

Los glaciares de montaña como fuentes de información paleoclimática: perspectiva alpina

Por Hanns KERSCHNER *

Introducción

En los últimos años, se ha desarrollado una amplia gama de técnicas paleoclimáticas. Esto ha dado como resultado un número considerable de registros indirectos de alta resolución de las fluctuaciones climáticas, que están basados principalmente en núcleos de hielo, núcleos de sedimentos de océanos y lagos, y series de anillos de árboles. En muchos casos, muestran una resolución desde años a décadas, o a veces incluso una resolución estacional de la información indirecta relacionada con el clima. Debido a la resolución extremadamente alta en el eje del tiempo, pueden utilizarse como un control temporal independiente para otros registros paleoclimáticos que, por su misma naturaleza, están peor datados, tales como las fluctuaciones de los glaciares. Por otro lado, la señal climática contenida en estos registros no es siempre fácil de descifrar en términos de datos climatológicos normales, tales como las temperaturas a nivel de pantalla o las sumas de precipitaciones anuales. En este caso, los glaciares del pasado pueden ser una útil fuente de información paleoclimática cuantitativa que puede interpretarse en términos glaciológicos y climatológicos estándar. Muchas décadas de investigación glaciológica y glaciometeorológica han contribuido a una comprensión más profunda de la relación entre el comportamiento de los glaciares y el clima. Este conocimiento acumulado puede utilizarse para la investigación paleoclimática con diversos grados de sofisticación. Puesto que los paleodatos glaciológicos normalmente están dispersos en el espacio y en el tiempo, probablemente tiene sentido utilizar solo métodos robustos que necesiten un mínimo de datos de entrada. El propósito de esta exigua contribución debería ser el de proporcionar cierta información sobre cómo los glaciares y las extensiones de los mismos en el pasado pueden utilizarse como fuentes de información paleoclimática cuantitativa.

Los glaciares son solo una parte del registro paleoclimatológico, pero quizás la más espectacular.

Tradicionalmente, han proporcionado el marco estratigráfico para la historia climática del período Cuaternario, incluyendo el Holoceno, y se ha acumulado una riqueza de información cualitativa sobre el comportamiento de los glaciares en el espacio y en el tiempo desde la primera mitad del siglo XIX. La resolución temporal de las fluctuaciones de los glaciares es normalmente del orden de unas pocas décadas a siglos o, en el caso de períodos más antiguos del Cuaternario, incluso milenios. Habitualmente, la resolución temporal se reduce al aumentar la edad del depósito glacial. Esto es bastante aproximado por los patrones paleoclimatológicos modernos. Los factores que limitan la resolución temporal son el registro geomorfológico y geológico, la disponibilidad de material datable y la precisión de los métodos de datación. Por otro lado, los glaciares pueden proporcionar una importante información climatológica terrestre con una base física sólida. En este sentido, están menos afectados por fuentes potenciales de errores que pueden incorporarse, por ejemplo, en funciones de transferencia entre los indicadores indirectos biológicos climáticos y los parámetros climáticos.

La retirada de los glaciares de montaña desde el final de la denominada, y actualmente mal designada, "Pequeña Época Glacial" (PEG), de aproximadamente 1600 AC a 1920 AC) ha dejado sus huellas, a veces espectaculares, en las cadenas montañosas altas del mundo. Muestra que la geometría del glaciar reacciona sensiblemente a cambios en el entorno climático, por ejemplo, en respuesta a la tendencia al calentamiento desde mediados del siglo XIX. Los Alpes europeos proporcionan, probablemente, el registro más detallado e integral de fluctuaciones de glaciares de montaña desde el Último Máximo Glacial (UMG), que tuvo lugar hace unos 20 000 años. Si se combina con la información de una serie de otros archivos paleoclimáticos, este registro permite una reconstrucción cualitativa y cuantitativa detallada de la historia climática en la parte central del continente europeo.

El estudio de la historia de los glaciares utiliza una serie de métodos. La cartografía de las extensiones de glaciares antiguos es normalmente el punto de partida. El análisis de diversos otros archivos relacio-

* Institut für Geographie der Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck, Austria. Correo electrónico: Hanns.Kerschner@uibk.ac.at

nados con el glaciar de interés, tales como depósitos de turba, suelos fósiles y desarrollo del suelo, árboles fósiles y otros restos orgánicos proporciona más información. En el caso óptimo, éstos estuvieron afectados directamente por el avance o por la retirada del glaciar. Los documentos y pinturas históricos son comparativamente abundantes en Europa desde los siglos XVI-XVII, y los primeros mapas con un grado suficiente de exactitud y detalle se dibujaron durante la primera mitad del siglo XIX, cuando muchos glaciares alpinos empezaron a avanzar hasta la posición máxima final de la PEG alrededor de 1850.

