

Activos helados: el papel de la criosfera en el sistema climático



Campo de investigación criosférica a 6 100 m, 29°N en el sureste de la Meseta Tibetana (Fotografía: V. Aizen)

Por Chad Dick, Director de la Oficina Internacional de Proyecto del CliC

Introducción

Todos sabemos que no podemos vivir sin agua, al menos en su forma líquida. Pero, ¿qué pasa cuando está helada? Para la población que habita en las regiones frías del mundo o cerca de ellas, la nieve y el hielo pueden resultar importantes para sustentar un modo de vida. Por el contrario, para muchas personas de latitudes templadas pueden parecer un mero inconveniente u, ocasionalmente, un peligro; mientras que para los que viven en los trópicos pueden parecer remotos, poco

atractivos y poco importantes. Pero el agua helada existe en la superficie de la Tierra en todas las latitudes (Figura 1) y es vital para todos nosotros. Sin ella, y los procesos de congelamiento y deshielo que afectan a sus características, el clima de la Tierra sería muy distinto y, tal vez, mucho menos hospitalario para la vida humana.

La “criosfera” se define como el conjunto de aquellas regiones de la superficie de la Tierra donde existe agua en forma de hielo. Incluye la cubierta de nieve, el hielo de mares, lagos y ríos, los glaciares, los casquetes y las capas de hielo, y la tierra helada, incluido el permafrost. Donde quiera que se den estos componentes criosféricos, ejercen un efecto importante sobre los ciclos hídrico, energético y químico. La nieve y el hielo tienen un albedo relativamente alto, y reflejan la radiación solar entrante fuera de la superficie de la Tierra de una manera mucho más eficaz que el suelo o el agua subyacente. La precipitación en forma de nieve en las



Oficina Internacional de Proyecto del CliC,
A la atención del Instituto Polar Noruego,
9296, Tromsø, Noruega
Correo electrónico: clic@npolar.no
Web: <http://clic.npolar.no>

regiones frías puede inmovilizar agua dulce durante muchos meses del año, liberándola rápidamente durante la fusión de primavera. Los glaciares, los casquetes de hielo y las capas de hielo son capaces de almacenar agua durante cientos o miles de años y si se fundiera todo este hielo terrestre se cree que el nivel del mar aumentaría unos 70 m. La formación y la fusión de hielo marino redistribuyen el agua dulce y la sal en el océano y fuerzan importan-



Figura 1 — Perforación de núcleos de hielo a 4 115 m, 49°N, en las Montañas de Altai (en la región sur de Siberia). La criosfera existe en todas las latitudes y hay una necesidad urgente de recoger núcleos de hielo de glaciares de altitudes altas y latitudes bajas antes de que el calentamiento destruya las señales climáticas que permanecen en el hielo frío (politérmico). (Fotografía: V. Aizen)

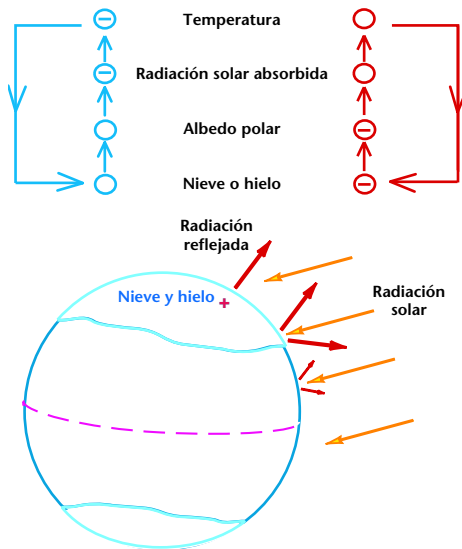


Figura 2 — Ciclos de calentamiento y de enfriamiento en la retroalimentación entre la nieve y el hielo y el albedo

tes transformaciones de las masas de agua que ayudan a mantener la circulación termohalina mundial y a ventilar el océano profundo. El permafrost y la tierra helada alteran los flujos del agua, la energía y los gases entre la superficie de la tierra y la atmósfera e influyen en gran medida en las formas de la tierra, la hidrología y la vegetación.

En un clima en cambio, las retroalimentaciones y la amplificación de las señales climáticas jugarán un papel crucial en el futuro del sistema terrestre a través de su interacción con la criosfera. Por ejemplo, la retroalimentación entre la nieve o el hielo y el albedo (Figura 2) y la amplificación entre el permafrost y los gases de efecto invernadero incrementarían cualquier calentamiento inicial. Ciertamente, muchos modelos climatológicos mundiales predicen que la región del Ártico mostrará el mayor calentamiento de efecto invernadero antropogénico, sobre todo debido a la retroalimentación del albedo.

