

Clima caótico

Wallace S. Broecker

La temperatura media de la Tierra ha experimentado a veces cambios notables en pocos decenios. ¿Nos hallamos en las puertas de uno de tales episodios?

Los últimos 10.000 años constituyen una rareza en la historia del planeta. Este período, durante el cual se desarrollaron las civilizaciones, se ha caracterizado por un tiempo más benigno y menos variable que cualquier otro intervalo similar transcurrido durante los últimos cien milenios. Los testigos, o cilindros de hielo, extraídos de diversos puntos del casquete helado de Groenlandia muestran una serie de bruscas olas de frío y períodos cálidos —de 1000 años o más de duración— que hicieron descender o subir la temperatura media invernal en Europa septentrional hasta 10 grados Celsius en el curso de intervalos temporales brevísimos, de sólo un decenio. Los signos de esas bruscas variaciones se hallan escritos en los archivos de polvo atmosférico, concentración de metano y precipitación conservados en las capas anuales de hielo.

El último período frío duró un milenio. El Joven Dryas, así se le llama en referencia a una flor de la tundra que medró mucho por entonces, acabó hace unos 11.000 años. Dejó sus huellas en los sedimentos marinos del Atlántico Norte, en las morrenas glaciales de Escandinavia e Islandia y en los lagos y pantanos marítimos canadienses y de Europa septentrional.

Abundan las pruebas del alcance global que adquirieron los efectos del Joven Dryas. El calentamiento posglacial de la meseta polar antártica se detuvo hace 1000 años; al mismo tiempo, avanzaron de forma espectacular los glaciares de las montañas de Nueva Zelanda y cambiaron notablemente las proporciones de especies planctónicas de la porción meridional del mar de la China. El contenido de metano en la atmósfera bajó en un 30 por ciento. Sólo en los archivos de polen de distintas zonas de los EE.UU. no se aprecia el impacto del período.

La gran cinta transportadora

¿Qué hay detrás de esta turbulenta historia? ¿Podría ésta repetirse? Aunque no existe una certeza absoluta, cabe presumir que así será a tenor de los indicios. De acuerdo con diversos modelos, puede alterarse bruscamente la circulación de calor y sal a través de los océanos, lo que ejercería efectos drásticos sobre el clima global. Unas células de circulación, a manera de cintas transportadoras gigantes, abarcan la extensión de cada océano. En el Atlántico, las aguas cálidas superficiales viajan

hacia el norte, llegando a la vecindad de Groenlandia, donde el aire ártico las enfría; se sumergen y forman una corriente que recorre el Atlántico hasta el océano Glacial Antártico. Allí, esta corriente, al ser más cálida y por tanto menos densa que las frías aguas superficiales, asciende de nuevo, se enfría hasta el punto de congelación y se hunde nuevamente en el abismo. Algunas lenguas del agua antártica de fondo, la más densa del mundo, fluyen en dirección norte hasta los océanos Atlántico, Pacífico e Índico, aflorando de nuevo

para repetir el ciclo. En los océanos Pacífico e Índico, el movimiento hacia el norte de las aguas profundas queda compensado por un movimiento hacia el sur de las superficiales. En el Atlántico, esta contracorriente hacia el norte se incorpora rápidamente en el seno de la corriente hacia el sur, mucho más vigorosa, de la cinta transportadora.

