

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS REGIONES POLARES Y EN LOS GLACIARES

Climate change impacts in Polar regions and glaciers

Jerónimo López-Martínez (*)

RESUMEN

Las regiones polares son destacados componentes del sistema terrestre e intervienen de forma muy relevante en el contexto actual de calentamiento global. Tanto las zonas polares como los glaciares de montaña son especialmente sensibles al aumento de las temperaturas. Las zonas de la Tierra que se han calentado en mayor grado en los últimos cincuenta años son regiones polares. Los cambios que se están produciendo en estas regiones tienen importantes repercusiones locales y globales.

En este trabajo se comentan los impactos del cambio climático actual en las regiones polares y en los glaciares, así como las implicaciones en conexión con el aumento de las temperaturas, las corrientes marinas, la fusión glaciaria, las aguas subglaciares, el mar helado, el agujero de ozono, el permafrost y el nivel del mar. La situación de los polos ante el cambio climático permite un acercamiento interdisciplinar que resulta interesante dentro de la enseñanza de las Ciencias de la Tierra en diferentes niveles educativos.

ABSTRACT

The Polar regions are important components of the Earth System and they have a key role in the context of the current global warming. Polar territories and mountain glaciers are especially sensitive to temperature increasing. They are Polar the areas that have increased more the temperature in the last 50 years. The changes that are taking place in the Polar regions have important local and global consequences.

In this paper, the impacts of the climate change in Polar regions and glaciers are discussed, as well as the connection to temperature increasing, marine currents, glacial melting, subglacial waters, sea-ice, ozone hole, permafrost and sea level. The connection of the poles with the climate change allows an interdisciplinary approach that can be interesting for Earth Sciences teaching at different education levels.

Palabras clave: Cambio Climático, Regiones Polares, Glaciaria, Antártida, Ártico.

Keywords: Climate Change, Polar Regions, Glacier, Antarctic, Arctic.

INTRODUCCIÓN

Las regiones polares y el hielo intervienen de un modo especialmente relevante en los cambios climáticos. Por un lado lo hacen contribuyendo a generar variaciones del clima y, por otra parte, son destacados escenarios de las consecuencias provocadas por los cambios climáticos. Además, las regiones polares proporcionan registros extraordinariamente valiosos de las condiciones ambientales del pasado, cuyo conocimiento ayuda a contextualizar el cambio climático actual y a elaborar modelos predictivos sobre futuros cambios y sus consecuencias.

En dichas regiones se encuentra la inmensa mayoría del hielo que hay en la Tierra. Aproximadamente el 91 % en la Antártida y aproximadamente el 7,5 % en el Ártico, la mayor parte del mismo en Groenlandia. El resto del hielo se encuentra en los glaciares de montaña.

Allí donde hay hielo los efectos del calentamiento se ven amplificadas. De hecho así está ocurriendo en el contexto actual de calentamiento glo-

bal. El conjunto del planeta se ha calentado: unos 0,8° C en el último siglo y aproximadamente 0,5°C en los últimos cincuenta años. Sin embargo, las zonas del mundo que más lo han hecho en los últimos años son regiones polares. Se trata del Ártico canadiense y Alaska, un sector de Siberia y la Península Antártica. En parte de estas zonas el calentamiento ha llegado a superar los 2,5°C en los últimos cincuenta años.

Un importante efecto de la presencia de hielo sobre la superficie de la Tierra es su contribución a la reflexión de energía solar recibida, el albedo (Fig. 1). Por su posición en el globo terrestre, las regiones polares reciben una gran cantidad de radiación solar en verano, mientras que permanecen en oscuridad la mayor parte del periodo invernal. Esto hace que los máximos de cantidad mensual de insolación que se dan en la Tierra a cierta altitud en la atmósfera no se sitúan en los trópicos, sino en las regiones polares. Así, en la parte alta de la atmósfera sobre el Polo Norte el máximo de radiación se recibe en junio y alcanza unos 520 vatios por metro

(*) Departamento de Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid. jeronimo.lopez@uam.es



Fig. 1. La nieve y el hielo sobre las rocas y en el mar aumentan la reflexión de la energía solar y contribuyen al enfriamiento. Foto J. López-Martínez.

cuadrado, mientras que el máximo de insolación sobre el Ecuador, que es en marzo, llega a 439 W/m².

Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de insolación que reciben en verano, los polos no se calientan como las zonas tropicales. Un importante motivo para ello es la reflexión de la radiación solar de nuevo al espacio que producen los glaciares, la cubierta de nieve y el mar helado. De este modo la Antártida y en el hemisferio norte sobre todo Groenlandia y el mar helado, ayudan a mantener frío el clima en las zonas polares. La disminución de la cubierta helada e incluso de la nieve superficial, que al fundirse deja al descubierto superficies rocosas o hielo más oscuro, contribuyen a aumentar la absorción de radiación y por lo tanto a un mayor calentamiento.