El control cronológico lo proporciona la liquenometría (el tamaño de los tallos de los líquenes depende de la edad), la datación de los anillos de los árboles, la datación por carbono radioactivo, la datación por exposición superficial con radionucleidos cosmogénicos terrestres y muchos otros métodos geológicos y geofísicos. Naturalmente, todos los métodos de datación tienen sus límites y, por tanto, no siempre es posible datar el comportamiento de los glaciares de forma no ambigua en una escala temporal de alta resolución. Por otro lado, incluso métodos de datación comparativamente aproximados son mejores que ninguno.

La mayoría de los glaciares de los Alpes son pequeños para, por ejemplo, los estándares de Alaska. Para el destacado glaciólogo estadounidense Marc Meier, son sólo “pequeños bancos de hielo”, pero muchos de ellos son suficientemente grandes como para ser independientes de las influencias topográficas a pequeña escala, tales como la sombra de las montañas circundantes, y todavía suficientemente pequeños como para reaccionar ante las fluctuaciones climáticas a una escala temporal de décadas. Los glaciares del orden de unos pocos kilómetros cuadrados con un gradiente de superficie media de aproximadamente 10° son los más adecuados para una interpretación paleoclimática cuantitativa, porque muchos métodos y conceptos glaciológicos, que pueden utilizarse también para la investigación paleoclimatológica, se desarrollaron y calibraron en este tipo de glaciares. Estos glaciares fueron, y aún lo son, abundantes en los Alpes europeos.

Balance de masas y clima

El comportamiento de un glaciar está directamente ligado al entorno climático. El balance de masas de un glaciar al final del año de balance (habitualmente el 30 de septiembre en el hemisferio norte) es una consecuencia directa de las condiciones climáticas durante el período de acumulación y el período de ablación.

Básicamente, el balance de masas de un glaciar es la suma de la acumulación y de la ablación (fusión). La

acumulación es principalmente el resultado de la cantidad de precipitación sólida, de la nieve desplazada por el viento y de las avalanchas. La ablación está controlada por la radiación global de onda corta, por el albedo de la superficie del glaciar, por el balance de radiación de onda larga de la superficie del glaciar y de la atmósfera, y por el intercambio turbulento de calor sensible y latente. Aunque es importante en otros casos, la fragmentación de icebergs puede despreciarse en condiciones alpinas.

La ablación aumenta conforme se reduce la altitud, mientras que la acumulación tiende a aumentar hacia las áreas superiores de un glaciar. La variación del balance de masas con la altitud se denomina gradiente del balance. Convencionalmente, una gran variación con la altitud se representa como un gradiente del balance “plano”, mientras que una pequeña variación del balance de masas con la altitud se representa como un gradiente “pronunciado”. Los gradientes de balance muy planos son típicos de glaciares en un entorno marítimo, como en el sudoeste de Noruega, mientras que los gradientes de balance muy pronunciados pueden encontrarse en áreas con un clima continental marcado con poca acumulación, como Tien Shan o el Ártico canadiense. Los gradientes de balance actuales en los Alpes se mantienen en una posición intermedia, pero más próximos al lado marítimo.

En cada glaciar existe una línea en la que la acumulación es igual a la ablación: la línea de equilibrio. Separa el área de acumulación del área de ablación. Normalmente, la línea de equilibrio no es una isohipsa, sino que muestra una configuración más o menos complicada en la superficie del glaciar, dependiendo de las condiciones locales. Con una serie de métodos, es posible determinar una altitud media: la altitud de la línea de equilibrio (ALE). La ALE de un glaciar es un parámetro muy adecuado para su balance de masas, debido a que el gradiente del balance de masas tiende a permanecer más o menos constante año tras año si las condiciones climáticas de contorno permanecen dentro de ciertos límites. En los Alpes, el área de acumulación de un glaciar ocupa habitualmente dos tercios de la superficie del glaciar, si el glaciar está en equilibrio. La relación de área de acumulación en condiciones de equilibrio es de 0,67. Con el método del área de acumulación, la ALE de los glaciares del pasado es fácil de determinar a partir de los mapas topográficos de glaciares. Por tanto, es un buen punto de partida para los estudios paleoclimáticos.

