

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Agosto 2013 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MEDIOAMBIENTE
Lagos alpinos
y cambio
global

ETOLOGÍA
Imitación
vocal entre
animales

QUÍMICA
Fisuras
en la tabla
periódica

INFORME ESPECIAL

El futuro de la fabricación

La próxima
revolución
industrial



Robots jefes

Nuevos materiales

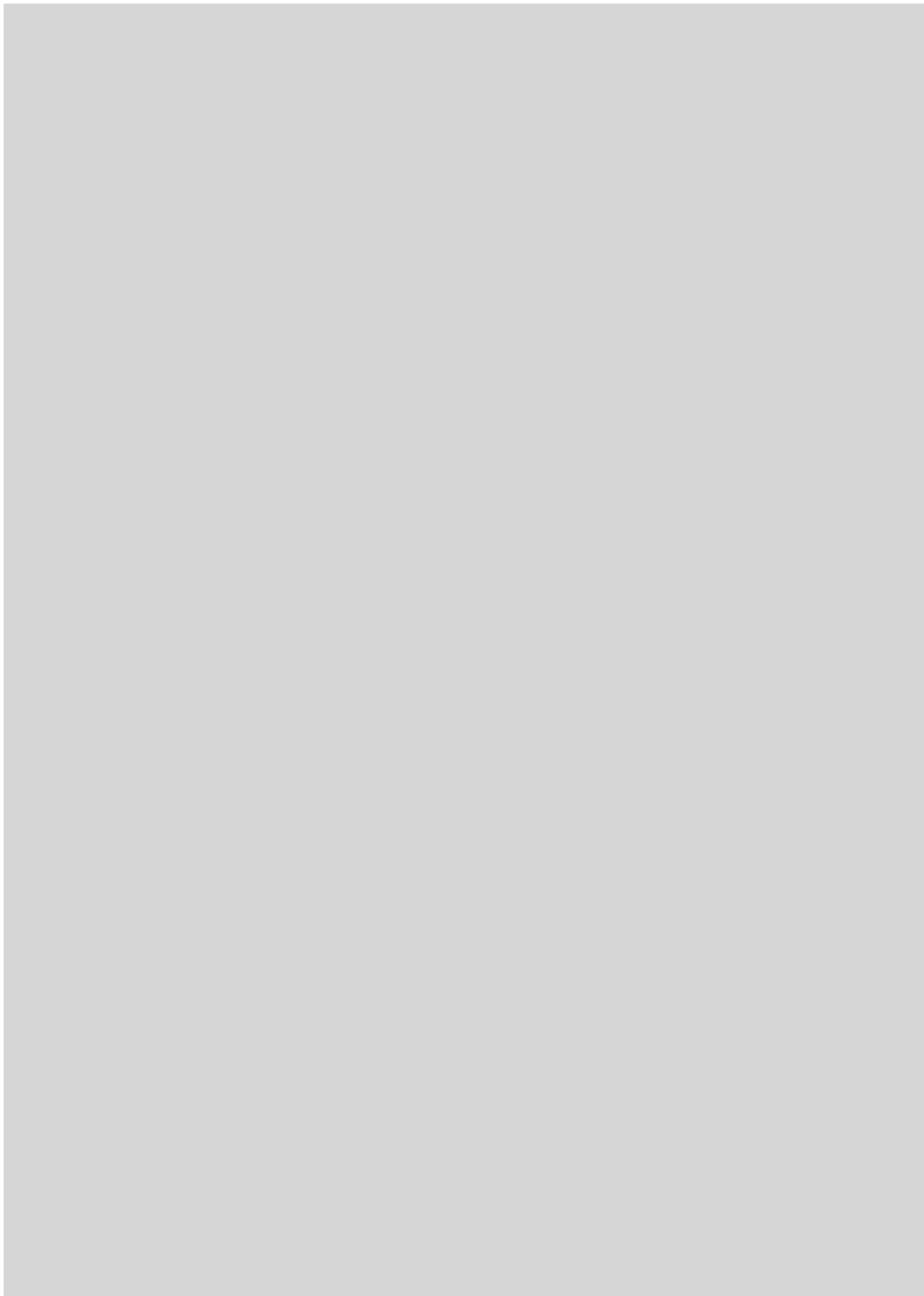
Impresión en 3D

Nanomáquinas

Fábricas virtuales



6,50 EUROS



ARTÍCULOS

INFORME ESPECIAL

16 **El futuro de la fabricación**

Por Ricardo Hausmann

18 **Mi jefe el robot**

Por David Bourne

22 **Materiales del futuro**

Por Steven Ashley

24 **Imprimir lo imposible**

Por Larry Greenemeier

28 **El auge de los nanorrobots**

Por Mihail C. Roco

30 **Fábricas virtuales**

Por James D. Myers

FÍSICA

32 **Bayesianismo cuántico**

Una nueva interpretación de la teoría cuántica aspira a eliminar las paradojas que parecen plagar el mundo microscópico. ¿El precio? Admitir que la información cuántica solo existe en nuestra imaginación.

Por Hans Christian von Baeyer

NEUROCIENCIA

38 **Romper la barrera cerebral**

Una nueva concepción de la barrera hematoencefálica como un órgano vivo y mutable puede revolucionar el tratamiento de enfermedades como el cáncer y el Alzheimer. Por Jeneen Interlandi

ECOLOGÍA

50 **Lagos alpinos: observatorios del cambio global**

Una gran sensibilidad a las alteraciones ambientales convierte a estos ecosistemas remotos en excelentes atalayas para el estudio del clima y la contaminación.

