

# El Artico eurasiático durante el último período glacial

Una vasta capa de hielo cubrió en tiempos el mar de Barents. Su brusca desaparición hace cien siglos proporciona una lección sobre la Antártida Occidental de hoy

Martín J. Siegert, Julian A. Dowdeswell, John-Inge Svendsen y Anders Elverhøi

Allá por el decenio de 1970, mucho antes de que el calentamiento global se hubiera convertido en una preocupación pública, un glaciólogo de la Universidad estatal de Ohio, John Mercer, propaló una inquietante semejanza. La geografía de la Antártida Occidental, explicaba, se parece muchísimo a la del Artico eurasiático. Ambas regiones polares poseen una gran plataforma continental de sólo algunos centenares de metros de espesor. La mayor diferencia es que una de esas plataformas, la de la Antártida Occidental, sigue cubierta por una capa de hielo de dos kilómetros y medio de espesor, mientras que en el Artico eurasiático abunda mucho menos el hielo posado sobre suelo. Según el razonamiento de Mercer,

si el calentamiento global continuara se correría un gran peligro de que la inmensa capa de hielo que cubre la Antártida Occidental se desintegrara y añadiera agua al océano como para elevar el nivel del mar seis metros. Se inundarían tierras costeras de todo el mundo.

Mercer comprendió que su comparación imponía una tarea: para calibrar si la capa de hielo de la Antártida Occidental corre verdadero riesgo de descomponerse, debían buscarse indicios en la otra punta de la Tierra, en los restos geológicos de las antiguas capas de hielo que cubrieron el norte de Eurasia. Muchos geólogos aplicaron sus diversas especializaciones a la investigación. Enseguida empezaron a sacar a luz la historia glacial del Artico eurasiático. Para mediados del de-

cenio de 1980, sin embargo, la interpretación de las observaciones geológicas variaba enormemente. Algunos veían pruebas de que en el momento más intenso de la última era glacial (el “Último máximo glacial”, o UMG), una inmensa capa de hielo de 3,5 kilómetros de espesor cubría la totalidad del norte de Europa y Siberia. Otros impugnaban esta apreciación; preferían creer que apenas hubo hielo alguno sobre el fondo del mar al norte de la tierra firme de Noruega y Rusia. La bibliografía da testimonio de la disputa entre estos dos puntos de vista contradictorios. El problema estribaba, en parte, en que cueste tanto descifrar el archivo geológico del Artico; la dificultad propicia las falsas interpretaciones. Otro obstáculo era la escasez de observaciones fidedignas de esa remota e inhóspita región.

Para resolver el dilema, la Fundación Europea de la Ciencia organizó, sin solución de continuidad, diversas campañas para la obtención de indicios geológicos en la vecindad de las antiguas capas de hielo del Artico eurasiático. Participaron más de 50 científicos de siete países europeos, entre ellos nosotros cuatro. El primero de los progra-

## Los autores

MARTIN J. SIEGERT, profesor del Centro de Glaciología de Bristol, estudia glaciología y ciencia del Cuaternario. JULIAN A. DOWDESWELL enseña geografía física y es miembro del Instituto Scott de Investigación Polar de la Universidad de Cambridge. JOHN-INGE SVENDSEN es profesor del departamento de geología de la Universidad de Bergen, Noruega. Dirige el proyecto, patrocinado por la Unión Europea, *Las capas de hielo y el clima en el Artico eurasiático durante el último máximo glacial*. ANDERS ELVERHØI, docente de geología cuaternaria, preside el departamento de geología de la Universidad de Oslo.  
© American Scientist Magazine.



mas, PONAM (de *POlar North Atlantic Margins*, Márgenes Polares del Atlántico Norte), se centró en la parte oeste del mar de Barents; el siguiente, QUEEN (*QUaternary Environments of the Eurasian North*, Entornos Cuaternarios del Norte Eurasiático), más al este, en el Arctico ruso. Estos trabajos proporcionaron una gran cantidad de información sobre las condiciones del norte de Eurasia en la Edad Glacial. Para captar toda la importancia de los resultados, hay que comprender, al menos en líneas generales, los procesos glaciológicos. Por ello nos detendremos un momento a repasar los rudimentos de la ciencia de los glaciares.

### Glaciología elemental

**P**ese a su solidez, el hielo se deforma, muy lentamente, cuando se le aplica una gran tensión, como la que le induce a una capa de hielo su propio, enorme peso. Esa deformación imparte a una porción de hielo del interior del glaciar un movimiento lento. Una parte del hielo de la superficie del glaciar queda enterrada por subsiguientes nevadas; se hunde entonces en el seno de la capa a una velocidad apreciable con respecto a la de la deformación. En conjunto, el hielo tiende a descender por el centro y a moverse hacia fuera por los lados.