A pesar de estas relaciones con el resto del sistema climático mundial, la criosfera todavía

es relativamente poco conocida. La mayor parte de ella está alejada de los principales centros de población y su estudio puede ser difícil, peligroso y caro. Pero sin conocer la criosfera y las interacciones climatológicas que tienen lugar en las regiones frías no podemos conocer completamente el sistema climático mundial y, por lo tanto, no seremos capaces de predecir cambios climáticos a medida que aumentan las concentraciones de gases atmosféricos de efecto invernadero. Teniendo esto en mente, el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC) ha sido el responsable de crear dos importantes proyectos: el Estudio del Sistema Climático del Ártico ((ACSYS, 1994-2003) y el proyecto en marcha (desde 2000) Clima y Criosfera (CliC), para examinar las interacciones del clima mundial y de las regiones criosféricas de la Tierra.

El Estudio del Sistema Climático del Ártico (ACSYS)

El sistema climático del Ártico consta de cuatro elementos principales: el océano, la atmósfera, el hielo marino y el sistema hidrológico de tierra. A principios de 1994 el Estudio del Sistema Climático del Ártico (ACSYS) se propuso estudiar estos cuatro elementos, sus interacciones y las conexiones de este sistema ártico con el resto del clima mundial. Eran de especial interés preguntas como si el Ártico era realmente tan sensible a un incremento de los gases de efecto invernadero como sugerían muchos modelos climatológicos, y cuáles serían las consecuencias del cambio climático del Ártico para el resto del mundo. El proyecto, de una década de duración, ofreció muchos conocimientos nuevos y numerosos resultados

sorprendentes y, tal vez, preocupantes. Muchos de ellos se presentaron en una conferencia final del ACSYS en San Petersburgo, en la Federación Rusa, en noviembre de 2003.

Hielo marino en retroceso

En septiembre de 2002 se produjo una extensión del hielo marino del Ártico mínima que constituyó un récord en al menos el período de 25 años de observaciones por satélite y que fue prácticamente igualada tanto en 2003 como en 2004. Desde que empezó la vigilancia continua por satélites, en 1979, la extensión del hielo marino se ha reducido en aproximadamente un 2,3 por ciento por década. A lo largo del mismo período el hielo multianual, la fracción que sobrevive a lo largo del período estival para volver a crecer en el invierno siguiente, se ha reducido un grave 8,9 por ciento por década. Este hielo multianual suele ser más grueso que el hielo del primer año, que es resultado del congelamiento de un solo invierno, así que cabría esperar alguna reducción en el espesor del hielo a medida que desaparece el hielo multianual. Sin embargo, los estudios de Rothrock y otros (1999) y de Wadhams y Davis (2000) hallaron una reducción de más del 40 por ciento entre las medidas submarinas (ACSYS/CliC, 2002) realizadas entre las décadas de 1950 y de 1970 y las medidas modernas realizadas a partir de la década de 1990. No sólo la magnitud de la reducción fue mayor de lo esperado sino que, lo que es sorprendente para un sistema tan dinámico, no se encontró ninguna región en la que el hielo hubiera aumentado de espesor.

Considerados juntos, este retroceso y la reducción ponen de relieve una importante disminución en el volumen del hielo marino y parecería ser una indicación clara de un importante cambio climático. Sin



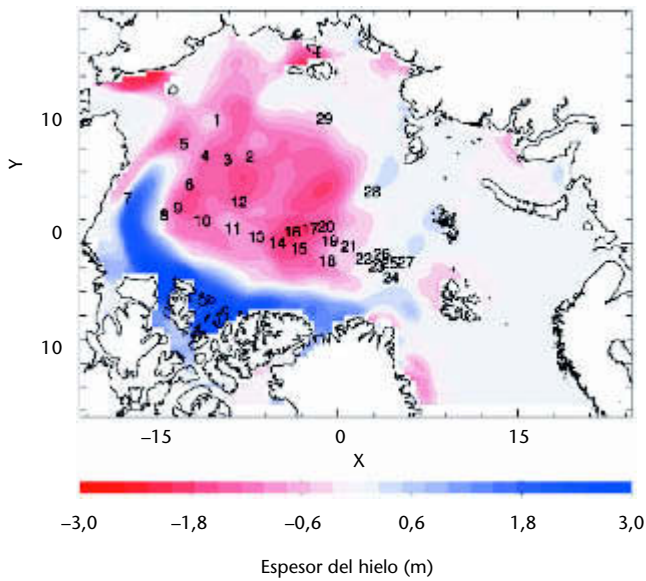


Figura 3 — Cambios en el espesor del hielo marino del Ártico. Los números muestran dónde las observaciones encontraron una disminución promedio del 40 por ciento en el espesor del hielo desde las décadas de 1950 y de 1970 hasta la de 1990, pero los modelos muestran que esto puede haberse debido más a la traslación del hielo que a su fusión.

embargo, no todos los científicos estaban convencidos. En un estudio de modelos acoplados de la atmósfera, el océano y el hielo relativo a los equilibrios de agua dulce y energía en el Océano Ártico, Holloway y Sou (2001; 2002) pusieron de manifiesto un modelo similar de reducción en el Ártico central, donde se habían realizado las medidas submarinas, pero un aumento del hielo frente a la costa canadiense y el norte de Groenlandia (Figura 3).