Por Lluís Camarero

QUÍMICA

60 **Fisuras en la tabla periódica**

El descubrimiento del elemento 117 llenó el último hueco que quedaba en la tabla periódica. Sin embargo, ahora que se ha completado puede que esté perdiendo su valor. Por Eric R. Scerri

ETOLOGÍA

66 **Imitación vocal en el mundo animal**

La imitación de las llamadas de los miembros del grupo y las parejas indica la existencia de vínculos sociales en algunas especies. Por Kendra Sewall

TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

76 **Las fronteras de Internet**

Para evitar el colapso de la Red ante el creciente tráfico de datos, hay que modificar por completo el tratamiento de la información, afirma el director de los Laboratorios Bell de Investigación. Por Larry Greenemeier

ASTRONOMÍA

80 **Cuatro noches estrelladas**

En el desierto más seco de la Tierra, una astrónoma escudriña el cielo en busca de pistas sobre la evolución de la Vía Láctea. Lo que sigue a continuación es el relato de uno de sus viajes. Por Anna Frebel

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes

Prever el próximo Cheliábinsk. Hablar con gestos. Rastreo de atunes mediante el cesio de Fukushima. Círculos enigmáticos. Medieval y moderno. Atención médica a través de móviles. Zumbidos reveladores.

7 Agenda

8 Panorama

Epigenética, temperatura y sexo. *Por Francesc Piferrer*
Los costes sociales del estrés. *Por Elizabeth H. Blackburn y Elissa S. Epel*
Cristales temporales. *Por Piers Coleman*
La vida bajo nuestros pies. *Por James I. Prosser*

44 De cerca

Diversidad marina escondida.
Por Esther Garcés y Sonia Quijano

46 Historia de la ciencia

Einstein, Picasso y la creatividad.
Por Jesús María Galech Amillano

48 Foro científico

¿Podemos hacer más con menos?
Por Xavier Obradors

86 Taller y laboratorio

Creación de una xiloteca.
Por Marc Boada Ferrer

90 Juegos matemáticos

Dilemas cooperativos e inducción hacia atrás (2).
Por Alejandro Pérez Carballo

92 Libros

Hubble. Cosmología. *Por Luis Alonso*
Ética aplicada. *Por Luis Alonso*

96 Hace...

50, 100 y 150 años.



EN PORTADA

Las nuevas técnicas para almacenar y procesar información prometen revolucionar la manera en que concebimos y fabricamos nuevos productos. En un futuro próximo, humanos y robots trabajarán codo con codo, la impresión en 3D permitirá construir objetos antaño imposibles de confeccionar y las simulaciones computarizadas someterán a prueba miles de posibles diseños antes de fabricar el primer prototipo. Ilustración de Justin Metz.





Febrero 2013

COMBATIR LA DEPRESIÓN

En el artículo «Terapia de la depresión» [INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2013], Robin Marantz Henig resume con acierto lo que hoy sabemos sobre la eficacia de los antidepresivos al afirmar que «dejan mucho que desear».

Sin embargo, existen alternativas. Varios estudios controlados aleatorios de gran calidad han demostrado que, tanto en pacientes que han sobrevivido a un cáncer como en otros grupos de población, el ejercicio aeróbico reduce los síntomas depresivos. Y al contrario de lo que ocurre con los efectos secundarios habituales de los antidepresivos (disfunción sexual, jaqueca, insomnio y náusea), los del ejercicio resultan maravillosos: refuerzo de la libido, mejoras en el sueño, reducción de la grasa corporal, aumento de la resistencia física y de la esperanza de vida, entre otros. A esto debemos añadir su bajo coste y la posibilidad de adaptarlo a las necesidades de cada paciente. ¿Acaso debemos recurrir siempre a los fármacos para combatir la depresión?

BLAIR T. JOHNSON
LINDA S. PESCATELLO
Universidad de Connecticut

Uno de los posibles nuevos tratamientos analizados en el artículo «Terapia de la depresión» se centra en suprimir los procesos inflamatorios. Sin embargo, esta clase de sustancias reguladoras del sistema inmunitario pueden provocar también un indeseado efecto secundario: permitir la reactivación de una infección laten-

«¿Acaso debemos recurrir siempre a los fármacos para combatir la depresión?»

BLAIR T. JOHNSON Y LINDA S. PESCATELLO
UNIVERSIDAD DE CONNECTICUT

te. Otros efectos no se limitan a las infecciones latentes, sino que pueden influir sobre infecciones activas pero que han sido pasadas por alto. En general, interferir con el sistema inmunitario tiene consecuencias.

Algunos investigadores están estudiando la relación entre microorganismos y los trastornos mentales. Es bien sabido que la sífilis provoca síntomas psiquiátricos. Lo mismo podría ocurrir con otros agentes infecciosos. En tales casos, lo deseable sería identificar y tratar también la infección.

LINDA FINN
Gainesville, Georgia

EL CALENTAMIENTO DEL ÁRTICO

En «Inviernos extremos» [INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2013], Charles H. Greene explica por qué el deshielo de la banquisa ártica puede provocar inviernos inusualmente fríos en Estados Unidos y Europa.

Según el artículo, las fases negativas de la Oscilación Ártica (AO) y de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) se encuentran asociadas a fenómenos climáticos que favorecen que las masas de aire frío se desplacen hacia el sur. En ese caso, ¿no deberían también producirse corrientes de aire cálido hacia el norte? Y, de ser así, ¿no constituiría ese fenómeno otro mecanismo de retroalimentación positiva que aceleraría el calentamiento del Ártico?

BEN HARDING
Boulder, Colorado

RESPONDE GREENE: *La corriente en chorro presenta ondulaciones cuya amplitud tiende a aumentar durante las fases negativas de la AO y la NAO. Cuando una parte de esas ondas se dirige hacia el sur y transporta aire ártico a latitudes más bajas, otra parte penetra hacia el norte*

y arrastra aire cálido a latitudes superiores. En general, ese aire cálido no alcanzará latitudes lo bastante altas como para influir directamente en la fusión de la banquisa ártica ni en la retroalimentación asociada al albedo del hielo oceánico. Sin embargo, existen otros procesos relacionados con una corriente en chorro más ondulada que sí podrían amplificar el calentamiento en el Ártico. En concreto, el transporte de vapor de agua hacia latitudes altas puede provocar los siguientes efectos:

1. Dado que el vapor de agua ejerce un potente efecto invernadero, absorbe las emisiones de radiación infrarroja (calor) y provoca un calentamiento adicional de la atmósfera.
2. El vapor de agua puede condensar en nubes que retienen el calor; lo cual también incrementaría las temperaturas.
3. Por último, esa condensación da lugar a una liberación de calor latente. Ello también contribuye a calentar la atmósfera.

