

MONITOREO DE LOS GLACIARES DEL POPOCATEPETL

H. Delgado¹ y M. Brugman²

RESUMEN

Los glaciares existentes en volcanes activos como el Popocatepetl, representan un peligro adicional a los peligros volcánicos comunes cuando se verifican erupciones explosivas. En caso de presentarse éstas, existe la posibilidad de generación de flujos de lodo debido a la mezcla de material piroclástico y agua proveniente de la fusión del glaciar, que viajarían por los cauces que son drenados actualmente por los glaciares. Esta clase de eventos han sucedido en el pasado geológico del volcán. De verificarse este tipo de fenómenos en la actualidad, estos plantearían un problema serio ya que existen numerosos asentamientos humanos a lo largo de los mencionados cauces. Por razones de protección civil, es importante estudiar los glaciares de volcanes activos para evitar que se repitan desgracias como la de Armero, Colombia en noviembre de 1985. Además, el estudio de los glaciares implica conocer más acerca de otros peligros geológicos de largo plazo como la desertificación.

Para poder conocer el riesgo de generación de lahares asociado a los glaciares, es necesario conocerlos. No obstante los inventarios glaciales de Lorenzo (1964) y Delgado (1993), el conocimiento de los glaciares del Popocatepetl es mínimo debido a que se trata de masas de hielo dinámicas que requieren ser monitoreadas continuamente. La expedición glaciológica de abril de 1995, llevó a cabo estudios para determinar el espesor del glaciar del Ventorrillo, topografiar el glaciar (ambos con el fin de obtener el volumen de hielo existente en la actualidad), medir las densidades y temperaturas del hielo (para obtener la equivalencia del hielo a agua) y sentó las bases para un monitoreo de los glaciares a largo plazo, al instalar estacas equipadas con reflectores y termistores. Los datos actualmente en procesamiento, servirán para llevar a cabo simulaciones de flujos de lodo (lahares).

Este trabajo muestra la importancia de estudiar los glaciares, reporta la situación actual de retroceso de los glaciares del Popocatepetl, así como las actividades que se han llevado a cabo para evaluar los peligros asociados a ellos y finalmente, comenta los trabajos en perspectiva para un mejor conocimiento de los mismos y evaluación de su papel como potenciales peligros geológicos.

1. INTRODUCCION

Los glaciares mexicanos constituyen una verdadera rareza debido a su presencia en latitudes subtropicales, sin embargo, deben su presencia a la altitud de las montañas que los alojan. Los glaciares del Popocatepetl, son de una presencia única y bella que recurrentemente se compara con la presencia del Monte Fuji en Japón dada su majestuosidad. Pero su presencia es de gran importancia también en la recarga de los acuíferos del Valle de Puebla y de las poblaciones de su vertiente occidental en el Estado de México durante la época de secas. Estos glaciares sin embargo, constituyen un factor de peligro en el caso de verificarse una erupción volcánica explosiva en el Popocatepetl.

¹ Instituto de Geofísica, U.N.A.M. Circuito Exterior, C.U. Coyoacán 04510 México, D.F.

² Environment Canada. National Hydrology Research Institute. 11 Innovation Boulevard Saskatoon, SK S7N 3H5.

Este trabajo trata de mostrar la importancia que tiene el estudio de los glaciares en la evaluación de peligros asociados a la actividad volcánica y, adicionalmente, reporta el estado actual que guardan los glaciares del Popocatepetl, su relación con la actividad volcánica actual describiendo los trabajos que actualmente se llevan a cabo y la manera de continuarlos en el corto y largo plazo

2. ¿PORQUE MONITOREAR LOS GLACIARES?

En esta sección se mencionan varios aspectos que permiten visualizar la relación íntima que existe entre glaciares y actividad volcánica. Además, las razones por las que es importante el estudio de los glaciares para la evaluación de peligros y riesgos geológicos.

Los glaciares son masas de hielo en movimiento. Esta es una definición muy objetiva que describe en forma clara a los glaciares y los distingue de otros cuerpos de hielo como campos de congesa, campos de nieve, e incluso campos de hielo muerto

Un glaciar es un cuerpo dinámico que se encuentra en movimiento debido a la acción de la gravedad (Embleton y King, 1968) Debido a este movimiento, se forman diversas estructuras tales como grietas y rimayas, ojivas, etc. y se producen otras tantas como morrenas laterales, de fondo, terminales, etc (depósitos de material producto de la erosión basal de un glaciar), estriaciones en las rocas que erosiona, etc. El hielo que constituye a un glaciar, es un producto metamórfico a partir de un material sedimentario (la nieve) que se deposita y sufre una serie de cambios mineralógicos al cambiar las condiciones termodinámicas (cambios de presión y temperatura) debido a las condiciones que imperan en las altas montañas y a la presión litostática por enterramiento de las capas de años subsecuentes (Shumshiy, 1964).

Los glaciares se forman por la acumulación de nieve (o granizo, lluvia, etc.) estacional año tras año Para ello, se requieren dos condiciones fundamentales: la primera es que existan las condiciones de temperatura adecuadas para que la precipitación se conserve en forma de hielo durante todo el año. Estas condiciones son generalmente de carácter latitudinal ya que en las montañas de latitudes altas, las condiciones de temperatura durante el año se encuentran cerca o muy por debajo de los 0 °C, debido al bajo ángulo de incidencia de la radiación solar. En latitudes más bajas, las condiciones de temperatura son dadas por la altitud, como es el caso de las grandes montañas de México (Popocatepetl, Iztaccihuatl y Pico de Orizaba) donde se rebasan los 5,000 m.s.n.m. y las condiciones de temperatura son bajas, particularmente en las caras norte de estas montañas que no reciben suficiente radiación solar durante el día. La segunda condición es que el balance hídrico sea negativo, es decir, que haya más acumulación en la época de recarga (a través de las nevadas, lluvias, granizo, etc.), que pérdida de agua en la época de ablación (por fusión, evaporación, sublimación, etc.), de manera que la línea de equilibrio (ablación-acumulación) de los glaciares avance pendiente abajo y de esa manera, los glaciares crezcan. Con la progresiva acumulación de masa sobre las pendientes, los glaciares se mueven bajo la influencia de la gravedad (Embleton y King, 1968).

