



Copyright © 2002 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2002 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
 Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

LA ERA DE LOS ANTIBIÓTICOS.

«Aunque ya se hayan descubierto más de 300 sustancias antibióticas, sólo cinco (penicilina, estreptomina, cloromicetina, aureomicina y terramicina) han conseguido la categoría de fármacos consagrados. Otro grupo tiene aplicaciones importantes, aunque limitadas, o que se consideran prometedoras. Todos los demás antibióticos, por una u otra causa, no han cumplido las expectativas. Unos son demasiado débiles; otros actúan sólo en los tubos de ensayo o en animales subhumanos; la mayoría son excesivamente tóxicos. Por supuesto, la búsqueda de nuevas medicinas 'milagrosas' prosigue con fervor infatigable. El campo de investigación es muy amplio. Apenas queda una zona en el reino vegetal que no haya dado sustancias antibióticas. Han salido de simientes, líquenes, muchos grupos de hongos, actinomicetos y bacterias.»

...cien años

ALIMENTOS FRESCOS EN INVIERNO. «A sabiendas, la ciencia ha desafiado todas las leyes que rigen el cultivo estacional; el conflicto se ha resuelto con un gran triunfo para el hombre. En la franja de los estados sureños, donde el clima es lo bastante cálido para los cultivos al aire libre, la horticultura y la agricultura de invierno se han extendido con una fenomenal rapidez en los últimos años. Esta industria ha transformado por completo nuestro sistema de vida y alimentación; durante el invierno estamos abastecidos de frutas y verduras casi tan abundantemente como en verano. La expansión se ha debido a las compañías ferroviarias y navieras que explotan líneas costeras o atraviesan la franja sureña. Durante el invierno se dedican a ese tráfico

más de 60.000 vehículos frigoríficos.»

PRECURSOR DEL ORDENADOR.

«El sistema Hollerith de perforado y tabulación mecánicos se concibió para el censo anterior (el undécimo). Pero el sistema ha sido perfeccionado y ampliado notablemente para satisfacer las actuales y crecidas exigencias del duodécimo censo. Los dos elementos más importantes del sistema son, primero, la tarjeta perforada y, segundo, un medio que traslada mecánicamente lo inscrito en ella a unos registros listados que suman las unidades que contenga (*ilustración*). El último avance del sistema es que el trabajo de colocar por separado cada tarjeta bajo la caja de palpadores, abatir ésta y retirar la tarjeta ya no se hace a mano, sino que se encarga de él automáticamente una máquina. Si en la partida hay presente una tarjeta mal perforada o deformada, será automáticamente expulsada.»

[Nota de la redacción: la Compañía

de Máquinas Tabuladoras de Herman Hollerith acabó siendo IBM.]

EL SABOR DEL DINERO. «Según el conde Gleichen en su 'Misión a Menelik', el pueblo abisinio emplea los táleros de María Teresa de 1780. Pero como dinero menudo se valen de una moneda muy distinta: barras macizas de sal cristalizada, de unos 25 centímetros de largo y con la punta levemente ahusada. Cinco de esas barras valen por un tálero. La gente es muy exigente acerca de los niveles de pureza de la moneda. Si no suena como un metal al ser golpeada con la uña, o si se agrieta o mella, no la aceptan. Es una muestra de afecto, cuando unos amigos se encuentran, intercambiar lamidas de sus respectivas *amolís* (barras), práctica que disminuye el valor de éstas.»

...ciento cincuenta años

EL DOCTOR LIVINGSTONE EN AFRICA.

«El señor Leavitt leyó ante la Sociedad Geográfica Americana un interesante informe del reverendo señor Livingstone (David Livingstone), misionero en Africa del Sur. El reverendo caballero había hecho dos excursiones a las regiones del centro del continente. En los mapas mostrados se aprecia que a 1100 kilómetros del océano el brazo occidental del Zambeze recibe al Chobe, el mayor de sus afluentes, sin que hasta ahora se conozcan las fuentes de esos ríos. Los tratantes de esclavos portugueses empiezan a extender en la zona sus actividades, pero no por sí mismos, sino con la mediación de las tribus negras que están a su servicio. Hará unos dos años que algunos tratantes bien provistos de telas, armas, etc., de fabricación inglesa entraron en la región del Chobe, pero la gente de allá no se mostró propicia al negocio.»



