

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Mayo 2011 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

PLANETAS
Viaje
a Mercurio

DINOSAURIOS
Atrapados
en el desierto
de Gobi

FÍSICA
Un demonio
de Maxwell en
el laboratorio

CÉLULAS MADRE
Nuevos usos
médicos

Floración

¿Cómo saben las plantas
cuál es el mejor momento
para florecer?



6,00 EUROS



ARTÍCULOS

PSICOLOGÍA

14 **Claves de la resiliencia**

Cuando la tragedia nos golpea, la mayoría de nosotros nos sobreponemos de manera admirable. ¿De dónde procede tal capacidad? *Por Gary Stix*

GENÉTICA

20 **Evolución de la cromatina**

A pesar de la gran información que poseemos del cromosoma, queda mucho por conocer sobre su función y evolución. *Por Gregory A. Babbitt*

BIOLOGÍA VEGETAL

28 **Bases moleculares de la floración**

Estudios recientes desvelan una red de señales moleculares que optimiza el tiempo de floración. *Por M. Á. Blázquez, M. Piñeiro y F. Valverde*

FÍSICA

42 **Demonios, entropía y la búsqueda del cero absoluto**

Un experimento imaginario del siglo XIX se ha convertido en un procedimiento factible para alcanzar temperaturas extremadamente bajas. *Por Mark G. Raizen*

ASTROFÍSICA

50 **Viaje al planeta más cercano al Sol**

En marzo, una sonda entró en órbita alrededor de Mercurio por vez primera. *Por S. L. Murchie, R. J. Vervack, Jr. y B. J. Anderson*

MEDICINA

56 **Enfermedades en una placa de Petri**

Las células madre procedentes de tejidos adultos podrían impulsar el desarrollo de fármacos para combatir enfermedades debilitantes. *Por Stephen S. Hall*

PALEONTOLOGÍA

62 **Trampa mortal**

Los fósiles hallados en una fosa del desierto de Gobi arrojan luz sobre la vida de los dinosaurios. *Por Paul C. Sereno*

TÉCNICAS OBSERVACIONALES

68 **Astronomía en globo, ayer y hoy**

Ya en 1874, dos investigadores se elevaron a una altitud de casi 8000 metros para efectuar observaciones astronómicas desde un globo aerostático. Desde entonces, los telescopios a bordo de globos han permitido explorar el cielo en casi todas las regiones del espectro. *Por Dietrich Lemke*

ROBÓTICA

78 **Escarabajos cyborg**

Diminutos robots voladores, parte insecto y parte máquina, ayudarán algún día a salvar vidas en caso de guerra o catástrofe. *Por M. M. Maharbiz y H. Sato*

CLIMATOLOGÍA

84 **Cambios en el cinturón de lluvias**

La reconstrucción histórica de las precipitaciones ecuatoriales ha permitido predecir la evolución del tiempo en los trópicos hasta 2100. *Por J. P. Sachs y C. L. Myhrvold*

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes

El origen de las baterías. Un arco de acero para Chernóbil. El efecto Coriolis. La mente más pequeña. Bisontes contra mamuts. Preparados para el gran terremoto. ¿Arte o ciencia?

6 Agenda

8 Panorama

Radiaciones ionizantes. *Por Guillem Cortés Rossell*
Envejecimiento prematuro. *Por Matilde Murga*
Monotremas extremos. *Por Charles Q. Choi*
¿Máquina o humano? *Por Raúl Arrabales Moreno*

37 Foro científico

Playas agotadas. *Por José A. Jiménez*

38 De cerca

Conservación de la herpetofauna. *Por C. A. Gallego Carmona, J. Llano Mejía y M. J. Gómez Martínez*

40 Filosofía de la ciencia

Ciencia y arte: ¿vidas paralelas? *Por José Carlos Pinto de Oliveira*

90 Taller y laboratorio

Miscelánea electroquímica. *Por Marc Boada*

93 Libros

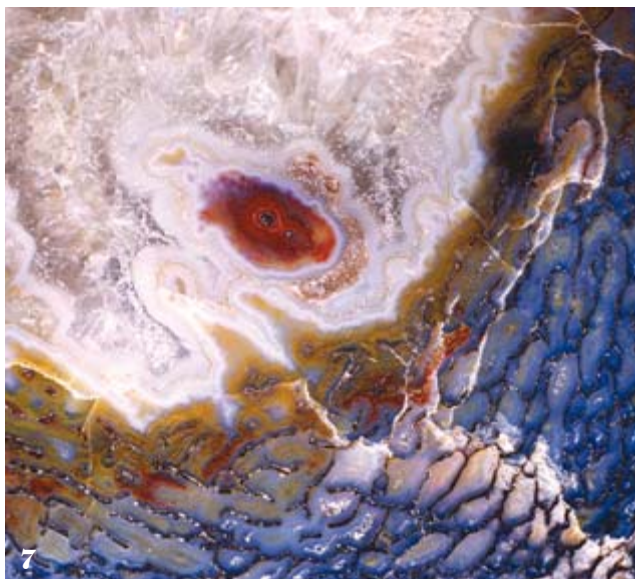
Los límites de la física. *Por Ángel Garcimartín*

94 Juegos matemáticos

Ilusionismo matemático. *Por Gabriel Uzquiano*

96 Hace...

50, 100 y 150 años.



EN PORTADA

Las plantas perciben cambios en su entorno y señales internas que les inducen a florecer. Como respuesta a la temperatura ambiental y a la duración del día, así como al estado nutricional y hormonal de la planta, se produce una imbricada cascada de reacciones moleculares que ponen en marcha el desarrollo de la flor. Fotografía de A. Kniesel/Creative Commons 3.0 Unported (flor de *Hippeastrum*).





Enero 2011

HUMANOS Y PARÁSITOS

En el artículo de Mary Carmichael «Detener al parásito más letal del mundo» [INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2011], encuentro interesante la idea de inmunizar los mosquitos a través de portadores humanos, quienes transferirían la vacuna al insecto. Pero ¿no podrían utilizarse, en lugar de personas, otros mamíferos? De esta manera se evitaría el dilema ético de vacunar a individuos que no se benefician directamente de ello.

PAUL SIDHU
Smethwick, Reino Unido

RESPONDE CARMICHAEL: *Vacunar a los animales es una idea atractiva, la cual revisite claramente una mayor aplicabilidad en el caso de enfermedades transmitidas por vectores con reservorios no humanos (por ejemplo, vacunar a los perros para prevenir la transmisión, tanto canina como humana, de la leishmaniasis visceral). Con todo, las dos principales especies de parásitos de la malaria humana —Plasmodium falciparum y P. vivax— no cuentan con muchas posibilidades a la hora de hospedarse en otros vertebrados. Por otra parte, como ya se señalaba en una de las conclusiones del artículo, una campaña de vacunación que bloquease la transmisión de la malaria sí beneficiaría de manera directa al individuo. El beneficio no sería inmediato, pero aparecería más tarde. No obstante, nadie considera limitar las medidas al uso de vacunas de bloqueo de la transmisión de la enfermedad. Lo más probable sería que una vacuna de ese tipo se combinase con otras y con fármacos antipalúdicos.*

NÚMEROS TRASCENDENTES

En el artículo de la sección *Juegos matemáticos* de marzo de 2011 [«Los límites

del conocimiento»] el profesor Uzquiano dejó de comentar algo que quizás hubiera interesado a los lectores.

