

A Frida, quien navega por el Mar del Norte fascinada por el hielo.

los glaciares de México

Alejandro Rivera Domínguez

¿Qué es lo que admiró Bloom, amante del agua, chupador de agua, aguador, volviendo al togón? Su universalidad; su democrática igualdad y su naturaleza fiel a si misma que la lleva a buscar su propio nivel; su vastedad oceánica sobre la proyección de Mercator... el incansable movimiento de sus olas y partículas de su superficie, que visitan por turno todos los puntos de sus orillas... su esterilidad en los congelados casquitos circumpolares, su importancia climática y comercial... su ubicuidad ya que ella constituye el noventa por ciento del cuerpo humano; lo nocivo de los flujos lacustres, los pantanos pestíferos, el agua descompuesta de los floreros, los charcos estancados en la luna menguante.

James Joyce, *Ulises*



El agua, ese sorprendente e inagotable problema de la ciencia, decisiva para la vida planetaria, desperdiciada sin objeto, el agua en sus formas gaseosa, líquida y cristalina es fundamental para el clima, la biosfera y los glaciares, esos cuerpos de hielo que se deslizan lentamente y que representan uno de los grandes problemas a resolver por la paleontología y la paleoclimatología. Hace apenas un millón de años, al menos cuatro avances de hielo cubrieron Europa, Canadá y tuvieron efectos hasta latitudes bajas como el centro de México. El rudo clima frío apenas retiró los hielos hace ocho mil años, ¿estaremos en un período interglaciar o el famoso cambio climático actúa derribando definitivamente todo vestigio de los glaciares actuales? Los glaciares son objeto de estudio profundo. En México, tenemos al menos cuatro zonas con hielo permanente producido de manera natural, cuyo estudio es de enorme interés debido a que son fenómenos que tienden a desaparecer por causas diferentes. Los actuales, en las altas montañas de México, son la última fase de una era con un clima mucho más frío que el actual y que llovó fin hace unos 8,000 años. Los pocos mantos de hielo permanente quizás sean reliquias de una época donde la fauna y la vegetación en el centro del país eran notablemente diferentes a las actuales.

¿Qué produce un glaciar? Indudablemente estamos hablando de agua, pero no es tan fácil explicar los mecanismos de formación y eventual desaparición de estos cuerpos tan importantes para el clima de una región: los glaciares son esencialmente Hidrógeno y Oxígeno que forman un compuesto sorprendente que puede presentarse en tres estados: líquido, gaseoso y sólido.

El agua es uno de los compuestos más interesantes e importantes de la física, química, ingeniería, geología, y muchas otras

ciencias que permite de una manera relativamente fácil comprender las fases sólida, líquida y gaseosa. El agua (H_2O) es de los pocos compuestos que al pasar al estado cristalino disminuye su densidad, es decir, el estado cristalino es menos denso que la forma líquida y este fenómeno ha tenido una importancia decisiva para la evolución y permanencia de la vida en la Tierra.

Al examinar diferentes líquidos se observa que la relación temperatura-densidad, tiene propiedades que hacen a la mayoría de los líquidos incrementar su densidad en función de una disminución de la temperatura, fenómeno que se debe esencialmente a que la amplitud del movimiento molecular del líquido disminuye y permiten el acercamiento de las moléculas.

En el H_2O la mayor densidad se obtiene cuando se llega a los 4 °C y la fase cristalina (hielo) es menos densa que la fase líquida. Es fácil observar este fenómeno simplemente al mezclar hielo y agua. El hielo sobresale del líquido inmediatamente.

La interpretación de que el agua tenga una mayor densidad a 4 °C resulta del hecho de que a esa temperatura el agua comienza a formar una estructura cristalina. Experimentalmente se ha encontrado que a menor temperatura, el agua contiene muchas vacancias ligadas en estructuras cristalinas que influyen considerablemente en la disminución de la densidad. El tamaño de las vacancias aumenta al disminuir la temperatura. Este fenómeno constituye la pre-transición que se ha observado en otros líquidos, sin embargo, en el caso del agua, es anómalo. Algunas propiedades fundamentales del agua quizás nos sean familiares, ya que por su abundancia relativa en la naturaleza ha servido de referencia para algunas unidades ampliamente utilizadas en ciencia y tecnología (Tabla 1).