Tabulador de tarjetas por el sistema Hollerith, año 1902

EL CEREBELO

El cerebelo, que coordina los movimientos delicados, interviene en la audición de las palabras y en otras actividades psíquicas. La disposición geométrica de sus neuronas le permite reconocer mínimas diferencias de tiempo entre las señales que le llegan

Detlef Heck y Fahad Sultan

La decisión ha de tomarse en una fracción de segundo. De repente el jugador atrapa la pelota, se retuerce, da dos cortos pasos y la envía a la red. Con toda razón admiramos a los grandes deportistas y a otros virtuosos que dominan magistralmente los movimientos, sean pilotos de carreras, artistas o mecánógrafos. No caemos en la cuenta, sin embargo, de que muchas veces al día todos realizamos movimientos de una precisión equiparable.

En el momento en que un jugador de baloncesto lanza la pelota, tiene que coordinar la contracción de más de seiscientos músculos: su cerebro procesa con rapidez vertiginosa la información que le llega de los órganos sensoriales, incluidos los que determinan la posición corporal y el tono muscular. Inmediatamente decide la actividad muscular a ejecutar. Para conseguir que su organismo realice de forma impecable un trabajo tan complejo, el deportista debe ejercitarse largos años. Con el entrenamiento, las distintas partes del sistema nervioso que intervienen, adquieren un grado creciente de coordinación.

El cerebelo desempeña una función decisiva. Se sabe desde hace tiempo que las lesiones de esta parte del encéfalo dificultan, si no impiden, los movimientos delicados. La ciencia ha descubierto funciones todavía más complejas donde podría participar el cerebelo: desde ciertas actividades psíquicas

hasta la percepción y la competencia en el lenguaje.

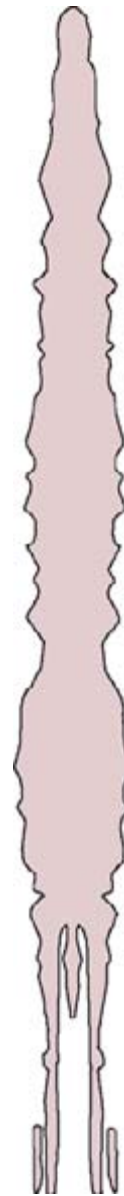
Empezamos a conocer de qué modo el cerebelo lleva a cabo tales funciones y en qué estriba su participación. A diferencia de otros integrantes del sistema nervioso central, el cerebelo presenta una estructura de regularidad extraordinaria. Consta de varios tipos de neuronas que divergen en aspecto y función. Las conexiones entre neuronas siguen un patrón estrictamente geométrico, propio, diríase, de un circuito electrónico. Se supone que en esta estructura radica la clave de la función que el cerebelo desempeña en el conjunto del sistema nervioso central. Como nosotros mismos hemos podido comprobar, gracias a

esa rígida estructura el cerebelo reconoce señales que le llegan en celerísima sucesión. Permite con ello que el cuerpo no sólo realice movimientos rápidos y perfectamente coordinados, sino también que capte determinados estímulos (reconocimiento del habla, por ejemplo). Estos ensayos confirman un modelo propuesto por nuestro grupo de trabajo según el cual las señales que llegan al cerebelo lo atraviesan a la manera de una ola mareal, una “onda de flujo” en nuestra denominación.

