

LAS FLUCTUACIONES DE LOS GLACIARES Y LA DETECCION DEL CAMBIO CLIMATICO; ELEMENTOS OPERATIVOS DE UNA ESTRATEGIA DE VIGILANCIA EN TODO EL MUNDO

Por Wilfried HAEBERLI*

Introducción

Los aspectos centrales relacionados con la detección del cambio climático debido a la perturbación antropogénica del efecto invernadero incluyen:

- ritmo secular del cambio de los flujos de energía entre la Tierra y la atmósfera;
- variabilidad natural (preindustrial) de estos flujos de energía; y
- posibles tendencias en la aceleración de los cambios en curso y de los potenciales cambios futuros.

Las fluctuaciones observadas en los glaciares proporcionan una información importante acerca de los tres aspectos. De hecho, las fluctuaciones de los glaciares en zonas montañosas frías son debidas a cambios en el balance de masa y energía en la superficie de la Tierra. El ritmo y la magnitud de dichos cambios en los glaciares pueden ser determinados cuantitativamente en diferentes intervalos de tiempo y pueden expresarse mediante los flujos de energía correspondientes con su variabilidad a largo plazo. Esto permite una comparación directa con otros efectos de la perturbación natural y estimada del efecto invernadero antropogénico. Además, los cambios de los glaciares están ligados al cambio de las condiciones atmosféricas mediante filtros importantes, tales como las funciones notables de la memoria y del realce. Como consecuencia, los cambios en los glaciares están entre las señales más claras de las continuas tendencias del calentamiento existente en la naturaleza. Tanto el balance de masa de los glaciares, como señal directa e inmediata, como el cambio de longitud de los glaciares, como señal indirecta y aplazada (figura 1), deberán aplicarse combinadas para el control mundial de los glaciares y del sistema climático (Haeberli y col., 1989; Wood, 1990). A continuación se explica brevemente la estrategia básica para las obser-

vaciones y los análisis de datos coordinados internacionalmente, empleando el ejemplo bien documentado de los glaciares alpinos como ilustración (véase Haeberli, 1994).

La recolección a escala mundial de observaciones normalizadas de los cambios de masa, volumen, superficie y longitud de los glaciares con el tiempo (fluctuaciones de los glaciares), junto con la información estadística de la distribución espacial de la superficie de hielo perenne (inventario de los glaciares) se coordina actualmente por el Servicio Mundial de Control de los Glaciares (SMCG). Las tareas del SMCG son:

- continuar la recolección y publicación de datos normalizados de las fluctuaciones de los glaciares, con intervalos de cinco años;
- completar y modernizar continuamente el inventario de los glaciares del mundo;
- publicar los resultados de las medidas de la variación de masa de los glaciares de referencia seleccionados con intervalos de dos años;
- inclusión de las observaciones por satélite de los glaciares muy remotos, con el fin de conseguir una cobertura total; y
- evaluación periódica de los cambios que actualmente están teniendo lugar.

Este trabajo se efectúa actualmente por el LHHG del IFT de Zurich bajo los auspicios de la Comisión Internacional de Nieve y Hielo de la AICH, la Federación de Servicios de Análisis de Datos Astronómicos y Geofísicos (del CIUC), el Sistema Mundial de Control del Medio Ambiente (del PNUMA) y la Sección de Ciencias del Agua de la UNESCO. Se publican periódicamente datos del SMCG (por ejemplo AICH(CINH)/PNUMA/UNESCO, 1989; 1993(a); 1993(b); véase también PNUMA, 1992) y los incluidos en el Centro Mundial de Datos para la Glaciología (Boulder/Colorado) y la Base de Datos Mundial de Información de Recursos.

* Laboratorio de Hidráulica, Hidrología y Glaciología (LHHG), del Instituto Federal de Tecnología (IFT), ETH-Zentrum. CH-8092 Zurich, Suiza

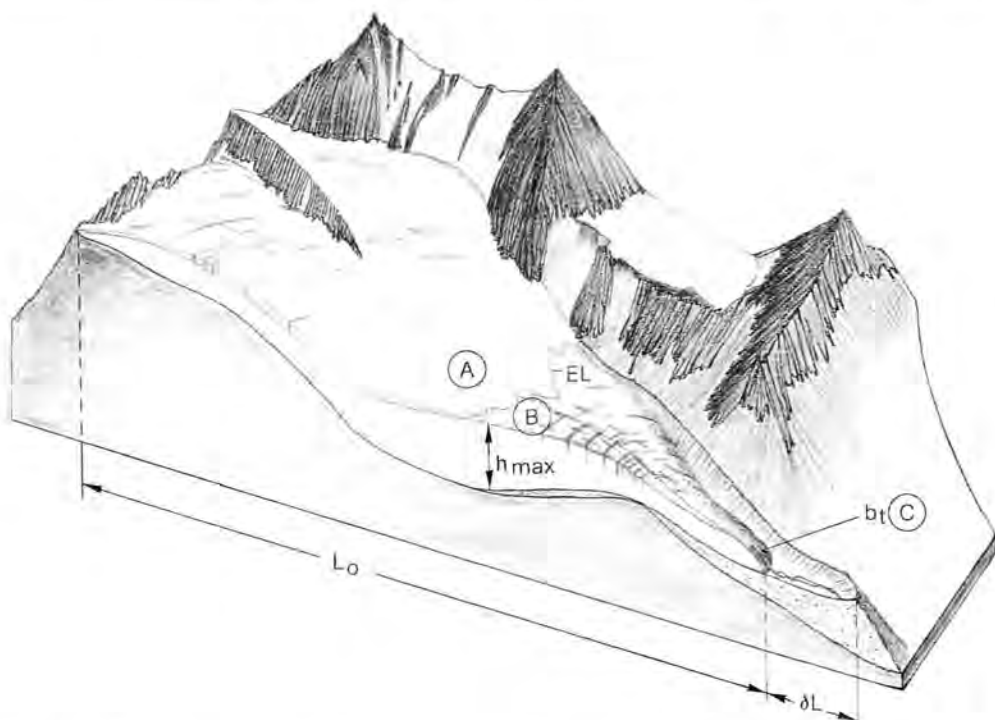
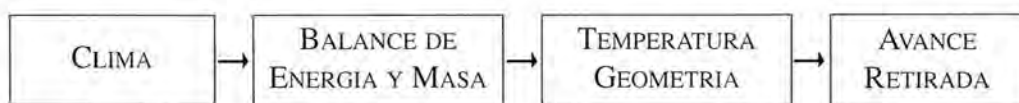


