

# Instituto de Protección Civil del Estado de México

## Cuaderno de Investigación

# 2

### Propuesta para la Implementación de Obras de Retención de Escombros en la Parte NW del Volcán Popocatepetl



Gobierno del Estado de México



INSTITUTO DE  
PROTECCIÓN CIVIL



AVANZA

***Propuesta para Implementación de  
Obras de Retención de Escombros  
en la Parte NW del Volcán  
Popocatepetl***

**Instituto de Protección Civil  
del Estado de México**

**Cuaderno de Investigación 2**

## **Directorio**

**Lic. Arturo Montiel Rojas,**  
Gobernador Constitucional del Estado de México.

**Ing. Manuel Cadena Morales,**  
Secretario General de Gobierno.

**Arq. Miguel Ángel Cruz Guerrero,**  
Director General del Instituto de Protección Civil.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	7
ANTECEDENTES .....	9
OBJETIVOS.....	11
Riesgo por Actividad Actual .....	11
Etapas del Proyecto .....	12
Tipos de Obra Para Detener y Almacenar Material Proveniente de los Flujos de Lodo .....	
Trabajos de retención de sedimentos .....	13
Trabajos de consolidación .....	13
Presa baja o reducida .....	13
Presa cribadora de rejilla vertical .....	13
Presa cribadora de rejilla horizontal.....	14
Presa de gravedad .....	14
Presa para clasificar y retener sedimentos (Presas Sabo).....	14
Depósito de arena .....	14
Trabajos de remoción de escombros .....	15
Trabajos de canalización .....	16
Adaptación de Obras Sabo .....	16
Estimación del Volumen de Agua de Fusión del Glaciar Noroeste .....	
Estimación del Volumen de Material de Caída del Volcán .....	19
Desarrollo del Flujo .....	21
Vigilancia y Monitoreo en el Volcán Popocatepetl .....	23
Propuesta Para Mejorar el Sistema de Aviso y Alertamiento Hacia la Población.....	
Conclusiones y Recomendaciones.....	26
Bibliografía.....	29

## **INTRODUCCIÓN**

Los fenómenos volcánicos ocurridos a través de la historia, han ocasionado destrucción y pérdida de vidas en muchas partes del mundo. Uno de esos fenómenos es el flujo de lodo o lahar, que es de los más destructivos. Se han tenido experiencias de este tipo en Armero, Colombia en noviembre de 1985, al generarse un lahar producido por la incidencia de un flujo piroclástico que fundió parte de la nieve y hielo en la cumbre del volcán Nevado del Ruiz. El lahar destruyó dicha población ubicada a 70 km de distancia y mató unas 25,000 personas.

En general, un flujo de lodo o “lahar” es una mezcla de escombros movida por agua, que fluye rápidamente pendiente abajo, por las laderas de los volcanes (Crandell, 1971), o bien una mezcla fluida de agua y una alta concentración de sedimentos producidos por una erupción volcánica, la cual se mueve hacia las partes bajas de las montañas por arroyos, barrancas y ríos hasta cientos de kilómetros ocasionalmente. Su temperatura es menor a 100 °C, pero eventualmente puede contener bloques de lava caliente que ocasiona fuego en casas y estructuras cercanas, ubicadas a lo largo de su trayectoria. Su velocidad puede llegar hasta 100 km/hr dependiendo de las pendientes, aunque las más comunes son entre 30 y 65 km/hr, lo que hace difícil una evacuación después de iniciado el proceso de descenso desde las partes altas de un volcán.

Así, mediante el estudio y trabajo de campo, se busca proponer para el Popocatepetl en las barrancas de la parte noroeste, sitios adecuados para diseñar y construir obras mediante las cuales se pueda controlar la erosión y arrastre de sedimento por los posibles flujos de lodo. La función primordial de estas obras es detener y almacenar los grandes bloques de roca con distintos tipos de estructuras, tales como rejillas de acero, pantallas metálicas, presas filtrantes y otras obras que más adelante se ejemplifican. Así mismo, se logra abatir pendientes en tramos de barranca, con lo cual disminuye la velocidad de los flujos y por consiguiente el poder destructivo de los mismos aguas abajo, principalmente hacia los poblados más cercanos, tales como San Juan Tehuixtltlán, Popo Park, Ozumba de Alzate, San Vicente Chimalhuacán, Nepantla de Sor Juana Inés De la Cruz y San Andrés Tlalámac en el Estado de México.

El contenido comprende los riesgos por la actividad actual, las etapas del proyecto, los diferentes tipos de construcción para detener y almacenar los materiales provenientes de los flujos de lodo, adaptación de las obras tipo Sabo para ser construidas en algunos sitios a lo largo de las barrancas del sector NW del volcán Popocatepetl, estimación del volumen de agua del glaciar noroeste, estimación de materiales de caída del volcán, el desarrollo del flujo, la vigilancia y monitoreo del volcán Popocatepetl, propuesta para mejorar el sistema de alertamiento a la población vulnerable a los flujos de lodo en el volcán y las conclusiones y recomendaciones, además de las referencias.

### ANTECEDENTES

Los fenómenos volcánicos ocurridos a través de la historia, han ocasionado destrucción y pérdida de vidas y recursos en muchas partes del mundo.

Uno de esos fenómenos es el flujo de lodo o lahar, que es de los más destructivos.

Recientemente, se han tenido experiencias de este tipo en Armero, Colombia en noviembre de 1985, al generarse un lahar producido por la incidencia de un flujo piroclástico que fundió parte de la nieve y hielo en la cumbre del volcán Nevado del Ruiz. El lahar destruyó dicha población y mató unas 25,000 personas.

Otro caso reciente es el de las Islas Filipinas, donde la erupción más grande del Siglo XX ocurrió en junio de 1991 en el Monte Pinatubo, emitiendo alrededor de 7 km<sup>3</sup> de tefra.

Parte de este material ha causado desde entonces muchos lahares cada año, al mezclarse con el agua de lluvia durante la temporada de tifones, lo que ha ocasionado el enterramiento paulatino de poblaciones y campos de cultivo, con la consecuente pérdida económica para grandes sectores de la población aledaña a dicho volcán.