TABLA 1

Peso molecular	18.06
Punto de congelación	0 °C
Punto de ebullición	100 °C
Calor de fusión	79.7 cal / g
Calor específico	1 cal / g / °C

Se ha dicho que el agua incrementa su densidad anormalmente, en comparación con la mayoría de los líquidos, cuando se incrementa la temperatura de 0 °C a 4 °C (exactamente 3.98 °C) temperatura en la que alcanza el valor máximo de 1 g/ml. Por encima o debajo de esta temperatura, el agua se dilata y la densidad disminuye (Tabla 2).

Estas mediciones se han realizado experimentalmente bajo control de laboratorio y en condiciones normales de presión (1 atmósfera), pero con el hielo, forma cristalina del agua en la naturaleza, la situación es algo diferente.

En la Tierra la forma sólida del agua es, no obstante su importancia, relativamente trivial, en comparación con las condiciones que se encuentran en el espacio vecino.

De las investigaciones espaciales recientes se sabe que en la Tierra se encuentra sólo una forma cristalina del agua. Los hielos de los glaciares, de los casquetes polares o del congelador de casa, tienen una característica común: el hielo presenta una estructura hexagonal. Se trata del hielo llamado Ih. Esta forma obedece a las circunstancias de presión y temperatura que definen las condiciones terrestres.

TABLA 2

TEMPERATURA °C	DENSIDAD (g/ml)
0	0.917
-10	0.988
5	0.999
3.98	1.000
100	0.9583

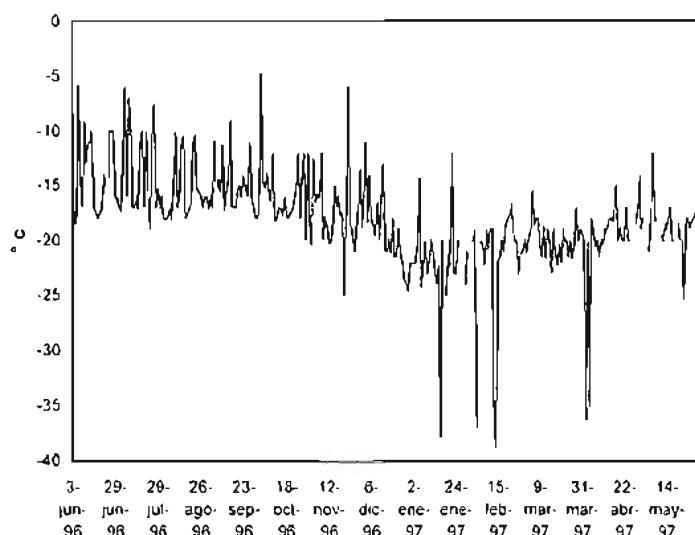


Figura 1. Curso temporal de la temperatura en la cima del Popocatépetl.

En la atmósfera terrestre, la única variedad de hielo que por refracción forma los halos solares y lunares, es también hielo l_h , una de las diez formas cristalinas conocidas del hielo; existe además una variedad amorfa. Por ejemplo, el hielo l_c es una forma que se obtiene en el laboratorio y se observa en algunas atmósferas planetarias o cuando en el laboratorio se condensa a partir de vapor de agua entre 130 y 150 °K (grados Kelvin; 0°K = -273.15 °C, teórico). Existe una presentación amorfa, hielo l_a , que se obtiene por condensación de vapor de agua a temperaturas inferiores a 110 °K. El hielo amorfo se transforma en cristal cúbico a una temperatura de transición de 153 °K. Sin embargo, estos aspectos termodinámicos del comportamiento del hielo bajo condiciones que no se encuentran de manera natural en la Tierra, salvo en laboratorios y bajo criterios experimentales, es de interés en muchos campos espaciales y en la investigación de atmósferas planetarias.

Una vez examinadas de manera breve algunas propiedades del agua y sus presentaciones físicas, pasamos a un tema de especial interés que es la formación de glacia-

res, sus mecanismos e importancia en la modelación del paisaje y su papel fundamental en la configuración del clima regional y planetario.

Los glaciares tienen una existencia dinámica: el glaciar es una masa de hielo en lento movimiento; al ser formado por hielo y agua líquida se comporta como un fluido con características especiales. Son también notables y únicos algunos de los mecanismos que los mantienen en un proceso dinámico, que han modelado el paisaje durante buena parte de la historia terrestre y tenido a lo largo de miles o quizás millones de años una presencia preponderante en la configuración climática de la Tierra.