Se trata de averiguar si existen números irracionales a y b tales que a^b es racional. O bien $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es racional, o bien lo es $(\sqrt{2}^{\sqrt{2}})^{\sqrt{2}}$. Pero, como precisamente señala el autor, el razonamiento no nos permite saber cuál de los dos es racional. Sin embargo, existe un argumento que nos da la respuesta: $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es un número trascendente y, por tanto, irracional.

Un número es trascendente si y solo si no es algebraico. Decir que z es algebraico significa que existe un polinomio con coeficientes enteros que tiene a z como raíz (por supuesto, se excluye el polinomio cero). Según el teorema de Gelfond-Schneider, si a y b son números algebraicos distintos de 0 y 1, y b no es racional, entonces a^b es trascendente. El teorema resolvió uno de los famosos problemas de Hilbert (puesto que no es necesario que a ni b sean reales).

Gracias a los autores de esta columna, que siempre es interesante.

STEPHEN TURNER
Badajoz

RESPONDE UZQUIANO: *En efecto, aunque el objeto del argumento de que hay números irracionales a y b tales que a^b es racional era ilustrar la noción de prueba no constructiva, lo cierto es que sabemos que $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es irracional, ya que se trata de la raíz cuadrada de $2^{\sqrt{2}}$, cuya trascendencia fue demostrada por Kuzmín en 1930. Este resultado era una respuesta parcial al séptimo problema de Hilbert, que consistía en demostrar la irracionalidad y trascendencia de ciertos números, como $2^{\sqrt{2}}$ o e^e . En 1934, Gelfond y Schneider contribuyeron de manera independiente a dar una solución general, de la que se sigue también que ambos números son trascendentes. Curiosamente, Hilbert había vaticinado que el problema sería tan difícil de resolver como el estatus de la hipótesis de Riemann o el último teorema de Fermat.*

LA BIBLIA Y LOS REGISTROS HISTÓRICOS

Soy periodista y lector habitual de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA desde hace muchos años. El número de marzo de 2011 ha sido el primero en el que me parece que se ha incurrido en un error de bulto. En concreto, el artículo «Víctimas del cam-

bio climático», por Alex de Sherbinin, Koko Warner y Charles Ehrhart, comienza afirmando: «Desde que existen registros históricos, las migraciones impuestas por el clima han remodelado a la civilización». Hasta ahí, ningún problema. El dislate viene después, cuando se habla de la sequía que «obligó a Jacob y su prole a abandonar Canaán». ¿Quiere esto decir que en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA se considera la Biblia como un registro histórico, o al menos que los autores lo consideran así? Pediría, sinceramente, que la mitología y las creencias de cada uno se dejen a un lado cuando hablemos de ciencia.

JAIME FERNÁNDEZ GARRIDO
Madrid

RESPONDEN LOS AUTORES: *Nuestro propósito no era argumentar ni a favor ni en contra de la veracidad de la Biblia como fuente histórica, si bien la existencia de muchos de los acontecimientos y personajes del Antiguo Testamento ha sido corroborada mediante pruebas arqueológicas y otros documentos. Más bien, decidimos ilustrar el fenómeno de las migraciones inducidas por el clima con un acontecimiento conocido y que pudiese atraer la atención de los lectores.*



Marzo 2011

CARTAS DE LOS LECTORES

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

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1º, 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

HISTORIA DE LA CIENCIA

El origen de las baterías

La energía de una batería procede de la tendencia de las cargas eléctricas a pasar de una sustancia a otra cuando se dan ciertas condiciones. Esa era la energía que Alessandro Volta pretendía aprovechar cuando, a finales de 1799, construyó la primera pila.

Una batería cuenta con dos electrodos. Uno de ellos (ánodo) tiende a ceder electrones al otro (cátodo). Por ello, al conectarlos a través de un circuito, los electrones fluyen y realizan trabajo (por ejemplo, encender una lámpara). Pero el simple movimiento de los electrones de un lugar a otro no da mucho de sí. Dado que las cargas del mismo signo se repelen, los electrones que se van acumulando en el cátodo acaban, a la postre, por impedir la llegada de más electrones. Para lograr una corriente estable, la batería ha de redistribuir las cargas en su interior. Ello se consigue transportando desde el ánodo hacia el cátodo iones de carga positiva, tarea que realiza un electrolito. Este puede ser sólido, líquido o gelatinoso. En cualquier caso, si la batería funciona es gracias al electrolito interno.

Una batería de litio cuenta con un ánodo de grafito lleno de átomos de dicho elemento. Estos ceden electrones al circuito externo, por donde llegan al cátodo. Al haber perdido electrones, los átomos de litio se convierten en iones de carga positiva que ahora se sienten atraídos por la carga negativa acumulada en el cátodo, hacia donde fluyen a través del electrolito. Esa redistribución de iones compensa el desequilibrio de cargas y gracias

a ella se mantiene la corriente eléctrica... hasta que se consume el litio del ánodo.

Al recargar la batería, el proceso se invierte: un voltaje aplicado entre los dos electrodos provoca que los electrones (y los iones) regresen al grafito. Este proceso cuesta energía, que es, en última instancia, la que almacenará la batería para realizar después trabajo útil.

Según Giuliano Pancaldi, historiador de la ciencia de la Universidad de Bolonia, Volta intentaba replicar el mecanismo que genera electricidad en la raya eléctrica, también conocida como pez torpedo. Es fácil que Volta se guiase por el método de ensayo y error antes de decidirse por electrodos de metal y cartón húmedo como electrolito, pues en aquella época nadie sabía de la existencia de átomos, iones o electrones. Pero, con independencia de la naturaleza de los portadores de carga, es muy probable que Volta nunca supiese que, en el interior de la batería, las cargas positivas se desplazaban en sentido contrario al «fluido eléctrico» del circuito externo. De hecho, como señala Pancaldi, habría de pasar un siglo para que se llegase a un acuerdo acerca del funcionamiento de la pila.

—Davide Castelvecchi



INGENIERÍA AMBIENTAL

Un arco de acero para Chernóbil

Imagine un gigantesco arco metálico más alto que la Estatua de la Libertad deslizándose a lo largo de una distancia de unos tres campos de fútbol. Bajo una construcción semejante, la mayor estructura móvil jamás construida, los ingenieros planean enterrar la central de Chernóbil, escenario del peor accidente nuclear de la historia.

