

Glaciares de montaña en redes de observación relacionada con el clima mundial

Por Wilfried HAEBERLI, Max MAISCH y Frank PAUL *

En las zonas de montañas frías se han observado, de forma sistemática, fluctuaciones de los glaciares en distintas partes del mundo durante más de un siglo. De hecho, se piensa que los cambios correspondientes son indicaciones altamente fiables de las tendencias del calentamiento mundial. Los glaciares de montaña son, por lo tanto, variables clave para las estrategias de detección temprana en observaciones relacionadas con el clima mundial. Hace poco se creó una Red Terrestre Mundial de Glaciares (GTN-G) como parte del Sistema Mundial de Observación Terrestre (SMOT/SMOC). El Servicio Mundial de Vigilancia de Glaciares (WGMS) es el encargado del funcionamiento de la red y sigue la Estrategia de Observación Jerárquica Global (GHOST). Esta estrategia consta de observaciones en cinco niveles que vinculan, por un lado, estudios de proceso detallados con, por el otro, cobertura mundial por medio de imágenes de satélite y de información digital sobre el terreno. A pesar de las continuas incertidumbres sobre la representatividad mundial de la muestra medida, hoy quedan pocas dudas sobre la fuerte pérdida de hielo que se está produciendo. No se puede excluir la posibilidad de que el forzamiento antropogénico del efecto invernadero haya empezado ahora a ejercer una influencia predominante en este crecimiento. Si sigue, o incluso se acelera, esta tendencia, muchas regiones montañosas podrían perder sus glaciares en las próximas décadas.

19

Introducción

Los cambios a lo largo del tiempo que se pueden detectar en la masa, volumen, extensión y longitud de los glaciares del mundo ofrecen algunas de las señales más claras de la naturaleza del cambio climático (Figura 1). Los glaciares de zonas frías de montaña reflejan de forma ciertamente clara el calentamiento secular a un ritmo elevado y en una escala mundial; se los considera indicadores clave dentro de los sistemas de observación relacionada con el clima mundial para la detección temprana de la continuación de un potencial efecto invernadero relacionado o, incluso, una aceleración de las tendencias de calentamiento (IPCC, 2001). Durante más de 100 años (Forel, 1895) se han realizado en algunas partes del mundo, sobre todo en los Alpes y en Escandinavia, observaciones sistemáticas de fluctuaciones de glaciares.

Desde 1986, el Servicio Mundial de Vigilancia de Glaciares (WGMS) ha asumido la responsabilidad de recoger y publicar datos normalizados. Este trabajo se lleva a cabo, principalmente, bajo los auspicios de la Comisión Internacional sobre Nieve y Hielo (ICSI/AICH) y de la Federación de Servicios Astronómicos y Geofísicos (FAGS/CIUC). Varias publicaciones

documentan los datos recogidos. El WGMS publica, con una periodicidad de dos años, el *Glacier Mass Balance Bulletin* (*Boletín del Balance de Masa de Glaciares*), que informa de los valores medidos en glaciares de referencia seleccionados (véase Figura 2). El Boletín (AICH(ICSI)/PNUMA/UNESCO/OMM 2001 y números anteriores) complementa la serie de publicaciones *Fluctuations of Glaciers* (*Fluctuaciones de los Glaciares*), donde se puede encontrar la colección completa de datos digitales, incluidas las observaciones más numerosas de variación de la longitud de glaciares. La serie *Fluctuations* contiene también información sobre episodios especiales tales como avances rápidos de glaciares, erupciones de volcanes revestidos de glaciares, reventones de lagos cerrados por hielo o por morrenas, o episodios importantes de caída de rocas en zonas con glaciares (AICH(ICSI)/PNUMA/UNESCO 1998 y volúmenes anteriores). En 1989 se ofreció un informe de estado sobre el Inventario Mundial de Glaciares (WGI) (AICH(ICSI)/PNUMA/UNESCO, 1989). El WGMS mantiene el intercambio de datos con el Centro Mundial de Datos A (CMD-A) sobre Glaciología, de la CIUC, en Boulder, Colorado, EE.UU., y con la Base de Datos de Información sobre Recursos Mundiales (GRID) del PNUMA.

En la actualidad el WGMS gestiona la recién creada Red Mundial Terrestre de Glaciares (Haerberli y

* Departamento de Geografía de la Universidad de Zúrich, en Suiza.

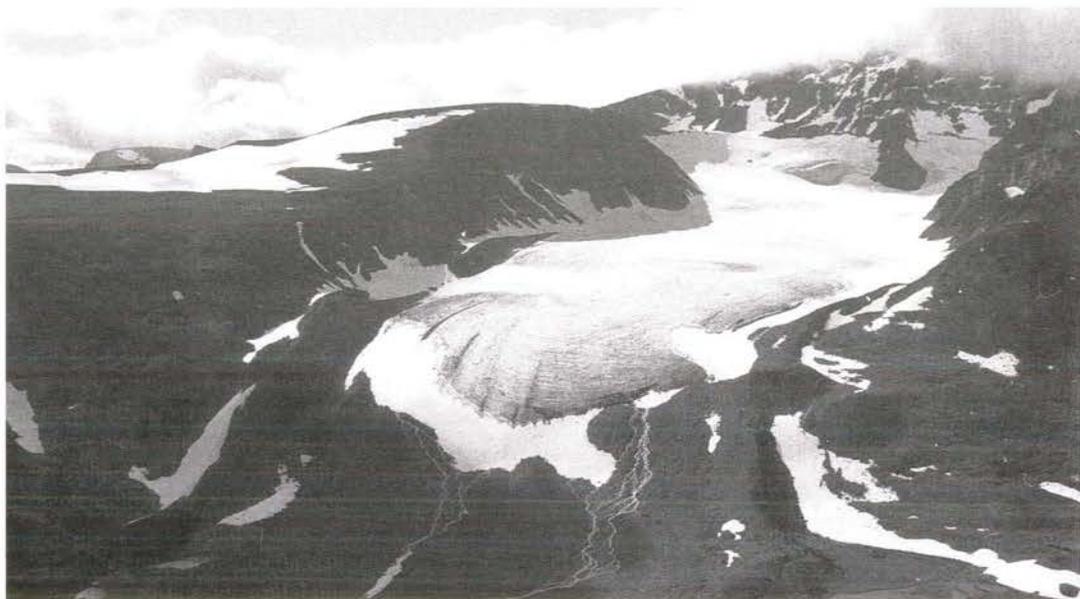


Figura 1 – El Storglaciären en el norte de Suecia tiene el registro más largo y más extenso de medidas directas de balance de masa; es un ejemplo de estudios de proceso detallados en el nivel del piso 2. (Fotografía tomada en julio de 2000 por P. Holmlund)