Además de los efectos señalados, la ondulación de la corriente en chorro se asocia al desarrollo de fenómenos de bloqueo: la formación de sistemas estacionarios de altas presiones que entorpecen la circulación atmosférica. En algunos veranos de los últimos años, el aumento del bloqueo sobre Groenlandia ha alterado la circulación de los vientos y ha favorecido la migración de hielo desde el océano Ártico hacia el Atlántico Norte. Esa pérdida de hielo ártico ejerce un efecto de retroalimentación por albedo similar al que provoca la fusión de la banquisa.

Hay, pues, razones suficientes para pensar que la aparición de corrientes en chorro más onduladas podría aumentar los fenómenos de retroalimentación positiva e inducir un calentamiento del Ártico aún más rápido.

CARTAS DE LOS LECTORES

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.º, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. INVESTIGACIÓN Y CIENCIA se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

ASTRONOMÍA

Prever el próximo Cheliábinsk

Durante los próximos años, la NASA reunirá grandes cantidades de datos sobre los objetos próximos a la Tierra (más conocidos por sus siglas inglesas, NEO), incluidos cometas y asteroides. Por desgracia, no parece fácil protegerse de un meteoróide como el que el pasado febrero sobrevoló la ciudad rusa de Cheliábinsk, en la que dejó más de un millar de heridos. Con sus 17 metros, aquel objeto era demasiado pequeño para haber sido detectado en un rastreo sistemático. Los buscadores de NEO suelen centrarse en objetos de mayor tamaño y potencialmente más peligrosos. Con todo, dado que los sucesos similares al de Cheliábinsk ocurren de media una vez al siglo, puede que para cuando caiga el próximo la humanidad ya cuente con técnicas más eficaces.

Desde hace unos diez años, el Sondeo Celeste Catalina constituye el principal proyecto dedicado a buscar objetos que transitan demasiado cerca de nuestro planeta. Gracias a un conjunto de tres telescopios que operan desde Arizona y Australia, esta iniciativa viene descubriendo unos 600 cuerpos celestes al año. Sus resultados han ayudado a la NASA a alcanzar el objetivo de catalogar el 90 por ciento de todos los objetos próximos de más de un kilómetro de diámetro.

El primero de los cuatro telescopios que integrarán el Sondeo Telescópico Panorámico y Sistema de Respuesta Rápida (Pan-STARRS), en Hawái, comenzó a funcionar hace poco. En términos del número de objetos detectados al año supone ya el segundo buscador de NEO más importante. Aunque debería facilitar el

rastreo de asteroides de varios cientos de metros de diámetro, la mayoría de los objetos de menor tamaño seguirá quedando fuera de su alcance.

El Gran Telescopio para Rastros Sinópticos (LSST), que se espera que entre en funcionamiento a finales de esta década en Chile, gozará de una capacidad de observación asombrosa. Con un diámetro de 8,4 metros y una cámara digital de tres gigapíxeles, podrá catalogar todos los cuerpos de más de 140 metros de longitud, lo que cumplirá con el próximo objetivo de la NASA.

El Sistema de Última Alerta de Impacto de Asteroides contra la Tierra (ATLAS), el cual debería entrar en servicio en 2015, se ha propuesto el objetivo de detectar objetos con la antelación suficiente para evacuar las áreas amenazadas. Sus diseñadores creen que este conjunto de telescopios situados en Hawái podrá identificar un asteroide de cincuenta metros de diámetro (con capacidad para arrasar una ciudad entera) una semana antes de su posible colisión contra nuestro planeta.

La Fundación B612, una institución sin ánimo de lucro, manifestó hace poco su propósito de construir Sentinel, un telescopio espacial que escudriñaría el sistema solar interior desde una órbita similar a la de Venus. Se lanzaría en 2018 y se centraría de inmediato en los asteroides más peligrosos. En un plazo previsto de cinco años y medio, identificaría el 90 por ciento de los objetos próximos a nuestro planeta cuyo radio sobrepasase los 140 metros.

—John Matson



Daños causados por el bólido de Cheliábinsk el pasado mes de febrero.



TECNOLOGÍA

Hablar con gestos

Hace ya tiempo que Stephen Hawking depende de los avances técnicos para comunicarse. Durante la última década, el conocido físico, que lleva medio siglo luchando contra una enfermedad neurodegenerativa, se ha valido de una contracción voluntaria en una de sus mejillas para componer, letra a letra, palabras y frases. Con cada movimiento detenía un cursor que se desplazaba sin cesar sobre las letras en una pantalla. En los últimos años, sin embargo, su estado se ha deteriorado. Ahora solo puede comunicarse al ritmo de una palabra por minuto. A finales de 2011, Hawking se puso en contacto con Intel y solicitó ayuda.

El director técnico de la compañía, Justin Rattner, informó en la Feria Internacional de Electrónica de Consumo, celebrada el pasado mes de enero, de que habían construido un sistema mejorado de predicción de palabras. En estos momentos la multinacional está explorando el uso de programas informáticos de reconocimiento facial para mejorar la comunicación. El trabajo forma parte de un programa de investigación más amplio que persigue desarrollar dispositivos de ayuda para ancianos y discapacitados. La clave reside en la «percepción del contexto», una técnica que permite que un instrumento se anticipe a las necesidades del usuario; por ejemplo, recordándole que tiene una cita o avisándole de que debe coger dinero antes de salir a realizar un recado.