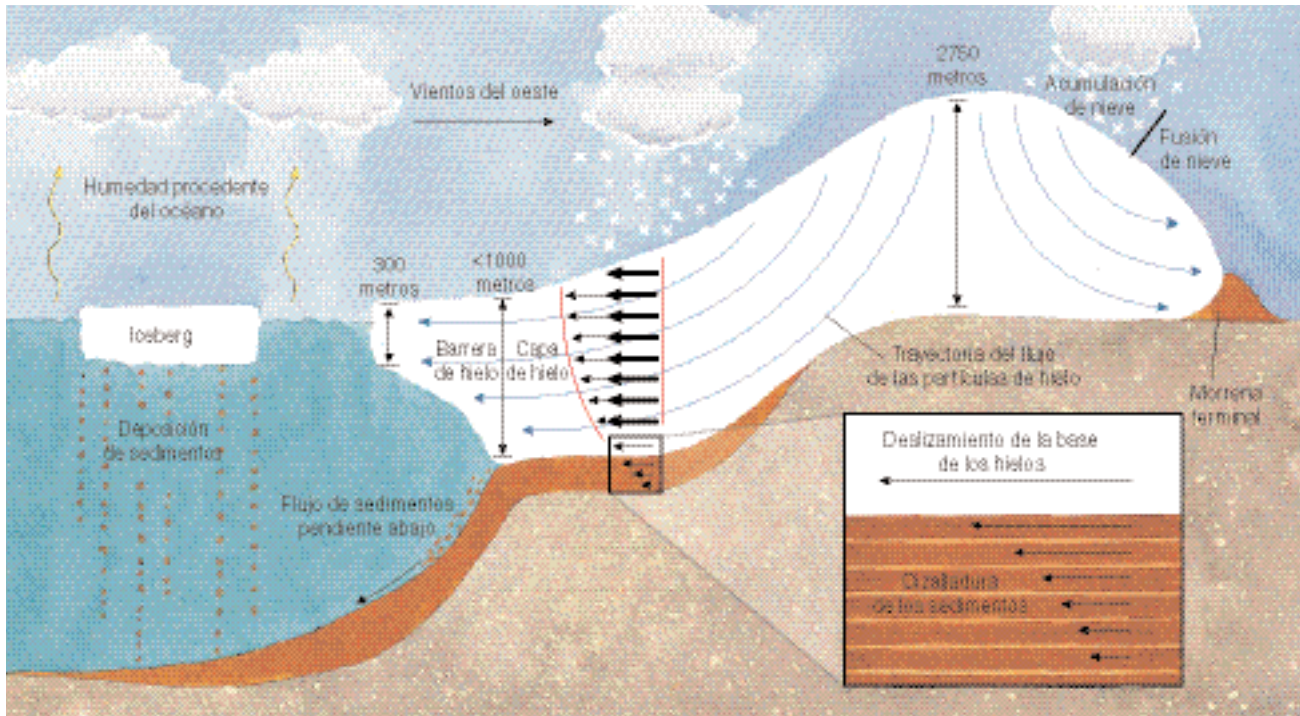


**1. BARRERAS DE HIELO FLOTANTE (arriba) rodean la gélida costa de la Antártida. Si el calentamiento global destruyese estos amortiguadores, la enorme capa de hielo marino, posada sobre suelo, de la Antártida Occidental quedaría directamente expuesta al mar. Su fusión se aceleraría; las costas de todo el mundo se inundarían. Los autores y sus colaboradores han examinado un episodio similar, sucedido en el hemisferio norte hace 15.000 años: la desaparición de la gran capa de hielo que en tiempos ocupó el mar de Barents. La comparación es apropiada porque la amplia plataforma continental de mar de Barents (azul claro, a la derecha) se asemeja a la configuración que la Antártida Occidental adquiriría si los hielos se fundieran allí (extremo derecho).**

Más en concreto, el flujo existente en el centro de una capa de hielo irradia desde la divisoria del hielo, el lugar donde no hay movimiento lateral en la superficie. A medida que el hielo se aleja de la divisoria, su velocidad lateral aumenta, desde un valor inicial de tal vez algunos metros por año. Más cerca de los márgenes, rápidos ríos de hielo —las “corrientes de hielo”—

“drenan” eficazmente las capas de hielo. Las corrientes de hielo fluyen a varios cientos de metros por año. Le deben esa rapidez a que el agua presente en la base reduce el rozamiento; el hielo desliza gracias a ella sobre el suelo subyacente. La deformación interna no aporta mucho a la velocidad total.

En términos generales, el hielo continúa fluyendo a una velocidad



**2. CORTE VERTICAL ESQUEMATICO** de la región del mar de Barents durante el apogeo de la última Edad del Hielo; se representa el flujo de hielo (*flechas azules*). Por el extremo derecho (que representa el límite meridional de la capa de hielo), la fusión tiene lugar a la misma velocidad a que se aporta hielo. Aquí, el material rocoso arrastrado por el hielo forma una morrena terminal. En el extremo izquierdo (que representa los límites septentrional y occidental de la capa de hielo) se forma una barrera de hielo

flotante. Ya en tierra, está la porción marina de la capa de hielo, la parte que descansa sobre roca bajo el nivel del mar. Aquí el hielo fluye con cierta rapidez porque el movimiento horizontal tiene dos componentes: la deformación interna (*flechas negras finas*) y el deslizamiento sobre la base (*flechas negras gruesas*). El deslizamiento puede ser considerable, lubricado por los sedimentos subyacentes, que se deforman para acomodarse al movimiento (*recuadro*).

cada vez mayor, hasta que acaba desapareciendo, sea en tierra (deteniéndose porque el hielo superficial se funda tan deprisa como se le reemplaza), sea en el mar. Cuando una capa de hielo fluye intacta hasta el océano y flota sobre él, forma una barrera de hielo, que pierde masa al desprenderse icebergs de sus bordes e irse fundiendo desde abajo.

Al fluir sobre la tierra, las capas de hielo la erosionan. Sus bases arrastran sedimentos. Transportan este material rocoso a grandes distancias antes de depositarlo por fin en sus márgenes. Por eso se ven delante de cada glaciar morrenas, sedimentos amontonados que recuerdan escombros. Una vez los glaciares y las capas de hielo se han fundido, quedan las morrenas, convertidas así en indicadores geológicos de la extensión del hielo en el distante pasado. Parecerá elemental reconstruir los límites de una antigua capa de hielo: basta con car-

tografiar la posición de las morrenas terminales. Pero no es tan sencillo; faltan en algunas zonas morrenas terminales, o se encuentran ahora bajo el nivel del mar. No es raro que varias morrenas de diferentes avances glaciares se mezclen desordenadamente y cueste distinguir la que importa.

### Criba de escombros

Tras diez años de esfuerzo concertado, los programas PONAM y QUEEN han recogido una gran cantidad de información geológica acerca de las antiguas capas de hielo que de tiempo en tiempo cubrieron vastas zonas del Artico Eurasiático. Nuestro trabajo proporcionó tres importantes descubrimientos. En primer lugar, documentó la formación de una gran capa de hielo de origen marino en la plataforma continental del mar de Barents durante el UMG, hará unos 20.000 años. En

esa época, la capa de hielo de Barents se unió con la escandinava; una cubierta continua de hielo iba de Alemania y el Reino Unido en el oeste hasta el mar de Kara en el este, pasando por Escandinavia y la barrera del mar de Barents. En segundo lugar, halló que hubo corrientes de hielo rápidas que transportaron grandes volúmenes de sedimento glacial al margen continental. En tercer lugar, demostró que la plataforma de hielo desapareció rápidamente al final de la Edad del Hielo. ¿Cómo llegamos a esas conclusiones y por qué son importantes?