20

otros, 2000; OMM, 1997). Lo que sigue describe de forma breve la estrategia de vigilancia de esta red y ofrece resultados importantes obtenidos de la observación y de la modelización. En Haeberli y otros (1998; véase también <http://www.geo.unizh.ch/wgms/>) pueden encontrarse los antecedentes históricos, los conceptos básicos de la vigilancia de glaciares y una visión global de conjunto.

Objetivos

Los principales objetivos de las observaciones a largo plazo de los glaciares se relacionan principalmente con aspectos de conocimiento de procesos, validación de modelos, detección de cambio y evaluaciones de impactos.

El conocimiento de procesos ofrece la base para los modelos físicos. Permite una interpretación adecuada de las señales directas de los cambios de masa y de las indicaciones, medidas de forma mucho más fácil pero indirectamente, de los cambios acumulados en la longitud del glaciar. También ayuda a discriminar los glaciares de tipo marítimo templado con valores medios cálidos de la temperatura anual del aire a la altitud de la línea de equilibrio (por ejemplo, los casquetes de hielo y los glaciares de valle de la Patagonia y de Islandia, la cordillera occidental de Norteamérica o las montañas de Noruega y de Nueva Zelanda) de los glaciares politérmicos o fríos con medias de temperatura anual del aire frías en la altitud de la línea de equilibrio, que existen bajo condiciones climáticas polares secas y continentales (por ejemplo, en el norte de Alaska, en el Canadá ártico, en la Rusia subár-

tica, en partes de los Andes cerca del desierto de Atacama o en muchas cadenas montañosas de Asia Central). Estos últimos presentan estaciones de ablación mucho más cortas, una retroalimentación albedo-nieve más débil con gradientes de balance de masa más pequeños y movimientos de masa más débiles; generalmente terminan lejos por debajo del límite de los bosques, están asociados con el permafrost periglacial y reaccionan al aumento de la temperatura atmosférica por escorrentía a partir de la zona de ablación y calentamiento (sin perder masa) de la neviza fría en la zona de acumulación.

La validación y la verificación de modelos en la actualidad y en el futuro próximo se relacionan principalmente con la calibración y las pruebas en zonas remotas con poca o ninguna información meteorológica: la verificación de esquemas complejos de cambio en escenarios simulados por Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano (MCGAO) acoplados y por Modelos Climáticos Regionales (MCR) (Beniston y otros, 1997) constituye un centro de interés. Un parámetro importante para la aplicación potencial de la información del inventario de glaciares a la validación de los MCGAO y de los MCR es la elevación media de los glaciares como se muestra en los inventarios detallados de glaciares. Este parámetro, de fácil determinación, es una aproximación burda a la altitud de la línea de equilibrio (ELA). Como tal, está conectado con la continentalidad y, por consiguiente, con la precipitación anual, el gradiente de balance de masa (índice de actividad), el movimiento de masa, la temperatura dentro del glaciar y las relaciones entre el glaciar y el permafrost.