El papel de los polos en los cambios globales y las consecuencias que el calentamiento global está teniendo en esas regiones permiten un acercamiento interdisciplinar al tema dentro de la enseñanza de las Ciencias de la Tierra en diferentes niveles educativos. Los datos actualizados que se incluyen en este trabajo pueden ser útiles para ese fin.

TEMPERATURAS

Desde hace tiempo se ha constatado el notable calentamiento ocurrido en la Península Antártica en los últimos años. Tanto que esta zona es la que mayor calentamiento ha experimentado de todo el hemisferio sur en los últimos cincuenta años. Además del calentamiento de la Península Antártica las mediciones efectuadas en las estaciones sobre el terreno que poseen registros de los últimos 50 años, indicaban que el resto del continente antártico se había enfriado en ese mismo periodo de tiempo. Ello lo convertía en una excepción en la Tierra, ya que todos los demás continentes habían experimentado un aumento de las temperaturas.

Sin embargo, un trabajo publicado en enero de 2009 (Steig *et al.*, 2009) ha puesto de manifiesto que en conjunto las temperaturas superficiales han aumentado en todo el continente antártico en el periodo comprendido entre 1957 y 2006. Este resultado proviene de un tratamiento conjunto de los registros históricos de las estaciones meteorológicas en tierra

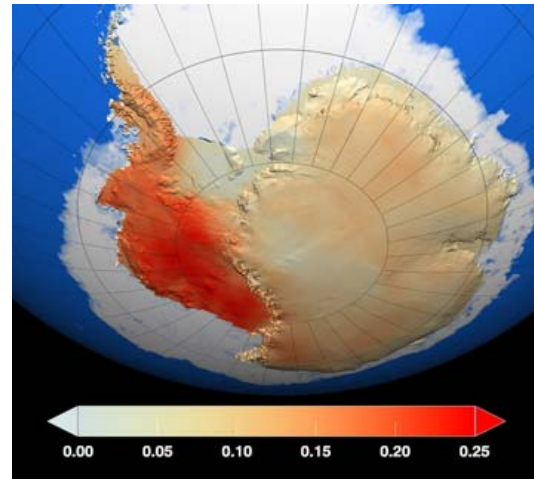


Fig. 2. Calentamiento de la Antártida en el periodo 1957-2006. La escala indica variación de la temperatura en grados centígrados por década. Imagen procedente de la NASA (2009).

y de las observaciones desde satélites. Existen ciertos sectores de la Antártida oriental que se han enfriado en las últimas décadas, pero a pesar de ello, considerando el conjunto del continente, el resultado es de calentamiento en los 50 años indicados. Si se considera toda la Antártida, el calentamiento ha sido de algo más de 0.5 °C en esos cincuenta años, aunque el aumento de la temperatura ha sido considerablemente mayor en la Antártida Occidental, un sector más amplio que la Península Antártica (Fig. 2).

CORRIENTES MARINAS

Las altas latitudes tienen un papel fundamental en la circulación oceánica global. La circulación termohalina tiene en ambos polos los principales motores que regulan el movimiento de las masas de agua a través del globo (Fig. 3).

Pero la circulación oceánica es compleja, se producen movimientos de masas de agua a distintas profundidades y existen múltiples aspectos aun no del todo conocidos. La *Warm North Atlantic Deep Water* se mueve hacia el sur desde cerca de Groen-

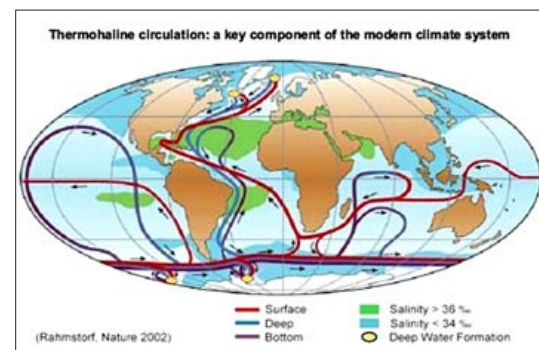


Fig. 3. Esquema de la circulación termohalina. Se aprecia el importante papel de las zonas polares. Según Rahmstorf (2002).

landia, a una profundidad de 2000-3000 m, mientras que hay un flujo hacia el norte de la fría *Subantarctic Mode Water*, cercana a la superficie, la *Antarctic Intermediate Water*, más abajo, y la *Antarctic Bottom Water*. Los mencionados son importantes componentes del llamado cinturón de la Circulación Termohalina, que mantiene al océano oxigenado y regula la temperatura terrestre. Para conocer cómo funciona globalmente la circulación termohalina es necesario comprender los procesos oceanográficos que tienen lugar en los mares alrededor del continente antártico.

Parece que los fenómenos de El Niño en la zona tropical del océano Pacífico se corresponden con condiciones relativamente frías y secas en la Península Antártica y con condiciones más templadas y mayores precipitaciones en la región costera meridional del mar de Amundsen, en la Antártida Occidental. Está habiendo rápido calentamiento en la estación invernal en el sector occidental de la Península Antártica, donde las temperaturas están aumentando más que en ningún otro lugar del hemisferio sur. Así todo, sigue siendo necesario conocer más detalles que ayuden a entender las razones de los procesos mencionados.