Sabemos que el mar de Barents estuvo helado durante el pasado geológico reciente porque bajo el fondo hay unos pocos metros de fango blando. El sedimento que se encuentra bajo esta delgada capa de barro, muy comprimido por el enorme peso de la última capa de hielo, está plagado de restos de origen glacial. Abundan las capas de

sedimento de esa naturaleza (*tills*) a lo largo y ancho de la plataforma continental. En las partes centrales del mar de Barents, la capa de hielo también dejó tras sí una serie de largos surcos paralelos, que reflejan anteriores movimientos del hielo. Para evaluar las dimensiones y edad de aquella capa de hielo, emprendimos, como muchos compañeros nuestros, diversas investigaciones geológicas en la región del mar de Barents y a lo largo del margen septentrional del continente eurasiático.

Los estudios geológicos de campo se iniciaron en Svalbard, un grupo de islas situado 600 kilómetros al norte de la península escandinava. Las costas elevadas de este archipiélago y, más al este, de la Tierra de Francisco José nos indicaron que la parte norte del mar de Barents se hundió bajo el peso de una gran carga de hielo durante el UMG. Esas costas elevadas se forman cuando las olas rompen contra las playas y las excavan. Una vez fundido el hielo, la corteza sube y transforma las playas en terrazas elevadas. A lo largo de la costa occidental de Svalbard hay también playas así, con conchas y huesos de ballena que tienen, según la datación con radiocarbono, más de 40.000 años de antigüedad. Muchos creían que la presencia de material orgánico de esa edad probaba que los glaciares no podían haber alcanzado la costa una vez creadas las playas elevadas. Jan Mangerud, geólogo noruego de la Universidad de Bergen, logró entonces un nuevo e importante descubrimiento. Halló que al menos parte de las viejas playas elevadas había estado recubierta por hielo; quería decir que durante el UMG los glaciares recubrieron una porción de Svalbard mucho mayor de lo que se había imaginado.

Trabajos posteriores revelaron que los principales fiordos estuvieron cubiertos de hielo en aquella época y que la totalidad del archipiélago quedó debajo de una capa de hielo centrada en el fondo del mar, al este de Svalbard. Para establecer por dónde caía el borde occidental de la capa de hielo, muchos investigadores colaboraron en la determinación de las características sedimentarias del fondo marino a lo largo del margen continental del

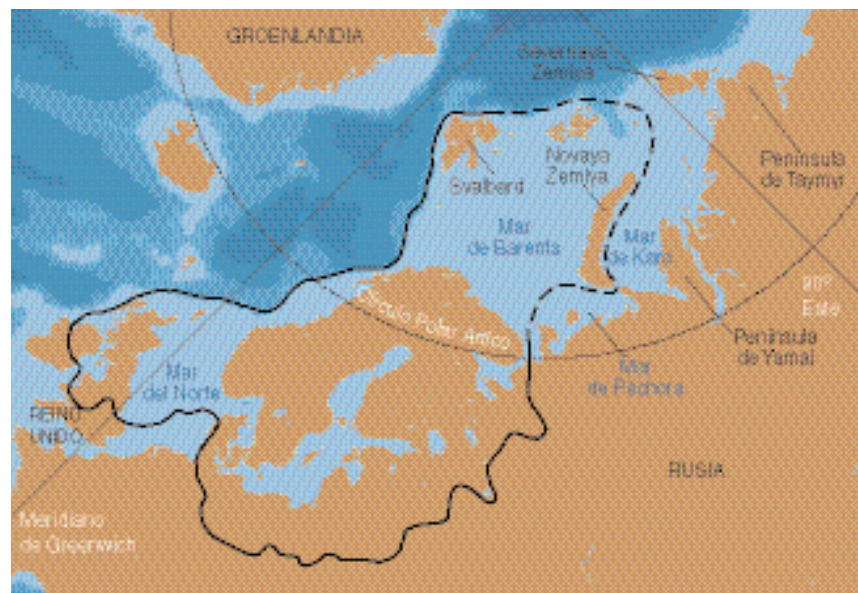
oeste de Eurasia. Se emplearon diversas clases de sondeos sísmicos y acústicos, y se efectuaron perforaciones en el sedimento para extraer testigos. Encontraron así grandes volúmenes de sedimentos glaciares, dispuestos a lo largo del talud continental en grandes complejos con forma de abanico. La capa superior de esos sedimentos se originó en la última glaciación extensa; sitúan, sin duda, el borde de la antigua capa de hielo en el margen de la plataforma. La gran cantidad de material transportado a esos abanicos demuestra que tuvo que haber corrientes rápidas de hielo activas a través de la parte occidental de la capa de hielo.

Más ha costado establecer los márgenes meridional y oriental de la antigua capa helada. A fines del decenio de 1970, Mikhail Grosswald, conocido geógrafo de la Academia Rusa de Ciencias en Moscú, presentó su hipótesis: una capa de hielo panártica de 3,5 kilómetros de espesor cubrió vastas regiones del Artico europeo y Siberia durante la UMG. Su hipótesis, puesta en duda por muchos científicos rusos, fue pronto aceptada por la mayoría de la comunidad científica occidental. Mientras tanto, Valery Astakhov, geólogo del Instituto Nacional de Métodos Geológicos de