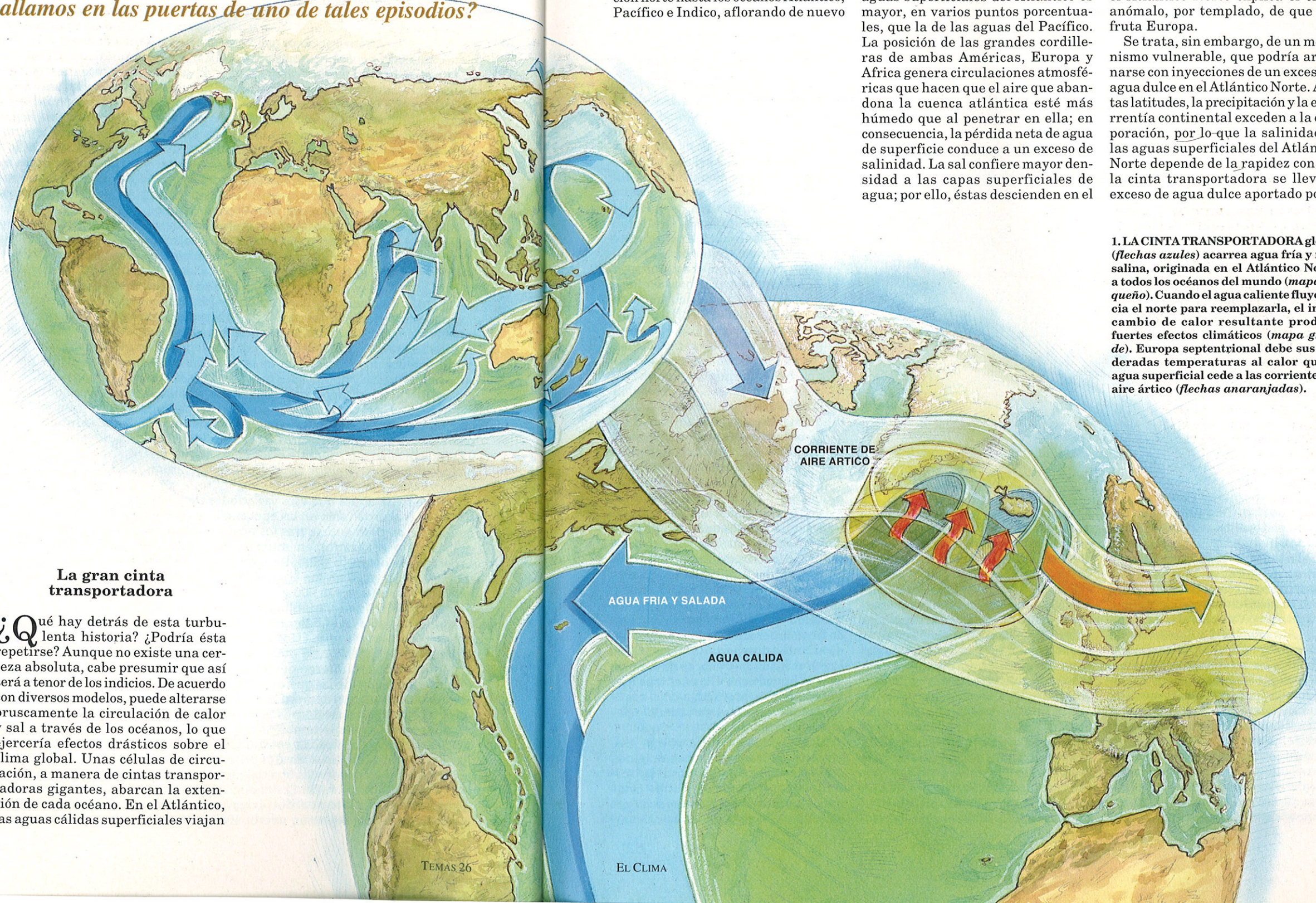
Esta agua profunda se forma en el Atlántico Norte —pero no en el Pacífico— porque la salinidad de las aguas superficiales del Atlántico es mayor, en varios puntos porcentuales, que la de las aguas del Pacífico. La posición de las grandes cordilleras de ambas Américas, Europa y África genera circulaciones atmosféricas que hacen que el aire que abandona la cuenca atlántica esté más húmedo que al penetrar en ella; en consecuencia, la pérdida neta de agua de superficie conduce a un exceso de salinidad. La sal confiere mayor densidad a las capas superficiales de agua; por ello, éstas descienden en el

Atlántico Norte e inician un tipo global de circulación que redistribuye de manera efectiva la sal en todos los océanos del mundo.

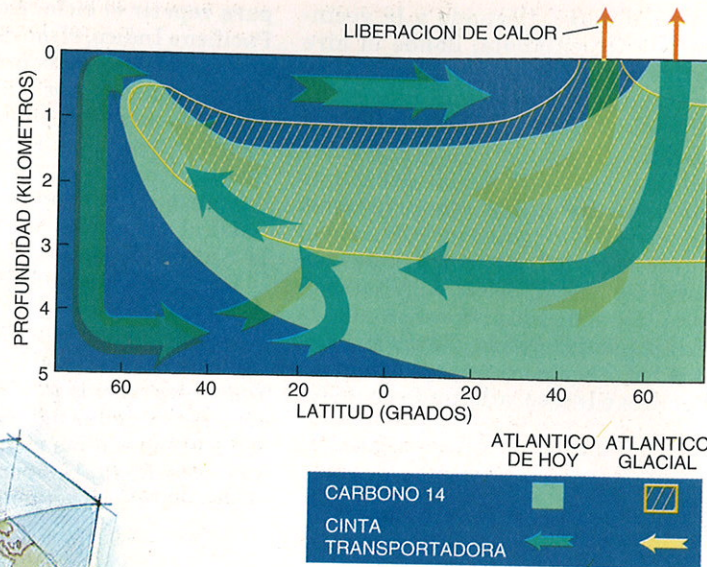
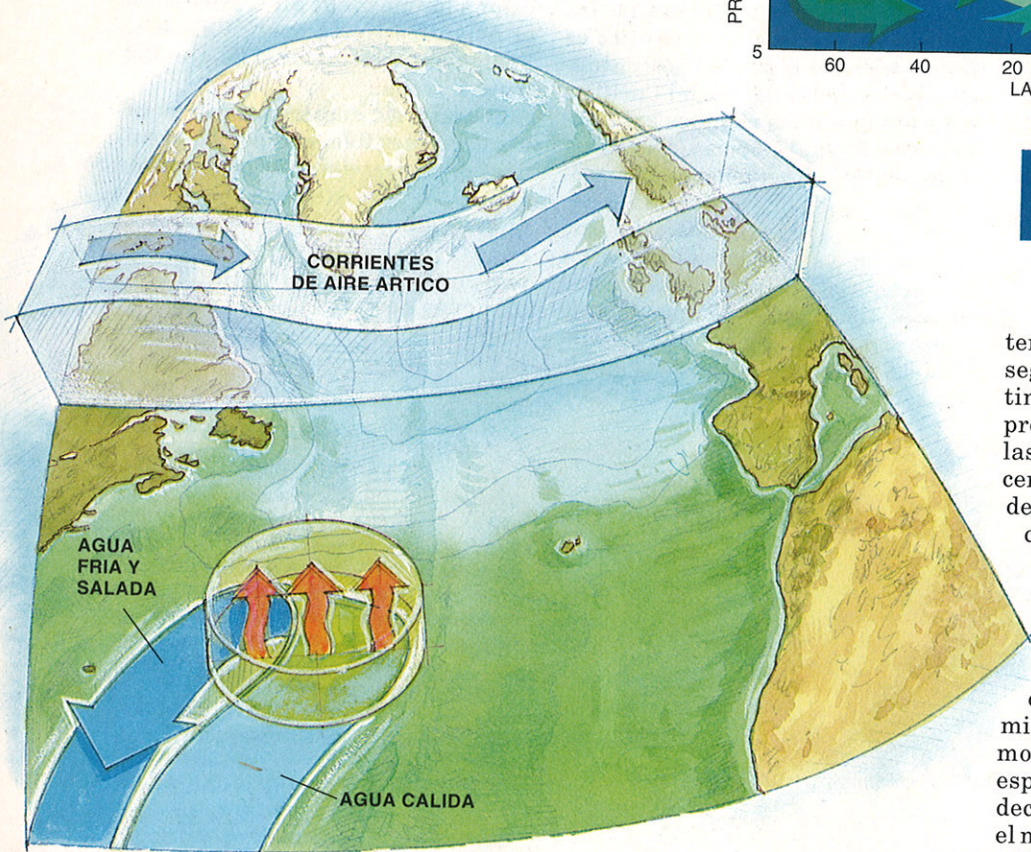
La circulación de la cinta transportadora atlántica, cuyo caudal centuplica el del río Amazonas, origina un enorme transporte de calor hacia el norte. El agua que fluye en esa dirección está, en promedio, ocho grados más caliente que el agua fría que avanza hacia el sur. La cesión de este calor a las masas de aire ártico sobre el Atlántico Norte explica el clima anómalo, por templado, de que disfruta Europa.