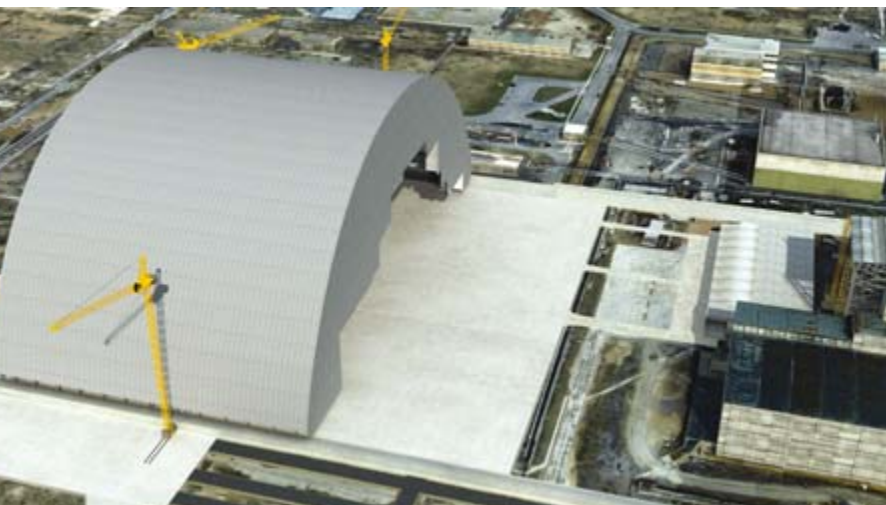
Tras la explosión del reactor número 4, el 26 de abril de 1986, la Unión Soviética levantó un sarcófago de acero y hormigón con el fin de contener la radiactividad. «Fue un gran logro, pero, después de 25 años, corre peligro de derrumbarse», explica Eric Schmieman, ingeniero de caminos y ambiental del Instituto Battelle. La estructura, construida a toda velocidad para limitar

la exposición de los trabajadores a la radiación, nunca fue concebida como una solución permanente. Schmieman explica que su diseño se asemeja al de un castillo de naipes, con piezas de metal enganchadas unas sobre otras. Carece de juntas soldadas o atornilladas, de manera que no haría falta un gran evento sísmico para derribarla.

Esa vieja estructura será reemplazada por el Nuevo Confinamiento Seguro (NSC), construido por la firma francesa Novarka y en cuyo diseño participó Schmieman. Dado que la radiactividad aún persiste en el reactor, por motivos de seguridad el NSC no se levantará sobre el sarcófago, sino en las inmediaciones, a partir de segmentos prefabricados. Después, se emplearán gatos hidráulicos para deslizar el arco a lo largo de unos 300 metros sobre cojinetes de teflón, hasta que cubra la construcción anterior. Una vez sellada, dos grúas robóticas activadas por control remoto y emplazadas en el interior del NSC dismantlarán el sarcófago y el reactor, y limpiarán los restos de polvo radiactivo que aún queden.

Novarka prevé concluir el NSC antes del verano de 2014. Su coste, de unos 1500 millones de euros, será financiado por 29 países. Se espera que la estructura contenga la radiación del reactor siniestrado durante al menos 100 años.

—Charles Q. Choi



FÍSICA

El efecto Coriolis

Hacia el final de la Primera Guerra Mundial, cuando el ejército alemán apuntaba con su artillería hacia París desde una distancia de 120 kilómetros, los soldados ajustaban la trayectoria en función de no pocos factores que bien podrían haber ignorado con cañones menos potentes. En particular, de no haber tenido en cuenta la sutil influencia de la rotación de la Tierra (el efecto Coriolis), los disparos se habrían desviado unos 800 metros.

Decenios antes, el parisino Gaspard Gustave Coriolis había deducido la ecuación que describe dicho efecto como parte de sus análisis sobre las máquinas giratorias, entre ellas los molinos de agua. El efecto Coriolis aparece siempre que intervenga la rotación de un sólido. Si nos hallamos sobre un tiiovivo que gira en sentido antihorario y lanzamos una bola en cualquier dirección, veremos que su trayectoria se curva hacia la derecha. Un observador junto al tiiovivo verá que la bola describe una línea recta, pero, en nuestro sistema de referencia rotatorio, la bola virará en sentido horario. Una nueva fuerza parece actuar sobre la bola. Debido a la rotación de nuestro planeta, los mismos efectos —aunque mucho más débiles— se observan sobre la superficie de la Tierra.

Además de desviar las trayectorias de los misiles balísticos, el efecto Coriolis da cuenta de que huracanes y tifones giren en sentido horario en el hemisferio sur y en sentido antihorario en el norte. De hecho, es dicho efecto lo que provoca que, en gene-



Un misil Titán II, con un alcance de más de 11.000 kilómetros, se vería desviado centenares de kilómetros a causa de la fuerza de Coriolis.

ral, el viento fluya *alrededor* de las zonas de altas y bajas presiones, y no directamente desde las regiones de presión alta hacia las de presión baja. En el hemisferio norte, cuando el aire fluye en dirección radial, la rotación de la Tierra lo desvía hacia la derecha; en el hemisferio sur, ocurre lo contrario. El resultado es un régimen estacionario en el que el viento circunvala la zona de bajas presiones. El gradiente de presiones empuja hacia dentro; la fuerza de Coriolis, hacia fuera.

Una falsedad muy extendida afirma que, en un desagüe, el agua gira en un sentido en el hemisferio sur y en el sentido contrario en el hemisferio norte. Tal idea es un mito: aunque la fuerza de Coriolis posee la intensidad suficiente para dirigir la rotación de un huracán durante días, resulta demasiado débil como para inducir la rotación de una pequeña cantidad de agua durante los escasos segundos que tarda en desaparecer por el sumidero.

—Graham P. Collins

NEUROCIENCIA

La mente más pequeña

La ciencia ha dado un paso más hacia el control de la mente, aunque el tamaño de esa mente sea inferior al de un grano de arena. Andrew Leifer y sus colaboradores, de la Universidad de Harvard, han construido un sistema computerizado para manipular gusanos. Han conseguido así que se desplacen y se detengan, que sientan que algo les toca, e incluso les han incitado a poner huevos. Todo ello mediante la estimulación de sus neuronas con luz láser y mientras los gusanos nadan libremente en una placa de Petri. Esta técnica podría arrojar luz sobre el funcionamiento del sistema nervioso animal.

El gusano en cuestión es el nemátodo *Caenorhabditis elegans*, uno de los organismos más estudiados. Los investigadores han cartografiado y clasificado por completo sus células, incluidas sus 302 neuronas y las aproximadamente 5000 conexiones entre ellas. Sin embargo, no se conoce todavía el funcionamiento conjunto de las neuronas en una red. ¿Cómo coordina el gusano sus aproximadamente 100 músculos para relajarse y contraerse en forma ondulatoria cuando nada?

Para descubrirlo, se modificó genéticamente el pequeño nemátodo de un milímetro de longitud para que algunas de sus células se volvieran sensibles a la luz, una técnica desarrollada hace poco y co-



nocida como optogenética [véase «Control del cerebro por medio de la luz», por Karl Deisseroth; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2011]. Puesto que el cuerpo del gusano es transparente, el uso de láseres enfocados en puntos concretos puede activar o desactivar distintas neuronas sin necesidad de electrodos u otros métodos invasivos. Leifer colocó un microscopio en un dispositivo construido para rastrear los movimientos del gusano mientras este nadaba en la placa. También desarrolló un software que analizaba las imágenes del microscopio, localizaba las neuronas de interés y finalmente apuntaba y disparaba el láser. La revista *Nature Methods* publicó los resultados en su página web.