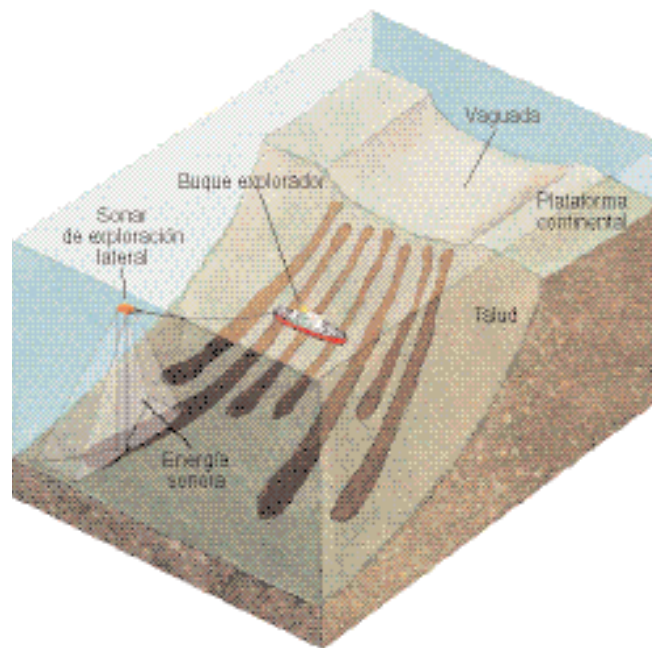
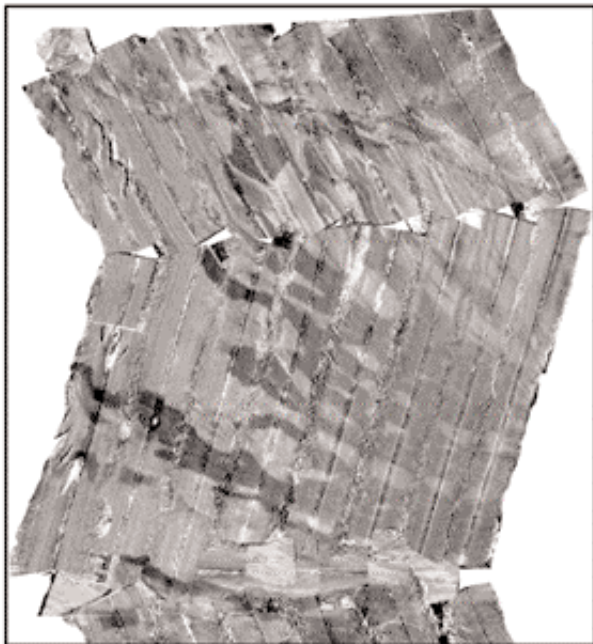
Exploración Remota, en San Petersburgo, excavaba en las heladas tierras de Siberia Occidental en busca de los escondidos restos de la última capa de hielo. Halló que una capa centrada en la barrera del mar de Kara avanzó hacia el sur a través del valle del río Yenissei, pero el episodio tuvo lugar mucho antes del UMG. Quedaba claro que algún error había en la hipótesis de Grosswald.

El programa QUEEN descubrió que un cinturón de morrenas que parecían recientes, en la parte europea del Artico ruso (al este del mar Blanco), en realidad se depositaron hace 60.000 años, unos 40.000 antes del UMG. Para situar el margen de los hielos del UMG fue preciso, por tanto, volver los ojos una vez más hacia el mar.

El examen de los sedimentos del fondo marino frente a la costa de la Rusia continental ha confirmado que la capa de hielo más reciente llegaba hasta la plataforma continental. Los testigos extraídos del mar de Péchora muestran que la sedimentación marina ha proseguido en esa región durante los últimos 40.000 años, mientras que en la zona acotada por el margen que se deduce tuvo la capa de hielo, los depósitos marinos más antiguos sobre la superficie del *till* tienen menos de 14.000 años. Las investigacio-



**3. LAS INVESTIGACIONES GEOLOGICAS** de los últimos años han precisado por dónde pasaba el margen de la capa de hielo (*línea continua*) durante el Último Máximo Glacial, hará unos 20.000 años. La parte discontinua de la línea indica dónde sigue siendo algo incierta la posición del antiguo límite.



**4. LAS EXPLORACIONES DEL FONDO MARINO** efectuadas con el sonar de barrido lateral revelan largas lenguas de sedimentos glaciares (*zonas oscuras, izquierda*). Estos depósitos se extienden desde el borde de la plataforma continental; descenden por el talud continental hacia las

profundidades marinas (*derecha*). La gran cantidad de sedimentos necesaria para formar estos característicos depósitos indica que deben haber sido transportados por una capa de hielos marinos que llegaron hasta el borde de la plataforma continental.

nes geológicas de la península de Yamal, que se proyecta hacia el mar de Kara, han mostrado que la capa de hielo tampoco alcanzó aquella región. Así, el límite meridional de la capa de hielo debió de encontrarse algo más al norte, en zonas poco profundas del mar de Kara.

La posición del borde oriental de la capa de hielo es igualmente difícil de determinar con precisión. Una vía consiste en estudiar los depósitos sedimentarios en los muchos lechos de lagos de la península de Taymyr, al este del mar de Kara. Están compuestos por fango de grano fino. Si hubiera existido una capa de hielo en la península, un material grueso, fácilmente discernible, de origen glacial, habría reemplazado o cubierto esos sedimentos. Sin embargo, las secuencias de sedimentos en esos lagos reflejan una acumulación continua de sedimentos no glaciales durante todo el UMG, lo que significa que las partes centrales de la península de Taymyr estaban libres de hielo al mismo tiempo que, al oeste, una capa de hielo se extendía por los mares de Barents y Kara.

Un grupo de geólogos dirigido por Christian Hort, de la Universidad de

Lund, en Suecia, llegó a la conclusión de que el borde noroeste de la península de Taymyr sí conoció hielos glaciares hace menos de 20.000 años. Cree, no obstante, que no se trataba de una extensión de la gran capa de hielo que cubría el mar de Kara. Es más probable que fuera parte de un glaciar de menor tamaño, posado sobre el fondo marino de cerca de la costa, poco profundo.

En Severnaya Zemlya, grupo de islas al norte de la península de Taymyr, se han descubierto colmillos de mamut de hará entre 25.000 y 19.000 años; parece, lo que resulta sorprendente, que los glaciares de este archipiélago fueron durante el UMG todavía menores de lo que se muestran hoy. Como se ve, sigue siendo bastante difícil trazar el borde oriental de la antigua capa de hielo.

### Causas primarias

Para conocer la historia glacial entera del Artico eurasiático durante la última edad de hielo, hay que tener en cuenta por qué surgen los períodos glaciales en general y cómo llenan un mar continental con hielo de más de un kilómetro de

espesor. El archivo geológico indica que se formaron y deshicieron repetidamente grandes capas de hielo en el Artico eurasiático, a causa de pronunciadas oscilaciones climáticas, a lo largo de los últimos 2.700.000 años. El anterior *intervalo interglacial* durante el cual el clima de la Tierra fue comparable con el actual duró desde hace 128.000 hasta hace 115.000 años. Fue seguido por una edad del hielo que terminó bruscamente hace 11.700 años. Durante esta edad de hielo tuvieron lugar hasta tres períodos de avance y retroceso glacial. La más reciente capa de hielo de la plataforma continental comenzó a formarse hará unos 30.000 años y alcanzó su máxima extensión unos 10.000 años después.