Los glaciares de todo el mundo se encuentran actualmente en retroceso debido a cambios climáticos importantes de carácter global. Los glaciares de México, por su tamaño, inclinación de la pendiente donde se encuentran y posición geográfica (además de su cercanía a zonas densamente pobladas como la Ciudad de México y Puebla), son sumamente sensibles a los cambios climáticos. Evaluar los cambios de estos glaciares es muy importante para reconocer la importancia de los cambios climáticos en el centro de México. No obstante la importancia del estudio de los glaciares para evaluaciones de carácter ambiental y de desastre ecológico, los objetivos del presente trabajo son muy distintos, aunque vale la pena mencionar que los estudios que se llevan a cabo actualmente, habrán de servir para muchos otros propósitos.

Las altas montañas de México, son volcanes activos (particularmente el Popocatepetl y el Pico de Orizaba) y la presencia de glaciares cerca de sus cumbres agrega un factor de riesgo adicional a los peligros volcánicos. Los

glaciares presentes en las cumbres de volcanes activos representan una reserva de agua que, al fundirse por acción de la actividad volcánica, pueden generar flujos saturados a hipersaturados (flujos de lodo, de detritos y lahares). Los procesos por medio de los cuales la actividad volcánica, en conjunción con los glaciares puede generar este tipo de flujos son dos (los lahares y otros flujos altamente concentrados también pueden generarse por la removilización de cenizas volcánicas recién caídas, cenizas de erupciones anteriores y suelos, mediante lluvias torrenciales antes, durante o después de una erupción, las cuales no se mencionan en este trabajo) generación de flujos piroclásticos erosivos y explosiones dirigidas (directed blasts).

Flujos piroclásticos turbulentos pueden ser sumamente erosivos y causar fusión del hielo glacial, particularmente en glaciares que cuentan con campos de grietas, las cuales agregan área de exposición y permiten la fusión del hielo a niveles más profundos dentro del glaciar. Flujos piroclásticos de regulares dimensiones producidos en la madrugada del 12 de noviembre de 1985 en el volcán Nevado del Ruíz (Colombia), ocasionaron la fusión de parte del glaciar y el agua producto de esta fusión, mezclada con el material piroclástico, formó un flujo que descendió por las laderas de la montaña, agregando al material transportado, suelo, sedimentos sueltos y árboles que encontró a su paso. Este flujo (lahar) se encañonó en el río, alcanzando hasta 40 m de altura sobre el cauce normal del río, el cual 60 km corriente abajo desemboca en una planicie. Al llegar a la planicie, el flujo descargó el material transportado formando un abanico aluvial que cubrió una extensa área con más de 3 m de espesor de lodo con la consistencia del concreto. La población de Armero se encontraba situada en la planicie vecina a la desembocadura de este río. Más de 20,000 personas perdieron la vida (Williams, 1989).

Las explosiones dirigidas pueden originar la destrucción (parcial o total) de un domo de lava, fragmentar la roca y adicionalmente, destruir un glaciar produciendo su fusión. La mezcla de la roca fragmentada y el agua de fusión pueden generar un flujo de lodo o de detritos que al descender ladera abajo, puede adquirir una mayor cantidad de material (suelo, rocas, árboles, etc.), aumentando la concentración del flujo y viajar por varios kilómetros antes de su emplazamiento final. Esta podría ser la historia del Lahar de San Nicolás que se encuentra actualmente en estudio en el flanco noreste del volcán Popocatepetl. Este depósito posee una litología sumamente homogénea (clastos de andesita gris), rara en un lahar, sin embargo la estructura y distribución del depósito es consistente con la de los flujos hiperconcentrados (estratificación, imbricación, poca a moderada clasificación del material, redondeamiento de clastos y amplio rango de tamaño de grano, es decir de arenas finas a grandes bloques de hasta 2 m de diámetro). El Lahar de San Nicolás se formó hace aproximadamente 1350 años a partir de una explosión dirigida que destruyó un domo andesítico que ocupaba y rellenaba el cráter del Popocatepetl. Los productos así fragmentados se mezclaron con el hielo glacial y originaron un flujo de detritos que bajó por la ladera noreste del volcán hasta alcanzar los primeros contrafuertes del volcán Iztaccihuatl. La energía de este flujo fué de tal magnitud que, salto por encima del primer contrafuerte erosionándolo y dejando una incisión antes de virar casi en ángulo recto hacia el sureste. El flujo recorrió la barranca que ahora ocupan las poblaciones de Santiago Xalizintla y San Nicolás de los Ranchos dirigiéndose sobre el río hacia San Buenaventura Nealticán y continuó hasta San Jerónimo Tecuanipán. Los depósitos asociados a este evento se han reconocido hasta una distancia de 30 km, pero los trabajos no han sido completados aún por lo que se presume que pudieron seguir por una distancia aún mayor. Los depósitos que dejó este flujo consisten de tres oleadas diferentes con espesores de hasta 10 m en la zona proximal, 3 m en la parte media y más de 1 m en las zonas distales (porciones centrales de cada zona), hasta acuñarse antes de desaparecer lateralmente. Este flujo siguió el curso del río completamente, viajando paralelamente a las lavas de Xalizintla y en los sitios donde el río no poseía un relieve significativo, se expandió formando un abanico aluvial. En la actualidad, más de 30,000 personas viven en las inmediaciones del río (*Alseseca, Xalapexco o Nexapa*)

Un fenómeno adicional que podría ocurrir en los glaciares de las montañas de México (en particular en el Popocatepetl), es un eventual deslizamiento de la masa glacial por aumento de la temperatura del basamento y fusión generalizada de la base del glaciar, produciéndose así, el derrumbe del glaciar. En primera aproximación, parece improbable que este tipo de eventos pudiera ocasionar un súbito flujo de lodo o de detritos, sin embargo, este tipo de derrumbes podría representar un peligro para las zonas más cercanas al volcán (Tlamacas por ejemplo) donde generalmente hay turistas. Un desprendimiento de esta naturaleza tendría su impacto más fuerte en el ambiente y

sus consecuencias serían evidentes en el largo plazo.

Las razones por las cuales es necesario llevar a cabo estudios en los glaciares del Popocatepetl son las siguientes:

1) El Popocatepetl posee una masa de hielo cerca de su cima, cuyas características no se conocen en detalle. El papel que juega actualmente o que podría jugar durante una eventual erupción volcánica debe ser evaluada, dada la densidad de población concentrada en las inmediaciones de los cauces que drenan las aguas de deshielo glacial.