Otros equipos han utilizado la optogenética para controlar neuronas individuales en gusanos inmovilizados. Leifer señala, sin embargo, que es necesario actuar sobre el gusano cuando este nada libremente. Ha demostrado así que, mientras el gusano avanza, las señales motrices se transmiten a lo largo del cuerpo a través de las células musculares, además de las conexiones nerviosas.

Leifer opina que la técnica podría ayudar a crear simulaciones completas del comportamiento del organismo, un modelo informático de la totalidad de su sistema nervioso. En cierto modo, sería como «cargar una mente en el ordenador», aunque se trate de una mente rudimentaria.

—Davide Castelvecchi

AGENDA

CONFERENCIAS

12 de mayo

Moléculas de un asesinato: moléculas criminales y casos clásicos

John Emsley, Universidad de Cambridge
 Museo de las Ciencias Príncipe Felipe
 Valencia
www.cac.es/acienciacierta

17 de mayo

La fuente de luz de sincrotrón ALBA

Ramón Pascual, Sincrotrón Alba
 Ciclo «Desafíos del siglo XXI»
 Residencia de Investigadores del CSIC
 Barcelona
www.residencia-investigadors.es

EXPOSICIONES

Ötzi, el hombre del hielo

Museo de Prehistoria de Valencia
 Valencia
www.museuprehistoriavalencia.es

M.C. Escher. Universos infinitos

Parque de las Ciencias
 Granada
www.eschergranada.com



OTROS

20 de mayo - Taller

Química para mayores de 60

Casa de las Ciencias
 Logroño
www.logro-o.org/casadelasciencias

26 de mayo - Maratón científico

Trasplantes: Una realidad en España

Alberto Juffé, Hospital Modelo de La
 Coruña
 Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
 Madrid
www.muncyt.es/mnct/agenda.html

Del 1 al 3 de junio - Jornadas

Los problemas del milenio

Centenario de la RSME
 Facultad de matemáticas
 Universidad de Barcelona
 Barcelona
garf.ub.es/Milenio

PALEONTOLOGÍA

Bisontes contra mamuts

Castores del tamaño de osos, mamuts, caballos, camellos y tigres de dientes de sable solían vagar por Norteamérica hasta que, hace unos 11.000 años, desapareció la mayoría de esos grandes mamíferos. En la actualidad, los expertos siguen debatiendo el motivo de esa extinción a finales del Pleistoceno: ¿un cambio climático, una caza excesiva, alguna enfermedad u otro factor? Eric Scott, responsable del área de Paleontología del Museo del Condado de San Bernardino en Redlands, California, sugiere que la causa fue muy distinta: a saber, la inmigración de los bisontes desde Eurasia.

Basándose en los datos obtenidos en sus excavaciones, así como en otras realizadas desde el siglo XIX, Scott afirma que el bisonte apareció en Norteamérica hace 220.000 años y se extendió por el continente durante el resto del Pleistoceno, una época en la que el cambio climático había hecho escasear la comida y el agua. Presentó esta idea la primavera del año pasado, en la revista *Quaternary International*. Propuso que la proliferación de los bisontes en esa época de carestía, junto con el cambio climático, habrían constituido la principal causa de extinción de los grandes mamíferos.

Scott halló la inspiración mientras realizaba una excavación cerca de la ciudad de Murrieta, en California, a principios de los noventa. Algunos años antes, había estudiado en la proximidad unos estratos de entre 760.000 años y 2,5 millones de

años de antigüedad, en los que no halló ningún indicio de la presencia de bisontes, pero sí de caballos. Entonces se preguntó: «¿Qué pensarían los caballos cuando aparecieron los bisontes y empezaron a consumir su alimento?» Su equipo realizó más tarde una excavación de los estratos de finales del Pleistoceno en Diamond Valley Lake, cerca de Murrieta, a unos pocos kilómetros del lugar sin indicios de bisontes. Cuando encontró allí fósiles de bisontes y de otros mamíferos, pensó haber dado con la respuesta. «Imaginé que, a medida que los bisontes migraban a esas zonas y su número crecía, el impacto sobre las poblaciones de otros grandes mamíferos resultaría decisivo». Scott recopila ahora datos de otras zonas de Estados Unidos para comprobar que el patrón que observó en la zona sudoeste se cumple también en el resto del país.

El investigador sugiere que los bisontes aventajaban a otros grandes herbívoros en numerosos aspectos. Su estómago múltiple tal vez les permitió aprovechar al máximo los nutrientes de la comida. Y no fue necesario ganar todas las batallas en las que participaron. Bastó con provocar una malnutrición en las hembras lactantes para causar un colapso en la población de otras especies. Los lobos gigantes, leones americanos y otros carnívoros también debieron de desaparecer a causa de la escasez de los grandes herbívoros con que se alimentaban.

—Rebecca Coffey



ERIC SCOTT, MUSEO DEL CONDADO DE SAN BERNARDINO (cráneo de bisonite)

Preparados para el gran terremoto



En los últimos meses se han producido varios terremotos devastadores en el océano Pacífico. En enero de 2010, un seísmo de magnitud 7,0 devastó Haití; en febrero, otro de magnitud 8,8 azotaba el centro de Chile. Christchurch, en Nueva Zelanda, se vio afectada por un temblor de magnitud 7,0 en septiembre, al que siguió una réplica de 6,3 el pasado mes de febrero. El terremoto de magnitud 9,0 que asoló Japón en marzo ocupa el cuarto puesto en la lista de los terremotos más intensos de los últimos 110 años.

Son muchos quienes se preguntan si existe alguna relación entre ellos. Aunque los sismólogos consideran como causa más probable una fluctuación estadística, eso no implica que sea seguro salir de debajo de la cama. El mejor indicador de riesgo sísmico lo proporciona el registro geológico, y los datos más recientes al respecto revelan una historia inquietante, sobre todo en la costa noreste del Pacífico.

Aunque la mayoría considera el sur de California como la región de EE.UU. con

mayor probabilidad de sufrir terremotos, existen razones para pensar que, en realidad, es la zona de subducción de Cascadia la que presenta el riesgo más elevado. Esta zona corre paralela a la costa y supone una amenaza para ciudades como Victoria (Columbia Británica), Portland (Oregón) y Eureka (California). Allí, la diminuta placa de Juan de Fuca se desliza hacia el este bajo la placa Norteamericana a una velocidad media de entre 30 y 40 milímetros al año. Sin embargo, el movimiento a lo largo de la superficie de contacto entre ambas parece haber permanecido bloqueado durante siglos. «No podemos ignorar esta zona de subducción y hacer como si no existiera», comenta Chris Goldfinger, geólogo marino de la Universidad de Oregón. «Tras permanecer tranquila durante cientos de años, de repente podría dar un empujón brusco».