Un caso más es el del Monte Tokachi-dake en Japón que, en mayo de 1926 tuvo una erupción, la cual dio lugar a un flujo piroclástico que fundió la capa de nieve de unos 10 metros de espesor, acumulada en su cima, formandose la mezcla de agua y escombros volcánicos (lahar) que impactó en las poblaciones de Biei y Kamifurano, matando a 144

personas y destruyendo 5,080 casas.

En general, un flujo de lodo o "lahar" es una mezcla de escombros movida por agua, que fluye rápidamente pendiente abajo, por las laderas de los volcanes (Crandell, 1971), o bien una mezcla fluida de agua y una alta concentración de sedimentos producidos por una erupción volcánica, la cual se mueve hacia las partes bajas de las montañas por arroyos, barrancas y ríos hasta cientos de kilómetros ocasionalmente.

Su temperatura es menor a 100 °C, pero eventualmente puede contener bloques de lava caliente que ocasiona fuego en casas y estructuras cercanas, ubicadas a lo largo de su trayectoria.

Su velocidad puede llegar hasta 100 km/hr dependiendo de las pendientes, aunque las más comunes son entre 30 y 65 km/hr, lo que hace difícil una evacuación después de iniciado su proceso de descenso desde las partes altas de un volcán.

Este tipo de flujos destruye prácticamente todo lo que encuentra a su paso y daña en alto grado la vida y la propiedad (Yamada, T., 1997).



**Fotografía 1.** En esta imagen se aprecia el glaciar noroeste (parte superior derecha y en oscuro), que es el que drenaría hacia el sector poniente del volcán en el Edo. de México. Las barrancas que aparecen en primera instancia son de derecha a izquierda Tenenepanco, La Espinera y Tepeteloncocone, que drenan hacia el Estado de Puebla

Los flujos de lodo se generan de varias maneras, pero en el caso específico del Popocatepetl, estos podrían presentarse como consecuencia de una erupción magmática de moderada a grande, la cual fundiría parte de los glaciares norte y noroeste del cono volcánico, al interactuar flujos piroclásticos y “surges” u oleadas piroclásticas con la nieve y hielo (fotografía 1), dando lugar a la formación de grandes volúmenes de agua de fusión, que al mezclarse con los sedimentos formarían los flujos que drenarían hacia los Estados de Puebla y México.

Otra posibilidad de generación sería la caída de lluvias torrenciales inusuales, que al mezclarse con la tefra y sedimento fino, daría lugar a este tipo de flujos. O también, si ocurren los dos fenómenos simultáneamente; esto es, una erupción moderada más lluvia torrencial, lo cual se podría dar principalmente durante la temporada de lluvias.

En el volcán Popocatepetl se dio uno de estos fenómenos hace unos 1,100 años, lo que ocasionó la formación de depósitos de lahar hacia la parte noreste, donde actualmente se asientan las poblaciones de Santiago Xalitzintla, San Nicolás de Los Ranchos, San Pedro Yancuictlalpan y San Buenaventura Nealtican. También existen pequeños depósitos en zonas confinadas a lo largo de la trayectoria del río Nexapa, continuando hasta el Municipio de Izúcar de Matamoros en el Estado de Puebla y por el río Ahuehuello donde el riesgo mayor lo constituiría el flujo ya diluido, debido al agua adicional de los afluentes que se van agregando en el trayecto.

Hacia el sector noroeste seguramente también se dio al mismo tiempo un flujo similar, como lo atestigua un depósito en la jurisdicción de San Juan Tehuixtlán dentro del Estado de México, que drenó por la barranca de Amalacaxco-Hueyatlaco-Estafiatepec-Caxquenatlaco.

Esto último, se corroboró el 30 de junio de 1997, al ocurrir la emisión de una cantidad moderada de gases y cenizas acompañadas por fragmentos de alta temperatura del domo cratérico que se ha venido desarrollando a partir del 25 de marzo de 1996. Como esta emisión tuvo un ángulo de salida hacia el noroeste y alcanzó una altura de unos 6,000 metros por encima del edificio volcánico, parte del material más grueso se colapsó sobre los glaciares norte y noroeste provocando la fusión de una pequeña porción del hielo, formando así pequeños flujos de lodo que viajaron hacia los Estados de Puebla y México, en las direcciones anteriormente descritas. Cabe destacar que también la lluvia tuvo una contribución importante en este episodio.



**Fotografía 2.** Trayectoria del pequeño flujo de lodo generado el 30 de junio de 1997 hacia la parte noroeste del Popocatepetl, con un avance aproximado de unos 3.5 km en el Estado de México

Sobre el lado NW del volcán, se dio este fenómeno, avanzando el flujo sólo unos 3.5 km (fotografía 2) debido a que los espesores de tefra son mayores que en el sector norte, provocando que su alcance se redujera por la alta porosidad y permeabilidad de los mismos, además de que las pendientes son menores en la base del cono comparadas con las del sector norte.

### OBJETIVOS

En la presente propuesta se sugieren los sitios donde, en otra etapa puedan construirse obras de retención de escombros (denominadas obras Sabo en Japón) acarreados por los flujos de lodo en las barrancas que nacen en las faldas del cono volcánico, primordialmente en los sectores del glaciar, susceptible de ser fundido por una oleada, por un flujo de piroclásticos o por efecto de lluvias intensas en la parte media y boscosa. Con dichas obras, se busca detener y almacenar los grandes bloques de roca en la parte alta y paulatinamente aguas abajo los bloques menores, gravas y sedimento, contenidos en los flujos que pudieran dispararse por una lluvia inusual o por una eventual erupción moderada del volcán.

Estas estructuras han mostrado su efectividad en muchos volcanes japoneses, donde cada año ocurren flujos de lodo, sobre todo en la temporada de tifones, ya que éstos disparan los flujos al saturarse el material volcánico no consolidado con el agua de lluvia que cae durante la incidencia de estos meteoros. Mediante estas obras, se disminuye la energía destructiva de los flujos, para que en las partes bajas del cauce pueda manejarse más fácilmente el agua con obras de encauzamiento, complementadas con trabajos de limpieza, corrección y desazolve.