Si uno o más de los parámetros de balance de calor y de masas citados anteriormente cambia, la ALE se ajustará hasta que se establezcan de nuevo las condiciones de equilibrio. A través de la mecánica no lineal del flujo del glaciar (deformación del hielo, desli-

zamiento basal), se traducen las fluctuaciones del balance de masas en cambios de la geometría de la superficie del glaciar. En consecuencia, la lengua del glaciar se engrosará y en último caso empezará a avanzar después de un período suficientemente largo con balance de masas positivo, o adelgazará y se fundirá (retirada) si el balance de masas de los años precedentes ha sido negativo. Dependiendo del tamaño y de la geometría del glaciar, la reacción de la lengua del mismo a una fluctuación climática se retarda y amortigua un tanto. En ese sentido, una lengua de glaciar actúa como un filtro para las fluctuaciones climáticas de alta frecuencia. Típicamente, las fluctuaciones de la lengua de glaciar de los glaciares alpinos representan las fluctuaciones climáticas en una escala temporal de unos pocos años hasta unas pocas décadas.

Cuando un glaciar alcanza su extensión máxima durante un avance, y empieza a retroceder desde sus morrenas, puede considerarse que ha estado en equilibrio. Por tanto, la extensión del glaciar, que está marcada por los sistemas de morrenas, nos da información sobre las condiciones climáticas medias que causaron el avance. Sin embargo, el marco temporal respectivo es difícil de evaluar. Puede ser del orden de unos pocos años o décadas, si el avance empieza a partir de una posición cercana a las morrenas, pero puede ser del orden de décadas o, incluso, de siglos si el avance del glaciar empieza desde más arriba. En cualquier caso, la señal climática conservada en las morrenas nos da información sobre las condiciones favorables medias para el crecimiento del glaciar. El clima de los períodos con pequeñas extensiones de glaciares puede evaluarse habitualmente sólo a partir de fuentes no glaciales, tales como depósitos orgánicos, análisis de polen, árboles fósiles u otros métodos biológicos, geológicos o geofísicos.

Modelos climáticos de glaciar

Los modelos físicos que describen la relación entre el comportamiento del glaciar y el cambio climático pueden ser muy sofisticados, incluyendo los mecanismos de flujo del glaciar, que está impulsado por el balance de masas. Estos modelos requieren datos de entrada detallados de varias fuentes, que no siempre son fáciles de obtener. Debido a su complejidad, son útiles para una comprensión más profunda del comportamiento físico del glaciar. Sin embargo, actualmente son solo de uso limitado para estudios paleoclimáticos, debido a que requieren demasiadas hipótesis.

Una solución analítica de las fluctuaciones de la ALE como consecuencia de fluctuaciones climáticas la proporciona el análisis de perturbaciones de la ecuación del balance de masas y de calor en la altitud de la línea de equilibrio (Kuhn, 1981), que puede utilizarse

de diversas maneras. Por ejemplo, es posible calcular el desplazamiento vertical de la ALE asociado con una fluctuación climática. A la inversa, los desplazamientos de la ELA pueden traducirse en fluctuaciones de un parámetro, si los restantes son conocidos o pueden estimarse con suficiente exactitud. Este enfoque glacial-meteorológico es físicamente explícito, y permite la consideración individual de los parámetros relevantes. Por otro lado, pone de relieve también que la relación entre el comportamiento del glaciar y las fluctuaciones climáticas puede ser muy compleja. En cualquier caso, demuestra muy claramente que las fluctuaciones del glaciar, y en particular las variaciones de la ALE, no deben interpretarse sólo en términos de fluctuaciones de temperatura. Como en el modelo lineal, su aplicación está limitada a fluctuaciones de la ALE del orden de unos pocos cientos de metros.

Otra categoría de "modelos climáticos de glaciar" son relaciones estadísticas bastante simples entre las variables climáticas que gobiernan la ablación y la acumulación. Se utilizan técnicas de regresión estadística para establecer dichas ecuaciones. Se utiliza un factor relacionado con la acumulación, tal como la precipitación invernal o la precipitación anual, como variable predicha, y se utiliza la temperatura de verano en la ALE como la variable independiente.