BALANCE DE MASAS Y RETROCESO GLACIAR

La pérdida de nieve y de hielo glaciar por fusión son una consecuencia directa del calentamiento. Se suele hablar de retroceso glaciar, pero ese, el retraimiento de los frentes del hielo en sus márgenes, no es el único efecto que se produce, también hay disminución de grosor del hielo y, en definitiva una pérdida de volumen. De hecho, aunque no es frecuente, pueden darse situaciones en las que habiendo una pérdida de volumen de hielo se produzca un avance de ciertos frentes.

Las consecuencias del calentamiento se dejan sentir de manera más drástica en las masas de hielo de pequeño tamaño que en los grandes casquetes polares, cuya inercia es mayor. De este modo, los glaciares de montaña están sufriendo los efectos del calentamiento global y, en general, experimentando importantes retrocesos.

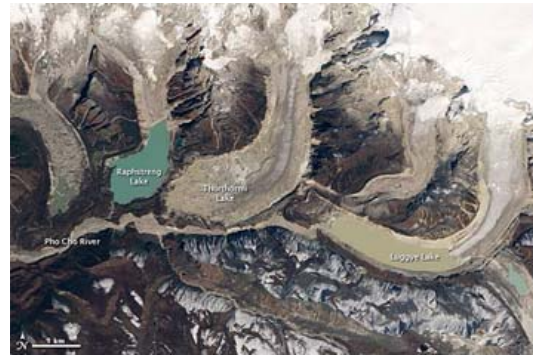


Fig. 4. El retroceso glaciar en el Himalaya está dando lugar a la formación de lagos, cuyo desbordamiento ocasiona crecidas aguas abajo. En esta imagen de 2009, del Himalaya de Buthan, se aprecia el retroceso de las lenguas glaciares, varios lagos y las señales dejadas por el desbordamiento de uno de ellos. Imagen de procedente de la NASA.

La actual reducción del hielo en las cordilleras, si bien tiene moderados efectos en los balances globales y en las variaciones del nivel del mar, si tiene importantes consecuencias locales y en el entorno de las montañas. Los glaciares de montaña juegan un importante papel en los ecosistemas asociados así como para las poblaciones que viven aguas abajo, las cuales padecen las consecuencias de su retroceso o desaparición.

En las montañas del Himalaya y del Karakorum están produciéndose considerables retrocesos de los frentes glaciares. En muchos casos se originan lagos gracias al represamiento de las aguas de fusión por las morrenas (Fig. 4). La rotura de los diques produce avenidas capaces de originar catástrofes aguas abajo. Los glaciares de estas cordilleras son fuente de alimentación de importantes ríos que afectan a la vida de muchos millones de personas. De progresar las condiciones actuales, se pueden producir desbordamientos seguidos de periodos de sequía al faltar la alimentación glaciar.

En los Andes el retroceso glaciar es muy notable y también allí la desaparición de glaciares tiene importantes consecuencias para las poblaciones que viven al pie de la cordillera (Fig. 5).

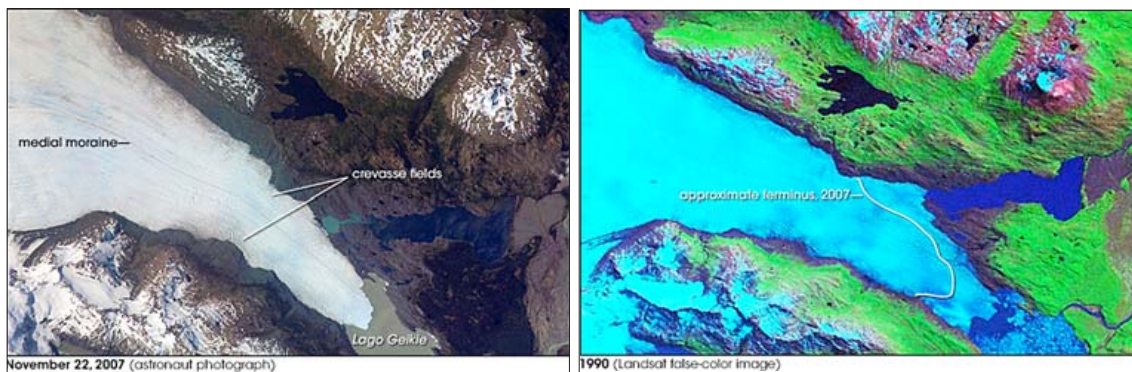


Fig. 5. Retroceso glaciar entre 1990 y 2007 del glaciar Tyndall, en el macizo de las Torres del Payne, Andes patagónicos. Imagen procedente de la NASA.

En la Península Ibérica en la actualidad solo existen glaciares en los Pirineos y estos, que son especialmente frágiles por su situación geográfica y por su pequeño tamaño, están experimentando una notable reducción en los últimos años. La superficie total de hielo en la veintena de glaciares pirenaicos supone en la actualidad algo menos de 500 hectáreas de superficie. Solo en el lado español de esta cadena, la superficie de hielo es hoy aproximadamente la sexta parte de la que había a finales del siglo XIX.