Así, mediante el estudio y trabajo de campo, se busca proponer para las barrancas de la parte noroeste del Popocatepetl, sitios adecuados para diseñar y construir obras para el control de la erosión y de arrastre de sedimento por los posibles flujos de lodo.

La función primordial de estas obras es detener y almacenar los grandes bloques de roca con distintos tipos de estructuras, tales como rejillas de acero, pantallas metálicas, presas filtrantes y otras obras que más adelante se ejemplifican. Así mismo, se logra abatir pendientes en tramos de barranca, con lo cual disminuye la velocidad de los flujos y por consiguiente el poder destructivo de los mismos aguas abajo, principalmente hacia los poblados más cercanos, que son San Juan Tehuixtlán, Popo Park, Ozumba de Alzate, San Vicente Chimalhuacán, Nepantla de Sor Juana Inés De la Cruz y San Andrés Tlalámac en el Estado de México.

### RIESGO POR ACTIVIDAD ACTUAL

La actividad actual del volcán (el domo de crecimiento en el interior del cráter, la sismicidad y las explosiones frecuentes) sugiere que podría ocurrir una erupción magmática o freatomagmática de magnitud moderada a intermedia, la cual a su vez vendría acompañada de flujos piroclásticos y oleadas, que aún siendo de nivel bajo o moderado podrían fundir una parte o quizás la totalidad del glaciar ubicado en las partes norte y noroeste del cono volcánico, provocando la formación de flujos de lodo.

Hacia el sector noroeste en el Estado de México, los flujos se encauzarían por las barrancas de Amalacaxco, Yancuecole y Huiclástoc (figura 1).

La primera cambia de nombre aguas abajo a Hueyatlaco-Estafiatepec-Caxquenatlaco-Tetoro-Necuate-Grande y pasa por los poblados de San Juan Tehuixtlán, Popo Park, Ozumba de Alzate, San Vicente Chimalhuacán y Nepantla de Sor Juana Inés De la Cruz.

Esta trayectoria continúa hacia el Estado de Morelos.

La segunda y tercera barrancas confluyen a los 2,875 msnm para formar la barranca de Huitzilac-



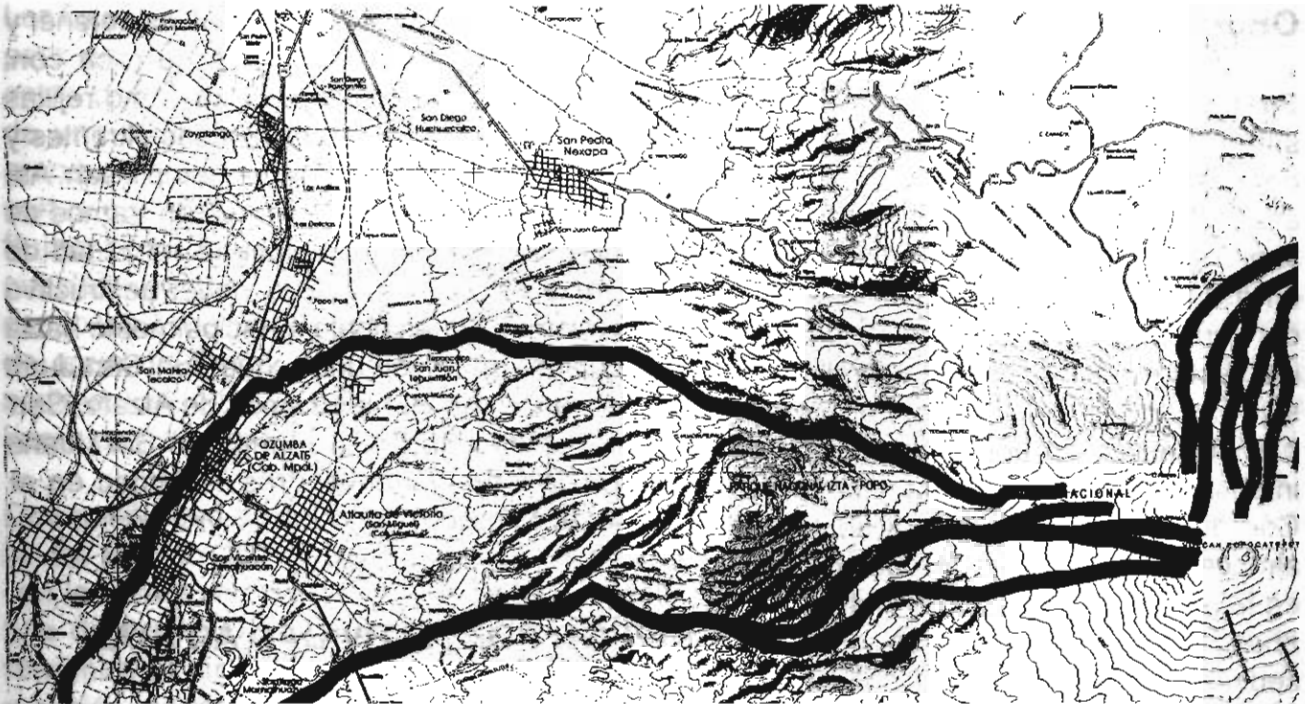


Figura 1. Mapa donde se enmarcan las barrancas (de arriba a abajo) Amalacaxco, Yancuecole y Huicléstoc. Estas dos últimas confluyen a los 2,875 msnm para formar la barranca de Huitzilac-Textaltitla-Grande. También aparecen algunos poblados a lo largo de estos cauces

Textaltitla-Grande, pasa por el poblado de San Andrés Tlalámac y continúa también hacia el Estado de Morelos.

En otra etapa de trabajo y un documento separado se considerará su análisis.

La población de mayor riesgo en y a lo largo de ambas trayectorias es de unos 2,200 habitantes y unas 528 casas-habitación.

**ETAPAS DEL PROYECTO**

Dentro del presente estudio, se consideran las tres barrancas que drenan hacia el sector noroeste en el Estado de México.

Para este tipo de estudios es necesario contar con mapas topográficos a escala 1:2,000 de la zona de barrancas y de depósitos de lahar anteriores, para definir y cuantificar con precisión los depósitos de flujos del pasado, ya que sólo de esta manera se podrán reconstruir escenarios con base en los datos de campo existentes.