De hecho, la temperatura de verano es un parámetro sorprendentemente bueno para todos los demás factores que gobiernan la ablación, debido a que controla no solo el intercambio turbulento de calor sensible, sino también, de forma más importante, el balance de radiación de onda larga. Las temperaturas climáticas estándar medidas a nivel de pantalla parecen ser adecuadas como datos de entrada. Los datos relacionados con la acumulación, tales como las precipitaciones, son más difíciles de evaluar, debido a que las precipitaciones en las regiones montañosas altas muestra una gran variabilidad espacial, tanto horizontal como verticalmente.

A pesar de su simplicidad de cálculo y del problema anteriormente citado de la evaluación de las precipitaciones, este tipo de relación glaciar-clima conduce a coeficientes de correlación sorprendentemente altos entre la temperatura de verano y las precipitaciones en la ALE.

La primera ecuación de este tipo se desarrolló por H. W. Ahlmann en 1924. Utilizando datos de Noruega, relaciona las precipitaciones en un área de captura de glaciar con la temperatura en el límite de glaciación ("nivel de glaciación"). Desde entonces, diversos autores han establecido dichas ecuaciones con datos de entrada de diferentes áreas de montaña con glaciares. Lo que tienen en común todas ellas es que son no lineales. Esto significa que las "precipitaciones" en la

ALE aumentan más o menos exponencialmente al aumentar la temperatura. Debido a su sencillo diseño, son adecuadas para la interpretación paleoclimática de las fluctuaciones de la ALE. Son particularmente útiles para las estimaciones cuantitativas exactas de paleoprecipitaciones y del cambio de precipitaciones, variables que son difíciles de evaluar a partir de otras fuentes paleoclimáticas.

Glaciares del pasado

Para usar modelos climáticos de glaciar adecuadamente para cualquier tipo de estudios paleoclimáticos, hay algunos puntos de importancia fundamental.

En primer lugar, el clima actual ha de definirse en una escala espacial apropiada, por ejemplo, la cuenca del glaciar. Esto puede parecer trivial, pero se descuida fácilmente. En lo referente a la temperatura, esto no es muy problemático, debido a que los campos de temperatura son bastante conservativos en el espacio. Si es necesario, tienen que calibrarse los datos de temperatura con el patrón utilizado para el modelo. Las precipitaciones son un problema mucho mayor. En un área de alta montaña, se presenta una variabilidad espacial muy alta, que está controlada no solo por la altitud, sino también por la convergencia local y los efectos de pantalla y, a una escala menor, por el campo de vientos local. Todos los gradientes horizontales de precipitación son demasiado a menudo más dominantes que un posible aumento de las precipitaciones con la altitud. Además, los efectos de las diferentes escalas espaciales tienden a contrarrestarse entre sí o a actuar en la misma dirección. Por tanto, es esencial permanecer en la misma escala espacial si han de compararse los valores de precipitaciones presentes y pasadas. En el eje del tiempo, es necesario utilizar un período de referencia bien definido y con significado glaciológico.

En segundo lugar, necesitamos un control de datación razonable para las extensiones pasadas del glaciar. La interpretación paleoclimática de las extensiones pasadas del glaciar tiene sentido sólo si pueden compararse con otros registros indirectos. Después de todo, la información climática de otros paleoregistros, tales como el cambio de temperatura, se utiliza como datos de entrada para los modelos climáticos de glaciar. Por lo tanto, la datación absoluta de las morrenas con una serie de procedimientos debería llevarse a cabo en la mayor cantidad posible de puntos. Esto plantea algunos problemas, debido a que los lugares de muestreo adecuados son normalmente raros; los métodos de datación modernos son caros; y las capacidades de laboratorio son limitadas. Durante las fases más interesantes del Pleistoceno Tardío y del Holoceno, la datación por carbono radioactivo está a

menudo impedida por la meseta del carbono radioactivo, y la calibración aún insuficiente en años naturales para períodos más antiguos de aproximadamente 12 000 años naturales AP (antes del presente, por ejemplo 1950). En muchos estudios, la mayor parte del tiempo y del dinero gastados se utiliza para obtener un marco cronológico razonable.

En tercer lugar, el registro geomorfológico y geológico mismo tiene que evaluarse cuidadosamente. Las morrenas y los depósitos relacionados deben correlacionarse, y las topografías del glaciar han de representarse razonablemente desde un punto de vista glaciológico. Puede utilizarse la simple reconstrucción manual guiada por el registro de campo, junto con técnicas basadas en sistemas de información geográfica más sofisticados.