2) La lección de Armero, Colombia es una experiencia que no se debe repetir. Existen evidencias geológicas que indican que los glaciares han jugado un papel importante en el pasado, en la generación de flujos de lodo, de detritos y lahares en el Popocatepetl. Estas evidencias muestran que, los flujos en que ha intervenido agua proveniente de los glaciares, han fluído a lo largo de los arroyos del flanco noreste y sus productos están distribuidos a lo largo de tales escorrentías, sobre los cuales existen hoy en día asentamientos humanos. Es de suma importancia reconocer los volúmenes de agua existentes en forma de hielo, con el fin de estimar mediante la simulación de diferentes escenarios, los alcances de flujos de lodo hipotéticos y el tiempo de arribo de los mismos a las zonas pobladas. Esta información sería de gran utilidad para el diseño de planes de emergencia.

3) Los glaciares son masas de hielo dinámicas, es decir, cambian continuamente. Los cambios de un glaciar generalmente representan una respuesta a cambios de carácter climático. Los cambios que sufren los glaciares del Popocatepetl están asociados a estos cambios, pero además pueden estar influenciados por la actividad volcánica. Para determinar esto, es necesario llevar a cabo actividades de monitoreo que permitan conocer el papel que juega esta actividad en la modificación de los volúmenes de agua (hielo). Un excelente parámetro de monitoreo lo constituye la medición regular de la velocidad de movimiento de los glaciares, a través de estacas clavadas en el glaciar y controladas por métodos geodésicos. Los métodos fotogramétricos permiten tener un registro de los cambios del área glacial, que complementados con el uso de las estacas mencionadas (como puntos de control terrestre) se puede tener un inventario glacial completo. Adicionalmente, se recomienda llevar a cabo la medición de espesores de nieve y hielo mediante métodos tales como el radar, perforación, sismicidad, etc. y de esta manera complementar la información de área glaciada calculando el volumen a través del conocimiento de espesores.

4) La generación de lahares y otros flujos asociados con los glaciares, puede darse mediante la combinación de un evento eruptivo explosivo que afecte a aquéllos a través de la formación de flujos piroclásticos erosivos o la verificación de explosiones dirigidas, condiciones potenciales en el caso del Popocatepetl. En la actualidad sabemos que el Popocatepetl es el volcán que, sin encontrarse en erupción, posee las mayores tasas de emisión de SO₂ en el mundo y es el segundo volcán en el planeta en la emisión de CO₂. También sabemos que estos gases son de origen magmático, es decir, la emisión de gases en el Popocatepetl está asociada a la desgasificación de grandes volúmenes de magma que se encuentran en su cámara magmática, debajo del volcán. El que un volcán emita grandes cantidades de gas, asociado con un magma que aún no sale de su lugar de confinamiento, representa un factor de preocupación, ya que las posibilidades de producirse una erupción explosiva son grandes y con ello la producción de lahares mediante la asociación mencionada anteriormente.

5) El deslizamiento de la masa glacial, si bien no se puede afirmar que pueda originar un flujo de lodo, constituiría un desastre ambiental de gran impacto, dada la importancia que tiene el agua proveniente del deshielo estacional, en la recarga de los acuíferos de Puebla y el Estado de México. Al desaparecer esta masa de hielo, desaparecería tal fuente de recarga y se originaría (¿o aceleraría?) un proceso de desertificación de grandes consecuencias al largo plazo.

6) Los flujos de lodo o el desprendimiento de la masa glacial, en caso de darse, serían fenómenos naturales imposibles de detener. Sin embargo, las consecuencias asociadas con ellos podrían aminorarse si se prevén éstas mediante una adecuada planeación e información a autoridades y población civil.

3. LOS GLACIARES DEL POPOCATEPETL

Los glaciares del Popocatepetl han sido inventariados en dos ocasiones. Aún cuando Flint (1957) reporta un área glacial de 3 km² para los glaciares mexicanos, el primero en estudiarlos fué José Luis Lorenzo, quién organizó la Sección de Glaciología del Instituto de Geofísica en 1958. Durante su corta vida, la Sección de Glaciología llevó a cabo el inventario glacial de los volcanes Pico de Orizaba, Popocatepetl e Iztaccíhuatl, entre 1958 y 1960, como parte de las actividades del *Año Geofísico Internacional*, llevado a cabo en México en 1958 (Lorenzo, 1964). El segundo inventario de los glaciares del Popocatepetl e Iztaccíhuatl, fué llevado a cabo por Delgado y colaboradores entre 1982 y 1984 (Delgado et al., 1986; Delgado, 1988; Delgado, 1993).

Lorenzo (1964) reportó la existencia de tres glaciares en el Popocatepetl: el glaciar Norte (0.20 km²), el del Ventorrillo (0.40 km²) y el glaciar Noroccidental (0.12 km²), totalizando un área glaciada de 0.72 km². La metodología utilizada por Lorenzo, se basó en el uso de fotografías aéreas y trabajo de campo con apoyo altimétrico con rangos de error de ± 10 metros. Lorenzo (1964) recomendó el monitoreo de los glaciares del Popocatepetl mediante la instalación de estacas con el fin de marcar con claridad la diferencia entre los glaciares del Popocatepetl en su parte superior (ya que durante estos trabajos no había sido posible observar una separación clara entre ellos en la parte superior de la montaña haciendo difícil su discriminación), determinar el movimiento glacial y adicionalmente hacer observaciones de la parte terminal de los glaciares.

Delgado et al. (1986), y Delgado (1988 y 1993) reportaron la existencia de dos glaciares: el glaciar del Ventorrillo (0.453 km²) y el glaciar Noroccidental (0.160 km²), totalizando 0.559 km² de área glaciada para 1982, lo cual representa un 78 % del total reportado por Lorenzo (1964). La determinación de los límites entre glaciares se llevó a cabo mediante trabajo de campo (apoyado en el uso del altímetro con errores de ± 10 metros) y uso de fotografías aéreas, la cartografía se hizo en base al mapa topográfico de INEGI (1983) escala 1:20,000 con distancia entre curvas de nivel cada 20 metros. El error cartográfico es de ± 10 metros. Las discrepancias entre la información producida por Lorenzo (1964) y por Delgado (1993) se deben a que el glaciar sufrió cambios dramáticos entre 1958 y 1982. Delgado et al. (1986) lograron discriminar los límites entre glaciares en su parte superior y en base a ello, los glaciares Norte y Ventorrillo fueron considerados uno. El área glaciada total reportada por Delgado (0.453 km²) representa el 76 % de la reportada por Lorenzo para estos dos glaciares juntos (0.60 km²) lo que representa una disminución del 24 % en el área glaciada debido a retroceso de este glaciar a lo largo de 24 años. El glaciar Noroccidental por su parte, experimentó un retroceso (pérdida de área glacial) de 12 % para el mismo período. Durante sus experimentos, Delgado et al. (1986) instalaron una serie de estacas sobre el glaciar, pero fueron destruidas por los alpinistas.