La formación de hielo de un glaciar comienza cuando se produce una acumulación, principalmente de nieve, sobre un suelo donde la temperatura media anual del aire oscila pocos gra-

dos del punto de congelación y, además, se ablaciona menos nieve en el periodo de verano que el acumulado en invierno. Las estaciones anuales son fuertemente determinantes para los ciclos de un glaciar que crece y decrece en función de la temperatura ambiente, de el régimen de lluvias, de las nevadas y de la insolación.

La formación de un glaciar considera diversos mecanismos que comienzan con la caída de nieve, sublimación, derretimiento, recongelación y deformación plástica.

La nieve es una formación de cristales de hielo laminares, de manera que una masa de nieve en realidad tiene una alta proporción de aire y, bajo ciertas condiciones, alcanza una densidad de sólo el 0.1, es decir, un volumen dado de nieve pesa sólo el 10% de un volumen igual de agua líquida; no obstante, la nieve seguirá un proceso que la convierte en el principal alimento de la masa helada.

Los copos de nieve se subliman fácilmente y pasan del estado cristalino al gaseoso a causa de las estructuras cristalinas, de área relativamente grande. Si la temperatura es baja y la nieve se derrete poco, se produce un proceso de recongelación favorecido por la tensión superficial del agua. Con frecuencia se observa que el agua de



Foto 1. Estrias dejadas por el deslizamiento de masas de hielo y rocas que dejan marcada la dirección del flujo.

fusión glaciar se congela alrededor de los núcleos, al transcurrir el tiempo se incrementa el fenómeno y se forma una superficie que cambia su configuración al de hielo mezclado con nieve y agua líquida. El hielo que sobrevive al periodo de verano se denomina "geloide" o neviza y tiene un peso volumétrico de 0.5, a ciertas acumulaciones que no maduran completamente se les denomina "ventisqueros".

A medida que se acumulan capas anuales sucesivas, la neviza profunda se compacta, los gránulos individuales de hielo se congelan en grandes masas y el aire es expulsado o, eventualmente, es encerrado dentro de la estructura. Es así, por definición, que la neviza o geloide se convierte en glaciar. El peso específico volumétrico es de 0.8 hasta 0.9, que es el peso específico del hielo sin gas.

Una propiedad muy interesante de los glaciares es que el hielo no forma un sistema cristalino "fuerte", el sistema cristalino hexagonal hace a la estructura susceptible de sufrir deformaciones plásticas. Si un volumen de hielo se somete a una presión de 1 kg/cm^2 , la estructura se deformará por los ajustes que demanda la red cristalina. Este fenómeno tiene una importancia relevante cuando se trata de analizar los movimientos

del geloide y del glaciar. Un cubo de hielo obtenido del congelador casero es, en cierta forma, un glaciar en miniatura. Si se coloca el cubito sobre un alambre delgado, pasados unos minutos, el alambre estará soldado con el hielo. Si además se coloca el hielo de manera que quede sujeto a la fuerza de gravedad, el hielo no se partirá en dos, el alambre penetrará y fundirá un poco de agua en la zona de contacto, pero el agua de derretimiento se congela otra vez. El alambre ha pasado a través del hielo pero no ha dejado una huella notable y el cubo permanecerá casi intacto, con muy poca pérdida.

Otras propiedades del hielo que constituyen parte de la dinámica glaciar están vinculadas con su calor latente, que es de 80 cal/gr , lo que significa que al derretirse un gramo de hielo se requieren justamente 80 calorías que son absorbidas por el ambiente. Otra propiedad es que el hielo y el agua coexisten bajo cualesquiera condiciones de presión en el caso terrestre. El agua que convive con el hielo bajo la presión de 1 atmósfera, permanece a 0°C hasta que las condiciones termodinámicas ablanden todo el hielo o congeleen toda el agua, fenómeno que ocurre estacionalmente: en primavera-verano, cuando las temperaturas son mucho más elevadas, el glaciar tiende a fundir-

se pero las lluvias de otoño y una menor insolación, producen un recongelamiento del cuerpo glaciar. El equilibrio general se conserva anualmente y oscila entre la ablación-recongelación.

Ya examinaremos otra propiedad del hielo que consiste en su escasa conductividad térmica, fenómeno que garantiza la permanencia del cuerpo helado en condiciones que a primera vista parecerían no permitirlo, por ejemplo, en algunos glaciares de Islandia, los flujos táticos no han logrado derretir totalmente algunos glaciares. En el Popocatépetl se ha registrado caída de material incandescente sobre el hielo y sólo ha producido orificios en el lugar del impacto.