Se trata, sin embargo, de un mecanismo vulnerable, que podría arruinarse con inyecciones de un exceso de agua dulce en el Atlántico Norte. A altas latitudes, la precipitación y la escorrentía continental exceden a la evaporación, por lo que la salinidad de las aguas superficiales del Atlántico Norte depende de la rapidez con que la cinta transportadora se lleva el exceso de agua dulce aportado por la

1. LA CINTA TRANSPORTADORA global (flechas azules) acarrea agua fría y muy salina, originada en el Atlántico Norte, a todos los océanos del mundo (mapa pequeño). Cuando el agua caliente fluye hacia el norte para reemplazarla, el intercambio de calor resultante produce fuertes efectos climáticos (mapa grande). Europa septentrional debe sus moderadas temperaturas al calor que el agua superficial cede a las corrientes de aire ártico (flechas anaranjadas).



2. EL TRANSPORTADOR AUXILIAR (abajo) propuesto por Stefan Rahmstorf, de la Universidad de Kiel, operaría a la latitud de Europa meridional y, por tanto, no cedería calor a los vientos del Atlántico Norte. Las temperaturas reinantes en Europa durante los periodos glaciales, cuando funcionaría esa cinta auxiliar, eran en promedio hasta 10 grados inferiores a las actuales. El transportador auxiliar se caracterizaba por una circulación más somera (derecha).



tema transportador primario podría seguir la creación de un sistema distinto de circulación que operase a profundidades menores, y en el que las aguas profundas no se formarían cerca de Groenlandia sino al norte de las Bermudas. Semejante alteración provocaría que el calor liberado resultara mucho menos eficaz en el proceso de calentamiento de Europa septentrional. El transportador superficial de Rahmstorf se bloquearía con una entrada brusca de agua dulce, lo mismo que el primario, aunque su modelo predice una reactivación espontánea al cabo de sólo algunos decenios. No está claro, sin embargo, el mecanismo mediante el cual la circulación oceánica podría retornar desde el transportador superficial al más profundo, tal como está funcionando hoy día.

Dos propiedades del modelo de Rahmstorf han llamado la atención de los paleoclimatólogos. En primer lugar, la corriente superficial del transportador auxiliar reproduce la distribución de isótopos de cadmio y carbono del período glacial que ha quedado aprehendida en las conchas de foraminíferos del bentos. Las aguas de la cinta transportadora del Atlántico Norte son hoy pobres en cadmio y ricas en carbono 13, mientras que las aguas más profundas en el resto del océano son ricas en cadmio y pobres en carbono 13.

Este contraste refleja que la respiración de los organismos marinos retrae carbono 13 y favorece la concentración de cadmio (y otros componentes cuya historia no queda registrada en las conchas bénticas).

Durante los episodios de frío, los niveles de cadmio descendieron en las aguas atlánticas de profundidades intermedias y subieron espectacularmente en las aguas de fondo; la relación de carbono 13 a carbono 12 mostró una variación opuesta, acorde con la conclusión de Rahmstorf de que la cinta transportadora funcionaba a menores profundidades y cortocircuitaba las aguas abisales.

En segundo lugar, el transportador auxiliar mantiene el movimiento del radiocarbono hacia las profundidades marinas. Si este intercambio hubiera cesado, los métodos de datación radioquímica basados en la desintegración del carbono 14 mostrarían enormes distorsiones. Y es cierto que el reloj de radiocarbono se ha calibrado por otros medios y se ha comprobado que, pese a su imperfección, mantiene básicamente su validez.