El primero que describió la importancia del cerebelo en la coordinación de movimientos, en particular de los muy complejos, fue Gordon Holmes en 1917. Este neurólogo inglés estudió soldados que sufrían lesiones cerebello-



1. REPRESENTACION de las células cerebelosas, tomada de Ramón y Cajal (1911).



2. EN LA VISTA POSTERIOR del encéfalo se aprecia el estrecho plegamiento del cerebelo. Si se desplegara resultaría una cinta de dos metros de longitud.

sas. El armamento y los proyectiles empleados en la Primera Guerra Mundial conseguían una gran velocidad de impacto y provocaban unas lesiones con trayectos “limpios”, bastante bien definidos. Muchos heridos sobrevivieron a sus lesiones. Holmes observó que quedaban lastrados: se veían incapaces de realizar las más sencillas tareas cotidianas. Todo lo hacían de forma incoordinada, como si fueran infantes. Cualquier movimiento resultaba brusco, a pesar de que los afectados no padecían ningún tipo de parálisis, ni sufrían trastorno psíquico alguno.

No lograban siquiera la coordinación de los movimientos más simples; por ejemplo, llevarse el dedo índice a la punta de la nariz, incluso con los ojos abiertos. Tenían gran dificultad para asir una taza de té. La mano llegaba o demasiado pronto o demasiado tarde, con frecuencia chocaba con la taza y la tiraba. A esa falta de coordinación los médicos la llaman “ataxia”. En algunos casos les temblaban las extremidades cuando pretendían realizar movimientos intencionados; verbigracia, aprehender un objeto. Lo peor era que este “temblor de intención” se hacía tanto más intenso cuanto más se aproximaba la mano al objetivo. En algunos afectados la mano iba de un lado a otro; les resultaba imposible asirlo.

Al principio de la evolución biológica el cerebelo (del latín *cerebellum*, “cerebro pequeño”) cubría probablemente otras funciones. Representa un área muy antigua del encéfalo. Se encontraba ya en los primeros vertebrados. La lamprea, un animal arcaico

con forma de anguila, presenta un cerebelo primitivo que se manifiesta como una suerte de protuberancia del cerebro. En esta estructura llama la atención la presencia de unas fibras paralelas que unen las dos mitades del encéfalo, hebras características de nuestro cerebelo. En el caso de la lamprea se trata de una cinta corta y estrecha. No conocemos a ciencia cierta las funciones de este cerebelo primitivo. Su íntima relación con los centros del equilibrio situados en el tronco del encéfalo sugiere una participación en el mantenimiento del equilibrio. Probablemente, los movimientos y los cambios de presión del agua puedan ser percibidos por los peces a través de un órgano sensorial específico situado en los costados del cuerpo.

Con el tiempo la evolución ha ido formando cerebelos de formas y tamaños muy diversos. Sin embargo, resulta sorprendente que, salvo contadas excepciones, la estructura íntima —el patrón en que se hallan ordenadas las neuronas y sus interconexiones— sigue siendo la misma.

Comparadas con las del cerebro, las características del cerebelo resultan sorprendentes. Conviene subrayar que el tamaño de uno y otro ha corrido un curso evolutivo paralelo. También en el desarrollo del individuo maduran a la vez. De la intrínseca relación de

ambas estructuras dan fe los millones de fibrillas a través de las cuales se hallan interconectados. La mayoría de las señales que llegan al cerebelo proceden del cerebro, a través de un grueso paquete de fibras situado en el tronco encefálico. En reciprocidad, el cerebelo envía muchas señales propias al cerebro.

Más neuronas que el cerebro

Pese a todo, no es fácil hallar dos estructuras más dispares. En la corteza cerebral los pliegues y los surcos se disponen de un modo intrincado en todas las direcciones. En la corteza del cerebelo los pliegues discurren en la misma dirección, de forma transversa al eje longitudinal del cuerpo. La corteza cerebral alcanza un grosor de varios milímetros; la del cerebelo, unas décimas de milímetro.