Figura 1 — Diagrama esquemático de los procesos que relacionan al clima y a los glaciares con los parámetros más importantes utilizados para cuantificar los cambios de masa a largo plazo a partir de los cambios acumulativos de longitud (avance/retirada) de las lenguas de los glaciares (véase el texto para la explicación de los símbolos; A, B, C = mínimo conjunto de postes (o pozos) necesario para la determinación del balance de masa específica según el modelo lineal de balance y los diagramas repetidos)

Los principios que se apliquen al control mundial de los glaciares tienen que ser físicamente correctos y tan sencillos como sea posible. La consecución de ambos requisitos no es trivial aunque de importancia fundamental para la supervivencia de las observaciones a largo plazo de los glaciares.

Balance de masa de los glaciares

En las zonas de ablación y en las templadas de descarga (que predominan en las latitudes/altitudes más bajas y en regiones con condiciones climáticas lluviosas), el calentamiento atmosférico produce principalmente cambios en la masa y en la geometría de los glaciares. Un supuesto cambio δ en la altitud de la línea de equilibrio (ELA = altitud en un glaciar en la que la adición anual [acumulación de masa] está compensada exactamente por la desaparición anual [ablación de la masa]), induce un inmediato cambio del valor de la masa específica [b = cambio total de la masa dividido por la superficie del glaciar]. El cambio resultante en el

balance de masa específica δb es el producto del desplazamiento de la altitud de la línea de equilibrio δELA por el gradiente del balance de masa con la altitud db/dH ponderado por la distribución del área de la superficie del glaciar en función de la altitud (hipsometría). La hipsometría representa la parte local/individual o topográfica de la sensibilidad del glaciar, mientras que el gradiente del balance de masa refleja principalmente la parte regional o climática (Kuhn, 1990). Como el gradiente del balance de masa tiende a aumentar al aumentar la pluviosidad (Kuhn, 1981), la sensibilidad del balance de la masa del glaciar con respecto a cambios en la altitud de la línea de equilibrio es generalmente mucho más grande en regiones con condiciones climáticas húmedas y marítimas que con secas y continentales (Oerlemans, 1993(a)). Los cambios acumulativos de masa dan lugar a cambios en el espesor del hielo, lo cual, a su vez, ejerce una realimentación positiva sobre el balance de masa y, al mismo tiempo, influye en la redistribución dinámica de masa por el flujo del glaciar.

Las medidas a largo plazo del balance de masa combinan óptimamente el método geodésico y fotogramétrico con el directo glaciológico con el fin de determinar los cambios en volumen/masa de todo el glaciar (representaciones repetidas) con gran definición temporal (mediciones anuales de postes y hoyos). Los fines primarios de tales observaciones sistemáticas son normalmente para:

- determinar el balance específico anual como una señal regional; y
- comprender detalladamente los procesos de intercambio de energía y de masa en la superficie del glaciar.

El balance específico anual como señal regional puede obtenerse más económicamente empleando determinaciones geodésico/fotogramétricas del cambio de volumen, repetidas a intervalos de tiempo desde varios años a unos pocos decenios (tabla I) con o sin observaciones anuales de un mínimo de tres postes índice seleccionados estratégicamente (figura 1): se deben controlar dos postes cerca de la línea de equilibrio, en donde el área de la superficie es mayor y uno cerca del frente del glaciar, para determinar los gradientes de la ablación e interpretar cuantitativamente cambios en la longitud sobre amplios periodos de tiempo, como se explica más abajo. La interpretación de los datos puede hacerse aplicando una versión simplificada del modelo de balance lineal (Reynaud y col., 1986), que supone que la variación del balance de masa en cada punto del glaciar es proporcional a la variación del balance de masa de todo el glaciar. Esta idea es una herramienta de trabajo importante, basada en la experiencia básica de que la distribución espacial del balance de masa permanece con frecuencia extremadamente similar de año en año; la variabilidad temporal de db/dH es muy pequeña, cercana a la altitud media de la línea de equilibrio, en donde el

área de la superficie y por lo tanto la influencia del balance de masa total del glaciar son más grandes. El tercer poste recomendado para la red mínima de postes debiera instalarse en el final del glaciar con el fin de mantener una comprobación de la exactitud del modelo de balance lineal y para introducir las correcciones adecuadas, si son necesarias (véase Kuhn, 1984; Oerlemans y Hoogen-dorn, 1989).