Los glaciares descritos por Delgado (1993) siguen siendo los mismos que se pueden observar en la actualidad, aunque obviamente, con diferentes dimensiones debido a los cambios que han sufrido desde 1982. El glaciar del Ventorrillo drena hacia el noreste, hacia el estado de Puebla, mientras que el glaciar Noroccidental drena hacia el occidente, hacia el Estado de México. Adicionalmente a los glaciares, Delgado et al. (1986) y Delgado (1993) reportan la presencia de varios campos de suelos permanentemente congelados. Estos son: el campo Norte (0.069 km²), Yancuecole (0.043 km²), Las Cruces (0.119 km²), y Coyotes (0.008 km²), que representan un área total de 0.239 km² cubierta por suelos permanentemente congelados. Estos suelos permanentemente congelados consisten de cenizas volcánicas saturadas en agua que ha sido congelada por las bajas temperaturas. Durante la época de secas (marzo a mayo principalmente) el hielo contenido entre los poros de las cenizas, se funde y forma una mezcla pastosa que fluye por reptación pendiente abajo. Estos procesos de soliflucción no son muy extensos, pero llegan a alcanzar altitudes de menos de 4,500 m.s.n.m., es decir, llegan muy cerca de Las Cruces en el flanco norte, ocasionando problemas algunas veces, al bloquear las veredas de ascenso al sitio mencionado, interrumpiendo por varios días el tránsito pedestre hacia la cumbre por esa ruta.

El retroceso de los glaciares del Popocatepetl es un fenómeno que se ha observado a lo largo de varios años mostrando avances y retrocesos, sin embargo, la tendencia general de los glaciares es la de retroceder. Este

retroceso ha sido particularmente rápido en algunos años por lo que es importante reconocer las causas. La lengua terminal del glaciar del Ventorrillo se encontraba aproximadamente a 4,390 m.s.n.m. en 1910 (White, 1981); a 4,690 m.s n.m en 1958 (Lorenzo, 1964); a 4,600 m.s.n.m. en 1978 (White, 1981) y a 4,780 m.s n.m. en 1982 (Delgado, 1993) y a 4,879 m s.n.m. en abril de 1995 (dato preliminar). La tasa de retroceso entre 1910 y 1958 fue de 6.25 m/año, entre 1958 y 1978 la tasa de avance se verificó a 4.5 m/año; entre 1978 y 1982 la tasa de retroceso fué impresionante, de 45 m/año; finalmente, entre 1982 y 1995 la tasa de retroceso fué de 7.6 m/año. Para poder definir el significado de estos patrones se requiere el monitoreo continuo.

Por lo anterior, es muy importante reconocer y monitorear las tendencias de los glaciares del Popocatepetl, con el fin de conocer las causas de su comportamiento y así, planear las soluciones adecuadas a los problemas que plantean.

4. OBSERVACIONES HECHAS DURANTE LA CRISIS DE DICIEMBRE DE 1994

El miércoles 21 de diciembre de 1994, se verificó en el volcán Popocatepetl un evento de tipo vulcaniano (*vulcanian gas burst*) que marcó el inicio de un período de emisión de gases, vapor y cenizas que continúa hasta el mes de junio. Durante los primeros días de actividad se procuró evaluar todas las posibilidades de peligro que pudieran representar una amenaza para la seguridad de la población. Uno de los peligros que se procuró investigar y atender fué la evaluación del peligro asociado a la presencia de los glaciares del Popocatepetl, durante esta fase de actividad del volcán

El Instituto de Geofísica lleva a cabo estudios en los glaciares del Popocatepetl, como parte de un proyecto de investigación apoyado por la Dirección General de Apoyo al Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México, en colaboración con el Instituto Nacional de Investigaciones Hidrológicas del Canadá (NHRI). Los que escriben, visitaron el volcán en varias ocasiones y de estas visitas se hicieron varios reportes que se transcriben a continuación.

Reconocimientos aéreos durante diciembre:

Diciembre 27, a las 13 00 horas, en helicóptero.

Diciembre 27, de las 15:00 a las 17:00 horas, en avión para toma de fotografías aéreas

Diciembre 28, a las 13:00 horas, en helicóptero.

Diciembre 29, a las 09:00 horas, en helicóptero

En todos estos vuelos se hicieron observaciones de los glaciares y de la columna de cenizas. Además, se filmaron videos que indican el tiempo y fecha de las observaciones, los que fueron entregados al Centro Nacional de Prevención de Desastres. Las fotografías tomadas por las tardes resultaron de muy buena calidad, mientras que las fotografías tomadas por la mañana no fueron satisfactorias ya que los glaciares se encontraban a contraluz (diciembre 29). En diciembre 28 se tomó un video del vuelo completo del helicóptero desde la Ciudad de México y de regreso a ella, que muestra la relación de la ciudad con los volcanes.

Las observaciones básicas son que el volcán continuó emitiendo "puffs" consistentes de una nube de gases de color naranja parduzco, vapor y cenizas. Estos puffs tienen su origen en el lado oriental del fondo del cráter. La parte basal-central del cráter estuvo oscurecida todo el tiempo. El viento soplaba a gran velocidad del suroeste y acarreó la pluma hacia el noreste, con variaciones hacia el este. Se observaron cenizas frescas de color blanquizco sobre las faldas del volcán, a bajas elevaciones que podrían indicar la presencia de varios centímetros de espesor de cenizas en el flanco noreste del volcán.

Se observó que varios bloques grandes de roca han rodado pendiente abajo en los flancos norte, este y sur del

volcán. La porción noroeste se ha visto cubierta por una ligera capa de ceniza fina y los glaciares aparecen limpios. Ha caído más ceniza en el glaciar, sobre la nieve, sobre la orilla del cráter (alrededor de 50 m de la orilla) y hacia el norte. El espesor de la ceniza parece ser de solamente unos milímetros, ya que es posible observar las rugosidades de la nieve debajo.