Con un cambio neto mucho menor mostrado por el modelo, este estudio sugería que el hielo se había trasladado debido a las configuraciones cambiantes de la presión atmosférica y el viento, en lugar de haberse fundido. El Grupo de Productos de Observación del ACSYS realizó un estudio de todos los resultados y concluyó que se había producido una reducción, sobre todo en verano, pero que era probable que fuese menor del 40 por ciento sugerido por las medidas submarinas. Sin embargo, el estudio también puso de manifiesto la insuficiencia de los datos, lo que a menudo dificulta los estudios criosféricos. Será necesario continuar con las medidas utilizando tanto técni-

cas in situ como de teledetección a lo largo de los próximos años para determinar si la reducción es parte de una tendencia o un ciclo.

Dada la dificultad de recoger datos climatológicos en el Océano Ártico, el Programa Internacional de Boyas en el Ártico (PIBA) ha supuesto un éxito destacable. Combinando en la actualidad los esfuerzos de 10 naciones y de 22 grupos, este programa ha

desplegado con éxito boyas a la deriva en las masas flotantes de hielo árticas durante más de 25 años. Las boyas a la deriva se siguen por satélite y ofrecen una imagen detallada del movimiento del hielo marino en zonas del Ártico central que serían inaccesibles de otra manera. Además, los sensores de presión y de temperatura han suministrado datos meteorológicos en una región con pocas medidas convencionales. Los resultados han revelado cambios en el esquema principal de movimiento del hielo entre las décadas de 1980 y de 1990 (Figura 4).

En la década de 1990 hubo un aumento en la advección de hielo lejos de la costa siberiana, una disminución de la advección de hielo del oeste al este del Ártico, y un ligero aumento en el transporte fuera del Océano Ártico a través del Estrecho de Fram (Rigor y otros, 2002). Se ha observado que estos patrones de movimiento del hielo están relacionados con la Oscilación Ártica, que es esencialmente una medida estadística de la fuerza del vórtice polar. Entre las décadas de 1980 y de 1990 esta oscilación cambió a una fase generalmente positiva, lo

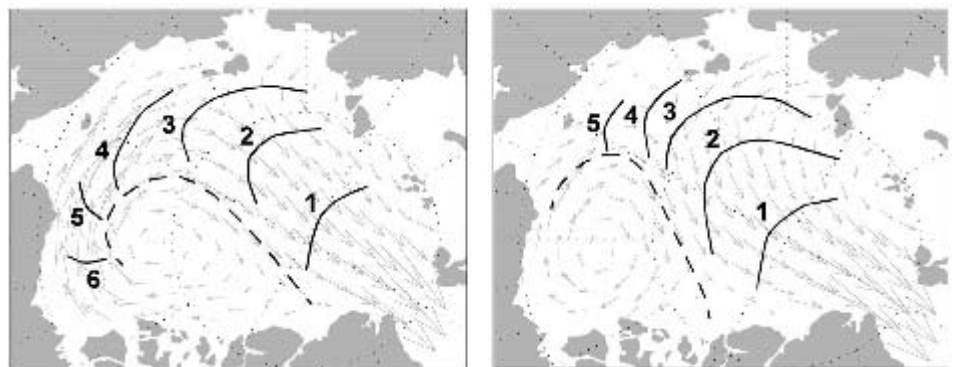


Figura 4 — El Programa Internacional de Boyas en el Ártico ha demostrado distintos modos de movimiento del hielo marino ártico correspondientes a índices bajos y altos de la Oscilación Ártica. Las líneas numeradas muestran cuántos años costaría atravesar a la deriva el Océano Ártico y salir a través el Estrecho de Fram; también se muestra el límite entre el hielo que saldrá por el Estrecho de Fram o recirculará en el Giro de Beaufort (línea negra de puntos). (Figura: I. Rigor)

que significa que se traía más aire caliente al Ártico con un aumento consiguiente de la temperatura media. Parece probable, por consiguiente, que tanto el calentamiento como los cambios en el movimiento del hielo contribuyan a la reducción del hielo marino observada durante la década del ACSYS.