Los estudios del balance de masa para mejorar la comprensión del proceso con respecto a los flujos de energía y de masa en las superficies del glaciar requieren extensas redes de postes que deben ser mantenidas y observadas estacionalmente tanto al final del periodo de acumulación (invierno) como al de ablación (verano). Aun con grandes densidades de postes y pozos, los valores absolutos del cambio de volumen/masa deben ser cuidadosamente calibrados mediante diagramas geodésicos/fotogramétricos repetidos, puesto que la representatividad de la red de control (postes/pozos) en relación con todo el glaciar no puede, de otro modo, ser valorada fácilmente: las zonas agrietadas, en particular, con sus superficies aumentadas, tienden a escapar al análisis glaciológico directo. Las observaciones del balance de masa orientadas hacia los procesos son, por lo tanto, costosas y muy lentas. En consecuencia, se debieran concentrar en los efectos característicos de la variabilidad climática. Los gradientes del balance de masa y sus cambios en el tiempo con condiciones climáticas marítimas continentales, tropicales, polares, etc., así como sus evoluciones a largo plazo con posibles cambios climáticos, son de un interés primario en relación con los modelos y las consideraciones bidimensionales (Oerlemans, 1993(b)). La distribución tridimensional de la configuración del balance de masa en función de las componentes del balance de energía tales como las nevadas, la redistribución de la nieve, la radiación solar, el flujo de calor sensible, etc., se

TABLA I
Cambios seculares de masa de los glaciares alpinos determinados de modo geodésico o fotogramétrico

Glaciar	Período de observación	Coordenadas	Mediana de elevación (m.s.n.m.)	Superficie (km ²)	b w.e. m. a ⁻¹
Rhone	1882-1987	4637/0824	2940	17,38	-0,25
Vernagt	1889-1979	4653/1049	3228	09,55	-0,19
Guslar	1889-1979	4651/1048	3143	03,01	-0,26
N Schnee	1892-1979	4725/1059	2690	00,39	-0,35
S Schnee	1892-1979	4724/1058	2604	00,18	-0,57
Hintereis	1894-1979	4648/1046	3050	09,70	-0,41

Fuentes: Chen y Fink (1990), Finsterwalder y Rentsch (1990), AICH/CINH/PNUMA/UNESCO (1988).

TABLA IIA

Comparación de los cambios de masa seculares medidos de un glaciar (ca.1890/1920-1980) con las estimaciones por el cambio acumulativo de longitud

Glaciar	Glaciar Rhone	Hintereisferner
Promedio medido b (m w.e. a^{-1})	-0,25	0,41
Longitud total hoy (km)	10,0	7,7
Espesor máximo estimado hoy (m)	500	400
Ablación en el morro (m w.e. a^{-1})	5,5	5
Tiempo estimado de respuesta (a)	90	80
Cambio de longitud (km)	1,0	1,2
Cambio deducido del balance δb (m w.e. a^{-1})	-0,55	-0,78
Promedio deducido b (m w.e. a^{-1})	-0,28	-0,39

TABLA IIB

Pérdida secular de masa del Gran Glaciar Aletsch, estimada a partir del cambio acumulativo de longitud

Espesor máximo hoy (m)	900
Ablación en el morro (m w.e. a^{-1})	12
Tiempo estimado de respuesta (a)	75
Longitud total hoy (km)	24
Cambio de longitud (km, ca. 1915-1990)	1,5
Cambio deducido del balance δb (m w.e. a^{-1})	-0,75
Promedio deducido b (m w.e. a^{-1})	-0,38

Fuentes: AELLEN (1979); Funk (1985); HAEBERLI y HOELZLE (en preparación); AICH/CINH/PNUMA/UNESCO (1988; 1991; 1993(b)); AICH/CINH/UNESCO (1985) y datos no publicados de LHHG/IFT de Zurich.

investigan actualmente con modelos digitales de terreno y los correspondientes cálculos de radiación solar, temperatura del aire, etc. (Escher-Wetter, 1985; Funk, 1985). La finalidad última de tales investigaciones es la de parametrizar los glaciares no medidos y así, describir mejor los cambios que tienen lugar a una escala mundial.

Se han medido los balances seculares de masa en seis glaciares de los Alpes europeos mediante repetidos diagramas de precisión, desde fines del siglo XIX (tabla I). La pérdida de masa anual promediada sobre todo el período varía entre 0,2 y 0,6 metros de agua equivalente. Estos valores reflejan un flujo de energía suplementario hacia la superficie de la Tierra de unos pocos $W m^{-2}$ que, por lo tanto, corresponde aproximadamente a la perturbación antropogénica estimada del efecto invernadero (Grupo Intergubernamental de Expertos en el Cambio Climático, 1992; PNUMA, 1994). La pérdida total de espesor en los hielos alpinos desde fines de la Pequeña Edad del Hielo se mide en decenas de metros.

Cambio de longitud de los glaciares

La compleja cadena de procesos dinámicos que ligán el balance de masa de un glaciar con los cam-

bios de longitud se simula en la actualidad numéricamente solo para unos cuantos glaciares individuales, que han sido estudiados con gran detalle (véase, por ejemplo, Kruss, 1983; Oerlemans y Fortuin, 1992; Greuell, 1992). La mayoría de las complicaciones desaparecen si los intervalos de tiempo analizados son suficientemente grandes. Después de un cierto tiempo de reacción t_r , que sigue a una variación en el balance de masa, la longitud del glaciar L_0 empieza a cambiar y alcanza finalmente un nuevo equilibrio $L_0 + \delta L$ después del tiempo de respuesta t_a . Después de la respuesta completa, la ecuación de continuidad exige (Nye, 1960) que:

$$\delta L = L_0 \cdot \delta b / b_t$$

en donde b_t = ablación (anual) en el final del glaciar. Esto significa que para una variación dada en el balance de masa, el cambio de la longitud es una función de la longitud inicial del glaciar y que la variación en el balance de masa del glaciar puede ser deducida cuantitativamente del cambio de longitud observado fácilmente y de las estimaciones de b_t en función de ELA y de $\delta b / \delta H$. El tiempo de respuesta t_{resp} de un glaciar, depende de la relación entre el espesor máximo ($h_{m\max}$) y su ablación anual en su extremo (Johannesson y col., 1989):

$$t_{resp} = h_{m\max} / b_t$$

Los valores correspondientes en los glaciares alpinos son típicamente de varios decenios (figura 3). Durante el tiempo de respuesta el balance de masa b se ajustará a cero de nuevo, de modo que el balance de masa medio $\langle b \rangle$ es próximo a $1/2 \cdot \delta b$. Los cambios seculares de masa estimados de este modo pueden ser comparados directamente con las escasas series de medidas a largo plazo del balance de masa existente en los Alpes (tabla II): el cambio acumulativo en la longitud del glaciar es evidentemente un fenómeno clave para evaluar la representatividad en el espacio y en el tiempo de los pocos balances de masa medidos de los glaciares.

La notable característica de señal de los cambios de la longitud del glaciar aparecen inmediatamente observando los valores acumulativos y las diferentes categorías de tamaño (figura 2):

- los glaciares más pequeños, casi estáticos, con pequeños esfuerzos de cizalladura (circos glaciares, depósitos glaciares) reflejan anualmente las perturbaciones climáticas y del balance de masa casi sin ningún retraso;
- los glaciares más grandes, dinámicos, con grandes tensiones (glaciares de montaña, glaciares de vaciado), reaccionan dinámicamente a variaciones decenales de las perturbaciones climáticas y del balance de masa, con una amplitud aumentada después de un retraso de varios años;
- los mayores glaciares de valle dan señales intensas y muy eficazmente suavizadas de las tendencias seculares, con un retraso de varios decenios.

Para estas dos últimas categorías de tamaño, el "ruido" de alta frecuencia (interanual) se filtra, pero la "memoria" de los mayores bloques perennes de hielo permite la acumulación de efectos de decenios hasta siglos y el cambio secular de espesor de unas escasas decenas de metros es "amplificado" en un cambio de longitud de cientos a miles de metros. La gran clauda de esta señal hace posible aplicar métodos de observación extremadamente sencillos, tales como, por ejemplo, las lecturas repetidas con cinta métrica. Esto, a su vez, permite la cooperación de numerosa mano de obra no especializada con mediciones a largo plazo en varios cientos de morros de glaciares por todo el mundo. Las observaciones cuantitativas y cualitativas de la retirada de los glaciares en las cadenas montañosas, especialmente a bajas latitudes, recogidas de este modo, no dejan duda de que el cambio del clima que causa la pérdida de masa de los glaciares es, ciertamente, un fenómeno rápido y mundial.

Inventario de glaciares

Se está creando una extensa base de datos de los parámetros topográficos de los glaciares en los in-

ventarios regionales de glaciares AICH(CINH)/PNUMA/UNESCO, 1989). Se está planificando la repetición de este trabajo de inventariar los glaciares a intervalos de tiempo que sean comparables con los tiempos característicos de respuesta dinámica de los glaciares de montaña (varios decenios). Esto ayudaría a analizar los cambios a escala regional y a valorar la representatividad de las mediciones continuas que sólo pueden realizarse en algunos glaciares seleccionados. Además, los datos de los inventarios de los glaciares servirían también como base estadística para extrapolar los resultados de las observaciones o para cálculos con modelos referidos a glaciares individuales (Oerlemans, 1993(b); 1994) y para simular aspectos regionales del pasado y posibles efectos de un futuro cambio de clima. Esta última aplicación exige la introducción de un esquema de parametrizaciones que utilicen los cuatro paráme-

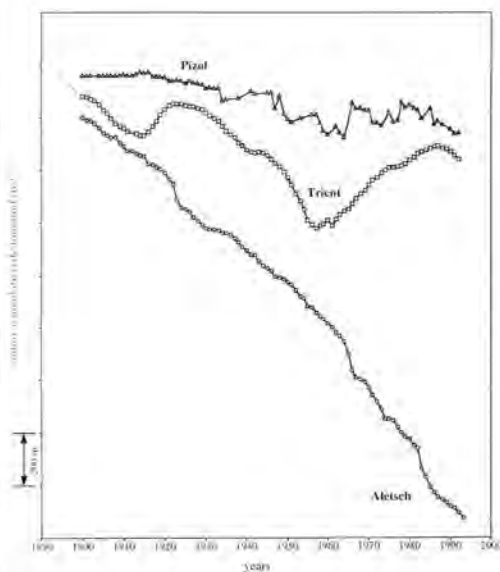


Figura 2 — Cambios acumulativos de longitud desde 1900 de tres tipos característicos de glaciar en los Alpes suizos. Glaciares en círculo tales como el Pizol, tienen pequeños esfuerzos de cizalladura en la base y responden directamente al cambio de masa anual y a la variabilidad de la "línea de nieve", mediante la caída o la fusión de la nieve o las grietas en el margen del glaciar. Glaciares de montaña de tamaño medio tales como Trient, fluyen con grandes esfuerzos de cizalladura en la base y reaccionan dinámicamente a las variaciones decenales del cambio de masa de un modo retardado y muy suavizado. Los grandes glaciares de valle, como el Aletsch, pueden ser demasiado largos para reaccionar dinámicamente a variaciones decenales del cambio de masa, pero muestran intensas señales de evolución secular. La consideración de todo el conjunto de características de respuesta de los glaciares da la mejor información sobre las evoluciones secular, decenal y anual. (Fuentes: Kasser y col., 1986; AICH (CINH)/PNUMA/UNESCO, 1988; 1993; Aellen y Herren, 1994; Aellen, comunicación privada)