La pobre conductividad térmica del hielo es notoria sobre todo cuando hay mucho aire atrapado, cada capa de hielo depositada y conservada anualmente, conserva la temperatura de deposición. Este fenómeno convierte a los glaciares en magníficos indicadores de climas pasados. Los paleoclimatólogos aprecian mucho los datos aportados por los glaciares por su índice de conservación y por su precisión.

La temperatura de cada capa dentro de los pocos decímetros superiores del glaciar depende de la época del año de depósito, sin embargo, a unos 10 m de profundidad,

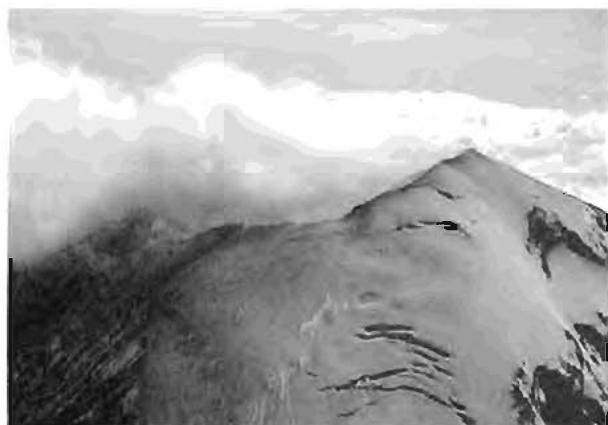


Foto 2. Sistema de grietas del glaciar del Popocatépetl (29-12-94).



Foto 3. Circos glaciares en la cara occidental del Iztaccíhuatl (15-08-97).

las variaciones estacionales de temperatura son irrelevantes y entonces se considera que la capa mantiene la temperatura media del aire de la región. Los glaciares de Groenlandia y de la Antártida se exploran con el propósito de averiguar pequeños cambios climáticos, depósitos de ceniza de erupciones antiguas y otros fenómenos. Los glaciares son justamente llamados la "biblioteca del clima terrestre".

Aunque en Europa y Norteamérica se ha intentado clasificar a los glaciares, en general estas clasificaciones obedecen más a la estructura topográfica que a características termodinámicas. Con este criterio, en el planeta se observan dos grandes grupos glaciares: el polar o frío, que mantiene casi todo el año temperaturas debajo de la temperatura de fusión del agua, y el templado, cuya característica es una oscilación térmica.

Los glaciares mexicanos se encuentran en esta categoría, es decir sufren modificaciones importantes en función de las estaciones del año, crecen unas hectáreas durante el verano y gelan en invierno reduciendo sus dimensiones en algunas hectáreas. Durante los meses cálidos de junio y julio se producen algunos deshielos importantes que no llegan a la inestabilidad, ya que los glaciares intertropicales (aquellos que

se encuentran entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, es decir a $23^{\circ} 27'$ de latitud norte o sur) dependen esencialmente de la altitud y de la contribución de corrientes térmicas de ladera, que transportan mucha humedad. Al chocar contra el cuerpo volcánico estas corrientes son obligadas a subir; a temperaturas de altitudes mayores a 4,700 m, condensan el agua produciendo nevadas que alimentan el geloide antecedente del glaciar.

En verano, cuando las temperaturas medias regionales en el centro de México se incrementan y las precipitaciones provenientes del régimen del Golfo o del Pacífico arrastran humedad al Altiplano, la lluvia, casi diaria, forma charcos con una temperatura superior a 0°C . El enfriamiento es rápido e intercambia calor de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, al fusionar la superficie del glaciar, por cada gramo de agua se desprenden 80 calorías, causando modificaciones locales en la superficie. El agua se cuela hasta la profundidad, donde la temperatura es muy baja y el agua inicia el proceso de recongelación (Figura 1). Este proceso hace inestables algunas regiones de la masa glaciar, pero todo el período de lluvias no es suficiente para romper el equilibrio térmico del sistema atmósfera-ablación-recongelación-glaciar.

Cuando en el edificio volcánico se desarrolla un glaciar, llama la atención que las grandes masas de hielo actúen como aislantes del calor geotérmico. Dado que son más frías en la base que en la superficie, el flujo de calor no ascenderá fácilmente a través de la placa de hielo y, aunque un volcán tenga actividad, la transmisión térmica es muy pobre. En general, las zonas glaciaras están sujetas al flujo térmico anual de la Tierra, que es de 40 cal/cm^2 , suficiente para derretir 0.5 cm en la base. Este fenómeno térmico es la causa del lento deslizamiento producido sobre una delgada capa de agua en contacto con la base del glaciar y el lecho rocoso.