Calentamiento del Océano Ártico y de la atmósfera

La atmósfera ártica se ha calentado durante los 20 últimos años, siendo dos de las regiones de calentamiento más rápido de la Tierra el noroeste de Canadá y Alaska, y el este de Siberia. Este calentamiento relativamente abrupto es de magnitud similar al observado durante la década de 1930. Es fundamental comparar estos dos "episodios" de calentamiento para comprender si el calentamiento ártico actual es de origen antropogénico o parte de la variabilidad natural del clima. Aunque la magnitud del calentamiento observado en la década de 1930 era similar, una diferencia importante es que el calentamiento ártico actual refleja una tendencia de calentamiento hemisférico (Figura 5).

El de la década de 1930 se produjo sólo en latitudes altas y fue debido a un mecanismo distinto: un mayor intercambio de aire con las latitudes más bajas, que a su vez se enfriaron (Overland y otros, 2004). El calentamiento hemisférico que tiene lugar ahora sugiere que es más probable un papel antropogénico a lo largo de las décadas recientes.

Junto con este calentamiento atmosférico reciente, también ha cambiado el Océano Ártico. En particular, ha habido un debilitamiento de la haloclina fría, la capa casi superficial de agua fría relativamente dulce que normalmente mantiene el agua atlántica, caliente y salada, bien alejada de la superficie del océano —y por lo tanto alejada del hielo marino—. El abrupto cambio de densidad observado en el pasado se ha vuelto más suave en los últimos años, y se ha acercado a la superficie. La zona ocupada por agua atlántica también ha aumentado, sobre todo a lo largo de la costa de Siberia, y ahora el núcleo de esta agua se encuentra 150 m más cerca de la superficie. Es interesante el hecho de que, si alcanzase la superficie, el calor contenido en la capa de agua atlántica es ciertamente suficiente para fundir todo

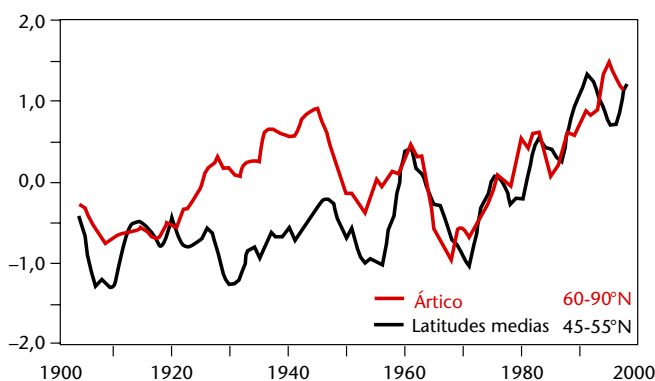


Figura 5 — Anomalías zonales medias de la temperatura del aire en superficie en el siglo xx (noviembre a marzo): los aumentos recientes de la temperatura del aire en el Ártico son parte de una tendencia hemisférica, mientras que los aumentos en las décadas de 1920 y de 1930 eran, sobre todo, un fenómeno ártico. (Figura: J. Overland)

Los objetivos del ClC

Se pone de manifiesto que la interacción en los dos sentidos de la criosfera y el resto del sistema climático es extremadamente importante: no sólo los cambios en el clima afectan a la criosfera, sino que los cambios en la criosfera pueden tener un efecto grave sobre el clima local, regional y mundial. Reflejando esta interacción de doble sentido, el objetivo principal del ClC es:

- Evaluar y cuantificar los efectos de la variabilidad y del cambio del clima sobre los componentes de la criosfera y las consecuencias de estos cambios para el sistema climático.

Los objetivos secundarios buscan incrementar y coordinar nuestra posibilidad de observar y vigilar la criosfera, de realizar estudios intensivos de procesos relacionados con el clima, de mejorar los modelos del papel de la criosfera en el sistema climático y de utilizar los cambios criosféricos como indicadores del cambio climático.

el hielo marino: un hecho que tendría efectos generalizados, no sólo en los ecosistemas árticos sino también en los sistemas climáticos ártico y mundial.

Mayor velocidad de flujo en los ríos árticos

De todos los océanos del mundo, el Ártico es el que está más influido por la escorrentía fluvial. Contiene sólo un 1 por ciento del volumen oceánico y abarca únicamente el 5 por ciento de la superficie de océanos del mundo, pero recibe el 10 por ciento de la escorrentía fluvial mundial y ocupa el 20 por

ciento de la superficie de la plataforma oceánica. Además de esta situación inusual, el aporte de agua dulce es altamente estacional. Los flujos son bajos en invierno, cuando los ríos están helados y la precipitación en la Cuenca del Ártico es en forma de nieve, pero la fusión de la primavera origina un rápido aumento de la escorrentía. Este aporte tiene un efecto importante en los flujos de flotabilidad del océano y todavía hay que investigar su influencia sobre la formación de hielo marino en la estación siguiente.