Sólo alrededor de una cuarta parte del carbono mundial reside en las capas superficiales del océano y en la atmósfera. El resto está en el abismo. La distribución del carbono 14 radiactivo, que se forma en la atmósfera por la acción de los rayos cósmicos, depende de la intensidad de la circulación oceánica. En el océano, la mayor parte del radiocarbono que alcanza las profundidades abisales lo hace por medio de la circulación del transportador atlántico. Durante su viaje Atlántico arriba, las aguas del brazo superior y cálido de la cinta transportadora absorben radiocarbono del aire. La cinta transportadora lo acarrea luego hasta las profundidades oceánicas. Aunque el agua profunda vuelve brevemente a la superficie en la vecindad del continente antártico, allí apenas se disuelve radiocarbono.

De todo ese cuadro cabe inferir que basta una ligera deceleración en la marcha de la cinta para producir un efecto significativo en la concentración de carbono 14 en la atmósfera y en el océano. La proporción de carbono 14 a carbono 12 estable en las profundidades oceánicas se cifra hoy en torno a un 12 por ciento menor que el promedio para la superficie oceánica y la atmósfera; culpable de ello es la desintegración radiactiva que tiene lugar mientras circula el agua profunda. Paralelamente, los rayos cósmicos reponen un 1 por ciento de las existencias de radiocarbono

en el mundo cada 82 años. Por consiguiente, si cesaran los intercambios entre la superficie y las profundidades oceánicas, la tasa de carbono 14 en el océano superficial y la atmósfera aumentaría a razón de un 5 por ciento cada siglo porque se iría añadiendo carbono 14, pero no se arrastraría hacia las profundidades oceánicas. Después de un milenio de aislamiento, la concentración atmosférica de carbono 14 habría aumentado en un tercio de su valor original.

Tal suceso conduciría a una alteración radical del registro de datación por radiocarbono. Los paleontólogos determinan la edad de los materiales orgánicos midiendo su contenido residual de carbono 14. La cuantía asi-

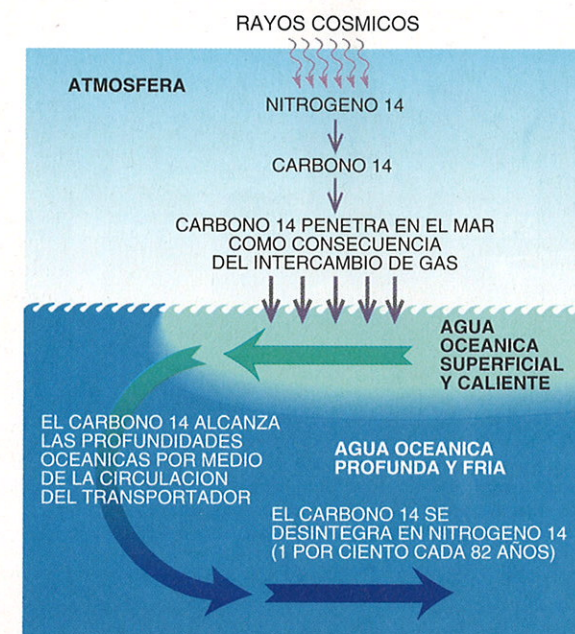
frías parecen, según la datación por radiocarbono, contemporáneas de las muestras correspondientes al período cálido, que vivieron más de 1000 años después.

Aunque la concentración atmosférica de carbono 14 ha variado algo a lo largo del tiempo, las secuencias de fechas mediante radiocarbono relativas a sedimentos marinos que se han ido acumulando a velocidad casi constante demuestran que no se produjo tal perturbación brusca durante los últimos 20.000 años. Además, contamos con las mediciones realizadas en corales cuyas edades absolutas se han establecido mediante el método de datación por uranio-torio; nos indican que, durante el final del último período glacial, cuando el transportador debería haber reanudado su funcionamiento e iniciado su extracción de carbono 14 de la atmósfera, aumentó la concentración atmosférica de radiocarbono.

Una flota de grandes témpanos

¿Qué nos dicen todas esas indicaciones del registro? Dos cosas: todas las pausas de la cinta duraron poco, no más de un siglo, y esas interrupciones se vieron compensadas por intervalos intermedios de rápida mezcla. En particular, el Joven Dryas fue, al parecer, una época en que la circulación general oceánica aumentó y no disminuyó, como sería de esperar si la ola de frío la hubiera provocado una parada completa del transportador atlántico. Si éste realmente se paró, debió entrar en funcionamiento algún otro mecanismo capaz de arrastrar carbono 14 hasta las profundidades oceánicas.

Suponiendo que las variaciones experimentadas por el mecanismo transportador produjeron los bruscos cambios hallados en los testigos de hielo de Groenlandia y en otros archivos climáticos, ¿de dónde saldría el exceso de agua dulce necesario para interrumpir el transporte de agua hacia las profundidades? Los casquetes de hielo polares son las fuentes obvias de las cataratas de agua dulce necesarias para alterar la circulación oceánica. Además, las variaciones bruscas parecen estar confinadas a épocas en que grandes capas de hielo cubrían el Canadá y Es-



3. EL PROCESO DE FORMACION de las aguas profundas extrae carbono 14 radiactivo, formado por los rayos cósmicos, de la atmósfera y capa superficial del océano para transportarlo hasta profundidades abisales. La datación por el método del radiocarbono mide indirectamente el estado del transportador oceánico; en efecto, cualquier paro prolongado causa un enriquecimiento de carbono 14 en la atmósfera y trastorna las edades aparentes de los residuos orgánicos.