El cabalgamiento, más precisamente, la fluencia de la masa, se origina mediante algunos mecanismos que actúan simultáneamente y se basan en la deformación interna de los cristales de hielo, fusión y recongelación, deslizamiento del hielo por la pendiente entre la roca y la superficie de contacto, fractura y fallamiento del hielo además de la participación de la fuerza de Coriolis* debida a la rotación terrestre.

* La fuerza de Coriolis aparece en los cuerpos que rotan. Su expresión es: $F_c = 2\pi w \cdot r$ (donde w es la velocidad angular de la tierra y r el radio terrestre).



Foto 4. Glaciar del pecho del Iztaccíhuatl (diciembre de 1994).



Foto 5. Glaciar norte del Popocatépetl (10-07-97).

Un glaciar aumenta su fluencia cuando granizadas, nevadas o lluvias torrenciales se acumulan súbitamente en la parte superior. La neviza absorbe las lluvias y las aguas estivales al igual que un secante; el agua que se hiela contribuye a compactar la nieve suelta mediante la expulsión de aire. En el origen de todos los glaciares existen grietas arqueadas que constituyen la "rimaya" (el término más usual en la literatura especializada es la voz alemana *Bergschrund*). Estas grietas se forman porque al avanzar el hielo de la parte más profunda del glaciar se rompe la porción superficial. Las grietas son más notorias en verano pero, paradójicamente, se llenan de nieve que forma puentes incluso en el invierno. Las rocas por donde fluye el glaciar sufren alteraciones de compresión, pero las huellas más notables son rayones de rocas arrasadas por la masa de hielo que, bajo su enorme peso, dejan el típico "rasguño glaciar" (Foto 1). Esta es una prueba del lento movimiento de la masa de hielo por la pendiente de una montaña o de un volcán. Al llegar a las zonas más templadas el hielo se derrite completamente dejando, sin embargo, un depósito de rocas de arrastre a las cuales se les identifica con el nombre de "morrenas".

El sistema de grietas del Popocatépetl, y en general de los glaciares, muestra que la profundidad de las grietas no supera los 50-60 m debido a que la masa de hielo se comporta plásticamente. Al fluir la masa de agua por el fondo del glaciar tiende a cerrar las vías abiertas por el agua líquida; la presión hidrostática mantiene abierto el conjunto de pequeñas vías profundas (Foto 2).

La mayoría de los glaciares tiene una zona de acumulación a gran altitud —misma que excede la pérdida— y una zona de abla-
ción más baja donde tiene lugar la pérdida neta del hielo.

La ablación incluye fusión, evaporación y otras pérdidas como la deflación eólica, fenómeno que consiste en la formación de hojas en la superficie glaciar que es desprendida fácilmente por el viento. La altitud más baja de acumulación neta anual en un glaciar está delimitada por la neviza, que es equivalente al límite de los mantos perennes en una isolínea alrededor de los 5,000 m, altitud en la cual casi todos los volcanes de México tienen nieve algunos días del año. Bajo determinadas circunstancias algunas nevadas logran formar campos nevados que permanecen unos cuantos días. La Malinche es un caso típico. Su altitud de 4,161 m apenas alcanza el límite de los 0 °C durante algunas semanas al año. Lo mismo ocurre con el Cofre de Perote y otros volcanes de 4,000 m (Tancitaro).

En la zona de acumulación se está añadiendo hielo nuevo de manera que la trayectoria general del flujo de una partícula de hielo es hacia abajo, hacia el interior del glaciar. El escurrimiento generalmente es absorbido por el terreno y reaparece en las regiones bajas donde el agua aflora en manantiales o se acumula en mantos freáticos.

Antes del proceso eruptivo del Popocatépetl, en diciembre de 1994, los glaciares habían recibido una atención mínima por parte de unos cuantos especialistas; el trabajo más destacado, sin duda, fue el del recientemente fallecido doctor José Luis Lorenzo, quien se dedicó a explorar y registrar diferentes aspectos de los glaciares mexicanos. Más recientemente, Hugo Delgado, de la UNAM, ha trabajado en aspectos glaciológicos, particularmente en el Popocatépetl, ya que el glaciar norte representa un caso de amenaza volcánica de la mayor importancia. A estas observaciones sistemáticas se ha incorporado personal del CUPREDER-BUAP, con el objeto de construir modelos

que permitan evaluar la amenaza que significa la súbita ablación del glaciar y su descenso por la ladera noreste del cono, mismas que afectarían a numerosas poblaciones cercanas al lecho de las barrancas.