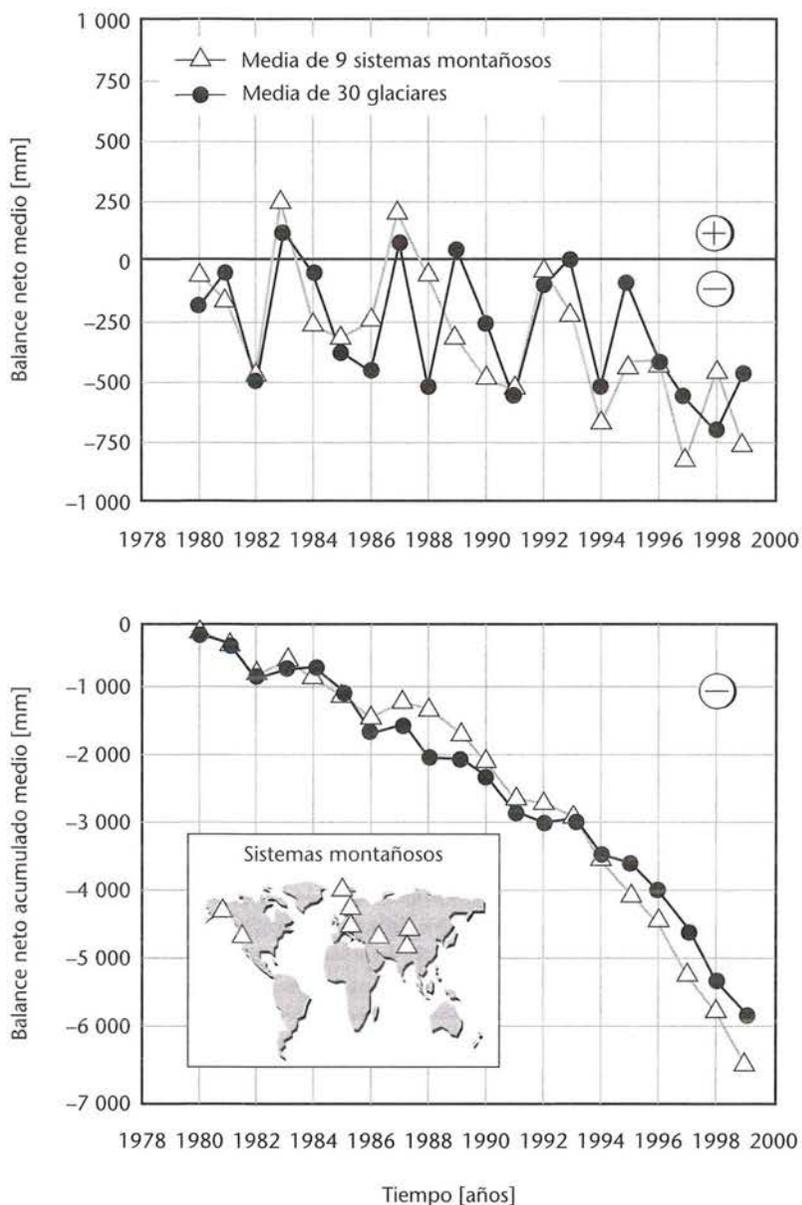


Figura 2 — Cambios de masa anuales (arriba) y acumulados (abajo) en glaciares (de *Glacier Mass Balance Bulletin*, 6)

Las estrategias de detección de cambio con respecto al aumento de la temperatura atmosférica originado por el forzamiento antropogénico del efecto invernadero incluyen índices seculares de cambio en los flujos de energía en la interfaz Tierra/atmósfera, la variabilidad natural (preindustrial) de estos flujos de energía, y las posibles tendencias de aceleración de los cambios en marcha y los posibles del futuro. Los cambios de los glaciares pueden determinarse de forma cuantitativa en varios intervalos de tiempo y se pueden expresar como flujos de energía correspondientes con su variabilidad a largo plazo. Esto permite una comparación directa con otros efectos de forzamiento

natural y de forzamiento antropogénico estimado por efecto invernadero.

Se pueden realizar evaluaciones de impacto a escala mundial y en distintas escalas regionales y locales, relacionadas con problemas como los recursos hídricos para riego en montañas semiáridas, la inestabilidad de las laderas en terrenos que han perdido sus glaciares o el deterioro del paisaje en relación con el turismo.

Estrategia

Dentro del marco de los sistemas de observación relacionada con el clima mundial, SMOT/SMOC, se desarrolló una Estrategia de Observación Jerárquica Global (GHOST) por “pisos” para utilizarla en todas las variables terrestres. De acuerdo con este sistema de pisos la representatividad de lo regional a escala mundial en el espacio y el tiempo de los registros relativos a masa y a extensión de glaciares debería valorarse mediante observaciones más numerosas de los cambios de longitud del glaciar, y también recopilando inventarios regionales de glaciares repetidos en intervalos de tiempo de unas pocas décadas — el tiempo

dinámico de respuesta típico de los glaciares de montaña—. Se espera la evolución con el tiempo de la correspondiente red mundial de localizaciones de glaciares llamada Red Terrestre Mundial para los Glaciares. Está estructurada para permitir análisis mundiales y regionales de cambios en los glaciares y para aprovechar las distintas intensidades de las medidas en las diferentes localizaciones. El papel inicial de la red de glaciares es detectar el cambio climático a largo plazo mediante sus consecuencias en los glaciares, en particular en el ámbito regional. Con respecto al sistema de pisos propuesto para las observaciones mundiales terrestres, se pre-

vén las localizaciones y los informes de observaciones siguientes (Haeberli y otros, 2000).

Piso 1 (transectos grandes): los detalles de los informes se determinarán más adelante

Se crean estos importantes lugares de experimentación intensiva para destacar medidas detalladas y el conocimiento de procesos a través de gradientes medioambientales. Deberían situarse destacando sobre todo la diversidad espacial. Una prioridad crítica consiste en abarcar la serie de los principales tipos de glaciares, pero la localización dentro de las regiones será oportunista. Aunque todos los datos y todos los descubrimientos de las investigaciones del Piso 1 son importantes para el SMOC/SMOT, se debería prestar una especial atención a las medidas a largo plazo. Los emplazamientos del Piso 1 abarcan grandes zonas experimentales y se necesitan varios ajustes antes de que se conviertan en parte de un programa de vigilancia a largo plazo. Las medidas a largo plazo serán un subconjunto de las que se realizaron durante el período de experimentación inicial, pero es precisa una planificación cuidadosa para la transición de los estudios de campo intensivos a una vigilancia continuada. Algunos de los glaciares observados (por ejemplo, los de los Pirineos, los Alpes, Escandinavia y Svalbard (en la región ártica)) ofrecen transectos grandes y podrían formar parte, más adelante, de las observaciones de Piso 1.

Piso 2 (estudios de balance de masa en glaciares extensivos y orientados a procesos dentro de las principales zonas climáticas): informe anual

Los lugares del Piso 2 posibilitan estudios de balance de masa en glaciares dentro de las principales zonas climáticas. De forma ideal, los emplazamientos de Piso 2 deberían estar situados cerca del centro del rango de condiciones medioambientales (aunque no necesariamente cerca del centro geográfico) de la zona de la que son representativos. Las localizaciones reales dependerán más de la infraestructura existente y de la viabilidad logística que de unas directrices espaciales estrictas, pero es necesario abarcar un amplio rango de zonas climáticas. Hay aproximadamente diez glaciares con investigación intensiva y con actividades de observación que representan lugares de Piso 2. El Storglaciären (Figura 1), en el norte de Suecia, es un ejemplo de dicho emplazamiento.