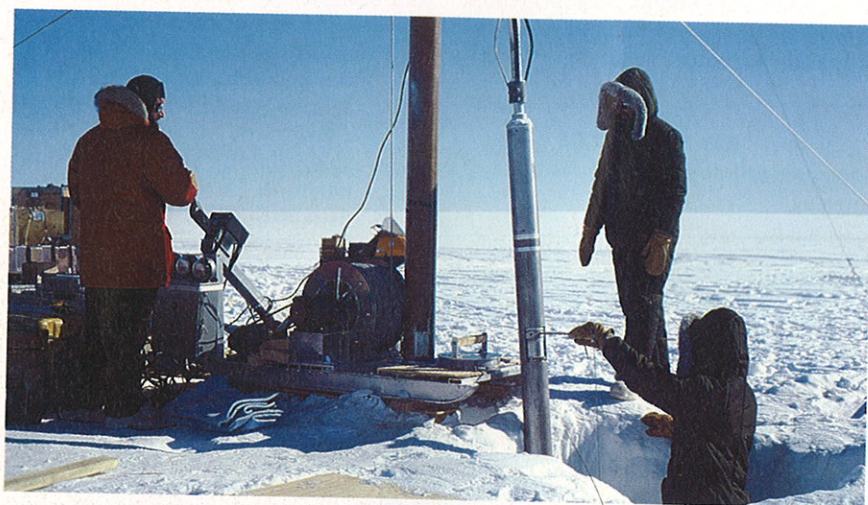
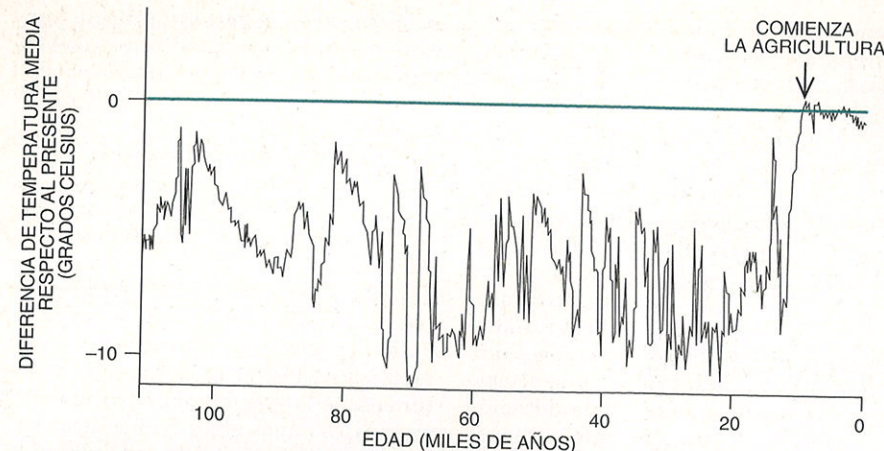
milada por un vegetal depende de la proporción de radiocarbono atmosférico (u oceánico) en esa época; cuanto menos carbono 14 quede, tanto más antigua debe ser la muestra. Las plantas que crecieron durante una interrupción de la operación de la cinta incorporaron el carbono 14 extra y parecen más modernas de lo que en realidad son. Después, cuando el transportador arrancó de nuevo y acarreo el carbono 14 atmosférico hasta cerca de su nivel actual, la anomalía se desvaneció. Así, las plantas de épocas

lluvia y los ríos. Cualquier interrupción del sistema transportador tendería a perpetuarse. Si el mecanismo transportador se detuviera, la temperatura del Atlántico Norte y tierras aledañas caería bruscamente cinco grados o más. Dublín sufriría el clima de Spitzberg, enclave siberiano situado a sólo 1000 kilómetros del círculo polar. Además, el cambio se produciría en 10 años, como mucho. (Los testigos de hielo y otros archivos indican que la temperatura media en toda la cuenca del Atlántico Norte descendió unos siete grados en preteritas olas de frío.)