En la capa cortical, constituida por la “sustancia gris”, residen las neuronas en un caso y en el otro. También se generan aquí las “sinapsis”, puntos de contacto a través de los cuales las neuronas reciben las señales transmitidas vía las ramificaciones dendríticas de otras. Por debajo de la corteza se encuentra la “sustancia blanca”, formada por largas prolongaciones de las neuronas —los “axones”— mediante las cuales envían señales a distancia. Para conseguir una más rápida transmisión de las señales eléctricas, tales prolongaciones están rodeadas por unas células especiales; ésa es la explicación de que en las preparaciones anatómicas presenten un aspecto claro. En el cerebro los axones adquieren un volumen enorme y conectan entre sí diversas regiones. El cerebelo presenta, por contra, una sustancia blanca claramente menor. Sus axones envían señales casi exclusivamente a otras partes del encéfalo, sobre todo al cerebro.

Sólo en volumen (una sexta parte) el cerebelo es inferior al cerebro. Extendida, su superficie representa aproximadamente la de un hemisferio cerebral.

Si desplegamos uno de estos hemisferios adoptará la figura de un trapo irregular, con dimensiones similares en todos los sentidos y un diámetro de unos treinta centímetros. En cambio, la superficie del cerebelo supondría una estrecha cinta de casi dos metros y medio de longitud.

Pero el número de neuronas del cerebelo quintuplica las del cerebro: unos cien mil millones frente a veinte mil millones. Si se toma el número de neuronas y la extensión de la superficie como parámetro de la capacidad de procesar información, habrá que admitir que el cerebelo cumple unas misiones diferentes, aunque del mismo nivel de complejidad, que el cerebro. Recientes investigaciones lo confirman.

Hace unos cien años Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) aportaba la primera descripción exacta de cada uno de los tipos de células que se encuentran en el cerebelo; mostraba, asimismo, la disposición estratificada de las células y de las fibras en la corteza cerebelosa. Refinó hasta tal punto nuevos métodos de tinción, que pudo representar células completas del sistema nervioso central, incluidas sus prolongaciones, con un detalle jamás visto hasta entonces. Los tipos celulares que identificó en el cerebelo y los nombres que les dio conservan toda su vigencia.

Ramón y Cajal vio que en la corteza cerebelosa se distinguen ópticamente tres capas. La capa interior y la media están formadas por apretados cuerpos celulares, mientras que la externa contiene las prolongaciones de las neuronas repletas de sinapsis, a través de las cuales se transmiten las señales. En esta capa externa, denominada “capa molecular” por su apariencia estructural homogénea en las tinciones histológicas clásicas, tienen lugar las funciones fundamentales del cerebelo. Aquí, como si se tratara de un patrón hístico tridimensional, las ramificaciones nerviosas se hallan en íntima interrelación.

Reparto de funciones entre las neuronas

En cada una de estas tres capas hay tipos celulares de tamaño, forma y especie peculiares. En su vinculación conjunta, cada tipo se ocupa de una tarea determinada. Las células mayores y más impresionantes son las “células de Purkinje”, denominadas así en honor de Johannes E. Purkinje (1787-1869). Sus grandes cuerpos celulares se ordenan en fila rigurosa, distantes entre sí unas cincuenta micras. Esa serie se sitúa en la parte más interna de la capa media. Las células de Purkinje son las únicas neuronas de la corteza cerebelosa que, a través de sus largas prolongaciones, envían señales hacia el interior del cerebelo; desde allí se retransmiten, entre otros destinos, al cerebro, en particular a la corteza motora, sede donde se emiten las órdenes motoras. Significa ello que las células de Purkinje constituyen las únicas neuronas eferentes del cerebelo que mandan los resultados de su procesamiento informativo a otras partes del encéfalo.

Para la recepción de señales cada célula de Purkinje dispone de un gran árbol dendrítico plano, o

Resumen/El cerebelo

- **El problema.** En la corteza cerebelosa las neuronas se disponen en fila, encadenadas. Sus prolongaciones se sitúan perpendiculares entre sí. Valiéndose de este patrón tan estrictamente imbricado, ¿cómo dirige el cerebelo los movimientos?
- **La tesis.** Las señales que llegan a la corteza cerebelosa deben dar lugar a una onda común de estímulos, una “onda de flujo”. Sólo entonces se envía el mensaje al cerebro.
- **La solución propuesta.** Debido a la separación geométrica entre contactos celulares estimuladores e inhibidores la corteza cerebelosa está formada por varios miles de “franjas”. En cada segmento de franja se desarrolla la coordinación de un determinado patrón motor, adecuado a una situación concreta. Únicamente las señales que rigen movimientos coordinados se retransmiten al cerebro.