Sin embargo, un importante hallazgo durante la década de investigación del ACSYS fue que la escorrentía fluvial al Ártico desde el continente eurasiático había aumentado en un 7 por ciento entre 1936 y 1999 (Peterson y otros, 2002). Gran parte de este aumento se produjo en invierno, lo que refleja temperaturas invernales más cálidas en la mayoría de regiones de Siberia. Lo más sorprendente es que, mientras que el aumento en el oeste de Siberia iguala al aumento de la precipitación, en el este de Siberia la precipitación ha disminuido, pero la escorrentía ha aumentado. Una causa que se sugiere es el deshielo del permafrost y la consiguiente liberación de agua que, de ser cierta, indica que tendrán lugar cambios en el paisaje y en la vegetación y una posible liberación de CO₂ y de metano: todos los cambios que podrían amplificar el calentamiento climático inicial.

Resulta esencial continuar con la vigilancia continua de la escorrentía fluvial y de otros parámetros hidrológicos terrestres. Para ayudar a ello, el ACSYS creó dos importantes bases de datos. Con la ayuda del Centro Mundial de Datos de Escorrentía de la OMM, del Instituto Federal de Hidrología de Coblenza, en Alemania, se creó la Base de Datos de Esco-

rrentía del Ártico (ARDB) para recoger, procesar, almacenar y distribuir datos de escorrentía de los principales ríos que vierten al Ártico. Además, el Centro Mundial de Climatología de la Precipitación del PMIC de la OMM, del Servicio Meteorológico Alemán, en Offenbach, en Alemania, ha creado el Archivo de Datos de Precipitación del Ártico (APDA) para recopilar datos de precipitación de toda la cuenca de drenaje del Ártico. Los datos de estos dos centros suponen un recurso extremadamente útil para la investigación continuada del clima y la hidrología.

Un asunto importante para los estudios hidrológicos del Ártico ha sido la disminución de las redes de observación de la región. El ACSYS, junto con socios del Departamento de Recursos Hídricos e Hidrología de la OMM y del Programa de Evaluación y Vigilancia del Ártico, ha apoyado el desarrollo de una componente ártica del Sistema Mundial de Observación del Ciclo Hidrológico (WHYCOS) —el HYCOS Ártico— que se espera que origine un incremento en la recogida de datos hidrológicos in situ vitales en la Cuenca del Ártico.

Un sistema climático ártico variable

Uno de los principales resultados del proyecto ACSYS fue la identificación de la variabilidad del clima del Ártico. Las medidas realizadas durante el ACSYS muestran que el sistema climático ártico global, y todos los elementos principales del mismo, son mucho más variables de lo que se imaginaba al inicio del proyecto. La distribución del hielo marino cambia de un año al siguiente; cambian las trayectorias y las intensidades de las principales corrientes oceánicas; la salida de agua dulce del Ártico puede variar en un factor de 2 de un año a otro; algunos años son más cálidos que otros,

con temporadas de fusión varios días más largas; y la situación, el ritmo y la cantidad de aportes fluviales al Océano Ártico varían de forma sustancial.

Estas variaciones inesperadas han hecho que sea más difícil comprender la interacción entre los distintos elementos del sistema climático, que sea más complicado identificar tendencias y que sea más difícil predecir cambios futuros. A menudo el conocimiento del pasado aporta pistas útiles para el futuro pero, en esta región con pocos datos, incluso los datos recogidos no siempre se han administrado de la mejor manera. Los primeros jefes del proyecto ACSYS crearon numerosas empresas de recuperación de datos para mejorar la situación, lo que dio lugar a numerosos registros de parámetros climatológicos árticos que se remontaban a décadas o incluso a siglos atrás. El proyecto “BarKode”, que recuperó datos de temperatura y salinidad del océano de la región de los mares de Barents y de Kara que se remontaban a 1898 (ACSYS, 1999) ha sido superado hace poco en la longitud del registro por el Archivo Histórico de Mapas de Hielo del ACSYS (ACSYS, 2003). Este esfuerzo por registrar cambios históricos en la extensión del hielo marino del Ártico lo inició Torgny Vinje, del Instituto Polar de Noruega, e hizo uso de cuadernos de bitácora de buques de vela, diarios históricos, registros de cazadores de focas y de ballenas y otras numerosas fuentes históricas, y utilizó modernos mapas de aeronaves y satélites para seguir con las series hasta la actualidad (Figura 6).