Materializar la idea de Intel requiere toda una combinación de sensores (cámara, acelerómetro, micrófono y termómetro, entre otros), así como un programa informático capaz de revisar la agenda del usuario, sus redes sociales o sus hábitos de navegación en Internet. «En pocos años estaremos conectados emocionalmente a nuestros dispositivos», predice Rattner.

—Larry Greenemeier

CONSERVACIÓN

Rastreo de atunes mediante el cesio de Fukushima

Un equipo de investigadores ha hallado trazas de isótopos radiactivos procedentes del accidente nuclear de Fukushima en atunes rojos cercanos a las costas de California. Aunque parecen malas noticias, los niveles de radiación resultan demasiado bajos para dañar a humanos o peces. Sin embargo, sí podrían ayudar a los conservacionistas a rastrear las especies amenazadas por la sobreexplotación y diseñar programas para protegerlas.

La pasada primavera, Dan Madigan, estudiante de doctorado de la Universidad Stanford, y otros colaboradores hallaron trazas de cesio 137 y cesio 134 en atunes rojos pescados en las proximidades de San Diego. Lo más probable era que los peces hubiesen incorporado dichos isótopos a su organismo tras ingerir plancton o peces contaminados cerca de la costa japonesa. Los científicos diseñaron un método para estudiar las migraciones del atún a partir de la cantidad almacenada de isótopos radiactivos. El cesio 134 tiene un período de semidesintegración de 2,1 años; el cesio 137, de 30,1 años. Así pues, verificaron si la proporción de cada isótopo presente en los peces reflejaba el momento de su llegada a las costas californianas. En general, una mayor abundancia del primero indicaría un tiempo de llegada más reciente.

Los resultados se mostraron conformes con lo que los expertos ya sabían acerca de la especie. Los atunes rojos del Pacífico desovan cerca de las costas de Japón. Las crías pasan allí su primer año de vida y, después, o bien permanecen en la zona, o bien se dirigen hacia la costa californiana para engordar antes

de aparearse. El equipo de Madigan halló que todos los peces con una edad igual o inferior a 1,6 años habían migrado y que el viaje desde Japón les habría llevado unos dos meses. Estos datos les permitieron validar su método. Los resultados aparecieron publicados el pasado mes de marzo en la revista *Environmental Science & Technology*.

La nueva técnica se muestra prometedora para rastrear los patrones migratorios de otras especies del Pacífico, como tiburones, ballenas y tortugas. Aunque los niveles de cesio 134 pronto serán demasiado bajos para resultar útiles, el equipo de Madigan logró correlacionar las tasas de radiactividad con la abundancia de otros isótopos estables, como los de carbono y nitrógeno. Ello permitirá emplearlos a modo de indicadores. «Uno de los métodos es finito, pero el otro no. Una vez que hemos establecido una relación entre ambos, podremos usar el segundo en el futuro», explica Madigan.

—Marissa Fessenden



¿QUÉ ES ESTO?

Círculos enigmáticos: En el desierto del Namib, en la zona suroccidental de África, la vegetación no destaca por su abundancia. Sin embargo, en algunas áreas aparecen misteriosos anillos de hierba con el centro yermo, los cuales prosperan a pesar de la escasez de lluvia. Un estudio reciente acaba de esclarecer su origen. Estos «anillos de hadas», como se les suele llamar, serían una consecuencia de la labor de ciertas criaturas diminutas: las termitas.

En el interior y las inmediaciones de tales anillos, cuyo diámetro varía entre uno y cincuenta metros, y cuya presencia puede prolongarse durante décadas, suelen congregarse una gran cantidad de organismos. En un estudio publicado el pasado mes de marzo en la revista *Science*, sin embargo, los autores refirieron que solo una especie era común a todos ellos: la termita del desierto *Psammotermes allocerus*. El pequeño insecto se convertía así en el principal candidato para explicar el fenómeno.

¿Cómo se crean los anillos de hadas? Cuando las termitas se agrupan para alimentarse, destruyen la vegetación y dejan vacía una zona de geometría circular que retiene más agua que el terreno circundante. Dichos círculos actúan así como depósito de agua para las termitas, las plantas que crecen en sus bordes y otros organismos sedientos.

—Sophie Bushwick



MEDICINA

Medieval y moderno

En tiempos antiguos, antes de que se descubrieran los antibióticos, los médicos empleaban larvas de insectos para ayudar a limpiar heridas y evitar infecciones. Debido a que las larvas solo se alimentan de la carne muerta, los facultativos no tenían que preocuparse por la posibilidad de que devorasen los tejidos sanos. La llegada de los antibióticos convirtió a los gusanos medicinales en una reliquia del pasado.

La resistencia cada vez mayor a los antibióticos, sin embargo, ha reavivado el interés por las larvas y, en 2004, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. los aprobó como «dispositivo médico». En la actualidad, los proveedores de larvas las crían a partir de huevos de mosca esterilizados y las colocan en paquetes semejantes a una bolsita de té, que los médicos aplican directamente a las heridas (con lo que evitan que las larvas se escapen y terminen por convertirse en moscas adultas). Mientras va aumentando la aplicación de los insectos para tratar heridas, se ha ido descubriendo el doble proceso mediante el cual los gusanos llevan a cabo su milagro.

Un estudio publicado el año pasado en *Archives of Dermatology* demostró que las larvas colocadas en incisiones quirúrgicas ayudaban a eliminar más tejido muerto que el desbridamiento quirúrgico, la estrategia estándar actual que consiste en el uso de un escalpelo o de tijeras. «El desbridamiento con gusanos elimina todo el tejido muerto e infectado, una condición necesaria para la cicatrización de la herida», afirma Anne Dompmartin-Blanchère, dermatóloga de la Universidad de Caen y autora principal del estudio. El desbridamiento quirúrgico suele ser un proceso prolongado y doloroso, mientras que el tratamiento con gusanos resulta más breve y no produce dolor, añade.