Tipos celulares y sus funciones específicas

El patrón que siguen las conexiones que enlazan las neuronas de la corteza cerebelosa, dispuestas en ángulo recto, constituye el sustrato para el gobierno de los movimientos de precisión.

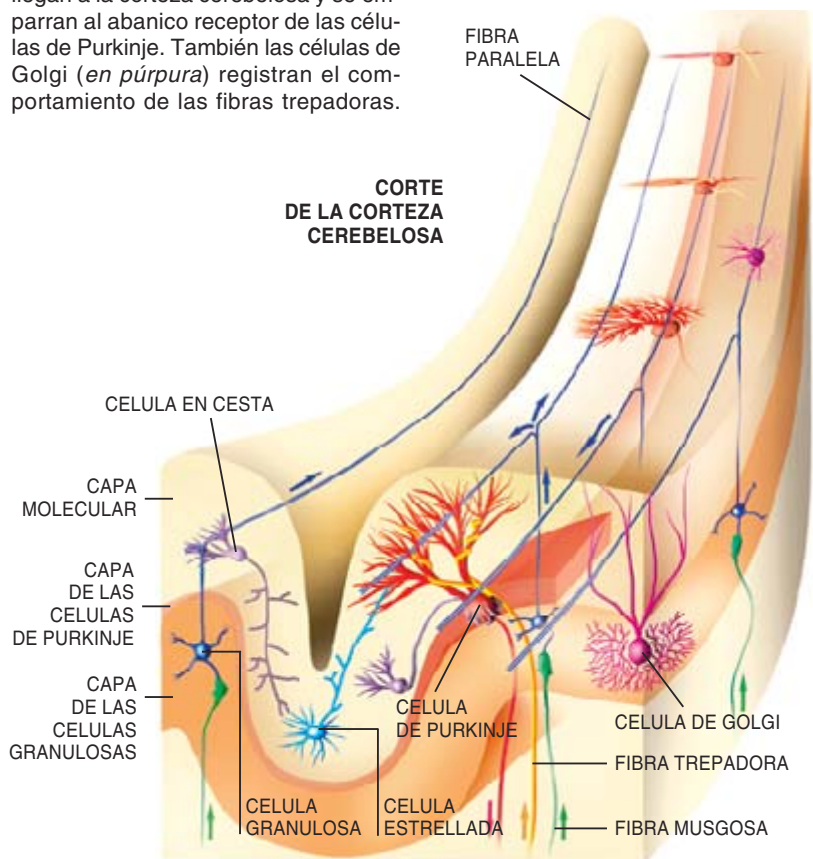
Aparecen varios tipos de neuronas. Las células granulosas (*en azul*) representan la “estación de entrada” para las señales procedentes del exterior. Residen en la capa más profunda de la corteza (*en castaño*) y, con una densidad de 2,7 millones por milímetro cúbico, representan las neuronas más abundantes del encéfalo. Las señales aferentes les llegan a través de las fibras musgosas (*en verde*), cuyo cuerpo celular se encuentra en el tronco del encéfalo.