En una edad de hielo, volúmenes inmensos de agua pasan de los océanos a las capas de hielo polares; el nivel del mar desciende a veces hasta 120 metros. Aporta el registro más claro de esta vasta redistribución de agua el examen de los tres isótopos naturales del oxígeno ( $O^{16}$ ,  $O^{17}$  y  $O^{18}$ ) en diferentes materiales geológicos. ¿Por qué nos dicen tanto? El agua que contiene la forma más ligera del oxígeno ( $O^{16}$ ) se evapora

más deprisa que la compuesta por los isótopos más pesados ( $O^{17}$  y  $O^{18}$ ). El agua formada por "oxígeno ligero" va a parar sobre todo a las capas de hielo. En consecuencia, durante una edad de hielo el agua de los océanos se enriquece en oxígeno pesado. Así, por ejemplo, la concha de carbonato cálcico ( $CaCO_3$ ) que un organismo marino construya en una época glacial contendrá una proporción de oxígeno pesado superior al promedio. Cuando el organismo muere, la concha cae al fondo del mar y deja un testimonio del estado isotópico del océano en el pasado.

Los geólogos han acumulado muchos largos registros de las variaciones de los isótopos de oxígeno gracias al análisis de sedimentos sacados del fondo del océano profundo. Han medido también la composición isotópica del hielo que se ha acumulado en la Antártida. Las variaciones de los isótopos de oxígeno procedentes del hielo y de los sedimentos oceánicos arrojan unos resultados muy parecidos: los cambios climáticos asociados con las edades del hielo se repiten con frecuencias de unos 100.000, 40.000 y 20.000 años. ¿Por qué oscila el clima con esas tres frecuencias? La respuesta reside en la órbita de la Tierra alrededor del Sol.

El primer parámetro orbital a considerar es la *excentricidad*, o desviación de la perfecta forma circular. La órbita de la Tierra varía de una trayectoria elíptica a una circular con una frecuencia de 100.000 años, en números redondos. El segundo parámetro de interés es la inclinación del eje de la Tierra, que oscila entre 22,2 y 24,5 grados con

**5. LAS VARIACIONES de la composición isotópica del oxígeno en las conchas dan constancia de muchos cambios repetidos entre condiciones glaciales e interglaciales. Durante las épocas glaciales, el oxígeno 16 "ligero" queda secuestrado en el hielo polar; el agua oceánica (y las conchas que se forman de ella) se enriquecen en el oxígeno 18 "pesado". Las investigaciones geológicas en la Eurasia de la Edad del Hielo, desde la época del Último Máximo Glacial (UMG), se complican por las muchas glaciaciones, igualmente intensas, que se produjeron antes.**

una frecuencia de unos 40.000 años. El tercero es la posición de la Tierra en su órbita elíptica durante el verano del hemisferio norte; varía con una frecuencia de alrededor de 20.000 años. Esas oscilaciones afectan a la cantidad de radiación recibida en la superficie de la Tierra en varias épocas del año. Si los tres parámetros orbitales coinciden en reducir la radiación en el hemisferio norte en verano, los glaciares y las capas de hielo se expandirán y empezará una edad de hielo.

La relación entre las oscilaciones del clima observadas y las predicciones teóricas sobre sus períodos es excelente. Lástima que haya un pequeño problema: las variaciones en las cuantías de la energía solar asociadas con las variaciones orbitales son, con mucho, demasiado pequeñas para causar las variaciones climáticas requeridas para que se forme una capa de hielo. Se necesita un medio que amplifique ligeros efectos orbitales hasta convertirlos en drásticos cambios del clima. Hay varios posibles mecanismos de realimentación; es probable que todos contribuyan de algún modo al nacimiento y desaparición de las edades de hielo.

Tal vez el mecanismo más fácil de entender es la realimentación entre el hielo y el albedo. La reflectividad de la superficie terrestre (o albedo) controla la cantidad de radiación solar que se devuelve desde la Tierra al espacio. Si el albedo es alto, se refleja más radiación y la Tierra se enfría. Si el albedo es bajo, la superficie del planeta absorbe más radiación y el mundo se calienta. La nieve y el hielo son muy reflectores. Cuando los campos de nieve y las capas de hielo se extienden a causa de un enfriamiento global, el

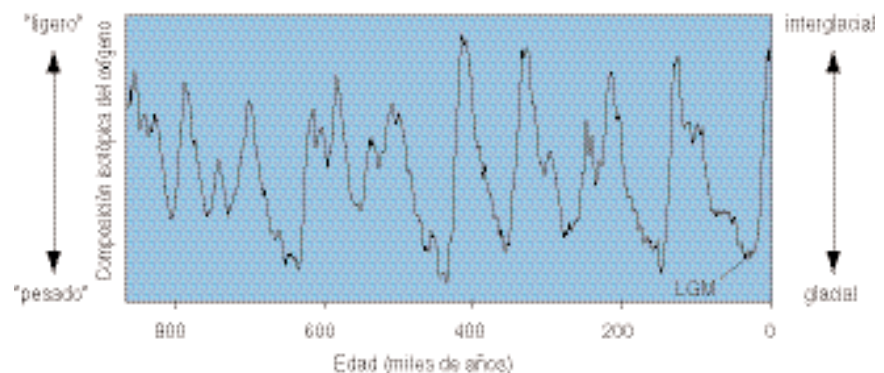
aumento del albedo de la superficie se traduce en un aumento de la reflexión de la radiación solar, lo que da por resultado un nuevo descenso de la temperatura del aire.