Otro estudio, publicado a finales del año pasado en *Wound Regeneration and Repair* por Gwendolyn Cazander, del Centro Médico de la Universidad de Leiden, y sus colaboradores, reveló que las secreciones de las larvas modulaban la respuesta del sistema del complemento, una parte del sistema inmunitario que reacciona contra los patógenos invasores y que resulta crucial para acabar con las infecciones. Cierta activación del complemento es necesaria, pero una reacción excesiva podría producir una inflamación crónica, lo que mantendría la herida abierta y vulnerable



a las infecciones. Las secreciones de los gusanos redujeron la actividad del complemento en muestras de sangre de adultos sanos e inhibieron la producción de varias proteínas importantes del complemento. Según se descubrió en el estudio, la atenuación de la respuesta inmunitaria promovía la cicatrización. «Entre el 50 y el 80 por ciento de las heridas que vemos pueden sanarse con gusanos», concluye Cazander.

El tratamiento con larvas puede sonar medieval, pero la medicina moderna parece mostrar que funciona.

—Carrie Arnold

SALUD

Atención médica a través de móviles

La posibilidad de utilizar mensajes de texto, vídeos o aplicaciones de teléfonos inteligentes para mejorar los cuidados sanitarios ha atraído una enorme cantidad de atención y financiación. Pero la «salud con móvil» sigue estando en pañales, y dos nuevos análisis ofrecen resultados poco alentadores. De 75 ensayos comparativos en los que los pacientes utilizaron la telefonía móvil para tratar una enfermedad o adoptar comportamientos más saludables, solo tres mostraron indicios fiables de éxito, según un artículo de revisión publicado en enero en *PLOS Medicine*.

En otra revisión, los mismos autores examinaron el uso de la telefonía móvil para mejorar la comunicación en la asistencia sanitaria, como el envío de mensajes de texto para recordar las citas a los pacientes; solo 11 de 42 ensayos tuvieron resultados positivos.

Rahul Chakrabarti, médico de la Universidad de Melbourne y codirector de la revista *Journal of Mobile Technology in Medicine*, considera que estas revisiones constituyen hasta el momento el metanálisis de datos más completo sobre la atención médica con móvil.

Las limitaciones de este sistema no deberían desanimar a los investigadores, afirma Caroline Free, epidemióloga de la Escuela de Higiene y Medicina Tropical de Londres, que dirigió el análisis. Es posible aprender de las experiencias que funcionaron bien. Por ejemplo, la recepción de mensajes de texto ayudó a los fumadores a dejar de fumar en un ensayo que verificó sus resultados con pruebas bioquímicas. En el único ensayo con pacientes realizado con éxito en un país en vías de desarrollo, Kenia, los mensajes de texto para recordar la toma de antirretrovíricos ayudaron a reducir los recuentos del VIH.

El problema reside en que la mayoría de los ensayos presentaban un diseño defectuoso y muchos no asignaron los participantes a los grupos de referencia y experimental de forma aleatoria. Otros se basaron en la información sobre los resultados que daban los propios pacientes, a pesar de que esta táctica ofrece datos poco fiables. Por otra parte, la mayoría de los ensayos prescindió de los países en vías de desarrollo, donde los teléfonos móviles muestran un mayor potencial para mejorar el acceso a los cuidados sanitarios.

Chakrabarti, que no participó en la investigación, afirma que los estudios ponen de manifiesto la necesidad de mejorar la metodología.

—Lucas Laursen



Zumbidos reveladores

Para el oído humano, el zumbido de las abejas puede parecer siempre igual. Sin embargo, un grupo de expertos espera que la descodificación de pequeñas variaciones en el ruido ayude a detener el catastrófico declive de la población mundial de abejas.

Los investigadores, dirigidos por un equipo de la Universidad Trent de Nottingham, creen que los sonidos cambiantes de una colmena indican modificaciones en el estado de salud de las abejas y que los dispositivos de escucha de alta tecnología podrían proporcionar señales de alerta temprana a los apicultores. Con la ayuda de una subvención de 1,4 millones de euros de la Unión Europea, los científicos analizarán el zumbido de 20 colmenas situadas en un pueblo del sudeste rural de Francia, en un experimento de cinco años de duración que comenzó esta primavera.

El jefe del equipo, Martin Bencsik, ya ha utilizado en otras ocasiones unos sensores conocidos como acelerómetros para captar un cambio distintivo en los sonidos de las abejas antes de la formación de un enjambre, el momento en que la reina deja la colmena llevándose consigo a numerosas obreras. Esta vez, el desafío consiste en identificar variaciones en el zumbido que puedan relacionarse con una enfermedad, incluido el síndrome del despoblamiento de las colonias, un misterioso mal que ha debilitado las colmenas de todo el mundo.

La herramienta clave empleada son sensores industriales diseñados para de-

teectar cambios sutiles en los patrones de vibración. Unos acelerómetros miniaturizados, integrados en las paredes de la colmena, medirán las vibraciones de los panales causadas por la actividad de las abejas y los sonidos que producen. Como las abejas carecen de oídos, se cree que utilizan las vibraciones, recibidas a través de las patas, para comunicarse unas con otras.

Después, el equipo de Nottingham analizará con un programa informático los datos de las colmenas para hallar relaciones reveladoras entre el zumbido (su tono o el intervalo entre pulsos) y la salud de las abejas. Bencsik prevé que, en el futuro, cualquier alteración preocupante detectada por el acelerómetro activará una alerta inalámbrica automática para el apicultor, el cual podrá tomar medidas de inmediato.