Las células granulosas transmiten su información mediante fibras paralelas (*en azul*). De cada célula surge una prolongación eferente hasta la capa externa de la corteza (*en gris*) donde se bifurca en dos ramas de varios milímetros de longitud formando un ángulo recto. Tales fibras, muy apretadas, atraviesan las antenas receptoras desplegadas en un plano perpendicular que emergen de las grandes células de Purkinje (*en rojo*); constituyen éstas el “punto de salida” de la corteza cerebelosa. Después de alguna estación intermedia, dichas células envían sus mensajes al cerebro. A través de las fibras paralelas reciben señales que aumentan su actividad. Por el contrario, las células estrelladas (*en azul claro*) y las células en cesta (*en lila*), variantes del mismo tipo celular, establecen contactos con las células de Purkinje a través de los cuales inhiben su actividad. También sus antenas receptoras corren per-

pendiculares a las fibras paralelas cuyos estímulos registran. De esta forma, entre todos los mensajes que a través de las “vías” o las “franjas” de fibras paralelas llegan a las células de Purkinje, quedan regulados los que aportan alguna utilidad.

Para controlar las células de Purkinje, y en realidad para aprender, sirven también las fibras trepadoras (*en amarillo*); desde el tronco del encéfalo llegan a la corteza cerebelosa y se empuñan al abanico receptor de las células de Purkinje. También las células de Golgi (*en púrpura*) registran el comportamiento de las fibras trepadoras.

Estas últimas distribuyen sus antenas en la capa externa, aunque no en un plano, sino en las tres dimensiones del espacio formando una especie de esfera. Las prolongaciones de las células de Golgi se ramifican entre las células granulosas y les transmiten una señal inhibitoria. Se les atribuye la misión de procurar que la actividad general de la capa externa de la corteza cerebelosa no sea excesiva.



mejor dicho, de un abanico dendrítico. Con sus numerosas sinapsis estos abanicos se compactan en la parte más externa de la corteza, unos a continuación de otros, pero todos en la misma dirección transversal a los pliegues de la corteza cerebelosa. Cada abanico, de un grosor de una centésima de milímetro, abarca una superficie aproximada de una décima de milímetro cuadrado. Para las señales aferentes ofrecen de cien mil a doscientos mil contactos sinápticos, cifra extraordinariamente alta incluso para las neuronas del sistema nervioso central. Esto supone un número de sinapsis veinte veces superior al de las neuronas típicas de la corteza cerebral. Cada célula de Purkinje recibe veinte veces más información que las neuronas de la corteza del cerebro.

A las células de Purkinje les llega la mayoría de señales desde las “células granulares”, instaladas en la más interna de las tres capas. La “capa granular” aparece repleta de estas células pequeñas que envían prolongaciones a la capa externa, donde se bifurcan en forma de T. Las dos ramas corren paralelas a los surcos del cerebelo, en un trayecto de dos o tres milímetros; atraviesan, pues, los abanicos de varios centenares de células de Purkinje. Dichas fibras transversales, denominadas “fibras paralelas”, constituyen las estructuras más singulares del cerebelo. Se aprietan en una densidad tal, que en un corte transversal de un milímetro cuadrado hallaríamos seis millones de fibras. A su disposición paralela se debe que los pliegues del cerebelo vayan todos en la

“Ondas de flujo”: garantía para movimientos suaves

¿Cómo consiguen las células del cerebelo que se realicen movimientos rápidos, precisos y coordinados?

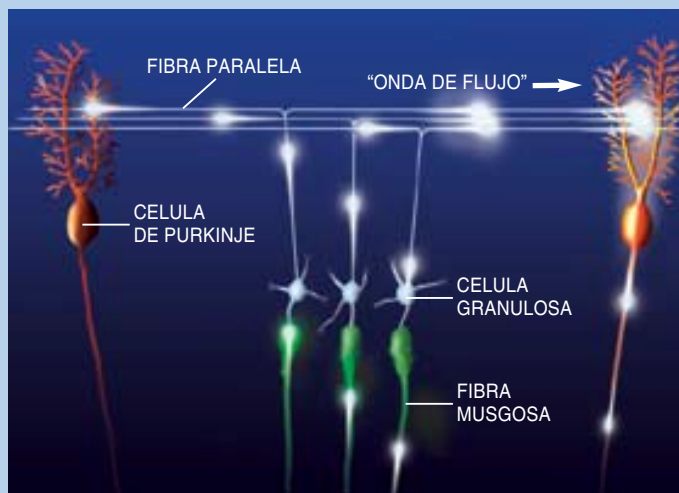
En la corteza cerebelosa, corresponde a las células de Purkinje (*en rojo*) enviar señales al cerebro. Deben ser “excitadas” cuando en una situación dada ha de tener éxito un determinado movimiento. En ese momento, sus grandes abanicos de antenas se ven invadidos por una andanada de señales estimuladoras vehiculadas por las fibras paralelas.