Se ha detectado que en la actualidad numerosos glaciares en los márgenes de los casquetes de hielo de Groenlandia y de la Antártida están acelerando notablemente su flujo. La pérdida de hielo por la aceleración del flujo se conoce como adelgazamiento dinámico. Se trata de un proceso hasta ahora mal conocido e infravalorado, cuyas consecuencias resultan difíciles de predecir, pero que pueden llegar a ser muy considerables, por ejemplo en lo que se refiere a los aportes al ascenso del nivel marino. Recientemente se ha comprobado que el adelgazamiento dinámico afecta en la actualidad al casquete de Groenlandia en todas las latitudes y que se ha incrementado en ciertos sectores críticos de la Antártida (Pritchard *et al.*, 2009).

En Groenlandia, un lugar especialmente crítico en cuanto al retroceso glaciar y sus consecuencias, se han medido velocidades de flujo glaciar que llegan a superar los 100 metros por año y una media de adelgazamiento superior a 0,8 m por año.

Los glaciares de la Antártida Occidental son especialmente vulnerables ante el calentamiento, porque buena parte de la base del hielo que recubre ese sector se encuentra por debajo del nivel del mar y existen numerosas plataformas de hielo. De hecho, en algunos glaciares del margen del mar de Amundsen se han medido adelgazamientos del hielo del orden de 9 m por año.

Las plataformas de hielo (*ice shelves*) están constituidas por hielo glaciar que se extiende en la periferia de ciertos casquetes polares (*ice sheets*), quedando apoyadas sobre el fondo marino o bien flotando. En el caso de la Antártida llegan a ocupar, en conjunto, una superficie del orden de dos millones de kilómetros cuadrados, pudiendo llegar su grosor a varios centenares de metros. De estas plataformas se desprenden gigantescos témpanos (*icebergs*) y, en ocasiones, han sufrido desintegraciones importantes, como por ejemplo las ocurridas en 1995 en la plataforma Larsen A y en 2002 en la plataforma Larsen B, ambas en la vertiente del mar de Weddel de la Península Antártica.

Otra plataforma de hielo de la Península Antártica que ha iniciado su proceso de desintegración es la plataforma Wilkins, situada en el sector orientado hacia el Pacífico. Esta plataforma tuvo una importante rotura a finales de febrero de 2008 (Fig. 6), que prosiguió en 2009, produciéndose en el mes de abril de ese año la rotura del puente de hielo que la unía a la isla Charcot, con lo que se ven favorecidas la inestabilidad y futura rotura de esta plataforma.

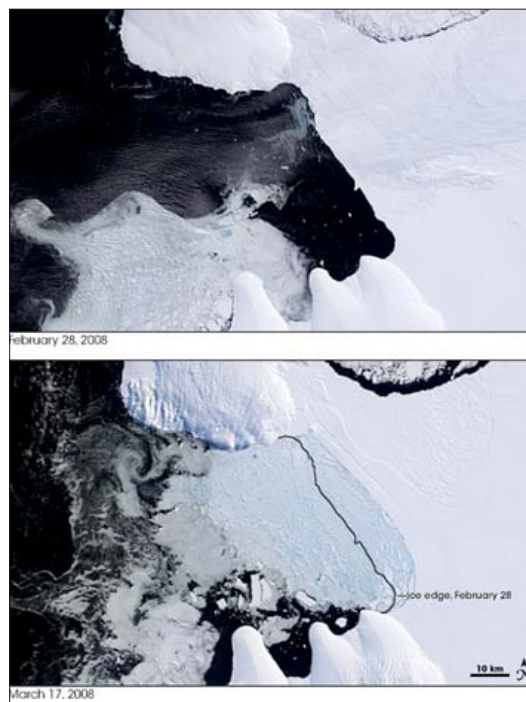


Fig. 6. Imagen de la plataforma de hielo Wilkins, en la Península Antártica, antes y después de la rotura ocurrida el 28 de febrero de 2008. Posteriormente, en 2009, se rompió el puente de hielo que enlazaba la plataforma con la isla Charcot. Imagen procedente de la NASA.

AGUAS SUBGLACIARES

La presencia de agua líquida en la base de los glaciares es conocida desde hace bastante tiempo, pero en los últimos años se ha constatado la existencia de grandes masas de agua, en una cantidad que no se sospechaba anteriormente. Se trata de agua embalsada en lagos o que circula, más o menos continuamente, a través de redes de drenaje subglaciares, y que llega a producir aportes hídricos muy considerables en ciertos márgenes glaciares. Dicha agua tiene efectos en la dinámica glaciar y en la pérdida de hielo en magnitudes que no habían sido consideradas con anterioridad.