Al encontrarse sobre volcanes, los glaciares mexicanos son susceptibles de modificaciones importantes cuando aquéllos inicien un proceso de actividad.

Los glaciares que encontramos en México se desarrollan a partir de los 4,500 m. A partir de los 4,000 m existen huellas de morrenas que revelan glaciares importantes, incluso la Malinche o Mallacueyell, volcán poco estudiado, muestra morrenas que llegan hasta una porción del canal de riego de Valsequillo y que son indicios indudables de grandes glaciares permanentes durante al menos cuatro períodos glaciares y cortos períodos interglaciares. También el Cofre de Perote muestra morrenas y zonas de intensa erosión glaciar producto de un clima que cambió hace unos ocho mil años y modificó radicalmente el clima y, con él, la flora y la fauna en casi todo el Altiplano. Ahora quedan sólo cuatro volcanes con glaciares permanentes: Cilatepell (Pico de Orizaba), Zinantécatl (Nevado de Toluca), Iztaccíhuatl y Popocatépetl. Todos ellos con cotas de 5,000 o más metros sobre el nivel del mar, hecho que facilita la condensación de agua y caída de copiosas nevadas. Estos volcanes pertenecen al Eje Volcánico Mexicano (EVM) y de hecho son los de mayor altitud. Vale la pena mencionar que el EVM es uno de los complejos volcánicos continentales más importantes de la Tierra. La mayoría de estas estructuras son denominados andesíticos por su composición química, esencialmente de SiO_2 . Los grandes volcanes mexicanos son geológicamente jóvenes, casi todos han tenido manifestaciones eruptivas durante el Pleistoceno superior (>1 millón de años) y

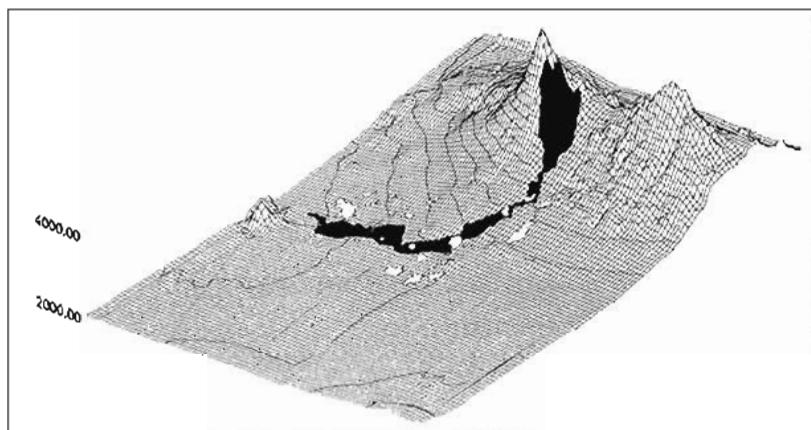


Figura 2. Sector oriental de los volcanes Popocatépetl e Iztaccíhuatl. Zona máxima de inundación por ablación del glaciar norte del Popocatépetl. Análisis de riesgo por flujos de lodo (Raúl Mayorga R. y Alejandro Rivera Domínguez. CUPREDER-BUAP).

evidentemente el volcanismo a lo largo del EVM sigue activo, dando lugar incluso al nacimiento de volcanes (Xitle, hace unos 2,000 años; Xorullo, en 1756; Paricutín, en 1943; Everman, en 1950). Como consecuencia de la gran actividad volcánica y por el hecho de que todos los glaciares están emplazados sobre las laderas de los volcanes, el estudio de los glaciares templados de México es urgente. Estos glaciares y sus huellas señalan aspectos del clima regional y planetario, asunto que hoy se ha convertido en uno de los objetivos más urgentes de la ciencia (Foto 3). Por ejemplo, algunas regiones del subsuelo de la ciudad de Puebla fueron formadas por los grandes escurrimientos glaciares de la Malinche, restos de megafauna, *elephas americanus*, *mamuthus* y otras especies encontradas en las inmediaciones de la ciudad de Puebla y la región de Valsequillo, muestran un clima radicalmente distinto al actual.