Las señales estimuladoras proceden también de las células granulosas (*en azul*) vecinas. Para que las señales transcurran sincrónicamente por las fibras paralelas en forma de “ondas de flujo” y lleguen al mismo tiempo a las células de Purkinje, se requiere que las distintas células granulosas reciban un estímulo

desde el exterior, siguiendo un patrón a tenor del cual arriben primero las más lejanas y, luego, las más cercanas.

Mediante una suerte de “aprendizaje” el cerebelo permite sólo combinaciones muy concretas de señales. Reconoce secuencias específicas de señales formadas por una multitud de informaciones. Se incluyen señales sensoriales sobre la postura del cuerpo y su situación en el espacio dado, así como sobre los procesos motores que se están llevando a cabo en el cerebro.

A buen seguro, la corteza cerebelosa “codifica”, localizándolas meticulosamente en su superficie, nuestras infinitas posibilidades motoras.



Una “onda de flujo” encuentra la célula de Purkinje adecuada.

misma dirección, que no es otra que la de las fibras paralelas.

El principio de las conexiones entre las células granulosas y las de Purkinje está muy claro: las células granulosas reciben señales del exterior del cerebelo y, por su parte, pueden estimular las células de Purkinje a través de múltiples sinapsis. Cuando éstas se excitan, envían las señales fuera de la corteza cerebelosa.

Sin embargo, el resultado final viene determinado por otras células. En la capa externa hay unas anodinas que forman también una especie de abanicos, pero mucho menos fijos. Estos árboles dendríticos se sitúan transversales a los surcos, dibujando un ángulo recto con las fibras paralelas. A través de sus axones, estas neuronas establecen también sinapsis con las células de Purkinje. Pero envían señales inhibitorias, que bloquean la actividad de las células receptoras. Ello significa que la célula de Purkinje obtendrá un resultado final a partir de los múltiples mensajes que le llegan, en parte estimuladores y en parte inhibidores.

Las células granulosas reciben también señales inhibitorias a través de otras advertidoras. Probablemente esto impida que la actividad general de la capa externa no se vea sobreexcitada. Por otro lado, estas neuronas inhibitorias, denominadas células de Golgi, constituyen una excepción en el patrón de las

neuronas cerebelosas que se caracteriza por extender sus ramificaciones en dos dimensiones.

En el procesamiento de la información desempeñan una función muy importante las “fibras trepadoras”. Ascenden desde el tronco del encéfalo y se empujan estrechamente a las células de Purkinje. Ese movimiento trepador se produce cuando la célula de Purkinje entra en una fase de actividad excesiva. Las fibras trepadoras, por utilizar una imagen, son el maestro que reprende al alumno. Intervienen, al parecer, cuando el cerebelo ha aprendido ya a dirigir un determinado movimiento.

Patrón de estímulos con limitaciones locales

El principio fundamental de la ordenación celular de la corteza cerebelosa resulta evidente. En la capa más externa, donde numerosas neuronas establecen contacto mutuo, existen dos direcciones privilegiadas para las vías eferentes: paralelas a los pliegues o siguiendo un plano perpendicular a las primeras. Los axones que optan por un curso paralelo, es decir, las “fibras paralelas”, son portadoras de señales estimuladoras; las otras lo son de señales inhibitorias. ¿Qué tiene que ver esta disposición precisa, de geometría casi exacta, con las funciones del cerebelo? ¿Qué se esconde tras la disposición de los elementos estimuladores e inhibidores?