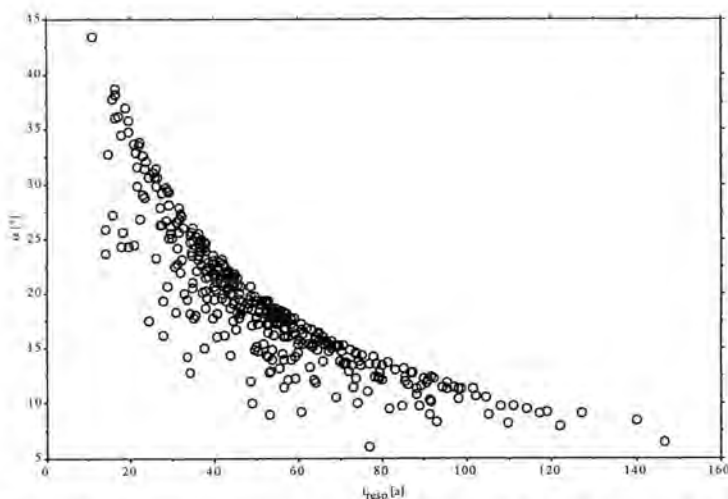


Figura 3.— Tiempos de respuesta t_{resp} como función de la pendiente superficial media α para glaciares alpinos con longitud mayor de 2 km (de Haerberli y Hoeltzle, en preparación)

tros principales contenidos en los inventarios detallados (longitud; altitud máxima y mínima a lo largo de la línea central de corriente; área de la superficie) y que empleen algoritmos adecuadamente sencillos para obtener otros parámetros como pendiente total, espesor medio y máximo, altitud de la línea de equilibrio, balance de masa en el extremo del glaciar, tiempo de respuesta, etc. (figura 3).

Un estudio de prueba en los Alpes europeos (Haerberli y Hoeltzle, en preparación) indica un volumen total glaciar alpino de 130 km³ a mediados de los años 1970. La pérdida total de masa del hielo superficial de los glaciares alpinos, entre 1850 y mediados de los años 1970, se puede estimar en la mitad del valor original. La mayor parte de este cambio se produjo durante la segunda mitad del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX (Patzelt y Aellen, 1990), es decir, en una época de débil perturbación antropogénica. Los pequeños intervalos de calentamiento rápido que se produjeron durante este periodo pueden haber sido predominantemente naturales, pero podrían incluir también efectos antropogénicos. La aceleración de esta evolución, con pérdidas de masa de un metro o más cada año, según presupone el Grupo Intergubernamental de Expertos en el Cambio Climático para el escenario A durante el siglo próximo, podría eliminar la mayor parte del volumen de hielo alpino que existe actualmente, en varios decenios. Queda muy claramente patente la llamativa sensibilidad de la glaciación en las zonas montañosas frías con respecto a la tendencia al calentamiento de la atmósfera.

Análisis de datos y estrategia de vigilancia

Los balances de masa de los glaciares, tanto los anuales como los acumulativos a largo plazo, pue-

den ser analizados estadísticamente de un modo muy sencillo. Estos análisis revelan una variabilidad espacio-temporal considerable en periodos breves de tiempo. Las tendencias decenales o seculares, por otra parte, son comparables, más allá de la escala de cordilleras individuales, siendo la continentalidad del clima el principal factor de clasificación (Letréguilly y Reynaud, 1990) además de los factores hipsométricos individuales (Furbish y Andrews, 1984; Tangborn y col., 1990). Los balances de masa de los glaciares alpinos fueron grandemente negativos durante el decenio exagerada-

mente cálido 1980-1990. Con un valor medio de un -0,65 metros de agua equivalente (Haerberli, 1994), la capa de hielo alpino puede haber perdido alrededor de un 10-20 por ciento de su volumen, tal como fue estimado en los años 1970 (Haerberli y Hoeltzle, en preparación). El promedio decenal es también notablemente mayor que el promedio secular de unos 0,3 a 0,4 m de agua equivalente y podría ser posiblemente una indicación anticipada de que se acelera la fusión del hielo en las latitudes no polares. Extrapolando el mencionado ritmo de fusión secular promedio a todos los glaciares y casquetes de hielo situados fuera de la gran capa de hielo polar de la Antártida y de Groenlandia, se tiene una elevación del nivel del mar de unos 5 a 6 cm durante el siglo XX (véase el Grupo Intergubernamental de Expertos en el Cambio Climático, 1992). La considerable incertidumbre de esas estimaciones se relaciona con el problema de extender un número pequeño de valores observados a grandes superficies no medidas. En grietas a temperaturas bajo cero que predominan en las latitudes polares, en regiones con clima continental y a altitudes muy grandes, el calentamiento atmosférico no lleva directamente a la pérdida de masa por fusión o escorrentía sino a un calentamiento de dicha superficie y, por lo tanto, produce las señales correspondientes en los perfiles de temperatura superficie/hielo en profundidad (Blatter, 1987; Haerberli y Funk, 1991; Robin, 1983). Por otra parte, existen grandes producciones de agua fundida templada tales como los gigantes glaciares alrededor del golfo de Alaska y en Patagonia, en ambientes de clima muy húmedo y por ello reaccionan con más sensibilidad a las tendencias del calentamiento que los glaciares de los Alpes, con su clima de transición. La mode-

lización del balance de energía es una herramienta muy importante para facilitar una extensión adecuada de las mediciones (Oerlemans, 1993(b)). Además de los efectos del balance de energía en superficies de altitud estable, la bajada acumulativa de la superficie del glaciar prediciendo la posterior retirada de la lengua del glaciar, tiende a aumentar la pérdida de masa debida a una mayor ablación. Esta repercusión del balance de masa/altitud es especialmente importante en los glaciares extensos y planos, que no pueden ajustar dinámicamente su longitud al cambio de clima en intervalos decenales o aun seculares sino que, más bien, se hunden en su sitio.