Se han llevado a cabo estudios paleoclimáticos basados en registros relacionados con glaciares en muchas cadenas montañosas del mundo. Unos pocos ejemplos de los Alpes europeos pueden mostrar cómo pueden utilizarse los glaciares para obtener una visión más detallada de las fluctuaciones climáticas durante el Holoceno y durante las fases finales del Pleistoceno Tardío (Terminación 1) (Figura 1).

Se han utilizado una gran variedad de métodos paleoclimatológicos para reconstruir la historia de los glaciares y del clima del Holoceno. Durante las pasadas décadas, ha sido posible obtener una representación detallada de las variaciones de la lengua de glaciares y de fluctuaciones del límite de arbolado. Estas últimas son importantes porque son buenas indicadoras de las fluctuaciones de las temperaturas de verano. La representación emergente muestra que las condiciones climáticas bastante cálidas y posiblemente también bastante secas eran las dominantes durante los primeros milenios del Holoceno. Los fragmentos de madera y de otros materiales orgánicos que surgen de debajo de las lenguas de los glaciares actuales ponen de manifiesto que, durante la mayor parte de ese período, los glaciares alpinos eran claramente menores que hoy en día. Este largo período de condiciones climáticas normalmente bastante estables estuvo interrumpido varias veces por avances de glaciares, que alcanzaron típicamente la extensión de la Pequeña Época Glacial. Habitualmente, los glaciares no avanzaron más allá de su extensión en la PEG, y si lo hicieron, la diferencia en la extensión del glaciar es insignificante. Más a menudo, los glaciares ocuparon menor extensión que durante la PEG. Por tanto, en muchos casos, se han conservado registros paleoglaciológicos bastante sustanciales en morrenas laterales, que a menudo se apilaban una encima de otra. Las fluctuaciones contemporáneas del límite de arbolado indican que las fluctuaciones del glaciar estuvieron causadas

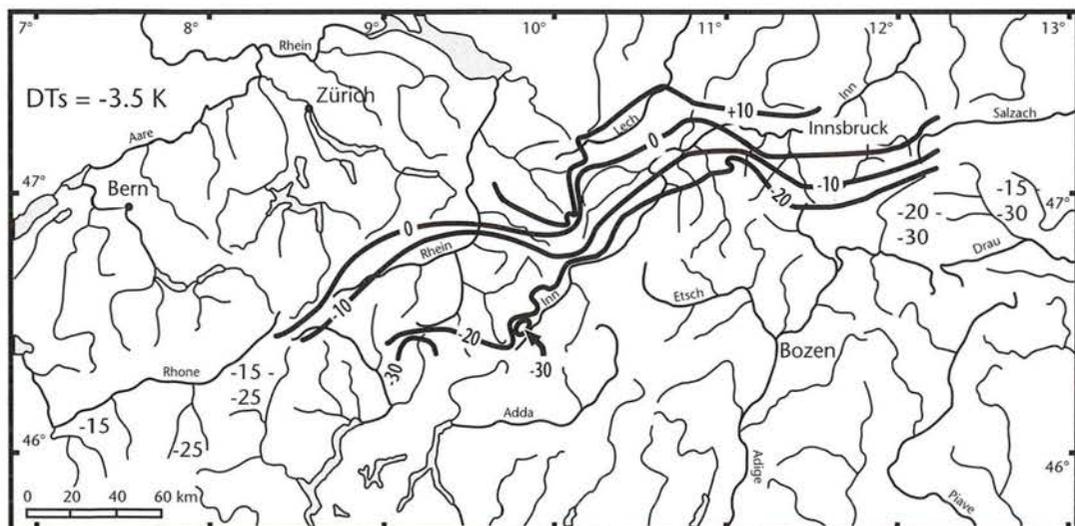


Figura 1 – Variación de la precipitación porcentual durante el Dryas Joven Temprano

principalmente por veranos más fríos pero, en unos pocos casos, hay indicios de un aumento quizás dramático de las precipitaciones. Hace aproximadamente 3 500 años, el clima cambió a condiciones más frías e inestables, que eran generalmente más favorables para el crecimiento de los glaciares. Desde entonces, los glaciares de los Alpes alcanzaron frecuentemente la extensión de la PEG. El período actual de retirada de los glaciares empezó a finales de los años veinte, pero los glaciares alpinos son aún mayores que durante largos períodos del Holoceno Temprano. A una escala temporal de algunos siglos, las fluctuaciones de la ALE en los Alpes durante el Holoceno permanecieron dentro de un intervalo de aproximadamente 150 m, pero superaron significativamente ese intervalo a escala temporal de años a décadas.