El resultado es uno de los registros de observaciones más largo de cualquier parámetro climatológico, en el que los primeros mapas se remontan a una expedición británica siniestrada al mar de Barents, en 1553. El análisis moderno de estos mapas está revelando una variabilidad incluso

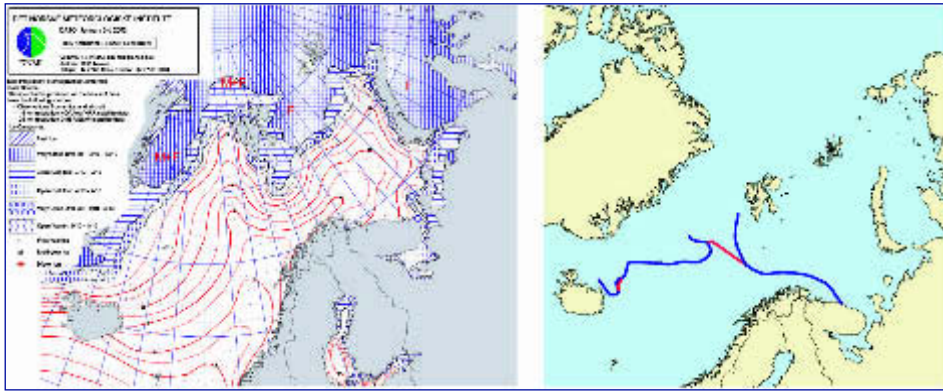


Figura 6 — El Archivo Histórico de Mapas de Hielo del ACSYS utilizó antiguos libros de bitácora de barcos de vela para reconstruir las posiciones del borde de hielo remontándose a 1553. Los mapas modernos (a la izquierda, mapa de 2002) complementan ahora los datos históricos (a la derecha, mapa de 1866).

mayor. Parece que no sólo la variabilidad interanual pasada fue similar a la de la actualidad, sino también que el Ártico está profundamente influido por los ciclos climatológicos decenales y multidecenales (Divine y Dick, 2005; Polvakov y otros, 2003). Los datos recuperados han confirmado de nuevo la complejidad del sistema y sus interacciones con el resto del sistema climático mundial. Esta complejidad pone de manifiesto la importancia del estudio continuado del clima ártico como un elemento completamente interactivo dentro del sistema climático mundial.

Estudios futuros: el Proyecto Clima y Criosfera (CliC)

A medida que progresaba el ACSYS y se hacía más clara la importancia del Ártico para el clima mundial, la atención se dirigió a las otras regiones frías de la Tierra. Parecía probable que, como el Ártico, esas otras regiones frías pudieran tener una influencia mayor sobre el sistema mundial de la que se había pensado en un principio. Un examen de los esfuerzos científicos relacionados identificó la necesidad de un mayor conocimiento de la criosfera y de todos sus elementos e interacciones, para que el PMIC

abaricara completamente el sistema climático de la Tierra. Dentro de otros proyectos del PMIC se abordaron muchos elementos criosféricos. Pero, con la relativamente pequeña comunidad de investigación mundial de la criosfera, lo remoto de la mayor parte de la criosfera y la complejidad de añadir la fase sólida del agua a los modelos conceptuales y numéricos, la criosfera solía recibir una prioridad menor dentro de estos proyectos que la que, tal vez, fuese justificada por su importancia dentro del sistema climático. Teniendo en cuenta esto, a finales de la década de 1990, el PMIC desarrolló el proyecto Clima y Criosfera (CliC) (CliC, 2001) como un proyecto central que abarcaba las regiones polares y todas las regiones criosféricas (continentales y marinas) intermedias.

Estudio del sistema criosfera-clima

La lista de elementos criosféricos representa una clara indicación de la amplitud de la interacción de la criosfera y el clima. Cada elemento responde al clima y lo afecta de formas distintas, interactuando en escalas temporales que van del corto plazo a efectos estacionales de nieve o tierra helada, a las respuestas a escala milenaria de las capas de hielo

y el permafrost. Por lo tanto, se consideraba una simplificación fundamental abordar el proyecto CliC como una serie de temas relacionados —Áreas de Proyecto CliC (CPA)— guiadas por cuestiones científicas clave. Estas CPA abarcan ampliamente la criosfera terrestre, la contribución del hielo terrestre al incremento del nivel del mar, la criosfera marina y las relaciones entre la criosfera y la circulación mundial. Los indicadores criosféricos del cambio climático forman un tema transversal a las cuatro CPA.