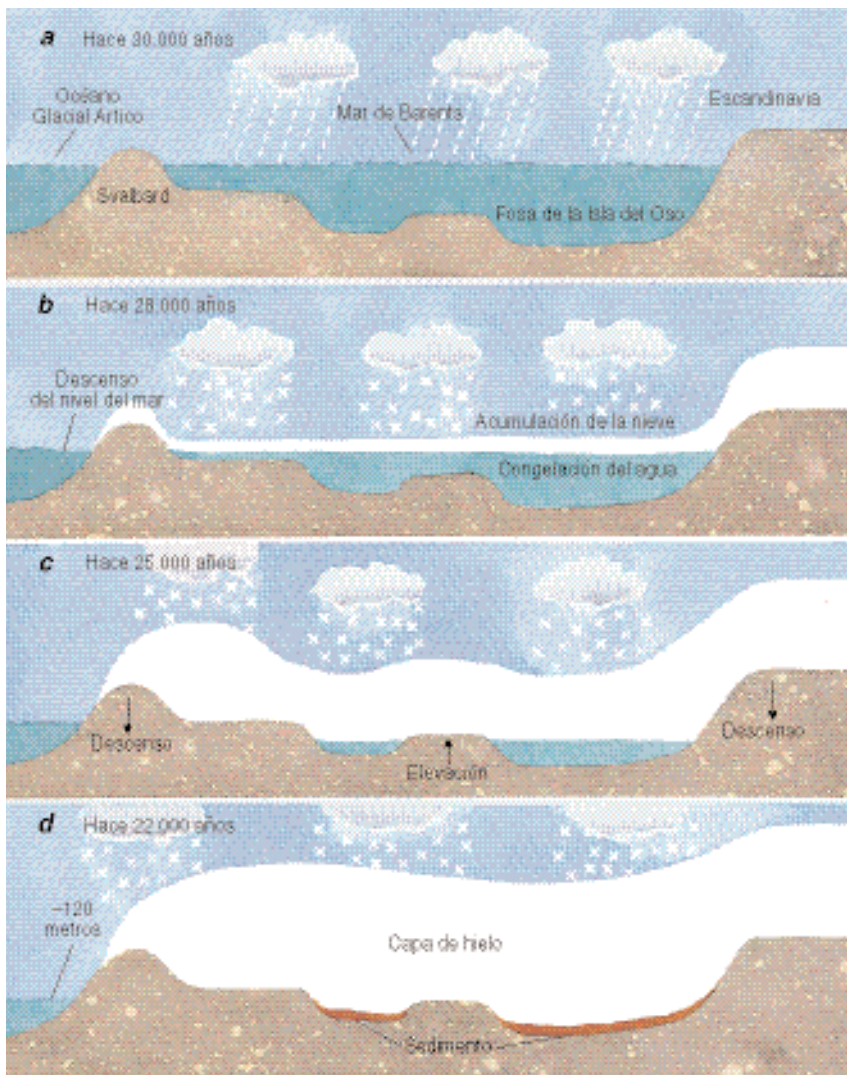
Otro mecanismo de realimentación depende del dióxido de carbono ( $CO_2$ ) atmosférico, que afecta al clima porque refuerza el efecto de invernadero. Por razones todavía no explicadas por completo, durante las épocas glaciales la concentración de  $CO_2$  atmosférico disminuye. Un enfriamiento que proviene de otras causas reduce, pues, el  $CO_2$ , lo que a su vez reduce el efecto de invernadero, dando por resultado un ulterior enfriamiento.

## La aparición de la capa de hielo

Con un conocimiento general de las variaciones orbitales y de los mecanismos de realimentación, no cuesta concebir cómo el empeoramiento del clima da por resultado la expansión de los hielos sobre tierra firme. No es tan fácil, sin embargo, comprender por qué el enfriamiento global hace que se forme una capa de hielo en el fondo del mar. Durante muchos años se ha debatido acerca de cómo una gran plataforma continental puede llegar a cubrirse con una capa de hielo. El principal problema es que el desprendimiento de grandes icebergs del borde de una masa de hielo que toca fondo se intensifica con la profundidad del agua. Así, cuando el borde de una capa de hielo se desplaza a aguas más profundas, la frecuencia con que se desprenden icebergs aumenta. Parece que este proceso impediría ulteriores expansiones de la capa de hielo.

Según Terence Hughes, de la Universidad de Maine, pudo generarse





**6. MODELO CONCEPTUAL** que muestra el origen de la capa de hielo marino en la región del mar de Barents, una vez hubo pasado de ser mar abierto (a) a que lo cubrieran hielos perennes (b). La pesada acumulación de nieve y hielo en las islas del norte (*izquierda*) y sobre el continente (*derecha*) forzó la corteza terrestre hacia abajo en esas zonas; el fondo del mar se elevó entre ellas al mismo tiempo que el nivel del mar iba descendiendo (c). Esos procesos continuaron hasta que la masa de hielo, cada vez más gruesa, descansó directamente sobre el fondo del mar, donde dejó depósitos de sedimentos húmedos en las depresiones topográficas locales (d).

una capa de hielo posada en el fondo de la cuenca del mar de Barents a partir de una barrera —una masa sólida de hielo que flota en la superficie— preexistente. El hielo marino permanente (de unos metros de espesor) quizás aumentara hasta formar una capa de hielo que tocara fondo (con algunos cientos de metros de espesor) si la acumulación de hielo en la superficie fue durante algunos miles de años más veloz que la fusión de la base. Una plataforma de hielo en el mar de

Barents habría favorecido el desarrollo de una capa que tocara fondo por dos motivos. En primer lugar, el desprendimiento de icebergs en una capa de hielo adyacente cesaría: el hielo fluiría, sin más, hacia la barrera de hielo. En segundo lugar, ésta se iría haciendo más gruesa, hasta tocar el fondo del mar, momento en que se convertiría en parte de la propia capa de hielo posada en el fondo.

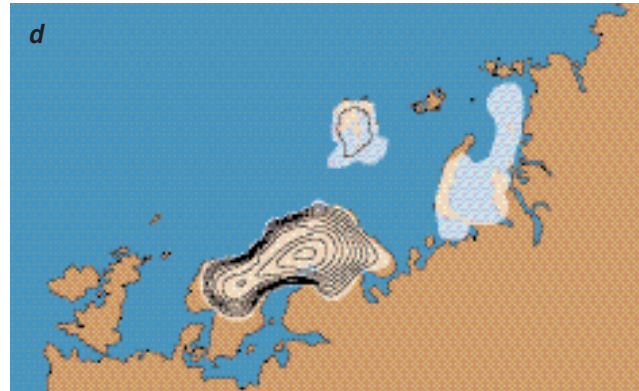
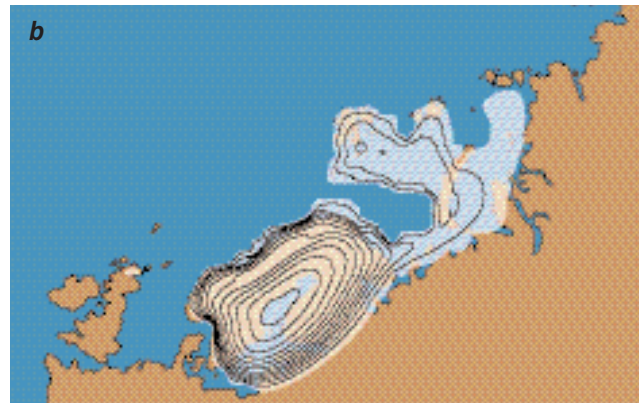
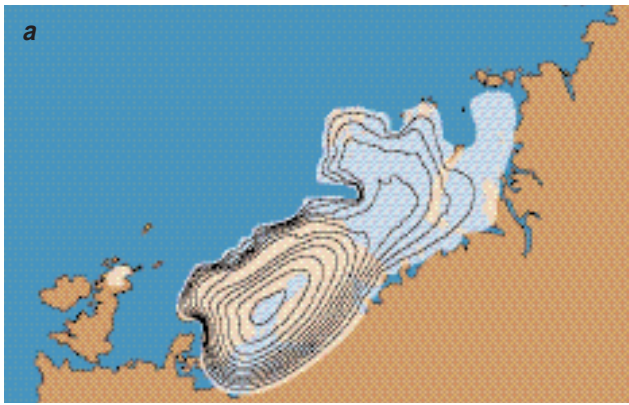
Otro mecanismo puede también haber intervenido en la constitución