Datos recientes indican que la región norte de la zona de subducción (desde el centro de la isla de Vancouver hasta la frontera entre los estados de Washington

EN DETALLE

¿Cómo se mide la velocidad de las placas tectónicas?

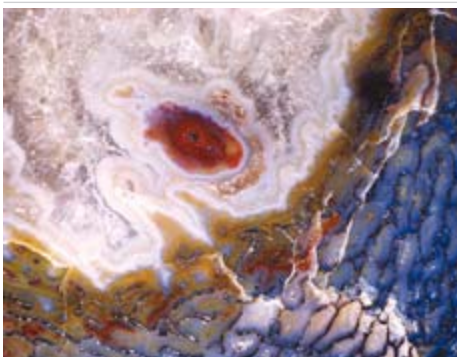
El método más preciso para calcular la velocidad de convergencia entre dos placas tectónicas lo proporciona el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Las mediciones repetidas de la distancia entre dos puntos permite estimar la tasa de convergencia a largo plazo, así como cuantificar desplazamientos bruscos, como el salto de 2,4 metros en dirección este que experimentó Japón durante el terremoto del 11 de marzo.

Antes de la llegada del GPS, los cálculos se basaban en el estudio de las rocas del fondo oceánico. Cuando se enfrían, en estas rocas queda registrada la orientación del campo magnético terrestre. Al conocer las variaciones del campo magnético, resulta posible calcular la tasa de formación de corteza oceánica en las dorsales oceánicas. Otra técnica se basa en el muestreo y cartografía de formaciones rocosas a ambos lados de la frontera entre dos placas; en particular, formaciones con una composición característica o con agregados inusuales de fósiles.

y Oregón) presenta una probabilidad de entre un 10 y un 15 por ciento de sufrir un terremoto de magnitud 8,0 o superior durante los próximos 50 años. La región sur (desde la frontera entre Washington y Oregón hasta el cabo Mendocino, en California) cuenta con una probabilidad del 37 por ciento de que ocurra lo mismo. Goldfinger y sus colaboradores esperan publicar sus datos en un próximo informe del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Con respecto al siguiente gran terremoto, Goldfinger comenta: «Va a ocurrir. Solo es cuestión de acotar cuándo».

—Sid Perkins

¿QUÉ ES ESTO?



¿Arte o ciencia? Norman Barker es experto en ambas materias. Profesor de anatomía patológica y de arte aplicado a la medicina en la Universidad Johns Hopkins, Barker fotografió con quince aumentos la sección transversal de un hueso de dinosaurio. El hueso (azul), que pertenece a una especie desconocida, presenta el tamaño de un plato de café y se descubrió en la formación geológica Morrison, en la meseta del Colorado, donde abundan los fósiles. El óxido de hierro (rojo) en la parte ocupada por cuarzo (blanco) podría corresponder a médula o hueso esponjoso. Pero el profesor afirma que también podría ser una raíz de árbol que creció y se descompuso a lo largo de millones de años, antes de convertirse en un fósil.

—Ann Chin

RADIATIVIDAD

Radiaciones ionizantes

Sobre la radiación ambiente, sus efectos sobre la salud y el accidente de Fukushima

A raíz de los daños sufridos en la central nuclear de Fukushima como consecuencia del tsunami provocado por el terremoto que asoló Japón el pasado mes de marzo, hemos podido leer gran cantidad de noticias sobre las fugas radiactivas y su impacto ambiental. La variedad y complejidad de los conceptos que subyacen bajo los datos publicados dificultan su interpretación por parte del público y los propios medios. A continuación presentamos una breve guía para orientarse en este mar de información.

La radiactividad es un fenómeno natural que experimentan ciertos núcleos atómicos inestables. Durante su proceso de transformación (desintegración) hacia un estado de menor energía, tales núcleos radian partículas con energía suficiente como para ionizar la materia, motivo por el que pueden resultar perjudiciales para la salud.

Resulta imposible saber cuánto tiempo tardará un núcleo en desintegrarse: se trata de un proceso aleatorio que puede tardar desde un nanosegundo hasta miles de millones de años en acontecer. Lo que sí podemos conocer es la *probabilidad* de que un núcleo se desintegre pasado cierto tiempo. Para cuantificarla, se emplea el período de semidesintegración. Esta cantidad expresa el tiempo que debe transcurrir para que, en una muestra de material compuesta por una gran cantidad de núcleos de la misma especie, se desintegren la mitad de ellos. Por ejemplo, transcurridos cuatro períodos de semidesintegración, el número de núcleos radiactivos se habrá reducido en un factor dieciséis.

La *actividad radiactiva* de una muestra nos informa del ritmo al que se producen las desintegraciones. Se cuantifica en becquerelios (Bq). Un Bq equivale a una desintegración nuclear por segundo. Conocidos el período de semidesintegración de una especie y la cantidad de isótopos radiactivos en una muestra, resulta sencillo calcular su actividad. Por ejemplo, el período de semidesintegración del cesio-137 asciende a 30,2 años, por lo que una cantidad de $3,13 \cdot 10^{-12}$ gramos de cesio-137 exhibirá una actividad

de 10 Bq. Nótese que el período de semidesintegración depende solo del tipo de núcleo considerado, mientras que la actividad depende también del tamaño de la muestra.

Impacto sobre el organismo

Para cuantificar el efecto sobre el ser humano de las radiaciones emitidas por una muestra, se emplea una magnitud denominada *dosis equivalente*, la cual expresa la energía absorbida por nuestro cuerpo cuando este se ve expuesto a radiaciones ionizantes. La dosis equivalente se define como la energía absorbida por unidad de masa corporal, ponderada según el tipo de radiación, y se mide en sieverts (Sv). Un Sv equivale a un joule por kilogramo, si bien suelen emplearse más a menudo sus submúltiplos, como el milisievert (mSv).

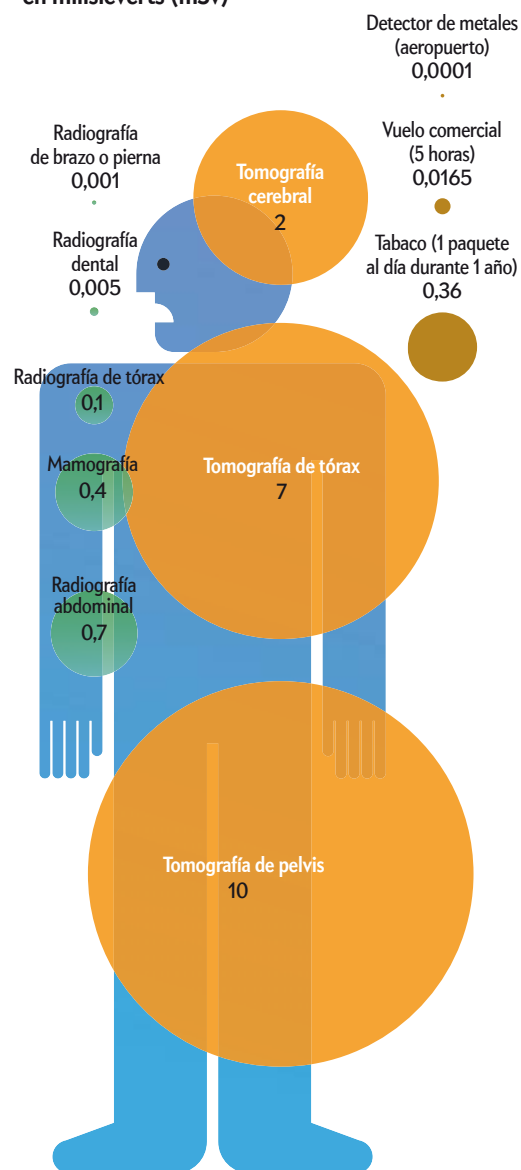
La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) es la encargada de fijar los niveles máximos de dosis recomendables para el público y para los profesionales expuestos a la radiación. Para el público en general, se fija un valor máximo de 1 mSv al año; para los trabajadores, 50 mSv anuales, con un límite máximo de 100 mSv acumulados en 5 años.