En la Antártida se han localizado más de 160 lagos subglaciares de dimensiones considerables, siendo el más grande de ellos el lago Vostok, de más de 13.000 km² de superficie y varios centenares de metros de profundidad, situado bajo una cubierta glaciar de unos 3.600 m de espesor. Hoy se sabe que en algunos de esos lagos se producen esporádicos desagües o aportes a través de auténticos ríos subterráneos que drenan grandes caudales y llegan a trasladar el agua centenares de kilómetros de distancia.

Se ha constatado el importante papel que tiene el agua subglaciar en el movimiento y la estabilidad de los glaciares polares. En la Antártida Oriental se han asociado rápidos movimientos de corrientes de hielo con la existencia de sistemas de lagos y de redes subglaciares que los conectan y que tienen periodos de drenaje activo (Bell, 2008).



Fig. 7. El hielo marino, que puede llegar a alcanzar varios metros de espesor, está haciéndose más delgado y frágil en el Ártico. Al fracturarse los bloques de hielo son arrastrados por las corrientes marinas y el viento. Foto J. López-Martínez.

MAR HELADO

La superficie ocupada por el mar helado en el entorno de ambos polos experimenta importantes variaciones estacionales y tiene, entre otras, notables implicaciones en lo que se refiere a la reflexión o absorción de la radiación solar (Fig. 7). Las fluctuaciones del mar helado en los últimos años, en el contexto de calentamiento global existente, muestran considerables diferencias entre lo que está ocurriendo en el Ártico y en la Antártida.

La superficie helada del océano Ártico en el momento de su mínima extensión, es decir en septiembre, se ha reducido del orden de un 40% en los últimos treinta años. El mínimo histórico conocido se produjo a mediados de septiembre de 2007. En esa fecha la superficie de mar helado en el Ártico alcanzó un mínimo de 4,13 millones de km², es decir casi 3 millones de km² menos que la media de los años 1979 a 2000. Al año siguiente, en 2008, la extensión de mar helado en septiembre fue algo mayor que en la temporada anterior, y lo mismo ha ocurrido en 2009 (Fig. 8).

El satélite ICESat de la NASA ha puesto de manifiesto que en el Ártico las ganancias de hielo en invierno no están compensando las pérdidas estivales y que entre 2004 y 2008 ha habido una pérdida de 1,54 millones de kilómetros cuadrados de superficie de mar helado, es decir unas tres veces el tamaño de España.

Sin embargo, además de la extensión también hay que tener en cuenta la edad y el grosor de la capa de mar helado. El satélite mencionado anteriormente ha medido un adelgazamiento del hielo marino del Ártico de 68 cm entre 2004 y 2008, es decir a un ritmo de 17 cm por año. Esto significa que ha aumentado considerablemente la superficie ocupada por hielo nuevo, tanto que solo el 32% del total es hielo plurianual, mientras que el 68% es hielo formado en el último invierno. Últimamente cuando se produce la máxima expansión del mar helado en el Ártico, entre finales de febrero y mediados de marzo, el hielo es considerablemente más joven y del-

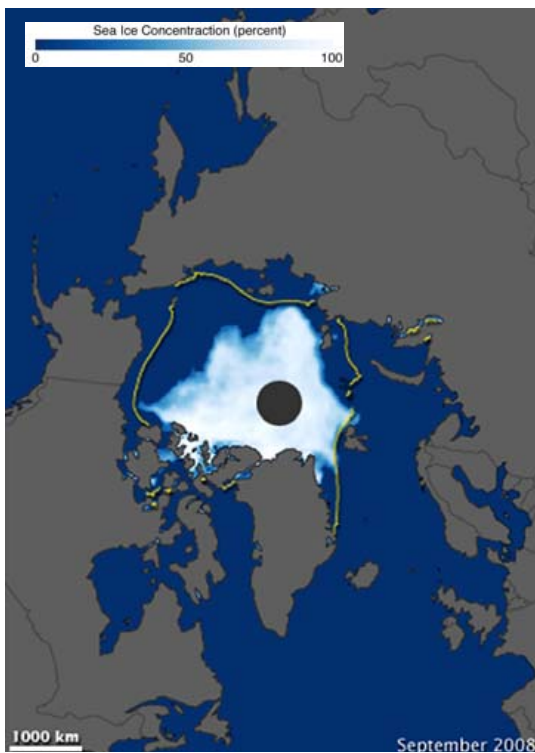


Fig. 8. Extensión del mar helado en el Ártico en la temporada 2008-2009, con su máxima extensión en marzo y la mínima en septiembre. La línea amarilla indica la posición media del frente del mar helado en el periodo 1979-2000. Imágenes procedentes de la NASA.

gado de lo que lo era antes. En el año 1987 la zona central del océano Ártico estaba ocupada en un 57% por hielo más antiguo de cinco años y el 25% era más viejo de nueve años. Sin embargo, diez años después, en 2007, solo el 7% de la superficie tiene hielo más antiguo de cinco años y ya no existe hielo de más de nueve años. Esto hace mucho más frágil la cubierta del mar helado

De seguir progresando las condiciones actuales, tal como parece que ocurrirá, hacia el año 2020 es probable que durante varios meses al año no hagan falta rompehielos para abrir el paso a otros buques que naveguen entre el Pacífico y el Atlántico a través del Paso del Noroeste. Se apunta también a que es posible que hacia la mitad del siglo XXI el océano Ártico podría llegar a deshelarse por completo en el verano. Esa situación supondrá ventajas para la navegación y facilitará el acceso a los recursos marinos y del subsuelo del Ártico, lo que aumentará los riesgos ambientales y las tensiones políticas en la zona.