de una capa de hielo dentro del mar de Barents. Varios científicos han apuntado que el hielo se acumuló en un principio sobre los archipiélagos situados a lo largo del borde norte de la plataforma continental eurasiática. Su enorme peso hundió la corteza subyacente; a consecuencia de ello, se levantó la de las regiones centrales, poco profundas, del mar de Barents (de la misma manera que una fuerza aplicada hacia abajo en el centro de una barra de acero la flexiona hacia arriba en cada extremo). Con este movimiento hacia arriba, combinado con el descenso del nivel del mar (de hasta 120 metros), al hielo quizá le fuera posible colmar los bajíos. Debió de llegar hasta allí desde capas de hielos contiguas, o se formó *in situ* al espesarse el hielo marino.

Ambos procesos pudieron actuar durante la última edad de hielo. Además, indicios procedentes de las cercanas aguas de Noruega y Groenlandia muestran que allí reinaron durante la última edad del hielo condiciones de mar abierto. Esas aguas oceánicas, tibias en comparación, proporcionaron una considerable fuente de humedad a las nevadas sobre el mar de Barents. La influencia combinada de mayores nevadas, la elevación de la corteza y el aumento de espesor de las barreras de hielo debió de conducir a la rápida congelación del mar de Barents. Los geólogos han de preguntarse no tanto cómo nacieron esos hielos, sino por qué desaparecieron.

Contamos con diversas indicaciones acerca de la destrucción de la capa de hielo que en tiempos cubrió esa porción del Ártico eurasiático. Según el contenido de isótopos de oxígeno de las pequeñas conchas presentes en los sedimentos del fondo del mar en el cercano estrecho de Fram y en el talud continental, abundó el oxígeno “ligero” en el agua hace 16.000 años. En este caso, los isótopos de oxígeno no reflejan el estado general del océano global. Más bien señalan una masiva entrada de agua procedente de la fusión de hielos en la región, señal a su vez de la desintegración de las masas de hielo sobre el mar de Barents al principio de la última deglaciación.

Hemos cartografiado también —al igual que otros investigadores— las



**7. LAS SIMULACIONES NUMERICAS** enseñan cómo debió de reducirse la capa de hielo del mar de Barents desde un espesor máximo de unos 2750 metros, que persistió hasta hace unos 14.000 años (a). Hará 13.000 años, gran parte de la región entre Escandinavia y Novaya Zemlya estaba libre de hielo que tocase fondo (b). Hace 12.000 años, el hielo que

cubría Svalbard se separó de la capa que todavía cubría Escandinavia y el Artico ruso (c). Hace 11.000 años, el hielo en la región había adelgazado todavía más y estaba ya partido en tres masas separadas (d). (Los colores claros señalan dónde tenía la capa de hielo al menos 50 metros de espesor. Las curvas de nivel se dan a intervalos de 250 metros.)

morrenas abandonadas por la retirada del frente de hielo en el fondo del mar de Barents; utilizamos barcos equipados con sonar y tomas sísmicas de imágenes. Los datos indican que la capa de hielo empezó a romperse donde más profundo era el fondo en que se asentaba. Hace 14.000 años, desapareció el hielo de la fosa de la Isla del Oso y de varias depresiones locales menores; quedaron así despejadas zonas de océano, a las que rodeaban murallas de hielo que se iban desmoronando. Hace 12.000 años la desintegración de las capas había progresado: a esas alturas no existían más que en los archipiélagos septentrionales y en los mares poco profundos que los rodeaban.

La pauta de la desintegración del hielo dentro del mar de Barents quedó registrada también en el levantamiento alrededor de Svalbard y la Tierra de Francisco José. Las playas elevadas en esas islas se han datado mediante

la aplicación de la técnica del radiocarbono a huesos de ballena, conchas de moluscos y trozos de maderas arrojados por la marea. Las fechas indican que el deshielo de los archipiélagos tuvo lugar varios miles de años después de que desapareciese el hielo en las regiones más profundas del mar de Barents.

### Simulación numérica

En un esfuerzo por reconstruir de forma más completa la historia de esta antigua capa de hielo, hemos llevado a cabo varias simulaciones numéricas de su desaparición. Para ello la subdividimos en cierto número de “columnas de hielo”. Cada una representa una “celda” dentro de una retícula bidimensional. Los modelos de las capas de hielo suelen ejecutarse mediante un bucle de cálculo. Arranca con una serie de algoritmos que determinan en cada celda el flujo de hielo, el

balance de masas y la interacción con la Tierra, y se completa mediante la aplicación a la retícula completa de una ecuación final (la ecuación de continuidad) que calcula el flujo de hielo entre celdas. Para simular la historia glacial, se deben especificar el nivel del mar, la temperatura del aire y la nieve caída en función del tiempo. Al obligar al modelo a formar una capa de hielo compatible con las observaciones geológicas, podemos juzgar las causas del crecimiento y desintegración de las capas de hielo.