Piso 3 (cambios de masa en glaciares regionales dentro de los principales sistemas montañosos, es decir, redes de interés reducido): informe anual

Se pretende que los lugares de Piso 3 sean una muestra del rango de variación medioambiental presente

en los glaciares dentro de zonas o regiones climáticas. En este nivel no hay necesidad de representatividad espacial de los glaciares. Hay numerosos lugares que podrían ser de Piso 3 (unos cincuenta glaciares en los que se llevan a cabo estudios anuales de balance de masa) para reflejar modelos regionales de cambio de masa de glaciares dentro de los principales sistemas montañosos, pero puede que no estén distribuidos de forma óptima. Como consecuencia, algunos tipos de glaciar pueden tener más potencial como lugares de Piso 3 que los necesarios para el SMOC/SMOT. Otros tipos de glaciar pueden tener representación en muy pocos lugares, o ninguno y, por ello, el SMOC/SMOT tendrá que promover esfuerzos para aumentar y equilibrar la red. La Figura 2 resume los resultados de dichas medidas.

Piso 4 (observaciones a largo plazo de datos de cambio en la longitud de los glaciares en un mínimo de unos 10 lugares dentro de cada sistema montañoso, elegidos de acuerdo a su tamaño y a la respuesta dinámica): informes plurianuales (frecuencia a determinar)

En este nivel, la representatividad espacial es la mayor prioridad. Aproximadamente 800 glaciares en los que solo se mide la longitud son compatibles con el Piso 4. Debido a que no se suele acceder a ellos, pueden estar situados dondequiera que sea necesario asegurar la representatividad. Las localizaciones de los lugares del Piso 4 deberían basarse en consideraciones estadísticas. No es práctico prescribir un diseño estadístico para todos los países. Por lo tanto, las organizaciones participantes individuales deberían responsabilizarse de dichas localizaciones, pudiendo elegir un enfoque sistemático o aleatorio estratificado (o una combinación de ambos, dependiendo de la variable o del sistema glaciar). Para la red de glaciares, se elegirán observaciones a largo plazo de los cambios de longitud del glaciar en unos diez lugares dentro de cada sistema montañoso, de entre el conjunto existente de lugares en los que se controla la longitud del glaciar, de acuerdo a su tamaño y a la respuesta dinámica. En la Figura 3 se recogen series temporales seleccionadas de dichas observaciones.

Piso 5 (inventarios de glaciares repetidos a intervalos de tiempo de unas pocas décadas mediante teledetección por satélite): mejora continua y análisis de los datos existentes y de los disponibles recientemente

Para la mayor parte de los casos, estos campos incluyen inventarios de glaciares repetidos a intervalos de tiempo de unas pocas décadas mediante teledetección

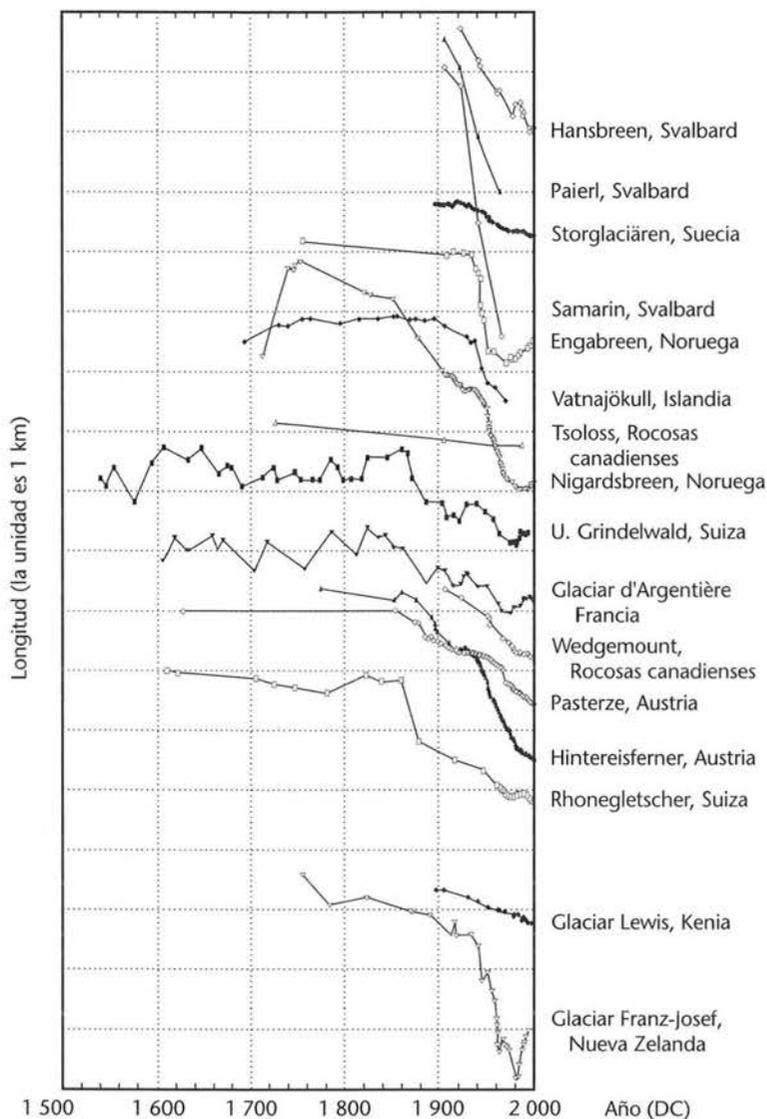


Figura 3 – Cambios de longitud acumulados de los glaciares en distintas partes del mundo (recopilado por J. Oerlemans a partir de datos del WGMS y de otras fuentes)

por satélite (Figura 4; Tabla 1). Las observaciones de satélite son generalmente para promedios de área (para áreas $< 10^2$ hasta $> 10^7$ m², dependiendo del sensor y de la variable del glaciar), mientras que las observaciones de tierra son valores puntuales. Algunas variables necesitan observaciones de superficie, incluso en el Piso 5. Para la puesta en marcha del mismo se necesita colaboración internacional, tanto en los componentes espaciales como de tierra, para realizar los conjuntos de datos necesarios. La preparación de los productos de datos a partir de medidas de satélite debe basarse en un programa a largo plazo de recogida y archivo de datos, generación de productos y control de calidad. Las observaciones de glaciares hechas desde instrumentos situados en el espacio se están

utilizando en distintas investigaciones. Sin embargo, la Vigilancia Geológica de EE.UU. (Flagstaff, Arizona), está iniciando el seguimiento rutinario de glaciares (Piso 5) utilizando el Radiómetro Espacial Avanzado de Emisión y Reflexión Térmicos (ASTER), junto con el Centro de Datos EROS, el Centro Nacional de Datos de Nieve y del Hielo y los centros regionales de análisis (Kieffer y otros, 2000).