¿Por qué se fijan esos valores, y no otros? Cuando la radiación ionizante interacciona con tejido biológico vivo, pueden producirse efectos deterministas y efectos aleatorios. Los primeros aparecen a dosis elevadas de radiación. Se observan efectos directos sobre la salud a partir de dosis superiores a 1 Sv. Si un grupo de personas recibe una dosis de 4 Sv, en ausencia de tratamiento médico se pue-

den producir, transcurridos dos meses, un 50 por ciento de muertes.

Por otro lado, los efectos estocásticos (cáncer y acortamiento no específico de la vida) carecen de umbral. Ello quiere decir que pueden manifestarse tras dosis elevadas, pero también muy bajas. Por ejemplo, se calcula que, tras las explosiones nucleares de Hiroshima y Nagasaki, se produjo 1 muerte por cáncer por cada 13.400 personas que recibieron 1 Sv de dosis equivalente. A partir de estudios similares, se estima el riesgo en función de la dosis recibida. Así, el límite de 50 mSv/año para los profesionales del sector nuclear se fija al imponer que la mortalidad ocasionada

Dosis de radiación equivalente en milisieverts (mSv)



¿Cuánta radiación absorbemos?

La dosis de radiación equivalente proporciona una medida de la energía absorbida por nuestro organismo cuando se ve expuesto a una fuente de radiaciones ionizantes. La energía absorbida por unidad de masa corporal suele expresarse en sieverts ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ julio/kilogramo}$). La figura muestra las dosis de radiación asociadas a algunas fuentes habituales de radiactividad.

por las dosis recibidas en el trabajo no supere a la mortalidad media de un trabajador que realiza otras actividades laborales de riesgo. A efectos de comparación, se estima que fumar 20 cigarrillos al día acorta la vida en unos 6,6 años; un sobrepeso del 20 por ciento, en 2,7 años, y los accidentes de automóvil, en 207 días. Por su parte, la radiación natural acorta la vida en 8 días; las exploraciones con rayos X, en 6 días, y una dosis de 1 mSv al año durante 20 años, en 9,9 días.

Radiactividad natural

A lo largo de la vida, el ser humano se halla expuesto a numerosas fuentes de radiación ionizante. Las fuentes de origen natural se deben, por una parte, a la radiación cósmica (partículas que llegan desde el espacio), y por otra, a la emitida por la superficie terrestre. Al nivel del mar, la tasa media de origen cósmico asciende a unos 31 nanosievert (nSv) por hora. Durante un vuelo intercontinental entre Europa y Norteamérica, la tasa se calcula entre 4000 y 8000 nSv/h. Ello significa que, en un vuelo de 10 horas, la dosis equivalente acumulada vendría a ser de unos 0,04 mSv.

La interacción entre los rayos cósmicos y la atmósfera también genera isótopos radiactivos que pasan a formar parte del entorno. Por ejemplo, la concentración media de tritio (hidrógeno-3, con un período de semidesintegración de 12,3 años) asciende a unos 400 Bq por metro cúbico en el agua continental y a unos 100 Bq/m³ en el agua de los océanos. Se estima

que, por término medio, una persona recibe por ingestión de agua una dosis equivalente de unos 0,01 microsievert (μSv) al año. En cuanto al carbono-14, su concentración asciende a unos 230 Bq por kilogramo de carbono. Por tanto, una persona contiene en su cuerpo unos 2700 Bq de carbono-14, y recibe por ello una dosis media de unos 12 μSv al año.

La radiación natural de origen terrestre se debe a la desintegración de los radionucleidos primordiales presentes en la tierra y los minerales. Entre ellos se encuentran el potasio-40 (con un período de semidesintegración de 1248 millones de años) y los descendientes radiactivos del uranio-238 (4468 millones de años) y del torio-232 (14.050 millones de años). Otra fuente de radiación natural proviene del radón-222, un descendiente del uranio-238. Cuenta con un período de semidesintegración de 3,82 días. Se trata de un gas noble que el terreno exhala de manera continua y que se encuentra en la atmósfera en cantidades variables. Las concentraciones típicas a 1 metro del suelo oscilan entre los 3 y los 200 Bq/m³. Sus descendientes, como el plomo-214, el bismuto-214 o el polonio-210, entre otros, son a su vez radiactivos. Durante los episodios de lluvia, el agua arrastra dichos isótopos y los concentra en el suelo, tras lo que pueden registrarse incrementos en la tasa de dosis ambiental de hasta un 50 por ciento.

Radiactividad de origen artificial

Las fuentes de radiación ionizante de origen artificial pueden clasificarse en dos grandes grupos: las que modifican la distribución de los radionucleidos primordiales y las que generan nuevos radionucleidos. La redistribución de los radionucleidos primordiales tiene su origen en actividades como las explotaciones mineras de metales, la industria de abonos fosfatados (rocas con concentraciones de uranio del orden de 1500 Bq/kg), la minería y combustión del carbón, o la extracción de petróleo y gas natural (las plataformas

petrolíferas generan aguas residuales con concentraciones de radón-226 de hasta 2000 Bq/m³).

Al segundo grupo pertenecen los reactores y las armas nucleares de fisión. En el proceso de fisión nuclear se genera un gran número de isótopos radiactivos, cuyos períodos de semidesintegración varían entre las milésimas de segundo y los millones de años. Antes de llegar al reactor, el combustible nuclear contiene solo óxido de uranio, con una proporción isotópica de entre un 4 y un 5 por ciento de uranio-235, y el resto de uranio-238. Al final del ciclo de quemado del combustible, aproximadamente un 3 por ciento de la masa total se habrá transformado en más de 200 especies nucleares, entre productos de fisión, sus descendientes y elementos transuránicos.