Por su parte, la superficie de mar helado en la Antártida se ha mantenido en su conjunto en cifras relativamente estabilizadas, habiendo incluso aumentado del orden de un 1% por década desde 1979, tanto en los momentos de máxima como de mínima expansión anual (Fig. 9). La media de superficie de mar helado alrededor de la Antártida, en el periodo entre los años 1979 y 2000, ha sido de 18,7 millones de km² en septiembre. A partir de ahí, en los últimos diez años, los valores de máxima expansión en septiembre han oscilado entre 18,2 y 19,4 millones de km², siendo las cifras más altas en los años 2006 y 2007 y las menores en 2002, 2001 y 2008.

Por otro lado, la media de la superficie helada en febrero para el periodo 1979-2000 ha sido de 2,9 millones de km², siendo las oscilaciones en los diez años siguientes entre 2,6 y 3,7 millones de km². En los diez últimos años las cifras de menor superficie

de mar helado han ocurrido en 2008 y 2000 y las de mayor extensión en febrero se han dado en 2003, 2008 y 2001.

No se aprecia por lo tanto una tendencia definida en el sentido de la disminución del mar helado en la Antártida. Hay sectores en los que en esos últimos años se ha reducido el mar helado, como los del mar de Bellingshausen y el mar de Amundsen, pero se han visto compensados en otras zonas en las que ha habido aumento de superficie de mar helado, como ocurre en el sector del mar de Ross. Se ha apuntado como causa de esta situación la llegada de vientos más fríos a esas zonas, debido a la existencia del agujero de ozono. Si esto fuera así, la esperada recuperación del agujero de ozono a lo largo de las próximas décadas podría tener un impacto en la disminución del mar helado en la Antártida.

AGUJERO DE OZONO

El descubrimiento del llamado agujero de ozono en la Antártida a principios de los años 1980 supuso la constatación del grado en que los humanos podemos llegar a afectar los ciclos naturales y a provocar un problema con graves consecuencias. La firma del Protocolo de Montreal en 1989, supuso un acuerdo entre 195 países para reducir las emisiones causantes del deterioro de la capa de ozono con el fin de prevenir su destrucción.

Al eliminarse las emisiones antropogénicas dañinas para la capa de ozono, se espera que esta avance en su regeneración. Parece que así está ocurriendo y que se han estabilizado los compuestos nocivos atmosféricos. Sin embargo la reconstrucción completa llevará algún tiempo y se apunta que hasta avanzados los años 2060 no se alcanzarán los valores de ozono estratosférico que existían sobre la Antártida antes de su generación a principios de los años 1980.

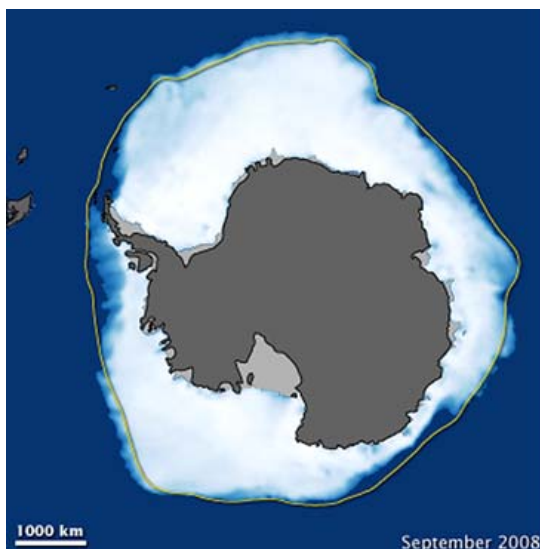


Fig. 9. Extensión del mar helado alrededor de la Antártida en la temporada 2008-2009, con su máxima extensión en septiembre y la mínima en febrero. La línea amarilla indica la posición media del frente del mar helado en el periodo 1979-2000. Las zonas en color gris claro corresponden a plataformas de hielo. Imágenes procedentes de la NASA.

Seguirá habiendo fluctuaciones de tamaño del agujero de ozono de un año a otro, que no siempre serán en el sentido decreciente del área afectada. De hecho, en octubre del año 2009 el tamaño del agujero de ozono sobre la Antártida fue mayor que en 2007, aunque menor que en 2008. Sin embargo, en el año 2006 su extensión fue mayor que en los tres años siguientes.

En estos últimos años se han ido poniendo de manifiesto ciertas conexiones entre los cambios en la cantidad de ozono en la estratosfera y las temperaturas, así como con la absorción de CO₂ en el océano Antártico. Además, parece que la regeneración de la capa de ozono se verá afectada por la evolución que tenga el calentamiento global.