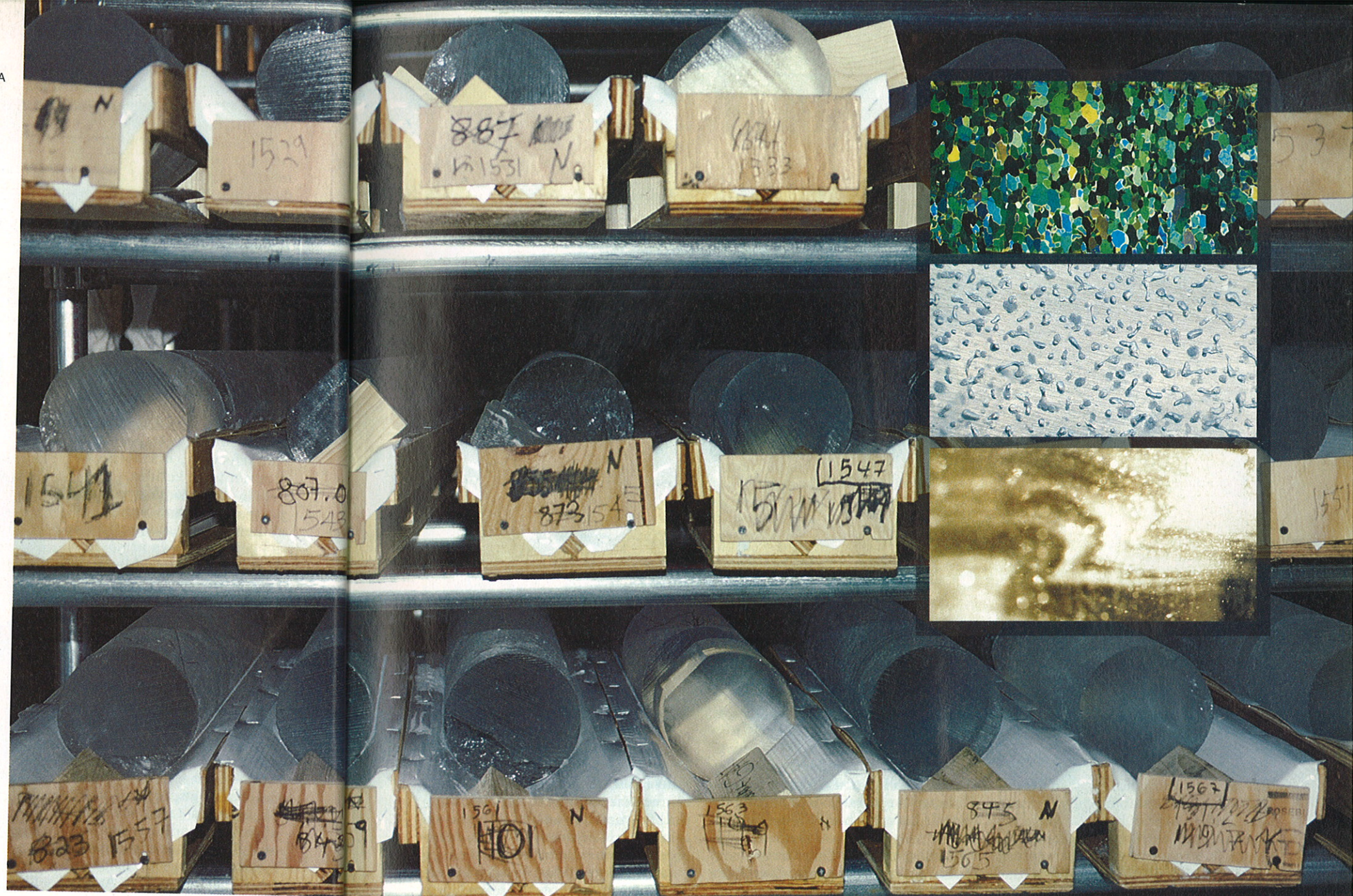
Según los modelos sobre el comportamiento del océano, la cinta transportadora tornaría a ponerse en funcionamiento, aunque habrían de transcurrir antes cientos o miles

de años. El calor cedido hacia abajo desde las capas cálidas de la superficie del mar y la difusión de la sal marina desde el fondo hasta la superficie reducirían con el tiempo la densidad del agua profunda rebalsada hasta el punto en que las aguas superficiales de una u otra de las regiones polares podrían de nuevo penetrar hacia el abismo, restableciendo la circulación de calor y sal. La configuración de esta circulación rejuvenecida no tendría, sin embargo, por qué ser la misma que existía antes del paro. Dependería, por contra, de la forma peculiar en que se desarrollara la aportación de agua dulce en cada región polar.

En un modelo más reciente, Stefan Rahmstorf, de la Universidad de Kiel, propone que a la detención del sis-



4. LOS TESTIGOS DE HIELO (arriba, a la izquierda) muestran la variabilidad del clima en los últimos 100.000 años. Se han realizado perforaciones hasta el lecho rocoso en la vecindad del centro del casquete de hielo groenlandés (arriba) y se ha medido la concentración relativa de oxígeno 18 y oxígeno 16. (Las muestras por analizar se ven en una cámara refrigerada a la derecha.) La cantidad de oxígeno 18 en el vapor de agua atmosférico depende de la temperatura del aire: cuanto más frío sea el clima, menos agua habrá que contenga el isótopo pesado. La imagen obtenida al microscopio de una sección del testigo (arriba, a la derecha) saca a la luz los distintos cristales de hielo mediante su diferente transmisión de la luz polarizada; las burbujas de aire aprisionadas registran la composición de la atmósfera (centro, derecha). El movimiento del casquete de hielo sobre un suelo irregular distorsiona las capas inferiores (abajo, derecha), lo que dificulta la obtención de mediciones precisas.



candinavia. Desde el final de los períodos glaciales, el clima mundial ha permanecido encerrado en su modo actual.

De acuerdo con los datos disponibles, hubo por lo menos ocho invasiones de agua dulce en el Atlántico Norte: siete flotas de témpanos desprendidos del margen oriental de la capa de hielo de la bahía de Hudson y una inundación de agua de fusión de hielos procedente de un lago enorme que delimitaba el borde meridional de la capa de hielo durante la retirada de ésta. A principios de los años ochenta, siendo alumno de segundo ciclo en la Universidad de Göttingen, Hartmut Heinrich descubrió un curioso conjunto de capas

en los sedimentos del Atlántico Norte. Las capas se extienden desde el mar del Labrador hasta las Islas Británicas. Según la explicación más plausible de sus características, débense a la fusión de numerosos témpanos desprendidos en el Canadá.

Los residuos procedentes de esta flota pierden potencia en dirección Este; su grosor de medio metro en el mar del Labrador se reduce a centímetros en el Atlántico oriental. La mayoría de las macropartículas de los sedimentos están constituidas por fragmentos característicos de arcillas sedimentarias y lechos de rocas ígneas procedentes de la bahía de Hudson y alrededores. Escasean las con-

chas de foraminíferos en estas capas, señal de que nos hallamos ante un océano cubierto de hielo marino; la baja relación de oxígeno 18 a oxígeno 16 en las conchas ofrece una inequívoca indicación de que los animales vivían en aguas mucho menos saladas de lo usual. (La lluvia y la nieve de grandes latitudes son pobres en oxígeno 18 porque el agua "pesada" que lo contiene se condensa preferentemente en la atmósfera al enfriarse las masas de aire.)