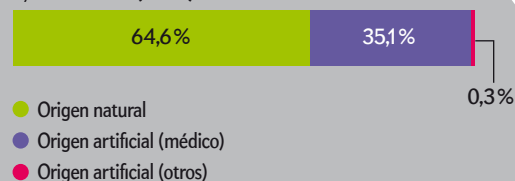
Accidentes, yodo-131 y cesio-137

En caso de accidente en un reactor nuclear, como el ocurrido en Fukushima, del total de isótopos presentes se acostumbra a valorar, en primera instancia, la concentración ambiental de solo dos de ellos: el yodo-131 y el cesio-137. ¿A qué obedece que nos fijemos solo en estos radionucleidos?

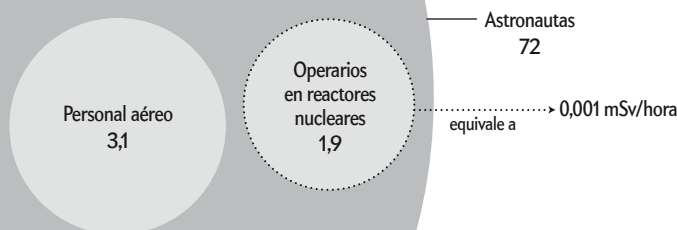
De entre los más de 200 isótopos radiactivos que mencionábamos arriba, podemos descartar los elementos no volátiles, que no podrán escapar de la matriz de óxido de uranio debido a su escasa capacidad de difusión. Los elementos volátiles son siete (Cs, Rb, I, Xe, Kr, Te y Br). De ellos, los gases nobles presentan un escaso impacto ambiental, ya que su incapacidad para formar compuestos impide que puedan incorporarse a la cadena trófica. Si, además, descartamos aquellos isótopos con períodos de semidesintegración inferior a 1 día (pues desaparecen con rapidez), solo nos quedan seis especies (¹³²Te, ¹²⁹I, ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁶Cs, ¹³⁷Cs). De estos, los isótopos más abundantes instantes después de la parada del reactor son el cesio-137 y el yodo-131, con períodos de semidesintegración de 30,2 años y 8,04 días, respectivamente.

Dosis equivalente media por habitante en España

3,6 mSv/año (total)



Exposición media por encima del fondo natural para profesionales (en mSv/año)



1 mSv/hora fue la dosis recibida por los trabajadores de la central durante la primera semana tras el accidente en Fukushima. Algunos picos de corta duración alcanzaron los 400 mSv. La Comisión Internacional de Protección Radiológica fija un límite máximo de 50 mSv/año. El límite para los operarios de Fukushima se amplió a 250 mSv/año.

El impacto biológico de ambos isótopos en el ser humano se debe a que la glándula tiroides emplea yodo, por lo que una acumulación de yodo radiactivo en dicha glándula puede provocar tumores. Por su parte, el cesio presenta una actividad química similar a la del potasio, de forma que tiende a acumularse en la musculatura. El período biológico de permanencia del cesio-137 en el cuerpo humano se estima en unos 110 días, y el del yodo-131, entre 120 y 138 días. Ambos pueden ser absorbidos por ingestión y por inhalación.

Si tenemos en cuenta el período biológico de ambos isótopos, la radiación emi-

tida y su actividad específica, se puede estimar el *factor de dosis* como consecuencia de su incorporación al organismo. Según la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (EPA), el factor de dosis correspondiente a la incorporación de cesio-137 por inhalación asciende a 8,63 nSv/Bq; por ingestión, a unos 13,5 nSv/Bq. En el caso del yodo-131, el factor de dosis por inhalación es de 292 nSv/Bq y, por ingestión, de 476 nSv/Bq.

Estos valores permiten determinar los límites admisibles en la concentración de dichos radionucleidos en la alimentación y en el aire. Según los datos del Consejo Nacional de Radiación de EE.UU., la con-

centración de cesio-137 en el aire no debería superar los 2200 Bq/m³ para un trabajador (lo que equivaldría a una dosis de 50 mSv/año si se respirasen dichas concentraciones durante 40 horas a la semana). Por otra parte, si consideramos una concentración en el aire de 1 Bq/m³, y si tenemos en cuenta que respiramos unos 2 litros de aire por minuto, deberíamos estar 4,4 años respirando dicha concentración para recibir la misma dosis que la que absorberíamos durante un viaje en avión de 10 horas.

—Guillem Cortés Rossell

Dpto. de física e ingeniería nuclear
Universidad Politécnica de Cataluña

GENÓMICA

Envejecimiento prematuro

El daño en el ADN durante la gestación acelera el envejecimiento futuro

Comprender los procesos biológicos que regulan el envejecimiento de los organismos sigue siendo uno de los objetivos de numerosos trabajos de investigación. En nuestro grupo hemos llevado a cabo un estudio que arroja luz sobre esta cuestión. Hemos desarrollado un modelo murino de una rara enfermedad hereditaria, el síndrome de Seckel. Los afectados presentan una mutación que altera los niveles de ATR, una proteína que protege el genoma de las posibles lesiones

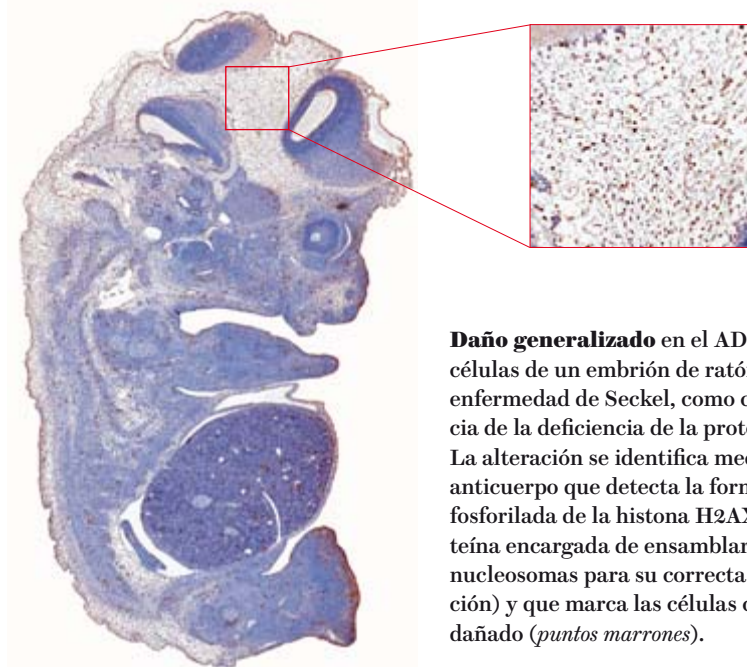
que sucedan durante su replicación. El modelo no solo reproduce los síntomas de la enfermedad, sino que nos ha ayudado a descubrir la influencia del estrés fetal en la aceleración del envejecimiento en los mamíferos.