Evaluación de los glaciares del Popocatepetl (Diciembre 27-30, 1994)

Desde el principio de la renovada actividad del volcán, una de las preocupaciones fué el riesgo asociado con la presencia de los glaciares cerca de la cumbre del Popocatepetl. Esta preocupación creció cuando varias de las personas que habían participado en vuelos de helicóptero desde el principio de la actividad, habían reportado la existencia de grietas sobre el glaciar y habían llamado poderosamente su atención las grietas cercanas a la cumbre y algunos derrumbes observados en otras grietas hacia la parte media del glaciar. Las grietas en cuestión se encuentran cerca del borde del cráter y se les ha observado fracturas frescas. Se pensaba que estas fracturas eran anormales y se nos pidió hacer comentarios sobre esta situación y revisar los peligros que poseen los glaciares.

Desde el primer día (Diciembre 27), se nos preguntó si había algún peligro inminente de producirse un lahar a partir de los glaciares. Revisamos juegos de fotografías aéreas viejas y preguntamos a varias personas que habían participado en vuelos anteriores sobre el volcán. Durante el primer vuelo del día 27 de diciembre a las 13:00 horas, observamos que las grietas existían tal como se nos habían descrito y notamos la presencia de grietas adicionales cortando enteramente al glaciar del Ventorrillo, pero no consideramos que esto fuera anormal. Comunicamos por medio de un teléfono celular que no observamos ninguna evidencia de agrietamiento anómalo en el glaciar. La nieve descansaba sobre los glaciares hasta debajo del terminus (el borde de la lengua del glaciar del Ventorrillo). Hubiéramos notado agrietamiento fresco en el terminus y en la parte baja del glaciar si hubiera habido cualquier evento de desgajamiento del glaciar. Consideramos que, ciertamente, existe una fuerte posibilidad de que un evento de tal naturaleza se llevara a cabo en el futuro, pero habría primero una propagación pendiente abajo del glaciar, antes de su derrumbamiento. Nosotros esperaríamos que deberían pasar varias horas a días de evolución de agrietamientos como preparativos de un desgajamiento. Sin embargo, no vimos ninguna grieta que indicara que un evento de esa índole estuviera ocurriendo en ese preciso momento. No había vapores saliendo por ninguna de las grietas, ni observamos el basamento rocoso en el fondo de ellas. Las grietas siguen los mismos patrones que han tenido por años, excepto por el renovado agrietamiento en las partes más elevadas. La experiencia de los montañistas reporta que la grieta "maestra" ha venido agrandándose y paulatinamente empeorando sus condiciones a través de los años, y por tanto este hecho no es nuevo. Lo que sucede es que dicha grieta se ha venido agrandando y quedando más expuesta durante la época de secas de los meses invernales.

Resumen de los resultados presentados el 29 de diciembre de 1994

Primero, se presentó el video tomado durante los vuelos alrededor del volcán, para poder describir de manera clara la situación a los miembros del Comité Científico Asesor para el caso del Popocatepetl, reunidos en el CENAPRED.

1. El objetivo de nuestras visitas al volcán durante el 27-29 de diciembre era saber que es lo que estaba sucediendo debajo de los glaciares del Popocatepetl.
2. Existe la posibilidad de que se presente un deslizamiento de la masa glacial y se verifique un derrumbe de hielo debido a la renovada frescura de la zona de grietas que está aproximadamente a 200 m (verticalmente) del borde del cráter.
3. La observación de abultamientos que se propagan a favor de la pendiente es consistente con la posibilidad de un desgajamiento del glaciar. Los rasgos topográficos sugieren esto, aunque los abultamientos no están acompañados de agrietamientos nuevos. Si se observara la aparición de grietas nuevas en la región de los abultamientos, un desgajamiento podría estar en gestación y un derrumbe mayor sería posible.
4. Una grieta fresca apareció durante la semana del 27 al 29 de diciembre y se extiende a lo ancho de la parte

superior del glaciar del Ventorrillo y en parte del glaciar Noroccidental a una elevación aproximada de 5,200 m.s.n.m. Una tasa estimada de apertura de estas grietas es de cerca de 1-30 cm/día. Una grieta similar de forma arqueada ha comenzado a formarse aproximadamente 100 m (verticalmente) a partir de la primera grieta. La mas baja de dos grietas arqueadas conecta a otra grieta mayor al norte de ésta, donde se observa el cruce de dos grietas frescas. La forma arqueada de las grietas y la frescura de las grietas que se cruzan a 5,200 m.s.n.m. podría estar relacionada con movimiento acelerado del glaciar pendiente abajo.

5. Este patrón del glaciar podría deberse también a un patrón de largo plazo de adelgazamiento del glaciar y retroceso relacionado con cambios climáticos observados desde 1978 en el volcán (Delgado, 1993) Este mismo patrón de adelgazamiento y retroceso también es observado en todo Norteamérica en las décadas recientes, desde California hasta el alto ártico del Canadá, y el carácter cambiante de las grietas del glaciar del Ventorrillo es enteramente consistente con estos patrones regionales. Entonces, aunque debemos ser cautos acerca de la estabilidad del glaciar y la potencialidad de generación de lahares, no creemos que existe alguna anomalía en las grietas del glaciar en este momento. Es importante sin embargo, monitorear sus cambios.

6. Es importante hacer notar que el agrietamiento fresco sobre el glaciar del Ventorrillo se encuentra localizado justo un poco arriba de la elevación de la base del piso interior del cráter del Popocatepetl. El espesor del hielo en la región de la zona de grietas, no se conoce en este momento. La relación entre las grietas localizadas en el volcán y la actividad eruptiva no se conoce, pero existe la posibilidad de una conexión hidrotermal entre la base del glaciar en la altitud y el conducto central del volcán, aunque esta posibilidad nos parece remota por el momento, debido al carácter estratificado de las secuencias de lava en este flanco del volcán, justo debajo del glaciar, y a que no se observó ninguna emanación de gases a través de las grietas del glaciar, manchas de azufre sobre el glaciar que indicaran la existencia de un punto de emanación de gases debajo, ni un deshielo anómalo debajo del glaciar. No obstante, no sabemos nada acerca de un posible deslizamiento del glaciar en su base en esas altitudes. Por ello, sugerimos que el agrietamiento del glaciar en estas regiones y el glaciar entero sean monitoreados

7. Acerca de la posibilidad de que las regiones donde existen suelos permanentemente congelados, alrededor de los glaciares, podrían ser el sitio de un incremento de deformación. No se han observado hasta el momento nuevos rasgos lobulados en ninguno de los vuelos de reconocimiento, aunque las observaciones fueron hechas en las regiones donde se sabe de la existencia de hielo y cenizas combinadas en forma de suelos permanentemente congelados (permafrost). Por ejemplo, la parte superior de la ruta de Las Cruces que no está cubierta de hielo glacial.