La octava invasión de agua dulce procedió del lago Agassiz, aprisionado en la depresión topográfica producida por el peso de la masa de hielo en regresión. Inicialmente, el agua del lago inmenso vertía desde una

terrazza rocosa a la cuenca del río Mississippi y de allí al golfo de México. Hace unos 12.000 años, la retirada del frente de hielos abrió un canal hacia el este, desencadenando una caída del nivel del lago catastrófica. El agua liberada inundó el sur del Canadá hasta el valle ocupado hoy por el río San Lorenzo y desembocó directamente en la región donde ahora se forman las aguas profundas.

La vinculación de estos sucesos con los cambios climáticos locales no admite dudas. Cuatro de ellos acontecieron en épocas de cambios importantes en el clima de la cuenca del Atlántico Norte. Una de las capas de Heinrich señala el final del ciclo glacial que fue el segundo en duración

y otra la del ciclo más reciente. Una tercera capa parece coincidir con el comienzo de las condiciones glaciales del Atlántico Norte; por su lado, la invasión catastrófica de agua dulce procedente del lago Agassiz data del inicio del Joven Dryas. Cada uno de los cuatro pulsos restantes da fin a un subciclo climático. Gerard C. Bond, del Observatorio Terrestre Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, correlacionó las capas de Heinrich con el archivo del testigo de hielo de Groenlandia y halló que los episodios fríos de un milenio de duración aparecen en grupos caracterizados por olas de frío de intensidad creciente, culminando en un suceso de Heinrich tras el cual se observa un calenta-

miento considerable que inicia un nuevo ciclo.

Las variaciones climáticas del período del Joven Dryas dejaron su huella por doquier. ¿Podemos decir lo mismo de la quincena de episodios similares que le anteceden en el archivo del testigo de hielo? Aunque sólo tenemos dos pruebas que apuntan en esa dirección, ambas son sólidas. Jerome A. Chappellaz, del Laboratorio de Glaciología y Geofísica del Medio Ambiente de Grenoble, que analizó las burbujas de aire aprisionadas en los testigos de hielo de Groenlandia, descubrió que los períodos fríos iban acompañados de descensos en la concentración atmosférica de metano. Este gas se produ-



5. EL IMPACTO SOBRE EUROPA de una desorganización de la formación de aguas profundas traería consecuencias catastróficas. El verano de Dublin (arriba, izquierda) se pa-

recería al que hoy vive Spitzberg, en el Artico lejano, y el invierno de Londres (abajo, izquierda) recordaría los actuales fríos del siberiano Irkutsk.

ce en ciénagas y pantanos. Ahora bien, en la zona templada septentrional tales lugares estaban congelados o enterrados bajo el hielo durante las épocas glaciales; por consiguiente, el metano presente en la atmósfera debió de proceder de los trópicos. Las fluctuaciones en el archivo del metano revelan que los trópicos se secaban en los períodos fríos del norte.

La segunda prueba la recabaron James P. Kennet y Richard J. Behl, de la Universidad de California en Santa Bárbara, de un testigo de sedimento extraído de una profundidad de 500 metros bajo el nivel del mar en la cuenca de Santa Bárbara. Observaron bandas de sedimento sin perturbar en el que se distinguían capas anuales, alternando con secciones perturbadas por gusanos formadores de túneles. La presencia de tales organismos indica que el agua de fondo de aquella zona contenía una cantidad apreciable de oxígeno, suficiente para conservar la vida. Dichos períodos presentan una invariable correlación con épocas frías de Groenlandia, lo que implica que las variaciones experi-

mentadas en la circulación oceánica abarcaban el planeta.

Mayor sorpresa reviste el comprobar que los episodios de Heinrich pudieron tener también alcance mundial. El grupo de Eric Grimm, del Museo estatal de Illinois, observó en muestras de polen extraídas de los sedimentos del lago Tulane, en Florida, un máximo destacado en la relación de pino a roble estudiada para cada episodio de Heinrich. Los pinos prosperan en climas húmedos, mientras que los robles prefieren entornos más secos. Aunque la relación exacta entre los intervalos ricos en pinos y los sucesos de Heinrich está pendiente de una datación más exacta mediante radiocarbono, el archivo del lago Tulane respalda la tesis de un intervalo húmedo por ciclo. El grupo de George H. Denton, de la Universidad de Maine, descubrió una vinculación entre fenómenos más alejados: cada uno de los cuatro episodios de Heinrich que caía dentro del dominio de la datación por radiocarbono correspondía a un máximo realzado de la extensión de los glaciares andinos.

La observación de que la creación y destrucción masiva de los glaciares canadienses afectó al globo entero plantea una paradoja. De acuerdo con los modelos atmosféricos, los cambios de clima relacionados con variaciones de la cantidad de calor cedida a la atmósfera en el Atlántico Norte afectarían sólo a las regiones circundantes. Pero las pruebas recogidas demandan un mecanismo que generalice esos efectos a los trópicos, las regiones templadas meridionales e incluso la región antártica.