Debido a que la cartografía disponible es a escala 1:50,000 y sólo se han efectuado algunos cálculos preliminares.

De aquí la necesidad de contar con mejores mapas para hacer una estimación más fina de los volúmenes de material y de escenarios de flujo, para determinar los diferentes grados de vulnerabilidad en la zona.

Esto es muy importante, ya que con la información geológica disponible y con el modelado de escenarios de flujos de lodo podremos conocer lo que ocurrió anteriormente y qué es lo que se puede esperar en el futuro.

En base a los volúmenes de material ya depositado, es como se podrán diseñar los tipos y el número de obras, necesarias para detenerlo y almacenarlo, evitando así que llegue el material sólido a las partes bajas donde hay población.

### TIPOS DE OBRA PARA DETENER Y ALMACENAR MATERIAL PROVENIENTE DE LOS FLUJOS DE LODO

En seguida se describen algunos tipos de obra que podrían ser adecuados para el fin que se persigue, aunque existe una gran variedad que aquí no se mencionan.



**Fotografía 3. Trabajos de retención de sedimentos para evitar la erosión en el lecho y partes laterales de barrancas, con lo que se evita la producción de sedimentos y su adición a los flujos de lodo**

1.- Trabajos de retención de sedimentos (fotografía 3), que implican la construcción de pequeñas presas para controlar los sedimentos, con alturas entre 2 y 3 metros, un ancho de corona de 1 a 1.5 metros, una pendiente de 0.2 aguas abajo y pendiente vertical aguas arriba. También deben tener una superficie de protección, paredes laterales y una buena cimentación para evitar abrasión y daño a las obras

Usualmente se construyen cada 2 ó 3 veces el ancho de la barranca y su función es prevenir la erosión del lecho y de las partes laterales de arroyos y barrancas.

2.- Trabajos de consolidación, cuya función primordial es evitar el movimiento y arrastre de sedimentos inestables de



**Fotografía 4. Trabajos de consolidación para evitar el movimiento y arrastre de sedimentos inestables de los lechos, en arroyos y barrancas**

los lechos, a lo largo de arroyos y barrancas. Este tipo se ilustra en la fotografía 4.

3.- Presa baja o reducida (fotografía 5), que es similar a la presa Sabo, solo que de menor dimensión y cuya función principal es consolidar los sedimentos inestables que vienen de la parte alta de la corriente.



**Fotografía 5. Presa baja o reducida, cuya función es consolidar los sedimentos inestables provenientes de aguas arriba**

4.- Presa cribadora de rejilla vertical, cuya función es detener los grandes bloques de roca, árboles, troncos y en general materiales de grandes dimensiones, permitiendo sólo el paso del agua, suelo y pequeños fragmentos. Esta es una estructura de acero tubular en diferentes arreglos

y dimensiones (fotografías 6 y 7), aunque también pueden construirse de concreto armado (fotografía 8).



**Fotografía 6.** Presa cribadora de rejilla vertical con estructura de acero, para detener los grandes bloques de roca que viajan dentro de los flujos de lodo

5.- Presa cribadora de rejilla horizontal, la cual sirve para separar el agua y lodo de las rocas, deteniéndose estas últimas en el frente del flujo, atenuando así su poder destructivo. Generalmente se construyen con acero, como se muestra en la fotografía 9.

6.- Presa de gravedad, utilizada para almacenar rocas y sedimentos, separados previamente por estructuras permeables aguas arriba. También sirve para regular la salida de agua de los materiales almacenados hacia las partes bajas de la corriente y para regular la salida de rocas y sedimentos acumulados en los cauces (fotografía 10).



**Fotografía 7.** Presa cribadora de rejilla vertical con estructura de acero y concreto armado, para detener grandes bloques de roca que viajan dentro de los flujos de lodo



**Fotografía 8.** Presa cribadora de rejilla vertical construida con concreto armado, cuya función es muy similar a la desempeñada por las estructuras mostradas en las fotografías 6 y 7

7.- Presa para clasificar y retener sedimentos (Presa Sabo) (fotografía 11), cuya función es acumular los pequeños fragmentos de roca separados previamente con otro tipo de obras como las que se señalan en los párrafos anteriores. Este tipo de presa es muy similar a la descrita anteriormente.



**Fotografía 9.** Presa cribadora de rejilla horizontal, donde se detiene bruscamente el material rocoso al ser filtrada el agua con esta estructura, cuando llega el frente del flujo de lodo

8.- Depósito de arena que sirve para almacenar los pequeños fragmentos y el material más fino que fue filtrado por las presas construidas aguas arriba y llevadas por el flujo a las partes bajas de los cauces (fotografía 12).

## Obras de Retención



Fotografía 10. Presa de gravedad, que sirve para almacenar rocas y sedimentos previamente separados por otras estructuras aguas arriba de los cauces y barrancas



Fotografía 11. Presa Sabo, que sirve para acumular pequeños fragmentos de roca y sedimentos previamente clasificados aguas arriba



Fotografía 12. Depósito de arena, donde se almacenan los pequeños fragmentos de roca y sedimentos

9.- Trabajos de remoción de escombros que implican la extracción y acarreo del material acumulado, principalmente en los depósitos de arena (fotografía 13), ya que es necesario mantener siempre su máxima capacidad para el caso de flujos inesperados como los que nos ocupan.



Fotografía 13. Trabajos de remoción de escombros, donde se remueve el material acumulado, ya que es importante tener en buen estado estas estructuras para el caso de flujos inesperados



Fotografía 14. Siembra de pastos y arbustos, que servirán para evitar la producción de sedimentos



Fotografía 15. Trabajos de reforestación, para evitar la producción de sedimentos y evitar que aumente el poder destructivo de los flujos generados en las laderas de zonas volcánicas

Tomando el ejemplo anterior es posible construir un equivalente a las obras Sabo, en donde se pueda contar con un diseño tal, que resulten represas permeables robustas. Lo primero, mediante la adición de una serie de tubos colocados en posición transversal al eje de las mismas, de tal forma que permitan que el agua pueda continuar su camino pendiente abajo, reduciendo a la vez el empuje que generaría la acumulación de agua del lado corriente arriba de las represas. Con esto se lograría una reducción drástica de la velocidad de los flujos. Las represas podrían tener una sección lo suficientemente robusta para que por peso propio contrarresten el impacto frontal y el pasivo que causaría el paro de los flujos de lodo y escombros.