La criosfera terrestre y la hidrometeorología de las regiones frías (CPA 1)

Muchos de los procesos en los que están involucrados la cubierta de nieve en tierra, el hielo de lagos y ríos, los glaciares y casquetes, el permafrost, la tierra helada estacionalmente y la precipitación sólida no se conocen bien y están mal representados en los actuales modelos climatológicos (Figura 7). Las cuestiones clave de esta CPA son:

- ¿Cuáles serán las magnitudes, configuraciones e índices de cambio en los regímenes de la criosfera terrestre en las escalas temporales que van de una estación a un siglo? ¿Cuáles serán los cambios asociados en los ciclos del agua, la energía y el carbono?

Los principales resultados que se esperan son un mejor conocimiento de los flujos del agua, la energía y el carbono en las regiones frías de la Tierra, conjuntos de datos históricos sobre la variabilidad pasada del clima y de la criosfera, mejores algoritmos validados de teledetección por satélite y mejores programas de asimilación de datos criosféricos en modelos tanto de predicción numérica del tiempo como acoplados de clima.

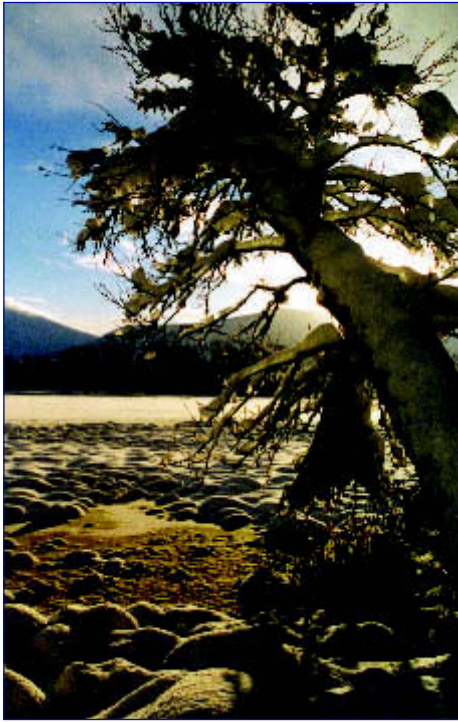


Figura 7 — La nieve y el hielo de lagos en el norte de Noruega. ¿Con qué rapidez cambiará la criosfera terrestre con el clima cambiante? (Fotografía: H. Goldman)

Los glaciares, los casquetes y las capas de hielo, y su relación con el nivel del mar (CPA 2)

Si se estabilizaran las concentraciones de gases de efecto invernadero en los valores actuales, aún así el incremento del nivel del mar continuaría durante miles de años, contribuyendo de manera importante las pérdidas del hielo terrestre. Las cuestiones clave son:

- ¿Cuál es la contribución de los glaciares, los casquetes y las capas de hielo al incremento del nivel del mar en escalas temporales comprendidas entre la década y el siglo? ¿Cómo podemos reducir la incertidumbre de estas estimaciones?

Los resultados principales incluirán nuevas medidas, modelos y explicacio-

nes del estado actual del equilibrio de glaciares, casquetes y capas de hielo y una cuantificación del papel indirecto de las plataformas de hielo a través de su influencia sobre el flujo de las capas de hielo terrestres y glaciares. Ya se ha puesto en marcha una comparación de modelos de capas de hielo, que busca mejorar nuestro conocimiento de los cambios pasados y futuros de las capas de hielo de Groenlandia y de la Antártida.

La criosfera marina y sus interacciones con los océanos en latitudes altas y con la atmósfera (CPA 3)

El hielo marino y su cubierta de nieve forman una capa aislante que interactúa con el océano y con la atmósfera, mientras que los icebergs y las plataformas de hielo modifican las propiedades de la masa de agua del océano y responden de gran manera al calentamiento atmosférico (Figura 8). Las cuestiones clave son:

- ¿Cuál es el estado medio, la variabilidad y las tendencias de las características del hielo marino en ambos hemisferios, y qué procesos físicos determinan estas características? ¿Cómo responderá el hielo marino a un clima en cambio en el futuro y cómo le afectará? ¿Qué estabilidad tienen las plataformas de hielo y cómo afectan al océano circundante?

Los resultados principales serán sistemas para seguir las variables clave del hielo marino (incluido el espesor, la extensión y la cubierta de nieve), el conocimiento de los procesos clave del hielo marino, y observaciones y modelos de la circulación del océano afectada por el hielo y de la transformación de las masas de agua. El CliC buscará avanzar a partir del Programa Internacional de Boyas en el Antártico

y del Programa Internacional de Boyas en el Ártico para mantener las series temporales de observaciones climatológicas clave, favorecer las nuevas tecnologías para la observación de las propiedades del océano bajo el hielo (p. ej., vehículos submarinos autónomos y transmisión de datos acústicos para flotadores perfiladores) y evaluar y mejorar los algoritmos de teledetección.