El problema reside en que los científicos aún no han logrado identificar, ni mucho menos tratar, las causas principales del declive de las abejas, que algunos estudios han atribuido a los plaguicidas. «Se han sugerido numerosos tratamientos, pero no hay pruebas de que ninguno de ellos funcione», afirma Simon Potts, profesor de biodiversidad y servicios ecosistémicos en la Universidad de Reading. Los apicultores solo pueden esperar que, cuando las herramientas de diagnóstico de Bencsik se perfeccionen, se hayan descubierto ya tratamientos más eficaces.

—William Underhill



HEIDI & HANS-JÜRGEN KOCH Minden Pictures (abeja); MUSEO DE LA NATURALEZA Y EL HOMBRE (epidemias); A. FUJII, TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE (galaxia), ESA Y ATG-MEDIA LAB (Galaxia)

EXPOSICIONES

La Peste. El Cuarto Jinete. Epidemias históricas y su repercusión en Tenerife

Museo de la Naturaleza y el Hombre
Santa Cruz de Tenerife
www.museosdetenerife.org



Nutrición, impulso vital

Alimentación, nutrición y hábitos de vida saludables en un entorno medioambiental sostenible
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com

Hasta el 15 de septiembre

Mil millones de ojos para mil millones de estrellas

Centro de Observación del Universo
Parque Astronómico del Montsec
Ager (Lérida)
www.am.ub.edu/expogaia



Libros inmortales, instrumentos esenciales

Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
Madrid
www.muncyt.es

Darwin y Galileo a través del cómic

Instituto de Historia de la Medicina y de la Ciencia López Piñero
Valencia
www.ihmc.uv-csic.es

La belleza: una búsqueda sin fin

Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

Epigenética, temperatura y sexo

Las condiciones térmicas que experimentan algunos animales durante el desarrollo temprano determinan su sexo. El «recuerdo» de la temperatura se transmite por mecanismos epigenéticos

En biología es bien conocido que el ambiente modula la expresión del genotipo para dar lugar al fenotipo. Sin embargo, el modo en que el entorno determina un fenotipo tan crucial como el sexual ha sido desde siempre motivo de especulaciones, como la del filósofo Empédocles (483-424 a.C.), quien propuso que el sexo de los recién nacidos venía definido por la temperatura del útero materno. En un estudio publicado en 2011 en *PLoS Genetics*, nuestro grupo ha esclarecido el mecanismo mediante el cual la tempera-

tura influye en la determinación del sexo de un animal.

La definición de este rasgo en los mamíferos se basa en la genética cromosómica. Esto es, el sexo de un individuo depende de sus cromosomas sexuales, que se designan por XX en las hembras y XY en los machos. El desarrollo del feto tiene lugar en el interior de la madre, donde se halla protegido de los cambios ambientales que se producen en el medio externo.

Sin embargo, en otros vertebrados, como los reptiles y los peces, la deter-

minación del sexo puede ser genética o ambiental. En los peces, la genética resulta la más habitual y presenta distintas modalidades: la cromosómica, similar a la de los mamíferos, y la poligénica, en cuyo caso el sexo viene definido por la combinación de factores masculinos y femeninos dispersos en los autosomas (los cromosomas no sexuales).

Por otro lado, en la determinación ambiental, los valores de un factor externo durante el desarrollo temprano definen el sexo de los individuos. El factor más conocido corresponde a la temperatura, que controla el fenotipo sexual de algunos peces y numerosos reptiles, entre ellos ciertos lagartos, muchas tortugas terrestres, las tortugas acuáticas y los cocodrilos.

El recuerdo de la temperatura

En la lubina (*Dicentrarchus labrax*) la determinación del sexo es a la vez poligénica y sensible a la temperatura. En nuestro grupo de investigación nos llamó la atención la enorme influencia de este factor ambiental durante el primer mes de vida del pez. En este período las gónadas de la lubina no solo no llegan a diferenciarse, sino que ni siquiera se han formado en su expresión más rudimentaria. ¿Cómo es posible, entonces, que la temperatura afecte el destino de un órgano que aún no existe? En otras palabras, ¿dónde reside la «memoria» de la temperatura experimentada en las fases críticas, cuando se decide el sexo? La búsqueda de respuesta a estas preguntas nos hizo pensar en la presencia de un mecanismo epigenético.

Existen varios mecanismos epigenéticos bien conocidos. Uno de los más importantes consiste en la metilación del ADN, que tiene lugar cuando un grupo metilo se añade al carbono 5' de una desoxicitidina adyacente a una guanidina (ambas moléculas son nucleósidos, las unidades básicas de los ácidos nucleicos). Cuando la metilación de estos dinucleótidos, denominados CG, se localiza en regiones reguladoras, como los promotores de los genes, suele inhibir la expresión de los genes en cuestión. Las modificaciones del ADN por metilación pueden reproducirse cuando una célula



En la lubina (*Dicentrarchus labrax*), la determinación del sexo es poligénica pero con influencia de la temperatura durante la fase larvaria. Las superiores a 17°C tienen un efecto masculinizante. La tortuga escurridiza (*Trachemys scripta*) posee determinación del sexo dependiente de la temperatura. Durante la fase de incubación, los valores alrededor de 26°C dan lugar a machos; los de 31°C, a hembras. En ambas especies, las temperaturas masculinizantes inhiben la expresión del gen *cyp19a1*, que codifica la aromatasa, la enzima catalizadora de la síntesis de estrógenos.

se divide, de forma que las células hijas poseen el mismo patrón de modificaciones que la célula madre. Este mecanismo se denomina epigenético porque confiere cambios heredables (de una generación celular a la siguiente) en la regulación génica. Pero, a diferencia de las mutaciones, no implican alteraciones en la secuencia nucleotídica del ADN.