Amenazas inmediatas en los glaciares del Popocatepetl.

- 1 Derrumbe del glaciar y creación de flujos de lodo de pequeñas dimensiones
- 2 Fusión en la base del glaciar del Ventorrillo.
- 3 Formación de una fuente de emisión de gases debajo del glaciar.
4. Infiltración del agua producto de fusión, al interior del conducto del volcán.

Medidas para evaluar las amenazas inmediatas (considerando que el volcán no ofrece seguridad por el momento para llevar a cabo trabajo de campo en el glaciar):

- 1 Una cámara de video debe ser instalada con vista hacia los glaciares y zonas de generación potencial de lahares, iniciación y propagación de un derrumbe del glaciar o deshielo subglacial indicativo de la aparición de un nuevo foco de emanación de fumarolas.
- 2 Toma de fotografías profesionales de la parte superior del glaciar a intervalos regulares, incluyendo el terminus del glaciar y las grietas del glaciar, así como las áreas marginales donde existen suelos permanentemente congelados
3. Instalación de monitores de eventos a lo largo del glaciar para seguir la propagación de un lahar corriente abajo, hacia el norte, noreste y oeste del volcán. La ausencia de nieve y hielo en otras laderas minimiza la probabilidad de un lahar debido a que la época de secas está comenzando. Durante la época de lluvias que comienza en mayo y dura hasta octubre, existe la posibilidad de generación de lahares en cualquier ladera del volcán debido a las

lluvias que aportan suficiente agua en las laderas del volcán, aunque esto deberá de coincidir con una intensificación de la actividad del volcán.

4. Toma de fotos aéreas verticales que permitan la visión estereoscópica del volcán. Se sugiere tener un vuelo por semana durante un mes cerca de los centros eruptivos. Después de un mes, se debe evaluar la frecuencia de los vuelos. Estas fotografías podrán usarse en el mapeo de la distribución de hielo y nieve, cubierta de cenizas, topografía, seguimiento de cambios en las grietas y velocidad del hielo si es posible. Se planea el uso del sistema PCI disponible en el NHRI para el principio.

Medidas secundarias (importantes, pero que deben ser hechas sólo si el peligro potencial lo permite):

1. Mejorar el mapeo usando interferometría de radar (SAR).
2. Procurar un estudio más profundo de la posibilidad del desarrollo de un derrumbe de hielo y de cambios en el comportamiento del deslizamiento del glaciar.
3. Procurar la determinación de los volúmenes de hielo y de cambios en el volcán.
4. Estudiar el mecanismo de flujo del glaciar (deslizamiento vs. congelamiento de la base del glaciar)
5. Evaluación del balance de masa y variación anual.
6. Determinar densidades y temperatura de la nieve, impacto en la generación de lahares.
7. Modelado del balance hídrico en el volcán, y registro continuo anual de acumulación, fusión, temperatura interna, velocidad del viento, precipitación radiación solar, etc.
8. Construcción de un modelo digital del terreno de alta resolución.

Mediciones Específicas Necesarias:

1. Velocidad del hielo (instalar 10 reflectores en el volcán y seguir el movimiento del hielo mediante levantamientos geodésicos y topográficos desde una distancia de aproximadamente 10 km).
2. Espesor del hielo (mediante el uso de radio ecosondeo de 5 Mhz y antenas monopolos tipo EKKO de 5, 10, 25 y 50 Mhz).
3. Profundidad de los suelos permanentemente congelados en las laderas superiores (usando la misma instrumentación descrita en 2).
4. Topografía del glaciar y sus cambios temporales
5. Comportamiento de la fusión y la acumulación, y control de parámetros meteorológicos
6. Equivalencia en agua de hielo y nieve del volcán.
7. Evidencia geomorfológica y estratigráfica de interacción de lahares y glaciares en el volcán Popocatepetl.
8. Registro de las fluctuaciones del terminus glacial de los glaciares del Popocatepetl.
9. Historia del hielo dentro del cráter del Popocatepetl.
10. Comparación de los registros del terminus de los glaciares en el Popocatepetl con los del Iztaccihuatl y Pico de Orizaba y otros glaciares de norteamérica.
11. Establecimiento de una red de referencia geodésica-topográfica, liga y chequeo con coordenadas UTM y latitud-longitud usando los cálculos respecto al geoide de Clarke 1866 y WGS84 (estación base GPS Wild/Lertz, con un Magellan usando imágenes Landsat Verdaderas y fotografías aéreas).

Acerca de la Estabilidad del Glaciar (Diciembre 29, 1994).

A pregunta concreta acerca de si la sismicidad podría causar el derrumbe del glaciar se contestó lo siguiente:

Los glaciares normalmente son sumamente estables y resisten los movimientos sísmicos. La roca de basamento, sin embargo, es más propensa a derrumbarse que una masa de hielo. En el Monte Santa Helena por ejemplo, los glaciares fueron muy estables y simplemente transmitían las ondas provenientes de las masas abultadas de roca de su basamento hacia el norte hasta donde las laderas estaban sobre- inclinadas y/o la base del glaciar estaba sobrecalentada debido al flujo de calor volcánico.

En el caso de los glaciares del Popocatepetl, la pregunta de cómo habrán de responder los glaciares a los tremores, es algo que desconocemos. Al desconocer completamente el mecanismo de flujo de los glaciares, el comportamiento de deslizamiento, condiciones basales de temperatura, profundidad del hielo y la distribución de la temperatura interna. Se asume que la base del glaciar permanece congelada cerca del terminus y entonces con base en ello, se explican los abultamientos del terminus y las características del empuje glacial. La ausencia de agua emergiendo del terminus de los glaciares también sugiere que sus bases están congeladas, al menos cerca del final del glaciar y que cualquier agua de fusión fluye internamente a lo largo de zonas de brecha permeables entre unidades viejas de flujos de lava (de manera similar a lo que se observa en el Monte Santa Helena). En el caso de los glaciares del Monte Santa Helena, el deslizamiento basal es mínimo en el terminus y el empuje glacial a lo largo de zonas de debilidad interna conteniendo escombros, es dominante. En las partes superiores del Monte Santa Helena, el deslizamiento basal era la norma y puede esperarse que ocurra lo mismo en el Popocatepetl. Las temperaturas internas del hielo y la variación estacional de deslizamiento apoyarían la idea del deslizamiento basal, sin tener que instalar inclinómetros dentro de los glaciares. No se sabe en este momento, si en el Popocatepetl está ocurriendo un deslizamiento basal en la parte superior del glaciar a partir del terminus y si esto puede ser afectado por un incremento de fusión en la base del glaciar o si hay un incremento en la percolación de agua desde la superficie, debido al efecto de las cenizas, o un incremento del agrietamiento proveen de agua a la base del glaciar.