Entre 1958 y 1962, a raíz del Año Geofísico Internacional, los científicos mexicanos participaron en algunos proyectos, entre los cuales se encontraba el estudio de los glaciares y los cambios que habían sufrido desde el retiro de las grandes placas heladas hace ocho mil años. Sin duda, el más destacado investigador de este tema fue el doctor

José Luis Lorenzo, quien fue el primero que realizó mediciones y observaciones sistemáticas en las zonas glaciadas e investigó los cinturones periglaciares, es decir, la frontera entre ambientes que permiten o no el desarrollo de capas heladas. En 1958, Lorenzo encontró en el Cittaltépetl cuatro glaciares que cubrían una superficie total de 9.5 km², misma que es actualmente el área glaciada más grande del país. Exploraciones recientes indican, sin embargo, una drástica reducción del área observada hace treinta y nueve años.

En general todos los glaciares mexicanos, y la mayoría de los glaciares del planeta, muestran una reducción de sus dimensiones que se debe, probablemente, a cambios climáticos de escala planetaria. Aunque ciertos indicios son más o menos claros en este sentido, lo cierto es que no se ha llegado a un criterio definitivo y concluyente.

Ha resultado dramático observar la reducción del tamaño de los glaciares e, incluso, su desaparición, sobre todo en el Iztaccíhuatl y el Popocatépetl. En el primero, Lorenzo registró doce áreas que cubrían 1.2 km². Actualmente existen sólo cuatro masas de hielo que cubren un área considerablemente menor a la reportada por Lorenzo. Además, muchos montañistas reportan que los glaciares del cue-

lo, cabeza y rodillas de la "mujer blanca" desaparecieron al finalizar la década pasada (Foto 4). Han desaparecido casi totalmente el glaciar del cuello, el "ala de ángel", entre otros menores. El área de los hielos permanentes se redujo en un 16%.

En el Popocatépetl los glaciares son pequeños, incluso se ha pensado que son sólo ventisqueros; sin embargo, aunque pequeños, tienen las propiedades que ya hemos señalado para los glaciares. El área medida por Lorenzo en 1958 era de 0.72 km²; actualmente apenas llegan a 0.3 km². Los glaciares del Popo son tres pequeños cuerpos. El mayor es el situado directamente en la cara norte que comienza en la cota de 5,600 m y desciende a los 4,600 m. El glaciar del Ventorrillo o de Teopizcalco, donde el arqueólogo Charnay encontró el oratorio prehispánico más alto del continente (4,950 m), cubría una superficie de 0.4 km² y hoy casi ha desaparecido y sólo es un campo de nieve intermitente. Su línea de alimentación se encontraba a 5,300 m y descendía a 4,800 m; el área cubierta era de 0.2 km².

En el costado de "La herradura" había otro glaciar conocido como Nororiental que comenzaba a los 5,400 m y descendía a los 5,000 m. Actualmente casi ha desaparecido y sólo ocasionalmente se forma un campo nevado que en tres o cuatro días se derrite (Foto 5). El glaciar Noroccidental también ha sufrido modificaciones importantes en sus dimensiones; actualmente apenas alcanza 200 m de longitud y un área variable difícil de medir.

El glaciar más importante del Popocatépetl es el Norte o Ventorrillo, que tiene una profundidad de 60 a 65 m observado directamente desde un sistema de grietas maestras que se generan de manera perpendicular a la línea de fluencia del cuerpo helado. La primera se localiza a los 5,300 m y es

justamente la zona de inicio. Es de hecho la rimaya más importante y tiene unos 300 m de longitud y una anchura de cinco o seis metros. Cabe mencionar que otros sistemas de grietas en el glaciar han sufrido una profunda transformación desde que el volcán se reactivó en diciembre de 1994. La salida de vapor de agua, gas a una temperatura de 30 °C, que roza la superficie y, sobre todo, la caída de ceniza que actúa térmicamente sobre la superficie glaciar, han modificado prácticamente todo el sistema reduciendo notablemente el área total. El sistema de glaciares del Popocatépetl ha perdido al menos 40% del campo glaciado con respecto a las mediciones realizadas por Lorenzo.

No cabe duda que el régimen eruptivo del volcán con las constantes fumarolas, eventuales caídas de ceniza y roca incandescente que rueda o penetra la superficie glaciar, ha sido decisivo para reducir las dimensiones del cuerpo helado.