Los mecanismos epigenéticos revisten una enorme importancia en la adquisición de la identidad celular, puesto que a partir de un único genoma un individuo puede poseer múltiples tipos celulares, cada uno con un perfil de expresión génica determinado. Tales modificaciones resultan, por tanto, esenciales durante el desarrollo y la organogénesis. Es más, permiten integrar las variaciones en las condiciones ambientales en cambios estables en la expresión génica. En un artículo recién publicado en *Developmental*

Dynamics hemos descrito la repercusión de los mecanismos epigenéticos en la determinación del sexo.

En los estudios que hemos realizado con la lubina, hemos encontrado que una temperatura de 21 °C, como la utilizada en numerosos criaderos de esta especie, da lugar a una mayor metilación del ADN del promotor del gen *cyp19a1* en la gónada. Este gen codifica la enzima aromatasa, catalizadora de la síntesis de estrógenos, que resultan imprescindibles para el desarrollo ovárico en todos los vertebrados no mamíferos. Por consiguiente, a una temperatura de 21 °C se originan sobre todo machos.

Se establece así una conexión mecanicista entre una variable ambiental muy importante, como es la temperatura, y la determinación del sexo, responsable a su vez de la proporción de sexos en la descendencia, uno de los parámetros de-

mográficos más relevantes para las poblaciones. Como retos importantes queda por averiguar si un mecanismo semejante opera también en otras especies, en particular de reptiles, y cómo las especies cuya determinación del sexo depende de la temperatura del medio externo pueden verse afectadas por un ascenso de esta en un contexto de cambio global. En este sentido, cabe mencionar un estudio recién publicado en *PLoS ONE* por Matsumoto y sus colaboradores, de la Universidad de Texas en Austin. El trabajo demuestra que *Trachemys scripta*, una tortuga con determinación del sexo dependiente de la temperatura, posee un mecanismo epigenético similar, lo que confirma nuestras observaciones.

—Francesc Piferrer
Instituto de Ciencias del Mar, CSIC
Barcelona

SALUD PÚBLICA

Los costes sociales del estrés

Relaciones entre el acortamiento de los telómeros, el estrés crónico y las enfermedades

En la película *Vacaciones*, estrenada en 2006, la actriz Cameron Díaz, que interpreta a una mujer cuya vida está dando tumbos sin control, exclama: «El estrés agudo... hace encoger el ADN de nuestras células hasta que pierde la capacidad de replicarse. Por eso, cuando estamos estresados tenemos un aspecto demacrado».

Desde un punto de vista científico, Hollywood dio en el clavo. El ADN al que se refiere el personaje de Díaz es el segmento que constituye los telómeros, unas estructuras que rematan y protegen los extremos de los cromosomas. Se estaba refiriendo a nuestro artículo de 2004 publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, el primero en vincular el estrés psicológico crónico con un mantenimiento defectuoso de los telómeros.

A partir de la publicación de ese artículo, se ha observado de forma generalizada que diversos tipos de estrés crónico se asocian al acortamiento de los telómeros, y probablemente lo provoquen. Por otra parte, los telómeros reducidos y el estrés se han relacionado, de manera independiente, con algunas dolencias

frecuentes, como la diabetes y las enfermedades cardiovasculares.

Esas relaciones resultan tan habituales que, incluso sin un conocimiento detallado de las rutas bioquímicas implicadas, el mensaje es claro. El fracaso a la hora de paliar el estrés agudo causado por amenazas prolongadas como la guerra, problemas financieros, abusos y maltrato psicológico (especialmente en los niños) conllevará unos costes muy superiores en el futuro: personales, económicos y de otro tipo.

Desgaste genético

Los telómeros humanos constan de varias kilobases de secuencias de ADN repetidas a las que se unen unas proteínas protectoras especializadas. Una peculiaridad del mecanismo de replicación del ADN hace que los telómeros se acorten a medida que las células se dividen. A veces la enzima telomerasa repone el ADN perdido, pero, a medida que envejecemos, nuestros telómeros se van haciendo más pequeños. Si se reducen demasiado, ya sea por la edad o por un mantenimiento defectuoso, las células pueden dejar de dividirse. También pueden empezar a funcionar de forma incorrecta; por ejem-

plo, segregan factores que provocan la inflamación o desencadenan el desarrollo de tumores.

En 2004, comparamos la longitud de los telómeros en glóbulos blancos de madres de hijos con enfermedades crónicas y la de madres con hijos sanos. Cuanto más tiempo la madre había sido la principal cuidadora de su hijo enfermo (las enfermedades de los niños iban desde trastornos intestinales hasta el autismo), mayor desgaste presentaban sus telómeros. Además, cuanto más estrés sufrían las madres de ambos grupos (lo que se valoraba a partir de la respuesta a preguntas estandarizadas, como en qué medida creía mantener el control sobre su vida), más cortos eran sus telómeros. El mayor acortamiento en las madres «más estresadas», en comparación con el de las «menos estresadas», equivalía al causado, como mínimo, por una década de envejecimiento.

Esa relación entre el estrés y la longitud de los telómeros se ha observado en otros casos, desde estudios con niños de corta edad hasta los que incluyen adultos de 80 años; desde pequeños muestreos clínicos de menos de cien personas hasta

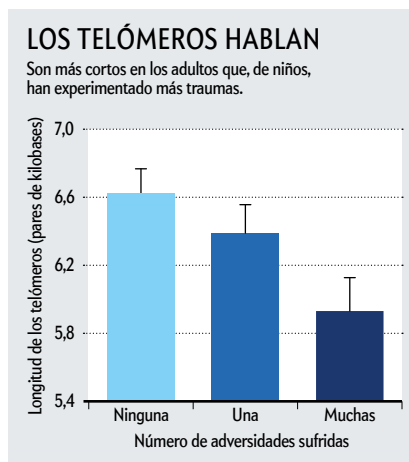
grandes estudios poblacionales basados en miles de personas.