La distribución simétrica de esos cambios climáticos alrededor del ecuador apunta a los trópicos. Los cambios operados en la dinámica de la atmósfera tropical podrían producir efectos de vasto alcance. Las células convectivas de gran altura que se forman en la atmósfera tropical, donde se enfrentan los vientos alisios, alimentan la atmósfera con su gas de invernadero predominante: el vapor de agua. Pese a la levedad de la relación entre la circulación oceánica y la convección tropical, parece plausible que las variaciones en las carac-

terísticas de la circulación alterasen la cantidad de agua fría que aflora en superficie a lo largo del Pacífico ecuatorial. Este afloramiento es una parte importante del balance de calor de la región y, por tanto, de su clima general. La reducción de este afloramiento ecuatorial, como ahora sucede durante los episodios de El Niño, pueden producir sequías en unas regiones e inundaciones en otras.

Cambios globales

Tal supuesto viene apoyado no sólo por los datos de Chappellaz, que atestiguan la sequía en los trópicos, sino también la humedad en Nevada, Nuevo México, Texas, Florida y Virginia. La prueba más contundente proviene de la región de la Gran Cuenca del oeste de los EE.UU.: inmediatamente después del último episodio de Heinrich, hace 14.000 años, el lago Lahontan de Nevada alcanzó su máxima extensión, un orden de magnitud superior al actual residuo. El mantenimiento de semejante masa de agua requiere cantidades ingentes de precipitación, del orden de las que se dieron durante el episodio cumbre de El Niño en el invierno de 1982-1983. Podríamos, pues, imaginarnos aquellos sucesos anteriores a la manera de cambios en la configuración de la circulación oceánica que originaron episodios de El Niño de 1000 años de duración.

Los descubrimientos recientes de Lonnie G. Thompson, de la Universidad estatal de Ohio, refuerzan la idea de que el tiempo tropical difirió drásticamente durante los períodos glaciales. Los antiguos testigos de hielo de más de 6000 metros procedentes de los Andes tropicales contienen 200 veces más polvo fino que las muestras más modernas: polvo probablemente transportado por vientos que soplaban desde la Amazonia, árida entonces. El hielo más antiguo es también pobre en oxígeno 18, si lo comparamos con el hielo formado hace menos de 10.000 años, lo que implica una temperatura 10 grados inferior a la actual. Junto con la observación de que la línea de nieves andina llegaba 1000 metros más cerca del nivel del mar durante los períodos glaciales, esos datos indican que los trópicos de las eras glaciales resultaban al propio tiempo más fríos y secos.

La conclusión de que el sistema climático de la Tierra saltó en ocasiones de un modo de operación a otro es, pues, sólida como una roca. Deben los investigadores identificar las causas

de esos bruscos cambios. Aunque las reorganizaciones de la circulación oceánica en gran escala parecen el mecanismo verosímil, quizá podrían salir a la palestra mecanismos atmosféricos.

Un balance frágil

Tal situación nos deja a extramuros de la predicción climática. ¿Podría el actual aumento de la concentración de gases de invernadero instar otra reorganización de la cinta transportadora de aguas profundas y las situaciones meteorológicas de gran escala que de ella dependen? Por una parte, el archivo paleográfico indica que los saltos se dieron en épocas en que el Atlántico Norte estaba rodeado de enormes capas de hielo, circunstancia de la que ahora nos hallamos alejadísimos. Por otra parte, el impulso del invernadero promete ser mucho mayor que cualquier otro estímulo experimentado durante un intervalo interglacial, y no hay certeza de que el sistema permanezca encerrado en su modo actual, bastante benigno.

No hay razón para que se produzca ahora un paro de la cinta transportadora o un cambio radical de magnitud pareja. Pero si ello ocurriera, el impacto resultaría catastrófico. La probabilidad de un tal suceso será máxima de aquí a 50 o 150 años, cuando la población del planeta sufra la amenaza del hambre y las enfermedades, mientras se debate por conservar un entorno sujeto a una atosigante presión ambiental. Nos conviene tomar esta posibilidad en serio. No deberíamos ahorrar esfuerzo en el intento de comprender mejor el comportamiento caótico del sistema climático global.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

¿QUÉ MECANISMO GOBIERNA LOS CICLOS GLACIALES? Wallace S. Broecker y George H. Denton en *Investigación y Ciencia*, vol. 162, páginas 48-57; marzo, 1990.
EVIDENCE FOR GENERAL INSTABILITY OF PAST CLIMATE FROM A 250-KYR ICE-CORE RECORD. W. Dansgaard et al. en *Nature*, vol. 364, páginas 218-220, 15 de julio, 1993.
A LOW-ORDER MODEL OF THE HEINRICH EVENT CYCLE. D. R. MacAyeal en *Paleoceanography*, volumen 8, n.º 6, páginas 767-773; diciembre, 1993.
SYNCHRONOUS CHANGES IN ATMOSPHERE CH₄ AND GREENLAND CLIMATE BETWEEN 40 AND 8 KYR BP. J. Chappellaz, T. Blunier, D. Raynaud, J. M. Barnola, J. Schwander y B. Stauffer en *Nature*, volumen 366, páginas 443-445; 2 de diciembre, 1993.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

MATEMATICA Y FORMAS OPTIMAS

STEFAN HILDEBRANDT Y ANTHONY TROMBA



Un volumen de 22 · 23,5 cm y 206 páginas, profusamente ilustrado en negro y en color.

SUMARIO

- Formas y figuras
- El gran esquema del mundo
- El legado de la ciencia antigua
- Conexiones mínimas. Enlaces rápidos
- Es un milagro y no lo es
- Pompas de jabón
- Diseño óptimo
- Dinámica y movimiento



Prensa Científica, S. A.