Debe mencionarse también la existencia de áreas que se consideran periglaciares, denominadas por los montañistas "hielo negro", que son zonas donde el agua intersticial en la ceniza y suelo volcánico se congela y forma una superficie denominada *permafrost*, es decir, suelo permanentemente congelado.

La evolución del sistema glaciar del Popocatépetl es de especial interés para los habitantes de la ciudad de Puebla, ya que muchos de los mantos freáticos de los que se surte agua a la ciudad podrían sufrir algunas alteraciones o perder aforo.

TABLA 3

ÁREA ESTIMADA DE LOS GLACIARES DE MÉXICO	
Citlaltépetl	9,000 ha
Popocatépetl	400 ha
Iztaccíhuatl	≈7,500 ha

La reducción del área glaciar del Popocatépetl nos parece natural debido al proceso eruptivo que no ha finalizado; es preocupante una ablación y eventual remoción de la masa glaciar por una erupción mayor, la cual causaría una remoción de agua líquida que descendería formando flujos por el sistema de barrancas del noreste del cono e invadiría en unos minutos numerosas poblaciones (Figura 2).

En el Citlaltépetl se encuentra el mayor glaciar mexicano: el glaciar norte con un área de 9 km², al que se vinculan la lengua del Chichimeco y la del Toro. Otro importante cuerpo helado es el Jamapa. Los glaciares del Citlaltépetl han mantenido una mayor estabilidad debido a las corrientes húmedas del Golfo de México y, por tanto, una alimentación más estable. También han sufrido reducciones significativas debido probablemente al cambio climático global y a la deforestación del bosque, factores que alteran las condiciones climáticas locales.

Las lenguas de los glaciares del Citlaltépetl tienen un límite relativamente bajo de 4,650 m, que es la zona de transición entre la zona periglacial y los glaciares.

¿Cuál es el futuro de los glaciares de México? Podemos suponer que su reducción continuará de acuerdo al patrón mundial de pérdida de masa de los glaciares. La pérdida de la capa de ozono, el efecto invernadero, el cambio climático global, el fenómeno de *El Niño* y otros muchos factores locales (crecimiento de ciudades, reducción de regiones boscosas, etcétera) han incrementado en unos pocos grados la temperatura del planeta. Algunos especialistas aseguran que la temperatura media anual ha subido unos 5 °C desde que se inició la revolución industrial a mediados del siglo pasado. No pretendemos aquí analizar estos factores, pero si señalar que estos cam-

bios modificarán el delicado equilibrio de los glaciares y que la humanidad deberá prepararse para enfrentar regímenes climáticos más extremos con la probable reducción de zonas agrícolas en ambos hemisferios.

BIBLIOGRAFÍA

- CUPREDER/BUAP, Gobierno del Estado de Puebla, *Reporte de vuelos 1996-1997. Vuelos 020897, 241197.*
- Reportes del programa de expediciones de montaña, Agrupación Universitaria de Montaña de la BUAP, Campañas 1987-1992*
- Delgado, H., *Monitoring volcanic activity through study of contaminated glacial ice at Popocatépetl volcano*, General Assembly of IAVCEI, 1997.
- Lorenzo, J.L., *Los glaciares de México*, Serie Investigaciones, Instituto de Geofísica UNAM, 1962
- Fletcher, N.H., *The chemical physics of ice*, Cambridge University Press, 1970.
- Hobbs, P.V., *Ice physics*, Clarendon Press, Oxford, 1974.
- Peterson, W.S.B., *The physics of glaciers*, International Glaciological Society, Pergamon Press, Oxford, 1991.
- Goody, R.M., *The atmospheres*, Harvard University, Prentice Hall, 1985.
- Bloom, A.L., *The surface of the Earth*, Prentice Hall, 1989.
- Laporte, L.F., *Ancient environments*, Prentice Hall, 1990.
- Martin, P.S., *Quaternary extinctions, a prehistoric revolution*, Arizona University Press, 1984
- Jáuregui, E., *Aspects of monitoring local/regional climate change in a tropical region*, *Atmósfera*, 5, 1992.
- Saunders, J.J., *Le mastodon américaine*, La Recherche, 92, 1991.
- Lamb, H.H., *Climate: present, past and future*, Vol. 2, Methuen, 1997.
- Rivera, A., Mayorga, R. y Tovar, C., *Evaluación de amenazas del Popocatépetl*, Cartografía y análisis espacial, CUPREDER-BUAP, 1997.
- (Alejandro Rivera Domínguez es director académico del Centro Universitario de Prevención de Desastres de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.)