Ahora hay una red de sesenta glaciares representativos de los Pisos 2 y 3. Este paso se corresponde estrechamente con el conjunto de datos publicado hasta la fecha por el *Glacier Mass Balance Bulletin* pero ahora garantizando los informes anuales en forma electrónica. Dicha muestra de glaciares de referencia ofrece información sobre los índices de cambio observados actualmente en la masa de los glaciares, las tendencias de aceleración correspondientes y los esquemas de distribución regional. Los cambios a largo plazo de la longitud de los glaciares se deben utilizar para evaluar la representatividad de la pequeña muestra de valores medidos durante

unas pocas décadas en relación con la evolución en una escala mundial y durante períodos de tiempo anteriores. Esto se puede hacer por (a) intercomparación entre curvas de cambio acumulado de longitud de glaciares a partir de glaciares geoméricamente similares, (b) aplicación de consideraciones de continuidad para cambios de ritmo asumidos entre condiciones de estado estacionarias alcanzadas después del tiempo de respuesta dinámica (Haerberli y Hoelzle 1995; Johannesson y otros, 1989); y (c) ajuste dinámico de los modelos de flujo dependientes del tiempo entre las geometrías a fecha actual con el observado cambio de longitud a largo plazo (Oerlemans y otros, 1998). Actualmente se están recogiendo nuevos inventarios detallados de glaciares en zonas que hasta ahora no

TABLA I

Análisis de los datos de inventarios de glaciares en los Alpes Europeos
(tomado de Haeberli y Hoelzle 1995, actualizado)

Presente y tendencias

Zona total cubierta por glaciares entre 1970 y 1980:	2 909 km ²
Volumen total de glaciares entre 1970 y 1980:	unos 130 km ³
Equivalente en nivel del mar entre 1970 y 1980:	unos 0,35 mm
Balance de masa promedio entre 1850 y 1970/1980:	0-0,25 m/año
Reducción de superficie entre 1850 y 1970/1980:	35-40%
Pérdida de masa entre 1850 y 1970/1980:	hacia el 50% de la de 1850
Balance de masa promedio entre 1980 y 1999:	-0,6 m/año
Pérdida de masa entre 1980 y 2000:	20-30% de la de 1970/1980

Simulación

Reducción de superficie entre 1970/1980 y 2025:	hacia el 30% de la de 1970/1980
Pérdida de masa entre 1970/1980 y 2025:	hacia el 50% de la de 1970/1980
Reducción de superficie entre 1970/1980 y 2100:	entre el 80 y el 90% de la de 1970/1980
Pérdida de masa entre 1970/1980 y 2100:	entre el 90 y el 95% de la de 1970/1980

24

estaban cubiertas o como una repetición de inventarios anteriores, para compararlos. El lanzamiento del programa ASTER/GLIMS ha facilitado enormemente esta tarea. Se debe combinar la teledetección en distintas escales (imágenes de satélite, fotogrametría aérea) y tecnologías SIG con información digital del terreno (Kääb y otros, en imprenta; Paul y otros, en imprenta) para superar las dificultades de los inventarios preliminares obtenidos de los anteriores satélites (únicamente determinación del área) y para reducir los costes y el tiempo de la recopilación. De esta forma, sería viable alcanzar los objetivos de los sistemas mundiales de observación en los próximos años.

Condiciones y tendencias observadas

Se pueden usar las relaciones de escala de la dinámica continua de hielo para relacionar la distribución de las zonas de superficie, tal y como están contenidas en inventarios regionales de glaciares, con distribuciones mundiales y regionales de otras propiedades tales como volúmenes de glaciares o espesores característicos, velocidades de flujo o tiempos de respuesta (Bahr, 1997). Basándose en este enfoque, Meier y Bahr (1996) calcularon el número total (160 000), el área (680 000 km²), el volumen (180 000 km³) y el equivalente en nivel del mar (0,5 m) de los glaciares y de los casquetes de hielo de todo el mundo. También se puede evaluar la contribución relativa de las regiones climáticas polar, subpolar, marítima templada y continental templada. Dyurgerov y Meier (1997(a)) analizaron las características de la red de observación del balance de masa con respecto a la distribución mundial de glaciares y observaron las principales categorías de tamaño y las áreas con poca o nula representación, por ejemplo, el Karakorum, la meseta del Tíbet, el Kunlun, el

sudeste del Pamir y el Hindukush, y los campos de hielo de la Patagonia (véase también el detallado análisis estadístico presentado por Cogley y Adams, 1998).