Un tipo de presas podría construirse mediante mampostería juntada hasta una altura de cuatro metros, con una base de seis metros y completar una altura total de cinco metros, mediante el empleo de concreto reforzado. Este remate de concreto tiene la finalidad de proteger la parte superior de las presas contra el deterioro que podría causar el paso de flujos extraordinarios sobre el cuerpo de las mismas, sobretodo ante la presencia de impactos directos de fragmentos de roca que podrían sobrepasar a estas estructuras durante la ocurrencia de flujos pico. Es conveniente que las presas tengan un ancho de corona no menor de cuatro metros, para lograr un cuerpo lo suficientemente pesado que resista el embate de cualquier flujo.

Otro aspecto que deberá cuidarse en el diseño de las presas es la implantación de un recubrimiento del lecho de las barrancas, en las zonas inmediatamente aguas abajo de las estructuras. Esto último con el fin de contrarrestar el efecto erosivo de los flujos al pie de las presas, del lado aguas abajo. Esta protección se podría lograr con la construcción de una losa de fondo, fabricada con concreto ciclópeo, al que se deberá agregar un entramado de rieles de acero que se pudieran conseguir de material de desecho.

Al igual que la protección del terreno natural inmediatamente aguas abajo de las represas, será necesario proteger contra erosión al terreno natural en los extremos de las barrancas, en donde se apoyarían estas estructuras, previendo que el terreno de soporte de las presas no sufra erosión y deterioro durante la ocurrencia de los flujos.

En cuanto a la permeabilidad del cuerpo de las presas, es conveniente ir dejando embebidos durante la construcción una serie de tubos, de tal forma que estas presas puedan funcionar como diques alcantarilla.

Se considera que es necesario construir presas, espaciadas entre sí de 500 a 600 metros, ubicadas aguas arriba de las poblaciones que se va a proteger, como se ha señalado en párrafos anteriores.

Estas obras tienen como fin el emular el comportamiento de las presas Sabo que se utilizan en Japón para estos fines, mismas que ya se han descrito anteriormente.

## **ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA DE FUSIÓN, DEL GLACIAR NOROESTE**

El riesgo que representa la actual actividad del volcán Popocatepetl es que puede ocurrir una erupción moderada, cuyo material emitido incidiría en el hielo de los glaciares, provocando la generación de flujos de lodo hacia los sectores ya señalados.

## Obras de Retención

Tomando la información de campo se tiene que:

$$\text{Área}_{\text{glaciar noroeste}} = 0.160 \text{ km}^2 = 160,000 \text{ m}^2$$

Espesores del glaciar = 10, 20, 42 y 60 metros (promedio de 30 metros)

Densidad<sub>hielo</sub> = 0.9 a 0.91 g/cm<sup>3</sup> (900 a 910 kg/m<sup>3</sup>), Lorenzo, (1964); Delgado et al., (1986) Delgado, (1988, 1993).

Temperatura<sub>lava</sub> = 800 °C (supuesta)

Tomando las experiencias del Monte Tokachi-dake (1926), Hekla (1947), Santa Helena (1980) y Nevado del Ruiz (1985), se puede considerar que un flujo piroclástico turbulento podría fundir un espesor de 10 metros, de la totalidad del área del glaciar, con lo que obtenemos el volumen de agua de fusión:

$$V_{\text{hielo}} = 160,000 \text{ m}^2 \times 10 \text{ m} = 1,600,000 \text{ m}^3$$

y tomando la densidad del hielo  $\rho = 910 \text{ kg/m}^3$  se tiene que:

$$\rho_{\text{hielo}} = \frac{W}{V_{\text{hielo}}}$$

Por tanto, la masa fundida es:

$$W = \rho_{\text{hielo}} \times V_{\text{hielo}}$$

$$W = 910 \text{ kg/m}^3 \times 1,600,000 \text{ m}^3 = 1.456 \times 10^9 \text{ kg}$$

Y, tomando la densidad del agua  $\sigma_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$  para transformar esta

última cantidad en agua de fusión, se obtiene:

$$V_{\text{tot. de agua de fusión}} = \frac{W}{\sigma_{\text{agua}}} = 1.456 \times 10^9 \text{ kg}$$

$$\frac{1.456 \times 10^9 \text{ kg}}{1000} = 1.456 \times 10^6 \text{ m}^3 = 1,456,000 \text{ m}^3$$

Que es el volumen total de agua de fusión del glaciar noroeste, tomando únicamente 10 metros de espesor del hielo.

Este volumen de agua de fusión, es el que puede considerarse en el momento de efectuar las simulaciones numéricas hacia este sector del volcán, considerando la información adicional que se apunta más adelante, además de utilizar la metodología de cálculo propuesta en los párrafos subsiguientes.

Por otro lado, cantidades adicionales de ceniza y otros materiales pueden incorporarse durante el desarrollo del flujo por las barrancas, conjuntamente con el material emitido por el posible flujo piroclástico y/o "surge".

## ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE MATERIAL DE CAÍDA DEL VOLCÁN.

Para calcular el volumen de material de caída del volcán, se hace lo siguiente:

El sedimento que interviene inicialmente en el flujo de lodo se encuentra en la base del cono volcánico entre los 14 y 24° y se supone que está en equilibrio, por lo que se estima el volumen de nieve y hielo fundidos.

Dado que el calor necesario para fundir un gramo de nieve desde  $-T_0$  °C hasta 0 °C es:

$$Q_h = T_0 C_g + q_w \quad (1)$$

Donde  $T_0 \cong 800$  °C (supuesto),  $C_g \cong 0.5 \text{ cal/g} \times ^\circ\text{K}$

(calor específico del hielo) y  $Q_w \cong 80 \text{ cal/g}$  (calor de fusión del hielo)

Y como el calor específico del hielo es muy pequeño comparado con el calor de fusión del mismo, entonces la cantidad necesaria para llevar el hielo desde  $-T$  °C hasta 0 °C puede despreciarse en la práctica.