El análisis de las variaciones de la longitud del glaciar en plazos breves, es decir, en periodos de tiempo menores que los intervalos de respuesta considerados, es delicado, a causa de la compleja dinámica incluida. Sólo glaciares con geometrías comparables (especialmente en lo que se refiere a

cambios modernos acumulativos de longitud de los glaciares pueden también compararse con los intervalos de la variabilidad preindustrial y aun prehistórica, que están muy bien documentados por las morrenas y otras huellas geomórficas. La reconstrucción de los cambios pasados de longitud de los glaciares, mediante mediciones directas, dibujos antiguos, fuentes escritas, morrenas, análisis de polen, investigación de los anillos de los árboles, etc., indican que, ya en tiempos primitivos, la extensión de los glaciares en ciertas épocas se había reducido tanto como hoy y que los ritmos de cambio observados durante el siglo XX no fueron desconocidos probablemente durante el Holoceno (Zumbühl y Holzhauser, 1988). Por otra parte, la extensión de los glaciares alpinos ha variado en los milenios pasados en un intervalo definido, aproximadamente, por los extremos de máxima extensión de la Pequeña Edad del Hielo y la etapa reducida de hoy día (Gamper y Suter, 1982,

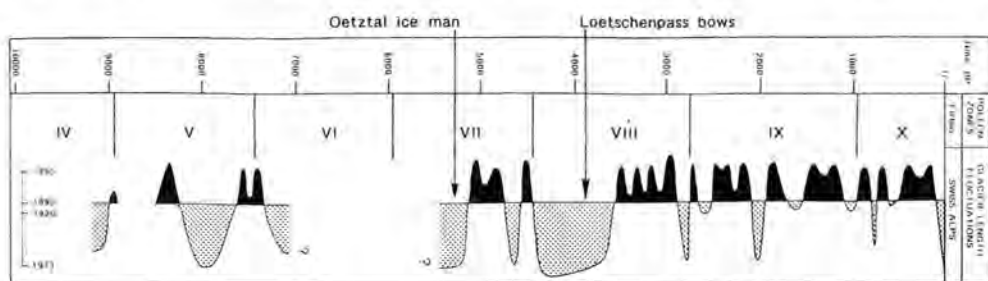


Figura 4 — Historia de los cambios de longitud de los glaciares de los Alpes durante el Holoceno y su relación con hallazgos arqueológicos recientes debidos a la fusión de la nieve en configuraciones en silla de montar (el Hombre de hielo de Oetzthal/Hauslabjoch; tres arcos/Lötschenpass). Modificada según Gamper y Suter, 1982; y Zumbühl y Holzhauser, 1988

longitud y pendiente) pueden compararse directamente (Ding y Haeberli, en preparación). Promediar los cambios de longitud anuales, para glaciares con una geometría muy variable, ya sea como porcentaje anual de glaciares que avanzan y se retiran, o como promedio de los cambios de longitud anuales, ha sido históricamente popular. Este método, sin embargo, mezcla en conjunto informaciones de glaciares con características de respuesta muy variables y suprime la función de memoria a largo plazo de las fluctuaciones de los glaciares (véase Haeberli y col., 1989; Kuhn, 1978). Para intervalos correspondientes al tiempo de respuesta dinámica, o para múltiplos de él, los cambios acumulativos de la longitud del glaciar pueden ser interpretados en función del balance de masa medio durante el intervalo considerado. En los Alpes europeos, por ejemplo, estos análisis confirman la representatividad de los pocos balances de masa secular de los glaciares determinados por repetidos diagramas de precisión (tabla II; véase también Haeberli y Hoelzle, en preparación). Los

figura 4). Esto significa que la situación parece estar evolucionando hacia el límite "cálido", o aún más allá, de la variabilidad natural del Holoceno.

Más recientemente, ha aparecido una prueba extraordinariamente importante en sitios distintos de los morros de los glaciares, es decir, de las cimas de las zonas de acumulación de los glaciares (Vaw, 1993). Aun a altitudes bajas, las crestas de hielo y las grietas abiertas de hielo expuestas a los vientos, no están templadas sino ligeramente frías y congeladas hasta el profundo (permafrost) lecho de rocas (Haeberli y Funk, 1991). Dichas condiciones glaciológicas (flujo de calor reducido por la nieve invernal, sin entrada de agua fundida ni deslizamiento en la base, esfuerzos de cizalladura reducidos a cero en la base de las quebradas de hielo abiertas) explican la conservación perfecta del "Hombre de hielo de Oetzthal", cuyo cuerpo fue enterrado por la nieve y el hielo en una pequeña depresión topográfica de piso rocoso en una cresta en silla de montar en Hauslabjoch (Alpes austríacos, a 3 200 m s.n.m.) hace más de 5 000

años y que se descubrió en 1991, cuando se derretió el hielo. A altitudes aún más bajas (2 700 m s.n.m.) pero en un lugar comparable (Lötschenpass, Alpes suizos) se descubrieron ya en 1934 y 1944 tres arcos de madera bien conservados y varios otros objetos arqueológicos. Recientes ensayos con C^{14} para fechar los tres arcos dieron edades cronológicamente correctas de unos 4 000 años (Bellwald, 1992). Estos notables hallazgos confirman que la variación de los glaciares y que el cambio total de masa de los glaciares ocurrieron en realidad simultáneamente, si se considera el tiempo a una escala secular; el empleo de la sencilla aproximación del estado-constante está así justificada para los intervalos temporales climáticamente importantes. Es evidente que se han producido anteriormente periodos de calentamiento comparables al del siglo XX. Los recientes hallazgos arqueológicos de la fusión del hielo en configuraciones en silla de montar confirman sin embargo que la extensión de los glaciares y del permafrost en los Alpes puede estar más reducida hoy día que nunca antes durante el Holoceno Superior.