Tanto el programa PONAM como el QUEEN recurrieron a las simulaciones de la capa de hielo para obtener detalles cuantitativos del tamaño y dinámica de la antigua capa de hielo. Ajustamos los parámetros ambientales que introducíamos en el modelo hasta lograr que el tamaño del hielo coincidiese con el borde de los hielos determinado por los datos geológicos. El modelo pro-

porcionó así información sobre el tamaño, espesor y velocidad de flujo de la primitiva capa de hielo.

Una vez simulamos la capa de hielo en el momento de su máximo tamaño, teníamos que lograr que se desintegrara de una manera coherente con los datos geológicos del deshielo real. Para imitar el deshielo en nuestros ordenadores, tuvimos que incrementar bastante en el modelo la frecuencia de desprendimiento de icebergs.

¿Por qué se desintegró tan rápidamente la capa de hielo real? Las simulaciones mueven a pensar que la respuesta estriba en el mecanismo de producción de icebergs. Cuando el mundo entró en la primera fase de deshielo, el nivel del mar aumentó, aunque gradualmente. El ascenso del nivel del mar produjo dos efectos sobre la capa de hielo marino que cubría el mar de Barents. En primer lugar, la profundidad de agua aumentó, dando lugar a una mayor frecuencia de desprendimiento de icebergs (si se supone que la capa de hielo descansaba en el fondo del mar). En segundo lugar, el peso efectivo de la capa de hielo se redujo, lo que llevó consigo una disminución del rozamiento de la base, mayores velocidades de los hielos y, en consecuencia, un intercambio de masa más rápido desde el interior de la capa de hielo hasta los bordes, donde se desprenden los témpanos. Estos efectos produjeron una realimentación positiva mediante la cual la desintegración de la capa de hielo, aquí y en otros lugares, condujo a una subida del nivel del mar, que a su vez condujo a mayores desprendimientos de icebergs. Así, es probable que una variación más bien pequeña del nivel del mar a principios del último deshielo desencadenase la desintegración de la capa de hielo eurasiática.

## La Antártida Occidental

**D**urante el último período glacial, la capa de hielo de la Antártida Occidental era bastante mayor de lo que es hoy. Toda la plataforma continental debía de estar cubierta por hielo asentado en el fondo, como en el mar de Barents. Sin embargo, la desintegración de esta capa de hielo ampliada de la Antártida Oc-

cidental debió de diferir de la del hielo del mar de Barents en dos aspectos. Por un lado, el deshielo antártico comenzó mucho más tarde que en el mar de Barents. Además, dio lugar a la formación de grandes barreras de hielo que flotaban entre el mar abierto y la capa de hielo asentado en el fondo. Las barreras de hielo de Filchner-Ronne y de Ross, por ejemplo, tienen ahora, cada una, un área de alrededor de 500.000 kilómetros cuadrados.

Estas diferencias sugieren dos importantes conclusiones sobre la estabilidad de la plataforma de hielo de la Antártida Occidental. En primer lugar, las barreras de hielo afectan al mantenimiento de la estabilidad de la capa de hielo; actúan como contrafuertes que soportan el borde que toca suelo de la capa de hielo. Al faltar las barreras en el mar de Barents, ese borde desprendía a buen ritmo icebergs. En segundo lugar, una vez se tiene en cuenta que las barreras hacen de contrafuertes de las capas de hielo, las actuales variaciones del nivel del mar no son de tal magnitud que fomenten la desintegración del hielo en la Antártida Occidental hasta el extremo que se observó en el mar de Barents. Una nota tranquilizadora relacionada con esta última conclusión: durante el último período interglacial, el nivel del mar fue varios metros más alto que en la actualidad; a pesar de ello, la capa de hielo de la Antártida Occidental no desapareció. La mayor parte del agua que elevó por entonces el nivel del mar provino seguramente de Groenlandia.

No cabe duda de que la capa de hielo de la Antártida Occidental resiste considerables subidas del nivel del mar, pero ¿por qué? Muy bien pudiera ser porque las plata-

formas de hielos flotantes de la Antártida Occidental contribuyen a que el hielo que toca suelo no acabe vertiéndose en el mar abierto. Si es cierto, debería preocuparnos la estabilidad de las barreras de hielo en la Antártida Occidental. Su desintegración no elevaría por sí misma el nivel del mar (de igual manera que un cubo de hielo no eleva cuando se derrite el nivel del agua en el vaso). Pero si se funden, la capa de hielo de la Antártida Occidental se parecerá mucho más a la antigua capa de hielo eurasiática, tal y como era inmediatamente antes de desaparecer.

¿Qué podría causar la destrucción de las barreras de hielo? La respuesta se halla en el océano. La fusión desde el fondo constituye gran parte de la masa perdida por las barreras. Si el océano se calienta, la velocidad de fusión aumentará. Si esto no quedara compensado por el aumento de la evaporación y de las nevadas que acompañaría al calentamiento del océano Glacial Antártico, las barreras de hielo adelgazarían hasta la extinción. La capa de hielo de la Antártida Occidental estaría entonces a punto de desaparecer a su vez rápidamente. No debería ignorarse esta posibilidad, ni el consiguiente aumento global del nivel del mar.

Mercer llamó a la presente situación "amenaza de desastre". El conocimiento de la historia glacial de la capa de hielo eurasiática sugiere que la amenaza no será crítica a menos que se diluyan las barreras de hielo actuales. No obstante, la investigación muestra con toda claridad que tal desastre tuvo lugar en el otro hemisferio en un pasado no tan distante. El mundo debe estar en guardia, por si se repitiese en el futuro.

## Bibliografía complementaria

- LATE WEICHSELIAN GLACIATION OF THE EURASIAN HIGH ARCTIC. M. J. Siegert, J. A. Dowdeswell y M. Melles, en *Quaternary Research*, vol. 52, págs. 273-285; 1999.
- NUMERICAL MODELLING OF GLACIAL ISOSTASY AND ICE SHEET GROWTH WITHIN THE LATE WEICHSELIAN BARENTS SEA. D. Howell, M. J. Siegert y J. A. Dowdeswell, en *Journal of Quaternary Science*, vol. 15, págs. 475-486; 2000.
- NEW CONSTRAINTS ON THE LIMITS OF THE BARENTS-KARA ICE SHEET DURING THE LAST GLACIAL MAXIMUM BASED ON BOREHOLE STRATIGRAPHY FROM THE PECHORA SEA. L. Polyak, V. Gataullin, O. Okuneva y V. Stelle, en *Geology*, vol. 28, págs. 611-614; 2000.