En consecuencia, como no sabemos suficiente acerca de los mecanismos de flujo, temperatura interna, comportamiento del deslizamiento, profundidad del hielo, topografía, velocidad del hielo, densidad superficial, cantidad de nieve respecto al hielo, carácter de los materiales basales, presencia de suelos permanentemente congelados debajo de la superficie, no podemos determinar en este momento, con exactitud, como responderá el glaciar. Cualquier evento podría ocurrir, desde derrumbe del glaciar hasta tener un glaciar sumamente estable.

5. EXPEDICION GLACIOLOGICA AL POPOCATEPETL: 8-17 ABRIL 1995

En marzo de 1995 el CENAPRED y el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M. decidieron apoyar la realización de una expedición glaciológica al Popocatepetl, una vez que se determinó que las condiciones para realizar trabajos de campo en la montaña eran adecuadas para llevarlos a cabo dentro de un buen margen de seguridad.

Este apoyo fué considerado por el Comité Científico para dar respuesta a las preguntas más urgentes respecto a los glaciares del Popocatepetl. Los objetivos concretos de esta expedición fueron:

1. Determinar el espesor del hielo.
2. Topografiar la superficie del glaciar.
3. Reportar el volumen de hielo existente en el glaciar.

Adicionalmente, en la medida de lo posible se procuraría:

4. Establecer un sistema de monitoreo de la velocidad del glaciar.
5. Establecer un sistema de monitoreo de la temperatura interna de los glaciares.

Para la realización de estos objetivos y dadas las condiciones de actividad del volcán se diseñó un plan de trabajo con un número mínimo de personal técnico y científico, que a su vez, estuviera un mínimo de tiempo sobre el volcán, para garantizar el máximo de seguridad a los participantes.

Para esto, la colaboración de la Comisión Federal de Electricidad fué determinante, al facilitar un helicóptero para la transportación y descenso de equipo a la parte alta de la montaña, toda vez que la mayor parte del equipo a utilizarse en la montaña representaba un total de 450 kg. Además, este helicóptero permaneció en estado de alerta durante el tiempo que duró la expedición con el fin de ayudar a realizar una evacuación de emergencia en caso de accidente.

Para la determinación de espesores se utilizó un sistema de radar monopolso con medidor digital de cola con antena de 10 y 20 metros; los sitios de medición de espesores fueron localizados mediante el uso de una estación total Wild/Leitz con distanciómetro DIOR 3002S. La topografía de la superficie del glaciar se llevó a cabo con este mismo instrumento y el uso de reflectores (prismas Pacific Lasers). El volumen de hielo se determinaría entonces, mediante la restitución de las fotografías aéreas hechas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes el día 27 de diciembre de 1994, y usando los datos de espesor obtenidos en el campo. Para esta campaña de campo se diseñaron estacas de aluminio siguiendo las especificaciones de Ostrem y Brugman (1991) y tomando en cuenta las experiencias obtenidas en 1984, con el fin de establecer un sistema de monitoreo de la velocidad del glaciar. Se construyeron 8 estacas de aluminio de 6 metros de largo cada una y otras 8 de 3 metros de largo con sistemas de empalme entre los dos tipos. Se programó una línea de estacas a lo largo del glaciar, de manera que cada estaca quedara enterrada 6 metros en el glaciar y estuviera equipada con un reflector en su extremo superior. Cada punto con estaca se controló topográficamente desde una estación base en Tlamacas. Para instalar las estacas se hicieron perforaciones en el glaciar utilizando una perforadora Kovac con varias extensiones. Al lado de una de las estacas se hizo una perforación adicional de 4 metros y se instaló una línea de termistores con registro de máximos y mínimos. Adicionalmente se instalaron sensores de temperatura en la base de la estaca y en su parte superior. También se hicieron determinaciones de densidad de nieve recién caída, de congesta y de hielo glacial. Con el fin de contar con localizaciones precisas de puntos topográficos clave alrededor del glaciar (a utilizarse en la restitución de las fotografías aéreas y en la formación de un modelo digital del terreno), se hicieron mediciones geodésicas con un sistema de posicionamiento global (GPS) marca Wild/Leitz (Base y Rover), posicionando la estación de base en Tlamacas, la cumbre del Popocatepetl, los refugios de Teopizcalco, Queretano y Las Cruces, y un punto de control en la zona de La Herradura.

La expedición al Popocatepetl se llevó a cabo del sábado 8 al domingo 17 de abril. Las actividades se desarrollaron de la siguiente manera:

Sábado 8 de abril

Reunión de equipo científico y técnico, de campamento y escalada en hielo, equipo de seguridad. Llegada de los integrantes de la expedición provenientes de Canadá y de los Estados Unidos. Transportación de equipo y personal al refugio de Tlamacas en la base del Popocatepetl.

Domingo 9 de abril

Selección del material y preparativos para el ascenso de cargas al Teopizcalco. Labor de aclimatación de los miembros de Canadá y Estados Unidos. Revisión del material y planeación de las maniobras entre los miembros de la expedición y el personal de tierra y piloto del helicóptero de la CFE.

Lunes 10 de abril

Ascenso al collado de Teopizcalco. Cancelación de la operación de transporte de equipo e instrumental con el helicóptero debido a vientos de más de 60 nudos (120 km/hr). Descenso a Tlamacas y replanteamiento del programa de actividades.

Martes 11 de abril

Nueva cancelación de la operación helicóptero debido a los vientos. Cuatro personas suben a La Herradura transportando cemento, agua y combustible para colocar un poste en el contrafuerte rocoso justo debajo del glaciar del Ventorrillo. Se fija el poste con concreto y se instala un reflector de dos prismas en el extremo superior del poste. Se determina la distancia al punto usando el DIOR. Dos personas suben al refugio de Teopizcalco y hacen mediciones con el GPS (Rover) y simultáneamente se hacen las mediciones en la base (Base GPS). Este mismo

grupo se mueve hacia El Queretano para hacer las mismas determinaciones. Luego se reúnen con el grupo de La Herradura, para hacer la misma operación de posicionamiento, justo encima del poste recién colocado. El último punto posicionado es un roquerío en el sitio del ex- refugio de Las Cruces. Descenso a Tlamacas.