Las tendencias en las series temporales largas para la longitud acumulada de glaciares y los cambios de volumen representan una evidencia convincente del rápido cambio climático a escala mundial, ya que la retirada de glaciares de montaña durante el siglo XX está afectando a todo el mundo. La retirada total de los terminales de glaciares se mide comúnmente en kilómetros para glaciares grandes y en cientos de metros para los pequeños (Figura 3). Los ritmos promedios característicos de adelgazamiento de los glaciares (Figura 2) son de unos pocos decímetros por año para glaciares templados y entre centímetros y un decímetro por año para los glaciares de zonas continentales con áreas de neviza por debajo de la temperatura de fusión. Sin embargo, la homogeneidad aparente de la señal en la escala de tiempo secular contrasta con la gran variabilidad en las escalas local y regional y a lo largo de períodos de tiempo más cortos, de años a décadas (Letréguilly y Reynaud, 1990). Se ha informado de períodos intermitentes de ganancia de masa y de avance de glaciares durante la segunda mitad del siglo XX en distintas cadenas montañosas, en especial en zonas de precipitación abundante tales como el sur de Alaska, Noruega y Nueva Zelanda. Por otra parte, los glaciares de los Alpes europeos han perdido alrededor de un 30-40 por ciento en extensión de superficie con glaciares y en torno al 50 por ciento de volumen de hielo desde mediados del siglo XIX, al final de la "Pequeña Era Glacial" (Tabla I). La reciente aparición de un hombre de la Edad de Piedra en hielo frío en una sierra de elevada altitud de los Alpes Oetzal ilustra de forma sorprendente que la extensión del

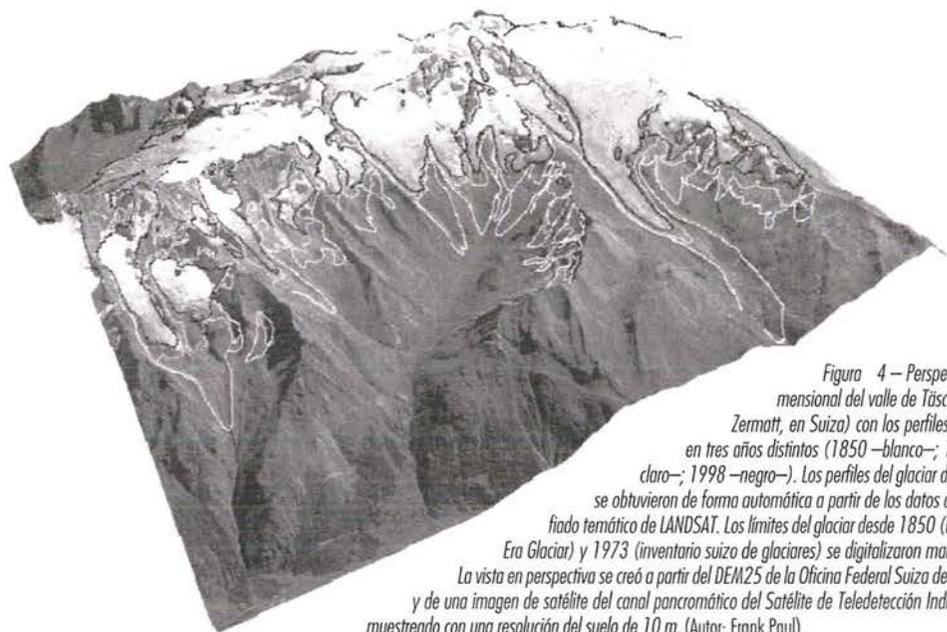


Figura 4—Perspectiva tridimensional del valle de Tösch (cerca de Zermatt, en Suiza) con los perfiles del glaciar en tres años distintos (1850—blanco—; 1973—gris claro—; 1998—negro—). Los perfiles del glaciar desde 1998 se obtuvieron de forma automática a partir de los datos de cartografiado temático de LANDSAT. Los límites del glaciar desde 1850 (La Pequeña Era Glaciar) y 1973 (inventario suizo de glaciares) se digitalizaron manualmente. La vista en perspectiva se creó a partir del DEM25 de la Oficina Federal Suiza de Topografía y de una imagen de satélite del canal pancromático del Satélite de Teledetección Indio (IRS-1C) muestreado con una resolución del suelo de 10 m. (Autor: Frank Paul)

hielo alpino es hoy, probablemente, menor que durante los últimos 5 000 años (Haeberli y otros, 1999).

El problema principal para interpretar la evolución del balance de masa de los glaciares a lo largo del mundo está relacionado con los métodos para promediar y extrapolar a grandes zonas, sin medidas, las pequeñas muestras de valores de los que se informa en unas pocas zonas del mundo. Recientemente se han llevado a cabo varios intentos para aplicar (a) todas las medidas disponibles de balance de masa, (b) glaciares seleccionados con registros a largo plazo, (c) ponderación de áreas utilizando datos de inventarios de glaciares, (d) promedios de glaciares de referencia en numerosas cadenas montañosas, (e) interpolación espacial basada en datos mundiales de extensión de hielo y correlaciones entre series temporales de balance de masa, (f) vuelos de altimetría láser y mediciones con GPS sobre líneas de flujo seleccionadas para comparar con cambios geométricos integrados, y (g) cambios acumulados de longitud de glaciares combinados con datos de inventarios de glaciares. Los resultados de los distintos esquemas de interpolación se desvían entre sí ligeramente (por lo general $< 0,1$ m por año) donde se les puede comparar, confirmando todos el orden de magnitud (unos pocos decímetros por año) que caracteriza la pérdida de grosor de hielo anual a lo largo del mundo durante las últimas décadas. Dyurgerov y Meier (1997(b)) descubrieron un aumento reciente en la pérdida de hielo en estrecha correlación con las anomalías mundiales de la temperatura del aire. Los glaciares de regiones climáticas de tipo continental parecen haber decrecido intensamente, mien-

tras que los glaciares de tipo marítimo de zonas húmedas muestran una importante variabilidad temporal y regional, observándose tendencias de crecimiento recientes en zonas en torno al Atlántico Norte. Cogley y Adams (1998) confirman la correlación entre los promedios mundiales de temperatura del aire y el balance de masa de los glaciares. En su recopilación, las pérdidas anuales de grosor aumentaban notablemente desde casi cero en 1960-1970 a cerca de 0,3 m en 1980-1990. Durante las dos últimas décadas, los balances de masa de glaciares en los Alpes europeos fueron mucho más negativos que el promedio secular medio (unos pocos decímetros por año) como se obtiene comparando con mapas históricos de alta precisión y a partir del cambio acumulado de longitud de glaciares (Tabla 1): de hecho, la cubierta de hielo puede haber perdido alrededor del 20-30 por ciento de su volumen estimado en la década de los setenta. Los análisis preliminares de la última información obtenida de los satélites acerca de las superficies de glaciares en los Alpes suizos revelan una pérdida promedio de casi el 20 por ciento solo entre 1985 y 2000 (Kääb y otros, en imprenta), un cambio más rápido incluso que el simulado con anterioridad para los Alpes europeos para un escenario del año 2025 (Tabla 1; Haeberli y Hoelzle, 1995).