Después del UMG, aproximadamente 20 000 años AP, los glaciares dendríticos grandes de los Alpes, con sus lóbulos en el Piamonte, se desintegraron en unos pocos miles de años, o quizás incluso, en algunos siglos. Las fluctuaciones climáticas posteriores durante la Terminación 1 causaron una serie de avances glaciares que dejaron sus huellas en casi todos los valles alpinos. Aproximadamente 16 000 años naturales AP al inicio del Estadio 2a de Groenlandia (“Dryas Antiguo”), existían grandes glaciares en valles en muchas partes de los Alpes. Típicamente, la ALE era de aproximadamente 700-800 m inferior que hoy en día (mediados del siglo XX). Las lenguas de glaciador durante ese período eran normalmente más delgadas y planas. Por tanto, las tensiones de cizalladura basal y las velocidades de flujo del hielo eran comparativamente bajas. Si se han conservado un número suficiente de morrenas, es posible calcular escenarios de descarga de hielo y gradientes de balance de masas. Los resultados mues-

tran que los gradientes de balance de masas a lo largo de la lengua glaciador fueron bastante pronunciados, lo que es típico de glaciares en un entorno climático frío y seco. Como consecuencia, la acumulación se redujo probablemente en aproximadamente un treinta por ciento de los valores actuales. Pueden encontrarse análogos modernos de este tipo de glaciares en las regiones montañosas secas de Asia Central, o en el archipiélago ártico canadiense. Utilizando modelos de clima de glaciador es posible estimar también aproximadamente las temperaturas de verano. Parecen haber sido aproximadamente 7,5-9 K inferiores a las actuales, lo que significa que incluso los valles alpinos mayores al norte del macizo alpino principal permanecieron por encima de la línea de arbolado.

El registro glacial más abundante de lejos puede datarse con la fluctuación climática “Dryas nuevo” (estadio 1 de Groenlandia, 12 700-11 500 años naturales AP), un período caracterizado por rápidas fluctuaciones climáticas y el regreso de condiciones casi completamente glaciares a amplias áreas del noroeste de Europa. Normalmente, pueden cartografiarse tres distintos avances del glaciador en el Dryas Joven en los Alpes. Debido a la topografía favorable, pueden trazarse mapas de las superficies de los glaciares para muchos valles y circos. En consecuencia, existe ya una densa red de puntos de datos para las fluctuaciones de la ALE en los Alpes centrales y septentrionales que muestra que la ELA del avance máximo fue de 400-500 m inferior a la “de hoy” en áreas a lo largo de la franja norte de los Alpes, pero solo 300-350 m inferior a la de hoy en los valles más protegidos a lo largo del macizo principal. El límite de arbolado alpino reaccionó de forma sincrónica, y era de aproximadamente 500 m inferior al de hoy a lo largo de los Alpes centrales y del

norte, indicando una depresión de la temperatura media en verano de 3,5 K. Puesto que el cambio de temperatura del verano parece bien conocido, la depresión de la ALE puede utilizarse para trazar mapas de la variación de las precipitaciones durante el Dryas Joven Temprano (Figura 2). Diversos modelos climáticos de glaciares conducen a resultados sorprendentemente similares. Muestran que las sumas de las precipitaciones anuales eran similares a los valores modernos, o incluso ligeramente superiores a los actuales a lo largo de la franja norte de los Alpes, pero hasta un 30 por ciento inferiores a los actuales en los valles interiores. Las precipitaciones invernales parecen haber sido aún más reducidas. Durante las fases tardías del Dryas Joven, el clima de los Alpes se volvió cada vez más seco y quizás también ligeramente más cálido, con precipitaciones anuales menores del 50% de los valores modernos. Esto está de acuerdo con los resultados de otros datos paleoclimáticos indirectos. Existe también un acuerdo sorprendentemente bueno con los resultados de los modelos de la circulación general atmosférica (MCGA) para el Dryas Joven Temprano en Europa continental. Muestra que las configuraciones de las paleoprecipitaciones pueden utilizarse como base de datos terrestres para comprobar los resultados de los MCGA.