La capa de ozono situada en la estratosfera actúa como una pantalla protectora para la llegada a la superficie de la Tierra de la dañina radiación ultravioleta. Sin embargo si el ozono penetra en la troposfera, adquiere un carácter contaminante con consecuencias dañinas para la salud humana y favorecedoras del efecto invernadero. Recientemente se ha detectado que el calentamiento global parece favorecer el flujo entre la estratosfera y la troposfera y es posible que para el año 2095 dicho flujo pudiera llegar a aumentar en un 23%.

Parece ser que la existencia del agujero de ozono reduce la absorción de carbono atmosférico por parte del océano Antártico. Aparentemente los modelos climáticos usados hasta ahora han sobreestimado la absorción de carbono y subestimado la acidificación de los océanos.

El océano Antártico absorbe aproximadamente una cantidad de CO₂ equivalente al 15 % del carbono de origen antropogénico. Se trata por lo tanto de un importante sumidero, pero su actividad está disminuyendo, dado su estado de saturación.

La disminución de ozono sobre la Antártida parece contribuir en cierto grado al incremento de los vientos alrededor del continente y por lo tanto al aislamiento de su zona interior, aunque no parece que esa sea la causa principal del comportamiento de las temperaturas, en contra de lo que se pensaba anteriormente.

PERMAFROST

El suelo helado o permafrost ocupa enormes superficies en las altas latitudes. Alrededor del 20% de las tierras emergidas del hemisferio norte tienen permafrost. El suelo helado sufre degradación en situaciones de calentamiento y la llamada capa activa, la que se hiela y deshiela estacionalmente, aumenta su grosor y afecta a mayores extensiones.

El permafrost tiene un importante papel en el ciclo global del carbono. Los suelos helados, cuyo espesor llega a ser de centenares de metros en ciertas zonas, almacenan una gran cantidad de carbono y tanto su dinámica como los procesos biogeoquímicos asociados deben ser tenidos en cuenta.

La degradación del permafrost favorece la acción bacteriana, con la consiguiente liberación de gases de efecto invernadero. Asimismo el deshielo de capas del subsuelo puede favorecer el escape de hidratos de gas. Parece que el calentamiento en la tundra ártica ha sido un importante contribuyente a los notables aumentos de metano atmosférico ocurrido en los últimos años. Además, las alteraciones del permafrost tienen implicaciones en la estabilidad del terreno y en la dinámica hidrogeológica, así como en los ecosistemas.

Al progresar el calentamiento, se ven afectadas capas más profundas de permafrost. Se estima que de seguir la tendencia actual a finales del siglo XXI podría llegar a desaparecer la mayor parte del permafrost de lugares como Alaska, Canadá y Rusia. Entre los efectos que esto tendrá, el más preocupante es el incremento de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, lo cual producirá una retroalimentación del calentamiento.

NIVEL DEL MAR

Es evidente que la fusión de hielo provoca aumento del nivel mar, aunque esa no sea la única causa que lo produce. Los cálculos a partir de los volúmenes de hielo existentes indican que el nivel medio del mar subiría más de 60 metros si se fundiese en su totalidad el casquete antártico y unos 6-7 m si lo hiciese el de Groenlandia. El hielo que recubre la Península Antártica, el sector más vulnerable de aquel continente, equivaldría a unos 6 metros de altura del nivel del mar. Desde luego que esto no es algo que pueda ocurrir en una escala de tiempo "humana". Además, incluso manteniéndose o aumentando las condiciones cálidas actuales, la fusión completa no parece posible al menos en escalas de varios centenares de miles de años.

Existen muchas incertidumbres en lo que se refiere a los modelos de fusión glaciaria y su conexión con la subida del nivel del mar en el futuro. La mayoría apuntan a que cabe esperar ascensos que no superen poco más de un metro en el próximo siglo. Sin embargo, ciertos datos recientes, por ejemplo sobre la importancia de la fusión subglaciaria, y nuevos estudios apuntan a que dichas cifras podrían verse superadas.

Recientemente, al correlacionar los cambios de temperaturas, los valores de CO₂ y las variaciones del nivel del mar durante los últimos cinco ciclos glaciares, se ha comprobado que si el modo en que se han comportado esos valores lo aplicamos a las actuales cifras de contenido de CO₂ en la atmósfera, a largo plazo resultaría un aumento de unos 25 m en el nivel del mar. Algo comparable a la situación existente hace unos 3-3,5 millones de años. Sin embargo, de ser esto así, se tardaría varios miles de años en alcanzarse el equilibrio y en producirse dicha subida del nivel marino. De todos modos, este tipo de datos apuntan a que quizás, bajo ciertas circunstancias de desequilibrio, se podría llegar a más de uno o dos metros por siglo en el ascenso del nivel del mar.

En cualquier caso la complejidad de los procesos relativos a los cambios del nivel del mar hacen que los modelos predictivos muestren rangos de incertidumbre considerables. La contribución global a la subida del nivel del mar por parte de las aguas de fusión glaciaria se ha estimado que en los últimos años es equivalente a unos 1,8 mm/año (Meier *et al.*, 2007). De todos modos estas cifras podrían sufrir incrementos notables si se producen retrocesos importantes en el hielo apoyado sobre el terreno o colapsos de las plataformas de hielo.