La relación cuantitativa entre los cambios de masa y de longitud de los glaciares a escala de tiempos de siglos ofrece la posibilidad de abarcar mejor todo el mundo mediante la aplicación de técnicas de teledetección, combinadas idealmente con modelos de balance de energía para un análisis cuantitativo más detallado. La teledetección podría combinarse con la fotografía aérea, disponible en muchas regiones desde los años 1950, las imágenes de gran definición de satélites tales como el SPOT (Satélite Français de Ensayo de Observación Terrestre), Trazador Temático, etc. Los resultados de la modelización de los balances de energía podrían ser aplicados a los gradientes del balance de masa y a la ablación en el extremo para cuantificar la retirada y la pérdida de masa de glaciares no medidos. De este modo podrían estimarse los balances de masa seculares (semi-seculares) para regiones remotas y podría valorarse la representatividad mundial de las escasas mediciones directas disponibles. Para esta finalidad, deberán ser seleccionados glaciares con características óptimas como "señales climáticas", es decir, glaciares relativamente limpios, con tiempos de respuesta adecuados (decenios), con una geometría definida claramente (separación entre grietas y hielo) y una dinámica estable (sin aludes ni otras inestabilidades). Con un calentamiento acelerado, los glaciares más grandes continuarían consumiéndose en lugar de retirándose. Los diagramas repetidos o los perfiles, con una combinación de la altimetría láser y el posicionamiento cinemático GPS darían informaciones importantes en estos casos, especialmente en relación con la producción de agua de fusión y elevación del nivel del

mar. De hecho, mirando hacia el futuro, parece que la aplicación sistemática de técnicas perfeccionadas de teledetección y de modelización será el principal desafío para el control de los glaciares del globo en el siglo XXI.

Referencias

- AELLEN, M., 1979: Recent fluctuations of glaciers. In: *Switzerland and her Glaciers*. P. KASSER and W. Haeberli (Eds.). Swiss National Tourist Office with Kümmerly and Frey, 70-89.
- AELLEN, M. and E. HERREN, 1994: Die Gletscher der Schweizer Alpen 1989/90 und 1990/91, Reports 111 and 112. *Jahrbuch der Gletscherkommission* (SANW), VAW/ETH Zürich.
- BELLWALD, W., 1992: Drei spätneolithisch/frühbronzezeitliche Pfeilbogen aus dem Gletschereis am Lötschenpass. *Archäologie der Schweiz*, 15, 4, 166-171.
- BLATTER, H., 1987: On the thermal regime of an Arctic valley glacier: a study of White Glacier, Axel Heiberg Island, N.W.T., Canada. *Journal of Glaciology*, 33, 114, 200-211.
- CHEN, J. and M. FUNK, 1990: Mass balance of Rhonegletscher during 1882/83-1986/87. *Journal of Glaciology*, 36, 123, 199-209.
- DING Yongjian and W. HAEBERLI (in preparation): Glacier fluctuations—comparison between long-term measurements in China and Switzerland. Submitted to the *Journal of Glaciology*.
- ESCHER-VETTER, H., 1985: Energy balance calculations for the ablation period 1982 at Vernagtferner, Oetzal Alps. *Annals of Glaciology*, 6, 158-160.
- FINSTERWALDER, R. and H. RENTSCH, 1980: Zur Höhenänderung von Ostalpengletschern im Zeitraum 1969-1979. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 16, 1, 111-115.
- FUNK, M., 1985: Räumliche Verteilung der Massenbilanz auf dem Rhonegletscher und ihre Beziehung zu Klimaelementen. *Zürcher Geographische Schriften*, 24.
- FURBISH, D.J. and J.T. ANDREWS, 1984: The use of hypsometry to indicate long-term stability and response of valley glaciers to changes in mass transfer. *Journal of Glaciology*, 30, 105, 199-211.
- GAMPER, M. and J. SUTER, 1982: Postglaziale Klimageschichte der Alpen. *Geographica Helvetica*, 37, 2, 105-114.
- GREUJELL, W., 1992: Hintereisferner, Austria: mass balance reconstruction and numerical modelling of historical length variation. *Journal of Glaciology*, 38, 129, 233-244.
- HAEBERLI, W., 1994: Accelerated glacier and permafrost changes in the Alps. In: *Mountain Environments in Changing Climates*, M. BENISTON (Ed.), Routledge (in press).
- HAEBERLI, W. and M. FUNK, 1991: Borehole temperatures at the Colle Gnifetti core-drilling site (Monte Rosa, Swiss Alps). *Journal of Glaciology*, 37, 125, 37-46.
- HAEBERLI, W. and M. HOELZLE (in preparation): Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate change effects on mountain