Perspectivas

Los glaciares de montaña y sus fluctuaciones pueden constituir en sí mismos una valiosa fuente de datos glaciológicos y climatológicos relacionados de nuestro pasado geológico reciente. Su comportamiento se comprende físicamente bien, y está inmediatamente ligado al entorno climático. Inevitablemente, permanecen una serie de interrogantes abiertos. Lo más im-

portante, seguimos necesitando un mejor control de datación de las fases de avance y retirada. En lo referente a las fluctuaciones de glaciares en el Holoceno, la datación con carbono radioactivo continuará siendo una de las técnicas más importantes. La meseta del carbono radioactivo, que parece aparecer más frecuentemente durante períodos de comportamiento interesante de los glaciares, presentará problemas en la investigación futura, como lo hizo en el pasado. Por tanto, estará cada vez más complementado con técnicas dendrocronológicas. Durante la Terminación 1, la datación por exposición a la superficie de las morrenas con radionucleidos cosmogénicos terrestres aumentará (siendo optimistas) nuestro conocimiento de la configuración temporal de la retirada de los glaciares y de los reavances de los mismos, no solo a lo largo del eje temporal, sino también en la dimensión espacial. Este método es aún algo experimental y ha de obtenerse más experiencia. Desde un punto de vista más glaciológico, el comportamiento de los glaciares de montaña a una escala desde unos pocos kilómetros cuadrados hasta algunas decenas de kilómetros cuadrados, puede interpretarse sin muchos problemas. Por otro lado, el comportamiento de los sistemas de glaciares dendríticos grandes en los valles alpinos parece ser mucho más complejo, y el trasfondo glaciológico y climatológico de los grandes glaciares del Piemonte durante su avance hasta el Último Máximo Glacial, es algo enigmático. En otras palabras, queda aún trabajo por hacer.

Bibliografía

Existen docenas de artículos recientes sobre fluctuaciones de glaciares y su interpretación climática. En lo referente a los Alpes europeos, la mayoría de ellos se han publicado en ale-

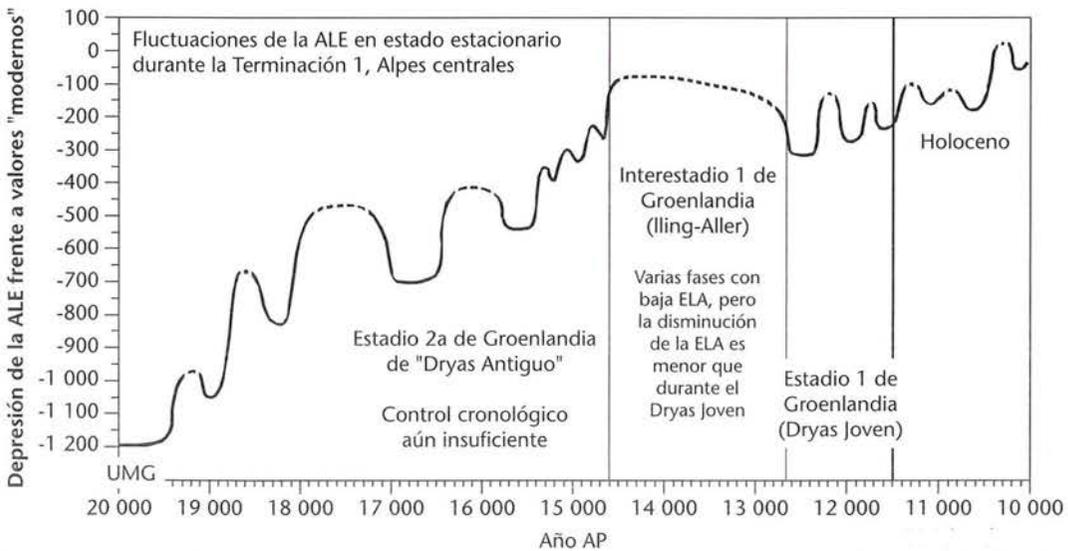


Figura 2 — Fluctuaciones con la altitud de la línea de equilibrio en estado estacionario durante el Pleistoceno Tardío, Alpes centrales, Austria

mán, italiano y francés. La bibliografía siguiente dista, por tanto, de ser completa. Pretende más bien proporcionar acceso al lector interesado a publicaciones recientes y a la bibliografía antigua.