Relaciones entre la criosfera y el clima mundial (CPA 4)

El conocimiento de la importante influencia de la criosfera sobre el clima de la Tierra a través de sus complejas interacciones radiativas, térmicas, hidrológicas y químicas con la atmósfera y la inyección de agua dulce en el océano con la consiguiente modificación de las masas de agua y la circulación sigue constituyendo un desafío.

Las cuestiones clave son:

- ¿Cuál será el efecto de los cambios de la criosfera sobre la circulación atmosférica y oceánica? ¿Cuál es la probabilidad de un cambio abrupto o crítico en el sistema de la Tierra como resultado de los procesos de la criosfera?

Los principales resultados de esta CPA altamente interdisciplinar abarcan asuntos amplios que tratan de las interacciones del clima mundial y las escalas de tiempo milenarias. De especial interés son las teleconexiones que vinculan la criosfera con el resto del sistema climático, los mecanismos por los cuales pueden ocurrir dichas interacciones importantes, y las principales retroalimentaciones y amplificaciones del cambio climático que se producen a través de la criosfera. El área de proyecto evaluará las predicciones criosféricas y la predictibilidad con especial alusión al cambio



Figura 8 — La investigación de hielo marino será vital para comprender y predecir el clima futuro. (Fotografía: S. Gerland)

climático abrupto y a los efectos sobre los ciclos biogeoquímicos mundiales.

Como en abril de 2005 tiene lugar la Primera Conferencia Científica Internacional del CliC en Pekín, en China, la comunidad científica mundial espera impaciente el Año Polar Internacional (API), que empieza en marzo de 2007. Este período de esfuerzo intensivo centrará la atención de los meteorólogos en las regiones polares frías y el proyecto CliC jugará un papel importante en los estudios de coordinación del clima polar y de la criosfera. Además, el CliC seguirá fomentando los esfuerzos para estudiar la criosfera en todas las latitudes. Sin dichos estudios, nuestro conocimiento del clima mundial y nuestra capacidad para hacer proyecciones climatológicas del futuro seguirán siendo incompletos.

Referencias

- ACSYS (Golubev *et al.*), 1999: Barents and Kara Seas oceanographic database (BarKode). WCRP IACPO Informal Report No. 5, Murmansk (Federación Rusa) y Tromsø (Noruega).
- ACSYS (Løyning *et al.*), 2003: ACSYS historical ice chart archive (1553-2002). WCRP IACPO Informal Report No. 8, Tromsø (Noruega).
- ACSYS/CliC (Laxon *et al.*), 2002: Recent variations in Arctic sea-ice thickness. WCRP IACPO Informal Report, Tromsø (Noruega).
- CliC (Allison *et al.*), 2001: Climate and Cryosphere (CliC) Project Science and Co-ordination Plan Version 1, WCRP-114, WMO/TD No. 1053.
- DIVINE, D. & C. DICK, 2005: Multidecadal variability of historical sea ice edge position in

the Nordic Seas; *J. Geophys. Res. Oceans* (en imprenta).

HOLLOWAY, G. & T. SOU, 2002: Has Arctic sea ice rapidly thinned? *J. Climate*, 15 (13), 1691-1701.

HOLLOWAY, G. & T. SOU, 2001: Is Arctic sea ice rapidly thinning? *Ice and Climate News*, 1. (ACSYS/CliC Newsletter).

OVERLAND, J. E., M. C. SPILLANE, D. B. PERCIVAL, M. WANG & H. O. MOFJELD, 2004: Seasonal and regional variation of pan-Arctic surface air temperature over the instrumental record. *J. Climate*, 17 (17), 3263-3282.

PETERSON, B. J., R. M. HOLMES, J. W. McCLELLAND, C. J. VOROSMARTY, R. B. LAMMERS, A. I. SHIKLOMANOV, I. A. SHIKLOMANOV & S. RAHMSTORF, 2002: Increasing river discharge to the Arctic Ocean. *Science*, 298 (5601), 2171-2173.

POLYAKOV, I. V., R. V. BEKRYAEV, G. V. ALEKSEEV, U. S. BHATT, R. L. COLONY, M. A. JOHNSON, A. P. MASKSHTAS & D. WALSH, 2003: Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875-2000. *J. Climate*, 16 (12), 2067-2077.

RIGOR, I., J. M. WALLACE & R. L. COLONY, 2002: On the response of sea ice to the Arctic Oscillation. *J. Climate*, 15 (18), 2648-2668.

ROTHROCK, D. A., Y. YU & G. A. MAYKUT, 1999: Thinning of the Arctic sea-ice cover. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (23), 3469-3472.

WADHAMS, P. & N. R. DAVIS, 2000: Further evidence of ice thinning in the Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 27 (24), 3973-3975.