El daño en el ADN es la causa de mutaciones que originan cáncer. Además, datos recientes sugieren que la acumulación de daño genético es responsable de la degeneración asociada al envejecimiento. No es de extrañar que los seres vivos

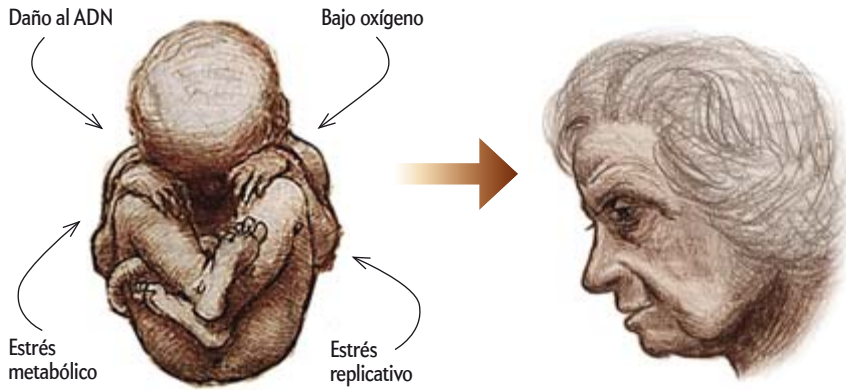
hayan desarrollado mecanismos para evitar semejante alteración. Cabe destacar la «respuesta al daño en el ADN» (RDA) realizada por un conglomerado de proteínas con diversas funciones, desde la detección de las mutaciones, hasta la unión de extremos rotos. Debido a su actividad protectora frente a las mutaciones, estos mecanismos representan barreras antitumorales muy importantes.

Las enfermedades genéticas debidas a mutaciones en esas proteínas protectoras suelen caracterizarse por una alta incidencia de cáncer, así como por un proceso de envejecimiento acelerado. Una de las funciones de la RDA consiste en detectar el daño y «avisar» sobre su existencia para ralentizar el resto de los procesos celulares hasta la reparación de la lesión. Esta señalización se hace a través de cascadas de fosforilación en cadena y recae principalmente en dos quinasas (proteínas con capacidad de fosforilar a otras proteínas): ATM y ATR. Mientras que ATM responde al daño exógeno, como el ocasionado por una exposición a radiación, ATR se encarga de señalar el daño intrínseco generado durante la duplicación del genoma.

Para estudiar la función de esas proteínas, los modelos animales han sido de inestimable ayuda. Pero si bien los ratones con deficiencia de ATM se generaron hace más de un decenio, los modelos deficientes en ATR han planteado una mayor dificultad. Aunque estos han sido generados por el premio Nobel David Baltimore, del Instituto de Tecnología de California, su uso se ha visto limitado por la letalidad celular que implica la eliminación de ATR. La necesidad de ATR para salvaguardar la integridad del genoma durante la replicación la convierte en una proteína esencial. Fi-



Daño generalizado en el ADN de las células de un embrión de ratón con la enfermedad de Seckel, como consecuencia de la deficiencia de la proteína ATR. La alteración se identifica mediante un anticuerpo que detecta la forma fosforilada de la histona H2AX, (proteína encargada de ensamblar el ADN en nucleosomas para su correcta organización) y que marca las células con el ADN dañado (*puntos marrones*).



Programación intrauterina del envejecimiento. La figura ilustra el concepto que hemos planteado en tiempo reciente: el estrés fetal (en nuestro estudio el ocasionado por el daño en el ADN) puede condicionar la forma y velocidad con la que se envejece en el futuro. Queda por demostrar si otros tipos de estrés intrauterino pueden también acelerar el envejecimiento.

nalmente, una rara enfermedad humana ha resultado clave para el desarrollo de modelos que permitan estudiar esta quinasa tan importante.

Reparación defectuosa

El síndrome de Seckel fue descrito en el año 1960 por Helmut Seckel. Se trata de una enfermedad rara con un cuadro clínico común a otros síndromes ligados a defectos en la reparación del ADN, como neurodegeneración, envejecimiento prematuro, inmunodeficiencias y cáncer. Se caracteriza además por una particular malformación craneo-facial, por lo que la afección se conoce también como «enanismo de cabeza de pájaro». Las células de los pacientes presentan una respuesta deficiente al daño en el ADN que se produce durante la replicación. En el año 2003 se descubrió una mutación en el gen de la quinasa ATR, posible causante del síndrome. La mutación disminuye la eficiencia de la reacción de corte y empalme del ARN mensajero (ARNm) de ATR, con lo que los niveles de la quinasa resultan casi indetectables pero aún hacen posible la vida. Nuestra estrategia para desarrollar un modelo de Seckel consistió en construir un alelo murino «humanizado» de ATR que reprodujera los defectos de procesamiento del ARNm provocados por la mutación.

Los ratones mutantes obtenidos presentaban niveles muy bajos de ATR y eran una fiel fenocopia de la enfermedad humana. Exhibían enanismo intrauterino, microcefalia (tamaño reducido de la cabeza), además de otras anomalías craneofaciales. Los ratones afectados morían a los cinco meses de edad (la vida media de los ratones de laboratorio varía entre dos y

tres años) debido a un envejecimiento prematuro, con la aparición de los siguientes síntomas: pelo gris, curvatura de la columna, osteoporosis, acumulación de grasa en la médula ósea, disminución de la densidad de folículos pilosos, adelgazamiento de la epidermis, etcétera. Sin embargo, al tratar de explicar este fenotipo descubrimos un hecho sorprendente.

Origen intrauterino

En el envejecimiento natural, la acumulación de daño en el ADN se da de manera gradual a lo largo de la vida. No obstante, los tejidos adultos, envejecidos, de los animales enfermos no presentaban una alteración del genoma muy importante, lo cual resultaba paradójico. El menor tamaño de los animales al nacer nos dio una pista clave para resolver ese enigma. El análisis de los embriones mutantes reveló que el ADN sufría un enorme daño durante la gestación. Cabe recordar que ATR ofrece protección frente a los defectos de replicación del ADN, y que el desarrollo embrionario representa la etapa en que ese proceso sucede más veces y con mayor velocidad. La deficiencia de ATR en esta fase crucial determina el daño producido en el ADN del embrión.

El aspecto de mayor interés de este trabajo reside en la posibilidad de que el estrés intrauterino condicione la velocidad de envejecimiento en el futuro. La idea de que las alteraciones gestacionales puedan ocasionar enfermedades posteriores no es nueva, concepto conocido como «programación intrauterina». Se sabe así que las enfermedades metabólicas de la madre durante el embarazo incrementan en gran medida la probabilidad de que los hijos padezcan diabetes en el futuro. Pero el



SciLogs

Ciencia en primera persona



JORDI SOLÉ CASALS

Tecnología, ciencia y sociedad



YVONNE BUCHHOLZ

Psicología y neurociencia al día



CLAUDI MANS TEIXIDÓ

Ciencia de la vida cotidiana



RAMÓN PASCUAL DE SANS

Física y universidad



JULIO RODRÍGUEZ LÓPEZ

La bitácora del Beagle



JOSÉ MARÍA VALDERAS

De la sinapsis a la conciencia



LUIS CARDONA PASCUAL

Ciencia marina



JUAN GARCÍA-BELLIDO CAPDEVILA

Cosmología de precisión

Y MÁS...

www.investigacionyciencia.es/blogs