Entonces la alta temperatura del material volcánico es la que suministra el calor total para fundir el hielo en el momento de interaccionar con el glaciar durante la posible erupción para producir una gran cantidad de agua rápidamente.

En seguida se calcula un hidrograma de suministro de agua, que es el que se utilizará para el lahar en el momento de su generación, el cual va a depender de la tasa de intercambio de calor, influenciada por la temperatura y tamaño del grano del material volcánico y del hielo.

Ahora si se supone que el material y el agua llegan a un equilibrio térmico cuando la mezcla de escombros de alta temperatura y hielo fundido producen el flujo de lodo, entonces la cantidad de hielo fundido  $W_0$  puede expresarse en función

de la ley de conservación del calor:

$$W_0 = \{[(T_s - T)C_s] / (q_w + TC_w - T_0 C_g)\} W_{so} \quad (2)$$

Donde:  $T_s$  =temperatura del escombros o sedimento en °C,  $T$ =temperatura en °C del flujo de lodo después de efectuarse la mezcla,  $C_s = 0.53$  (cal/cm<sup>3</sup> x °K) "calor específico del escombros o sedimento",  $q_w = 80.00$  (cal/g) "calor de fusión del hielo",  $C_w = 1.00$  (cal/g x °K) "calor específico del agua",  $T_0$  =temperatura del hielo en °C,  $C_g = 0.50$  (cal/g x °K) "calor específico del hielo" y  $W_{so}$  =suministro de escombros o material

Como generalmente:

$$T_s \gg T \text{ y } q_w \gg TC_w - T_0 C_g \quad (3)$$

Durante el periodo de fusión del hielo, el glaciar contiene no sólo hielo sino también agua de fusión. Ahora suponiendo que el porcentaje de agua de fusión dentro del agua equivalente de hielo, tiene un contenido de humedad  $C_w$  y considerando la ecuación (3), tenemos que la ecuación (2) llega a ser:

$$W_0 = [(T_s - T)C_s] / (1 - C_w)q_w W_{so} \quad (4)$$

Como la temperatura del material piroclástico varía considerablemente, podemos esperar que sea entre 400 y 800 °C.

Ahora si se supone que la temperatura del material es de 800 °C y el contenido de humedad en el hielo es 0, entonces  $W_0$  es cinco veces el volumen de escombros caído. Para esto, el hielo debe contener al menos 25 % de agua y aún si la temperatura del escombros es tan baja como 600 °C, el volumen de hielo fundido es aproximadamente cinco veces el del escombros caído.

Por otro lado, si las densidades del agua y sedimento se expresan en las razones volumétricas por  $\sigma$  y  $\rho$  respectivamente, tenemos que:

$$V_0 / V_{so} = (\sigma/\rho) x [(C_s T_s) / q_w] \quad (5)$$

donde:  $V_0$  =volumen del agua,  $V_{so}$  =volumen de sedimento,  $\sigma/\rho = 2.65$  y  $T_s \cong 800$  °C

De lo anterior, podemos considerar que el agua de fusión puede ser de tres a cinco veces el volumen de sedimento de alta temperatura suministrado por la erupción volcánica, el cual erosiona rápidamente las capas depositadas. Además, si éstas están saturadas, entonces el agua contenida en el sedimento es adicionada dentro del flujo simultáneamente.

Para calcular la concentración de sedimento  $C_0$  en el sitio donde se genera el flujo, que en este caso es la base del cono y donde la pendiente es  $\theta$ , usamos la fórmula aplicada en el Monte Tokachidake:

## Obras de Retención

$$C_0 = \rho \tan \theta_0 / [(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_0)] \quad (6)$$

Donde  $\tan \phi$  = coeficiente de fricción interna de la grava que se encuentra en la base del flujo, el cual depende de la concentración del sedimento. Este coeficiente es mayor a lo largo del lecho y cuando está en movimiento.

Como la concentración de sedimento en el flujo es aproximadamente igual a la concentración de su depósito y además es aproximadamente constante durante su movimiento, entonces es válido adoptar un valor de 0.75 como factor de fricción interna.

Ahora al considerar que el flujo tiene características de flujo granular, las partículas en movimiento se clasifican en dos fases: una sólida compuesta de partículas grandes (mayores al diámetro promedio) y otra de partículas finas. Ambas transportadas dentro del mismo flujo.

Por tanto, la concentración de sedimento  $C$  debe definirse para las partículas de la fase sólida. Así, tenemos que:

$$C_0 = V_{so} / (V_o + V_{so}) \cong 1/6 \cong 0.17$$

Cuando  $\theta_0 = 15 \sim 20^\circ$  la ecuación (6) llega a ser:

$$C_0 = 0.3 \sim 0.5$$

Suponiendo que el estado de saturación de las capas de depositación erosionadas es  $S$ , se obtiene la siguiente ecuación a partir de la condición de continuidad del agua y sedimento:

$$C_0 = (V_{so} + V_e C_e) / \{ [V_o + V_e (1 - C_e) S] + (V_{so} + V_e C_e) \} \quad (7)$$

donde:  $C$  = concentración de sedimento de las capas de depositación y  $V_e$  = volumen erosionado

Así, la relación del volumen erosionado al volumen de sedimento suministrado se obtiene transformando la ecuación (7) en:

$$V_e / V_{so} = [(C_0 - 1) + C_0 (V_e / V_{so})] / \{ C_0 [C_0 + (1 - C_0) S] C_0 \} \quad (8)$$

Cuando  $V_e / V_{so} = 5$  y  $C_0 = 0.6$ , la ecuación (8) llega a ser:

$$V_e / V_{so} = (6C_0 - 1) / [0.6 - (0.4S + 0.6)C_0]$$

Por tanto, la relación del volumen total  $V_m$  del flujo de lodo desarrollado, al volumen suministrado de sedimento es:

$$V_m / V_{so} = [(V_{so} + V_o + V_e) / V_{so}] = 6 + \{ (6C_0 - 1) / [0.6 - (0.4S - 0.6)C_0] \} \quad (9)$$

$S$  es el parámetro que indica el grado de saturación del terreno, que da lugar a la ocurrencia de un flujo de lodo cuando caen de 10~20 veces la descarga total de productos eruptivos o de sedimento colapsado.