Los balances de masa acumulados de los que se informa para glaciares individuales reflejan no solo la variabilidad climática regional sino también marcadas diferencias en la sensibilidad de los glaciares observados. Hay una importante variabilidad espacial y temporal a lo largo de períodos de tiempo cortos: los

glaciares alrededor del Atlántico Norte, por ejemplo, mostraban un incremento de masa importante durante los últimos años y las sensibilidades de los glaciares de climas marítimos son, por lo general, superiores en un orden de magnitud a la sensibilidad de los glaciares de montañas áridas. Un análisis estadístico indica que las correlaciones espaciales tienen, por lo general, un rango crítico de unos 500 km (Cogley y Adams, 1998) y tienden a aumentar marcadamente con el crecimiento de la longitud de los intervalos de tiempo considerados (como sucede con las variables meteorológicas en general): tendencias de entre décadas y siglos son comparables más allá de la escala de las cadenas montañosas individuales, siendo la continentalidad del clima el principal factor de clasificación (Létréguilly y Reynaud, 1990) además de efectos hipsométricos individuales.

Perspectivas para el futuro

Aunque todavía no se dispone de un conocimiento detallado de los procesos involucrados, no se puede seguir excluyendo la posibilidad de que las influencias antropogénicas sobre la atmósfera podrían representar ahora —y por primera vez— un importante factor de contribución al encogimiento observado de los glaciares (Haeberli y otros, 1999). En escenarios razonables en los que se produce un calentamiento acelerado durante el siglo XXI, muchas cadenas montañosas podrían perder importantes partes de su cubierta de glaciares. Debido a su espesor, los glaciares grandes seguirían existiendo, ciertamente, en el siglo XXII. Sin embargo, los glaciares pequeños con alcance altitudinal limitado pueden desaparecer muy rápidamente y, en algunos lugares, cambiar el paisaje de forma dramática, además del ciclo hídrico (estacionalidad de la escorrentía) y los procesos geomorfodinámicos (estabilidad de laderas) de muchas zonas montañosas.

El Tercer Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2001, en especial el Capítulo 11) estima la contribución al nivel del mar de los glaciares y de los casquetes de hielo que desaparezcan a lo largo del siglo XXI en un orden que va desde unos pocos centímetros a uno o dos decímetros. Tales valores, obtenidos de los MCGAO acoplados representan entre el 10 y el 40 por ciento de la masa total contenida en la actualidad en los glaciares de montaña y en los casquetes de hielo. Sin embargo, dos aspectos físicos de importancia fundamental siguen esperando ser incluidos en las simulaciones y evaluaciones correspondientes: el efecto de la temperatura neviza/hielo y el efecto tamaño/dinámica. El calentamiento de la neviza fría está relacionado con el intercambio de calor latente implicado en la percolación y recongelación del agua fundida superficial; este proceso hace que el índice

de calentamiento de la neviza sea considerablemente mayor que el correspondiente cambio de temperatura del aire. Una vez que se templó la neviza, comienza a producirse la pérdida de masa con un calentamiento continuado del aire. Esto significa que la sensibilidad del balance de masa en grandes zonas de neviza —todavía frías en este momento— en el Ártico canadiense o en Asia central, etc., podría (a) aumentar mucho durante las próximas décadas y, por esa razón, (b) reducir las diferencias regionales de sensibilidad. Los glaciares grandes y relativamente llanos del entorno del Golfo de Alaska o de la Patagonia, que producen la contribución más importante de agua fundida al aumento del nivel del mar, tienen tiempos de respuesta dinámica superiores a la escala secular y no pueden ajustarse de forma dinámica, por retraimiento de la lengua, al forzamiento rápido, sino más bien consumirse con poca pérdida de superficie. Esto, a su vez, hace que se vuelva importante la retroalimentación balance de masa/altitud. Un balance de superficie acumulado de alrededor de unos 50-100 m dentro de un siglo, más o menos, podría, realmente, aumentar con facilidad la sensibilidad del balance de masa en un factor de dos, doblando por tanto la disminución de superficie y originando con ello un efecto de fuga. El crecimiento correspondiente del tamaño del área de ablación en dichos glaciares compensaría considerablemente, con probabilidad, el efecto de la disminución de las superficies totales en glaciares pequeños de otros lugares. Esto significa que es probable que la sensibilidad de los principales productores de agua fundida aumente intensamente durante las próximas décadas y fortalezca, de acuerdo con ello, las diferencias regionales. Sin embargo, se reducirían en cierta medida los efectos sobre el nivel del mar por el hecho de que partes importantes de algunos grandes productores de agua fundida están por debajo del nivel del mar.

Wallinga y Van de Val (1998) muestran que el Rhonegletscher —el histórico lugar en el que comenzó la vigilancia moderna de los glaciares— podría desaparecer en algunas décadas si continúa la tendencia observada en la actualidad. El estudio extensivo de modelización de Oerlemans y otros (1998) confirma ciertamente que la mayor parte de los glaciares con redes de observación extensivas y con abundantes datos de entrada para la modelización podrían, de hecho, desaparecer dentro de unas pocas décadas si continúa, o incluso se acelera, el calentamiento. Aún sin datos de mediciones, las generaciones futuras pueden reconocer claramente qué escenario de cambio climático mundial se está produciendo mirando simplemente la evolución de los glaciares de montaña.