Miércoles 12 de abril

Mejoran las condiciones climáticas y se efectúa la operación helicóptero. Una persona sube a dirigir las maniobras del helicóptero desde el collado de Teopizcalco. Se suben dos cargas de equipo al collado y luego el helicóptero hace dos viajes con cuatro personas al mismo lugar. Dos personas suben a pie al refugio de Teopizcalco después, al no haber posibilidades para un quinto viaje. Se realizan mediciones de espesor con el radar en la parte media del glaciar y se perforan 6 metros de glaciar en el mismo sitio para colocar una estaca (Estaca 20) con un reflector de dos prismas en su parte superior. Se transportan más estacas hasta el sitio de la Estaca 20 y se depositan ahí. Cuatro personas pernoctan en el refugio de Teopizcalco. El resto desciende a Tlamacas.

Jueves 13 de abril

Tres personas perforan el glaciar (Estaca 30) y hacen las determinaciones de espesor usando el radar. Desde la base de Tlamacas se determina la distancia al sitio y se hace una nueva medición de distancia a la Estaca 20. Los movimientos sobre el glaciar son aprovechados para realizar trabajos topográficos colocando los piolets sobre el hielo y encima un reflector de dos prismas. Cuatro personas suben al Teopizcalco con comida, y baterías de repuesto para el equipo GPS y para el radar. Dos personas verifican el sitio de La Herradura para asegurarse que el concreto ha fraguado correctamente. Dos personas padecen mal de montaña y descienden muy temprano. Seis personas pernoctan en el refugio de Teopizcalco. Por la noche cae una nevada.

Viernes 14 de abril

Dos personas suben a la cumbre del Popocatepetl a realizar determinaciones con el GPS durante una hora (30 minutos de medición real). Tres personas perforan un nuevo sitio (Estaca 10). Una persona desciende a Tlamacas. Ascenden a Teopizcalco tres personas llevando comida y descienden inmediatamente. Se realizan determinaciones de espesor con el radar en el sitio de la Estaca 10. Durante la aproximación al sitio de la Estaca 10 se hacen determinaciones topográficas de la superficie del glaciar, lo mismo que al seguir los movimientos de la cordada de cumbre, cuando se puede. El día es muy nublado y por la tarde se pierde contacto visual hacia el glaciar, por lo que la medición de distancia a la estaca 10 queda pendiente. Se preparan las cargas que habrá de bajar el siguiente día el helicóptero de la CFE, pero una tormenta eléctrica imposibilita esta tarea, pues el cable que une las redes para transportar el material es de metal y hay peligro de una descarga eléctrica. Cinco personas pernoctan en el refugio de Teopizcalco.

Sábado 15 de abril

Se realiza la operación helicóptero muy temprano en la mañana y se baja el equipo que ya no es necesario en la montaña. Dos personas terminan la instalación de la Estaca 10 y se lleva a cabo la determinación de distancia a la Estaca 10. Dos personas hacen una nueva perforación junto a la Estaca 20 e instalan termistores en la nueva horadación y sobre la estaca. Se hacen determinaciones de la densidad del hielo y de la nieve y se toman muestras de la misma para análisis químicos e isotópicos. Se construye con concreto el monumento de la base de Tlamacas fijando una placa metálica de bronce identificando los datos del sitio. Todos los miembros de la expedición se reúnen en Tlamacas.

Domingo 16 de abril

Última medición de distancia a las estacas instaladas durante la mañana. Organización del equipo y empaque para

su transportación. Descenso a la Ciudad de México.

Lunes 17 de abril

Parten los miembros canadienses y estadounidenses por la mañana a sus lugares de origen.

Actividades después de la expedición

Hasta la fecha en que se escribe este reporte, continúa el procesamiento de la información obtenida en el campo. El Comité Científico sin embargo, fue informado de los resultados preliminares de las mediciones realizadas. Los resultados finales de estos trabajos estarán listos en el mes de julio, después de la visita a las instalaciones del NHRI para llevar a cabo el procesamiento de imágenes y de datos. Durante esta visita se dará entrenamiento a tres técnicos mexicanos en técnicas de investigación glaciológica.

6. PERSPECTIVAS

Las tareas que quedan pendientes por llevarse a cabo son:

1. Monitoreo de la velocidad del hielo.

La infraestructura para llevar a cabo el monitoreo del glaciar del Ventorrillo ya está lista y se puede continuar mediante mediciones periódicas de distancia desde la estación base de Tlamacas hacia las diferentes estacas.

2. Espesor del hielo.

En jornadas de campo posteriores, con el fin de reconocer cambios de éste.

3. Profundidad de los suelos permanentemente congelados en las laderas superiores.

En cuanto sea posible acercarse con seguridad a los campos de suelos permanentemente congelados, que están cerca del borde del cráter (cerca del Labio Inferior).

4. Topografía del glaciar y sus cambios temporales.

Nuevas determinaciones topográficas que coincidan con la toma de fotografías aéreas verticales en un período de tiempo de aproximadamente un año.

5. Comportamiento de la fusión y la acumulación, y control e parámetros meteorológicos.

Este es un factor fundamental ya que no se tienen datos meteorológicos a esta altitud (precipitación, humedad, velocidad de viento, temperatura, etc.) Para ello se requiere la instalación de una estación meteorológica a una altitud aproximada de 5,000 m.s.n.m. Se requiere también llevar a cabo mediciones de flujo en las corrientes que bajan del glaciar para medir el gasto de descarga.

6 Evidencia geomorfológica y estratigráfica de interacción de lahares y glaciares en el volcán Popocatepetl

Se requiere profundizar en el estudio y cartografía de los depósitos asociados con los lahares, alrededor del volcán.

7 Comparación de los registros del terminus de los glaciares en el Popocatepetl con los del Iztaccihuatl y Pico de Orizaba y otros glaciares de norteamérica.

Para esto, se requiere llevar a cabo un extenso programa de mediciones glaciológicas en los tres volcanes y reunir a un grupo de personas entrenadas en glaciología para formar nuevamente la Sección de Glaciología del Instituto de Geofísica.