## DESARROLLO DEL FLUJO

En este aspecto, la zona correspondiente a la base del cono en la parte noroeste del volcán, es seleccionada y dividida en una malla que puede ser de 100x100 metros utilizando un mapa a escala por ejemplo de 1:2,000. Esta área debe estar comprendida entre los 4,100 y 4,200 msnm, donde las pendientes varían de 14 a 24°.

Aquí, el flujo puede considerarse como turbulento, por lo que el esfuerzo de Reynolds controla su comportamiento y por tanto puede ser aproximado mediante un análisis unidimensional para flujo inestable utilizando la Ley de Manning.



Para conocer el suministro de agua, se elabora un hidrograma con una hora de duración, considerando una descarga pico a los 12 min (tiempo medio de fusión del hielo). Este último valor ha sido aplicado para simulaciones en el volcán Tokachi-dake, Japón, durante la reconstrucción del flujo de lodo de mayo de 1926.

También se debe definir mediante trabajo de campo la superficie y espesor del depósito de lahar del área de San Juan Tehuixtlán (de hace también posiblemente 1,100 años), con lo cual se podrá obtener el volumen aproximado de material.

Así mismo, se pueden realizar simulaciones de escenarios de flujos de lodo, mediante los cuales se tratará de reconstruir los depósitos anteriores y así definir zonas con distinto grado de riesgo. Esto se logra con hidrogramas de suministro de agua de 1, 2 y 3 horas de duración por ejemplo, con distintos volúmenes de agua de fusión considerando espesores de 20, 30, 40, 50 y 60 metros de espesor de hielo en los glaciares.

Para realizar los escenarios de simulación en las zonas de interés, además de las pendientes entre  $\theta = 14-24^\circ$  y la concentración de sedimentos  $C$ , es necesario considerar como mínimo el volumen de lava andesítica que se encuentra en el interior del cráter (por ej.  $13.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ , hasta el mes de enero de 1998); aunque normalmente se va a adicionar un volumen mayor debido al aporte de nuevo material durante la erupción, una gravedad específica para el sedimento de 2.685, un tamaño promedio del grano de sedimento  $d = 0.05$  metros y un coeficiente  $n = 0.03$

Para calcular el volumen de transporte de sedimento en flujo turbulento usamos la fórmula de Manning:

$$q = (1/n) (h^{5/3} s^{1/2}) \quad (12)$$

Donde:  $q = vh$ ; y:  $v =$  velocidad media,

$n =$  coeficiente de Manning,  $h =$  profundidad del flujo o tirante y  $s =$  pendiente del lecho. De aquí obtenemos:

$$h = [qn / s^{1/2}]^{3/5} \quad (13)$$

y utilizando la ecuación para esfuerzo cortante:

$$\tau = \rho g (n^2 u^2 / h^{1/3}) \quad (14)$$

$$\text{donde } u = (1/n) h^{2/3} s^{1/2} \quad (15)$$

y:  $h = R$ ;  $R = A/P$  y  $A =$  área hidráulica,

$P =$  perímetro mojado

$$\tau_c = \tau / [(\sigma - \rho)gd] \quad (16)$$

Usando  $\tau_c$  se puede definir la descarga  $Q$  de sedimento del lecho (o volumen de transporte de sedimento) mediante cualquiera de las siguientes fórmulas  $Q$  (A.T.M.),  $Q$  (M.P.M.) y  $Q$  (Brown) que a continuación se presentan:

**Fórmula de Ashida-Takahashi-Mizuyama (A.T.M.)** (Ashida *et al.*, 1981):

$$Q_{bb} = Q_{bt} / [(\sigma - \rho)gd^3]^{1/2} = 12 \tau_c^{3/2} \{ [1 - 0.850(\tau_c / \tau_c)] [1 - 0.922 (\tau_c / \tau_c)^{1/2}] \} \quad (17)$$

donde si:  $\tau_c > \tau_c$ , entonces:

$$Q_{bb} = Q_{bt} [(\sigma - \rho)gd^3]^{1/2} \quad (18)$$

y si:  $\tau_c \leq \tau_c$ , entonces:  $Q_{BB} = 0$

$$y: S = (\sigma / \rho) - 1 \quad (19)$$

$$\tau_c = u^2 / (sgd) \quad (20)$$

$$u_c = (ghs)^{1/2} \quad (21)$$

**Fórmula de Meyer-Peter-Muller (M.P.M.) (Meyer et al., 1948):**

$$Q_{bb} = Q_{b^*} / [(\sigma - \rho)gd^3]^{1/2} = 8(\tau_e - \tau_c)^{3/2} \quad (22)$$

donde si:  $\tau_e > \tau_c$ , entonces:

$$Q_{bb} = Q_{b^*} [(\sigma - \rho)gd^3]^{1/2} \quad (23)$$

y si:  $\tau_e \leq \tau_c$ , entonces:  $Q_{bb} = 0$

$$y: \tau_e = u_e^2 / (\sigma - \rho)gd \quad (24)$$

$$u_e = (n_b / n)^{3/4} u_c \quad (25)$$

donde n es el coeficiente de Manning.