Referencias:

- BAHR, D. B., 1997: Global distribution of glacier properties: A stochastic scaling paradigm. *Water Resources Research* 33/7, 1669-1679.
- BENISTON, M., W. HAEBERLI, N. HOELZLE y A. TAYLOR, 1997: On the potential use of glacier and permafrost observations for verification of climate models. *Annals of Glaciology*, 25, 400-406.
- COGLEY, J. G. y W. P. ADAMS, 1998: Mass balance of glaciers other than the ice sheets. *Journal of Glaciology*, 44/147, 315/325.
- DYURGEROV, M. B. y M. F. MEIER, 1997 (a): Mass balance of mountain and subpolar glaciers: a new global assessment for 1961-1990. *Arctic and Alpine Research*, 29/4, 379-391.
- DYURGEROV, M. B. y M. F. MEIER, 1997 (b): Year-to-year fluctuations of global mass balance of small glaciers and their contribution to sea level. *Arctic and Alpine Research*, 29/4, 392-402.
- FOREL, F.-A., 1895: Les variations périodiques des glaciers. Discours préliminaire. *Archives des Sciences physiques et naturelles*, Ginebra, XXXIV, 209-229.
- HAEBERLI, W. y M. HOELZLE, 1995: Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology*, 21, 206-212. Traducción al ruso en: *Data of Glaciological Studies*, 82, Moscú, 116-124.
- HAEBERLI, W., M. HOELZLE y S. SUTER (Eds.), 1998: Into the second century of worldwide glacier monitoring: prospects and strategies. *Studies and Reports in Hydrology*, 56, UNESCO, París.
- HAEBERLI, W., R. FRAUENFELDER, M. HOELZLE y M. MAISCH, 1999: On rates and acceleration trends of global glacier mass changes. *Geografiska Annaler*, 81 A, 585-591.
- HAEBERLI, W., R. BARRY y J. CIHLAR, 2000: Glacier monitoring within the Global Climate Observing System. *Annals of Glaciology* 31, 241-246.
- IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO [en español, AICH(ICSU)/PNUMA/UNESCO], 1989: World glacier inventory — status 1998 (W. HAEBERLI, H. BOSCH, K. SCHERLER, G. ØSTREM y C. C. WALLÉN (Eds.)), Nairobi.
- IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO [en español, AICH(ICSU)/PNUMA/UNESCO], 1998: *Fluctuations of Glaciers 1990-1995* (W. HAEBERLI, M. HOELZLE, S. SUTER y R. FRAUENFELDER (Eds.)), Zurich.
- IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO/WMO [en español, AICH(ICSU)/PNUMA/UNESCO/OMM], 2001: *Glacier Mass Balance Bulletin*, 6 (W. HAEBERLI, M. HOELZLE y R. FRAUENFELDER (Eds.)), Servicio Mundial de Vigilancia de Glaciares, Universidad y ETH de Zúrich.
- IPCC, 2001: Tercer Informe de Evaluación. Grupo de Trabajo I. Cambridge University Press.
- KIEFFER, H., J. S. KARGEL, R. BARRY, R. BINDSCHADLER, M. BISHOP, D. MACKINNON, A. OHMURA, B. RAUP, M. ANTONINETTI, J. BAMBER, M. BRAUN, I. BROWN, D. COHEN, L. COPLAND, J. DUEHAGEN, R. V. ENGESET, B. FITZHARRIS, K. FUJITA, W. HAEBERLI, J. O. HAGEN, D. HALL, M. HOELZLE, M. JOHANSSON, A. KAEAEB, M. KOENIG, V. KONOVALOV, M. MAISCH, F. PAUL, F. RAU, N. REEH, E. RIGNOT, A. RIVERA, M. DE RUYTER DE WILDT, T. SCAMBOS, J. SCHAPER, G. SCHARFEN, J. SHRODER, O. SOLOMINA, D. THOMPSON, K. VAN DER VEEN, T. WOHLLEBEN y N. YOUNG, 2000: New eyes in the sky measure glaciers and ice sheets. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 81/24, 13 de junio, 270-271.
- JOHANNESON, T., C. F. RAYMOND y E. D. WADDINGTON, 1989: Time-scale for adjustment of glaciers to changes in mass balance. *Journal of Glaciology*, 35/121, 355-369.
- KÄÄB, A., F. PAUL, M. MAISCH, M. HOELZLE y W. HAEBERLI (en imprenta): The new remote sensing-derived Swiss Glacier Inventory: II. Primeros resultados. *Annals of Glaciology*, 34.
- LETREUILLY, A. y L. REYNAUD, 1990: Space and time distribution of glacier mass balance in the northern hemisphere. *Arct. Alp. Res.*, 22/1, 43-50.
- MEIER, M. F. y D. B. BAHRE, 1996: Counting Glaciers: Use of Scaling Methods to Estimate the Number and Size Distribution of the Glaciers on the World. C. S. Colbeck (Ed.), *Glaciers, Ice Sheets and Volcanoes: a Tribute to Mark F. Meier. CRREL Special Report*, 96-27, 1-120.
- OERLEMANS, J., B. ANDERSON, A. HUBBARD, P. HUYBRECHTS, T. JOHANNESON, W. H. KNAP, M. SCHMEITS, A. P. STROEVEN, R. S. W. VAN DE WAL, J. WALLINGA y Z. ZUO, 1998: Modelling the response of glaciers to climate warming. *Climate Dynamics*, 14, 267-274.
- PAUL, F., A. KÄÄB, M. MAISCH, T. KELLENBERGER y W. HAEBERLI (en imprenta): The new remote sensing-derived Swiss Glacier Inventory: I. *Methods. Annals of Glaciology*, 34.
- WMO [OMM], 1997: GCOS/GTOS plan for terrestrial climate-related observation. GCOS 32, versión 2.0. WMO-TD-796, UNEP/DEIA/TR 97-7.