Sometido a estrés, el organismo aumenta la producción de ciertas hormonas, como el cortisol, y otros factores bioquímicos. Estos compuestos ayudan a desarrollar una respuesta apropiada al estrés a corto plazo. Pero si su sobreproducción se prolonga durante meses o años, pueden alterar la expresión génica, probablemente con efectos deletéreos. En el laboratorio, estos factores provocan también un acortamiento de los telómeros; en concreto, el cortisol disminuye la actividad de la telomerasa. Se piensa que las rutas implicadas en las alteraciones de la expresión génica quizás interactúen con las que afectan al mantenimiento de los telómeros, aunque todavía no se ha explorado tal posibilidad.

Aunque numerosos estudios han desentrañado las relaciones entre los telómeros reducidos y el estrés, otros han establecido asociaciones entre ese defecto y algunas enfermedades frecuentes. Ciertas mutaciones raras en los genes que codifican los componentes de la telomerasa dan lugar a telómeros demasiado cortos. Ello provoca trastornos en el sistema inmunitario, como la anemia aplásica y otras dolencias, entre las que se incluyen la fibrosis pulmonar, la diabetes, algunas enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer. Cabe destacar que muchas de esas enfermedades hereditarias, denominadas «síndromes de los telómeros», suelen asociarse con el envejecimiento.

El desgaste de los telómeros permite incluso predecir el riesgo de padecer ciertas enfermedades. Tras medir la longitud de los telómeros durante 10 años en hombres y mujeres, se ha comprobado que quienes los presentaban más cortos tenían una probabilidad tres veces mayor de sufrir determinados tipos de cáncer, como el de páncreas, que quienes los tenían más largos. En los ancianos, el riesgo de desarrollar demencia o de fallecer por cualquier causa era un 50 por ciento mayor.

Durante décadas se han venido acumulando pruebas de que el estilo de vida, el bienestar y otros factores ambientales pueden contribuir de manera significativa al estado de salud. Pero ahora hemos descrito tres combinaciones binarias que relacionan entre sí tres factores: el estrés con el acortamiento de los telómeros, el estrés con el riesgo de ciertas enfermedades y el acortamiento de los telómeros con el riesgo de esas enfermedades. Resulta difícil evitar la conclusión de que al menos una de las formas mediante las



cuales el estrés causa enfermedades crónicas corresponde a la reducción de los telómeros.

Es tiempo de actuar

¿Cómo deberían reaccionar los responsables políticos en vista de las numerosas pruebas que ha generado el estudio de los telómeros?

Identificar las rutas celulares y fisiológicas que sustentan la relación de unos telómeros inusualmente cortos con el estrés y las enfermedades podría resultar importante a la hora de descubrir posibles objetivos de los tratamientos. Pero los responsables políticos no deben esperar a que se desvelen todos los detalles mecanicistas (algo que podría llevar décadas), más si se tiene en cuenta que lo que se observa en el laboratorio no suele reflejar lo que está pasando en el conjunto del organismo.

Una lección sorprendente que nos enseñan los telómeros es que, a la hora de hacer frente a las enfermedades, los factores ambientales desempeñan un papel importante, además de los genéticos. Entre 2008 y 2011, los Institutos Nacionales de Salud de Estados Unidos (NIH) destinaron 29 millones de dólares a la investigación genética. En comparación, solo concedieron 14 millones de dólares a las investigaciones relacionadas con las ciencias sociales y conductuales. Y ello a pesar de que varios análisis concluyen que un 50 por ciento de la varianza de la mortalidad prematura en EE.UU. se atribuye a comportamientos que pueden modificarse, como la sobrealimentación, el alcoholismo y el tabaquismo (en parte, también relacionados con el estrés).

Con las técnicas modernas resulta más fácil identificar las variaciones génicas de las personas que la plétora de influencias ambientales, y ya no digamos los diversos modos en que se comportan, piensan y

sienten. Sin embargo, para determinar la propensión de una persona a una enfermedad deberán conocerse todos estos factores. La longitud de los telómeros nos ofrece una perspectiva excepcional sobre su estado fisiológico y patológico.

La investigación de los telómeros nos ayuda a reconocer algunas formas para mejorar la salud. Los ratones transgénicos carentes de telomerasas se vuelven pronto marchitos y canosos; pero esos cambios, asociados al envejecimiento, se pueden revertir, al menos en parte, restaurando la actividad de la telomerasa. Diseñar fármacos para aumentar esa enzima en humanos sin introducir efectos secundarios indeseables constituye un reto formidable. Otras estrategias más viables para mitigar el acortamiento de los telómeros consistirían en aliviar las condiciones que producen el estrés crónico y el cambio de ciertos hábitos.

En apoyo a la última estrategia, algunos estudios piloto sugieren que, si se aplican medidas reductoras del estrés durante tan solo tres meses, a menudo combinadas con un aumento de la actividad física y con cambios dietéticos, puede ralentizarse o incluso revertirse el desgaste de los telómeros al aumentar la actividad de la telomerasa. Un reto fascinante consiste en ver si la idea de la erosión de los telómeros (que, según muchos, evoca una imagen impactante de una salud decadente) podría motivar a las personas para que modificaran su conducta.

Comenzar jóvenes

Esfuerzos individuales aparte, quizá la conclusión más clara que puede extraerse del estudio de las telomerasas es que, para evitar numerosas enfermedades frecuentes, en especial aquellas cuya prevalencia está aumentando en la población, cada vez más anciana, los Gobiernos y otros responsables políticos deberían priorizar lo que nosotras denominamos la «reducción del estrés social». Los retiros para meditar o las clases de yoga quizás ayuden a quienes puedan permitirse el tiempo y el gasto. Pero sobre todo defendemos políticas socioeconómicas amplias que amortigüen los factores que provocan estrés crónico a tantas personas.

Los resultados de los estudios sobre los telómeros, el estrés y las enfermedades refuerzan una recomendación que hizo la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2008 para reducir las desigualdades en materia de salud. La OMS propone que los Gobiernos y las organizaciones sanitarias mundiales se centren en mejorar la edu-