- glaciers—a pilot study with the European Alps. Submitted to *Annals of Glaciology*.
- HAEBERLI, W., P. MÜLLER, P. ALEAN and H. BOSCH, 1989: Glacier changes following the Little Ice Age—a survey of the international data basis and its perspectives. In: *Glacier Fluctuations and Climatic Change*, J. OERLEMANS (Ed.), Kluwer, 77-101.
- IAHS (ICSII)/UNESCO, 1985: *Fluctuations of Glaciers 1975-1980*, W. HAEBERLI (Ed.), Paris.
- IAHS (ICSII)/UNEP/UNESCO, 1988: *Fluctuations of Glaciers 1980-1985*, W. HAEBERLI and P. MÜLLER (Eds.), Paris.
- IAHS (ICSII)/UNEP/UNESCO, 1989: *World Glacier Inventory—Status 1988*, W. HAEBERLI, H. BOSCH, K. SCHERLER, G. ØSTREM and C.C. WALLÉN (Eds.), Nairobi.
- IAHS (ICSII)/UNEP/UNESCO, 1991: *Glacier Mass Balance Bulletin*, No. 1, W. HAEBERLI and E. HERREN (Eds.), World Glacier Monitoring Service, ETH Zurich.
- IAHS (ICSII)/UNEP/UNESCO, 1993(a): *Fluctuations of Glaciers 1985-1990*, W. HAEBERLI and M. HOELZLE (Eds.), Paris.
- IAHS (ICSII)/UNEP/UNESCO, 1993(b): *Glacier Mass Balance Bulletin*, No. 2, W. HAEBERLI, E. HERREN and M. HOELZLE (Eds.), World Glacier Monitoring Service, ETH Zurich.
- IPCC, 1992: *Climate change 1992—the supplementary report to the IPCC scientific assessment*. WMO and UNEP, Cambridge University Press.
- JOHANNESSON, T., C.F. RAYMOND, and E.D. WADDINGTON, 1989: Time-scale for adjustment of glaciers to changes in mass balance. *Journal of Glaciology*, 35, 121, 355-369.
- KASSER, P., M. AELLEN, and H. SIEGENTHALER, 1986: Die Gletscher der Schweizer Alpen 1977/78 und 1978/79. *Glaziologisches Jahrbuch*, Reports Nos. 99 and 100, 288 pp.
- KUHN, M., 1978: On the non-linearity of glacier length response to climatic change: comments on a paper by H.W. Posamentier. *Journal of Glaciology* 20, 83, 443-446.
- KUHN, M., 1981: *Climate and glaciers*. IAHS Publication 131, 3-20.
- KUHN, M., 1984: Mass budget imbalances as a criterion for a climatic classification of glaciers. *Geografiska Annaler*, 66A, 3, 229-238.
- KUHN, M., 1990: Energieaustausch Atmosphäre—Schnee und Eis. In: *Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre*. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, 108, 21-32.
- KRUSS, P., 1983: Climate change in East Africa: a numerical simulation from the 100 years of terminus record at Lewis Glacier, Mount Kenya. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 19, 1, 43-60.
- LETREGUILLY, A. and L. REYNAUD, 1990: Space and time distribution of glacier mass balance in the northern hemisphere. *Arctic and Alpine Research*, 22, 1, 43-50.
- OERLEMANS, J., 1988: Simulation of historic glacier variations with a simple climate-glacier model. *Journal of Glaciology*, 34, 118, 333-341.
- OERLEMANS, J., 1993(a): A model for the surface balance of ice masses: Part I. Alpine glaciers. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 27/28, 63-83.
- OERLEMANS, J., 1993(b): Modelling of glacier mass balance. In: *Ice in the Climate System*, W.R. PELTIER (Ed.), NATO ASI Series I, 12, Springer, 101-116.
- OERLEMANS, J., 1994: Quantifying global warming from the retreat of glaciers. *Science*, 264, 243-245.
- OERLEMANS, J. and N.C. HOOGENDORN, 1989: Mass balance gradients and climatic change. *Journal of Glaciology*, 35, 121, 399-405.
- OERLEMANS, J. and J.P.F. FORTUIN, 1992: Sensitivity of glaciers and small ice caps to greenhouse warming. *Science*, 258, 115-118.
- NYE, J.F., 1960: The response of glaciers and ice sheets to seasonal and climatic changes. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 256, 559-584.
- PATZELT, G. and M. AELLEN, 1990: Gletscher. In: *Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre*. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, 108, 49-69.
- REYNAUD, L., M. VALLON and A. LETREGUILLY, 1986: Mass balance measurements: problems and two new methods of determining variations. *Journal of Glaciology*, 32, 112, 446-454.
- ROBIN, G. de Q., 1983: *The climatic record in polar ice sheets*. Cambridge University Press.
- TANGBORN, W.V., A.G. FOUNTAIN and W.G. SIKONIA, 1990: Effect of area distribution with altitude on glacier mass balance—a comparison of North and South Klawatti Glaciers, Washington State, USA *Annals of Glaciology*, 14, 278-282.
- UNEP, 1992: *Glaciers and the environment*. UNEP/GEMS Environment Library, 9.
- UNEP, 1994: *Environmental data report 1993-94*. Blackwell, Oxford.
- VAW, 1993: *Greenhouse gases, isotopes and trace elements in glaciers as climate evidence for the Holocene*. Report on the ESF/EPC workshop, Zurich, 27-28 October 1992. VAW-Arbeitsheft 14.
- WOOD, F.B., 1990: Monitoring global climate change: the case of greenhouse warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71, 1, 42-52.
- ZUMBühl, H.J. and H. HOLZHAUSER, 1988: *Alpengletscher in der Kleinen Eiszeit*. *Die Alpen*, 64, 3, 322 pp.