- DAHL, S. O. y A. NESJE, 1996: A new approach to calculating Holocene winter precipitation by combining glacier equilibrium-line altitudes and pine-tree limits: a case study from Hardangerjøkulen, central southern Norway. *The Holocene*, 6(4), 381-398.
- HOLZHAUSER, H., 1997: Fluctuations of the Grosser Aletsch Glacier and the Gorner Glacier during the last 3 200 years: new results. En: Frenzel, B. et al., (eds.): Glacier fluctuations during the Holocene. *Paläoklimaforschung*, 16, 35-58.
- HORMES A., Ch. SCHLÜCHTER y T. F. STOCKER, 1998: Minimal extension phases of Unteraarglacier (Swiss Alps) during the holocene based on 14C analysis of wood. *Radiocarbon*, 40(2), 809-817.
- ISARIN, R. F. B. y H. RENNSSEN, 1999: Reconstructing and modeling Late Weichselian climates: the Younger Dryas in Europe as a case study. *Earth Science Reviews*, 48, 1-99.
- IVY-OCHS, S., Ch. SCHLÜCHTER, P. W. KUBIK, H. A. SYNAL, J. BEER y H. KERSCHNER, 1996: The exposure age of an Egesen moraine at Julier Pass, Switzerland, measured with the cosmogenic radionuclides 10Be, 26Al and 36Cl. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 89(3), 1049-1063.

- KERSCHNER, H., G. KASER y R. SAILER, 2000: Alpine Younger Dryas glaciers as palaeo-precipitation gauges. *Annals of Glaciology*, 31, 80-84.
- KERSCHNER, H., S. IVY-OCHS y Ch. SCHLÜCHTER, 1999: Palaeoclimatic interpretation of the early late-glacial glacier in the Gschnitz valley, central Alps, Austria. *Annals of Glaciology*, 28, 135-140.
- KUHN, M., 1981: Climate and Glaciers. International Association of Hydrological Sciences Publication. 131, 3-20.
- NICOLUSSI, K. y G. PATZELT, 2001: Untersuchungen zur holozänen Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner (Ostalpen). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 36 (2000), 1-87.
- OHMURA, A., P. KASSER y M. FUNK, 1992: Climate at the equilibrium line of glaciers. *Journal of Glaciology*, 38 (130), 397-411.
- OHMURA, A., 2001: Physical basis for the temperature-based melt-index method. *Journal of Applied Meteorology*, 40, 753-761.
- PATZELT, G., 1999: Werden und Vergehen der Gletscher und die nacheiszeitliche Klimaentwicklung in den Alpen. *Nova Acta Leopoldina*, N. F. 81/314, 231-246.
- ZUMBÜHL, H. J., 1980: Die Schwankungen der Grindelwaldgletscher in den historischen Bild- und Schriftquellen des 12 bis 19. Jahrhunderts. *Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft*, 92. Basilea: Birkhäuser, 79 pp.

La meseta tibetana: procesos físicos atmosféricos y su impacto en las precipitaciones intensas

Lianshou CHEN *

Introducción

Con una altitud media de más de 4 000 m sobre el nivel del mar, la meseta tibetana es la más grande del mundo. Tanto la circulación general de la atmósfera sobre esta meseta y su área inmediata, como otros cambios del tiempo en Asia oriental y la variación del clima en el planeta, pueden verse influidos significativamente por los procesos dinámicos y termodinámicos en la meseta, tales como una fuerte radiación, una fuente de calor, potentes actividades convectivas, la diferente naturaleza de la superficie terrestre y la topografía compleja, etc. Estos importantes temas científicos han atraído siempre la atención de la comunidad de investigación meteorológica mundial.

Dos experimentos de campo en la meseta tibetana

Para juzgar y resolver los misterios meteorológicos afectados por los procesos dinámicos y termodinámicos en la meseta tibetana, científicos chinos iniciaron dos experimentos de campo en 1979 y 1998, respectivamente. El primer Experimento Científico Atmosférico de Campo de la Meseta Tibetana (QXPME) se llevó a cabo del 1 de mayo al 31 de agosto de 1979, superponiéndose parcialmente con el FGGE-MONEX. Se ejecutaron cuatro sondeos en altitud, seis fuentes de calor y estaciones de radiación, una observación de radar y 223 observaciones circundantes de superficie. La investigación se centró en la estructura, formación y desarrollo de los sistemas meteorológicos en la meseta durante el verano, el balance de radiación en superficie, el balance térmico y sus variaciones y el impacto de la meseta sobre la variación estacional de la circulación general, inicio de los monzones, etc. Sin embar-

* Academia China de Ciencias Meteorológicas, Pekín.
Correo electrónico: cams@public.bta.net.cn.