Si en una escala de milenios nos fijamos en las variaciones del nivel del mar que han seguido a fusiones de hielo importantes ocurridas en periodos interglaciares, se aprecia que el cambio del nivel del mar ha presentado variaciones de unas zonas a otras, habiendo existido notables diferencias temporales y espaciales, ya que, por ejemplo en regiones de las que desaparecieron importantes recubrimientos de hielo (por ejemplo de Escandinavia o Canadá con posterioridad al último máximo glaciario ocurrido hace unos 20.000 años) el levantamiento cortical por motivos glaciostáticos domina la respuesta. Para una mayor información de los efectos del cambio climático sobre el nivel del mar en el litoral puede consultarse el artículo de Bardají *et al.* (2009) publicado en este mismo monográfico.

COMENTARIOS FINALES

Es necesario mejorar la información que se posee de las zonas polares. Durante el recientemente terminado Año Polar Internacional 2007-2008 se ha hecho un importante esfuerzo coordinado internacionalmente cuyos efectos se dejarán sentir en los próximos años (Allison *et al.*, 2007, 2009). Se han mejorado las redes de adquisición de datos, así como la accesibilidad de los mismos. Las observaciones de los nuevos satélites (como CRIO-SAT-2, de la ESA; RADARSAT-2, canadiense e ICESat, de la NASA, entre otros) y los nuevos programas en curso apuntan a que en los próximos años aumentará la atención hacia lo que ocurre en los polos.

Se trata de regiones remotas pero de una trascendencia crucial para la evolución del clima terrestre. Por otra parte, el estudio de estas regiones requiere de la cooperación internacional, tanto por circunstancias geográficas y condiciones ambientales como por la magnitud e interdisciplinariedad de su investigación. De ahí la importancia que juegan los órganos que promueven proyectos e iniciativas coordinadas, como es el caso para la Antártida del Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR).

Afortunadamente hoy, tras una veintena de años desde que se oficializaron y desarrollaron de un modo continuado las investigaciones polares españolas, nuestro país forma parte de la comunidad internacional que investiga en ambos polos y contribuye a su conocimiento.

BIBLIOGRAFÍA

Allison I., Béland, M., Alverson, K., Bell, R., Carlson, D., Cutler, P., Dahell, K., Ellis-Evans, C., Fahrback, E., Fanta, E., Fujii, Y., Glaser, G., Goldfarb, L., Hovelsrud, G., Huber, J., Kotlyakov, V., Krupnik, I., López-Martínez, J., Mohr, T., Odmak, H., Quin, D., Rachold, V., Rapley, C., Rogne, O., Sarukhanian, E., Summerhayes, C. & Xiao, C. (2007). *The scope of science for the International Polar Year 2007-2008*. WMO Technical Document n.º 1364. 79 p. Geneva: World Meteorological Organization. (accesible on-line en: www.uam.es/cn-scar)

Allison I., Béland, M., Alverson, K., Bell, R., Carlson, D., Cutler, P., Dahell, K., Ellis-Evans, C., Fahrback, E., Hovelsrud, G., Huber, J., Kotlyakov, V., Krupnik, I., López-Martínez, J., Mohr, T., Odmak, H., Quin, D., Rachold, V., Rapley, C., Rogne, O., Sarukhanian, E., Summerhayes, C. & Yamanouchi, T. (2009). *The State of Polar Research*. 12 p. Geneva: World Meteorological Organization. (accesible on-line en: www.uam.es/cn-scar)

Bardají, T., Zazo, C., Cabero, A., Dabrio, C.J., Goy, J.L., Lario, J. y Silva, P.G. (2009). Impacto del cambio climático en el litoral. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. 17.2, 141-154.

Bell, R.E. (2008). The unquiet ice. *Scientific American*, 298(2), 60-67.

Meier, M.F., Dyurgerov, M.B., Rick, U.K., O'Neel, S., Pfeffer, T., Anderson, R.S., Anderson, S.P. & Glazovsky, A.F. (2007). Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. *Scientific American*, 317, 1064-1067.

Pritchard, H.D., Artern, R.J., Vaughan, D.G. & Edwards, L.A. (2009). Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature*, 461, 971-975.

Rahmstorf, S. (2002). Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature*, 419, 207-214.

Steig, E.J., Schneider, D.P., Rutherford, S.D., Mann, M.E., Comiso, J.C. & Shindell, D.T. (2009). Warming of the Antarctic ice sheet surface since 1957. *International Geophysical Year. Nature*, 457, 459-463.

Páginas web relacionadas:

Comité Español del SCAR: www.uam.es/cn-scar

Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR): www.scar.org

Año Polar Internacional 2007-2008: www.ipy.org ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 24 de marzo de 2009 y aceptado definitivamente para su publicación el 20 de noviembre de 2009.