**Fórmula de Brown (Brown, C.B., 1950):**

$$Q_{bb} = Q_{b^*} / [(\sigma - \rho)gd^3]^{1/2} = 10 \tau_c^{5/2} \quad (26)$$

donde si:  $\tau_e > \tau_c$ , entonces:

$$Q_{bb} = Q_{b^*} [(\sigma - \rho)gd^3]^{1/2} \quad (27)$$

y si  $\tau_e \leq \tau_c$ , entonces:  $Q_{bb} = 0$

**VIGILANCIA Y MONITOREO EN EL VOLCÁN POPOCATÉPETL**

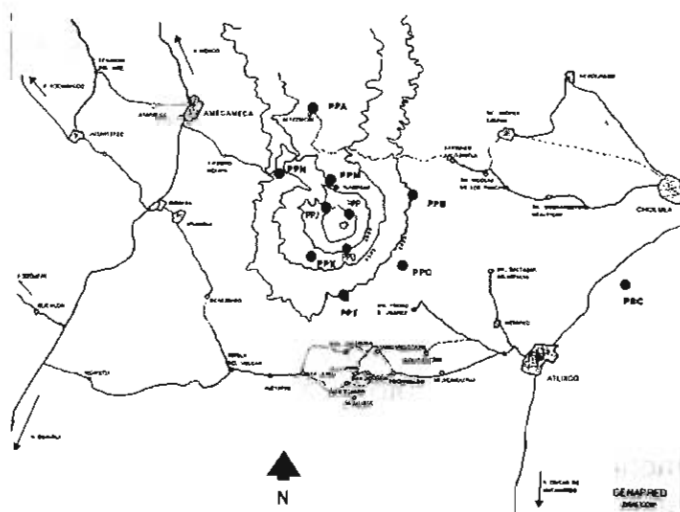
El sistema de vigilancia y monitoreo que actualmente tienen el CENAPRED y el Instituto de Geofísica de la UNAM en el Popocatepetl, consta de:

\* 1. Un comité científico asesor que evalúa y discute la información técnica que además emite recomendaciones a las autoridades de protección civil en caso de alguna contingencia.

\* 2. Una red sísmica con 11 estaciones (actualmente operan ocho) que sirven para detectar la sismicidad volcánica. Esta se muestra en el mapa de la figura 2, cuyas características aparecen en la tabla 1.

**Tabla 1.- Red de monitoreo sísmico en el volcán Popocatepetl y sus características**

ESTACIÓN	NOMBRE	ALTITUD (msnm)	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	TIPO DE EQUIPO
PPJ	JUNCOS	4,452	19.0341°	98.6445°	Sismómetro triaxial (1 Hz)
PIC	LOS CUERVOS	4,200	19.0090°	98.6246°	Sismómetro triaxial (1 Hz)
PPP	CANARIO	4,170	19.0412°	98.6280°	Sismómetro triaxial (1 Hz)
PPA	ALTZOMONI	4,000	19.1204°	98.6530°	Sismómetro vertical (1 Hz)
PPX	CHIPIQUITILE	3,950	19.0088°	98.6566°	Sismómetro triaxial (1 Hz)
PPM	TLAMACAS	3,980	19.0663°	98.6278°	Sismómetro triaxial (1 Hz)
PPN	YOLOXOCHITL	3,700	19.0744°	98.6738°	Sismómetro vertical (1 Hz)
PPT	TETEXCALOC	3,300	19.3745°	98.6241°	Sismómetro triaxial (1 Hz)
PPB	BONSAI	3,080	19.0498°	98.6600°	Sismómetro vertical (1 Hz)
PPC	COLIBRI	2,690	18.9870°	98.6572°	Sismómetro triaxial (1 Hz)
PRC	CALO	2,600	19.3641°	98.3448°	Estación de reparación


**Fig. 2. Red sísmo-volcánica para vigilancia y monitoreo del volcán Popocatepetl. Las estaciones aparecen como círculos llenos y su nomenclatura con tres letras**

\* 3. Un arreglo de cinco inclinómetros electrónicos, para detectar posibles deformaciones del terreno en la estructura volcánica.

**Tabla 1.- Red de inclinómetros electrónicos y sus características**

ESTACIÓN	NOMBRE	ALTITUD (msnm)	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	TIPO DE EQUIPO
PIJ	JUNCOS	4,452	19.0341°	98.6445°	Inclinómetro biaxial
PIC	LOS CUERVOS	4,200	19.0090°	98.6246°	Inclinómetro biaxial
PIP	CANARIO	4,170	19.0412°	98.6280°	Inclinómetro biaxial
PIN	NEXPAYANTLA	4,100	19.0465°	98.6355°	Inclinómetro biaxial
PIX	CHIPIQUITILE	3,950	19.0088°	98.6566°	Inclinómetro biaxial

\* 4. Tres sensores de flujo (ver tabla 3) para detectar el paso de posibles flujos de lodo o lahares por las barrancas principales que drenan hacia el Estado de Puebla, en caso de generarse éstos desde la parte alta del volcán.

**Tabla 3.- Red de monitores de flujo y sus características**

ESTACIÓN	NOMBRE	ALTITUD (msnm)	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	TIPO DE EQUIPO
PFM1	CANARIO	4,170	19.0412°	98.6280°	Detector acústico de flujo y pluviómetro
PFM2	LA ESPINERA	4,284	19.0393°	98.6255°	Detector acústico de flujo y pluviómetro
PFM3	UNION	3,893	19.0681°	98.6222°	Detector acústico de flujo y pluviómetro

\* 5. Un detector de gas radón que mide las emisiones de este gas y sus variaciones con la actividad.

\* 6. Mediciones periódicas de precisión en 3 redes geodésicas ubicadas en los flancos norte, suroeste y sureste del volcán y con GPS (Sistema de Posicionamiento Global).

\* 7. Mediciones aéreas y terrestres con COSPEC (Espectrómetro de Correlación) para conocer los volúmenes emitidos de SO<sub>2</sub>, como producto de la degasificación del cuerpo magmático del volcán.

\* 8. Dos cámaras instaladas: una de video para vigilancia visual y otra de infrarrojo altamente sensitiva, para monitorear la temperatura del domo de crecimiento que se encuentra en el interior del cráter. Con la primera se tiene un monitoreo visual en tiempo real los 365 días del año y con la segunda se monitorea incluso de noche cuando no se puede observar con la primera.

\* 9. Un mapa de riesgos y otro de sectorización del mismo; estudios de gravimetría, de glaciares, geología, cenizas, temperatura y geoquímica de manantiales.

\* 10. Un semáforo de alerta volcánica, para transferir a la población que vive en la periferia del volcán con un lenguaje sencillo, la información contenida en el código de alerta volcánica (seis niveles).

El semáforo consta de tres colores: VERDE, AMARILLO Y ROJO donde están implícitas las acciones recomendadas en caso de cualquier contingencia, con lo que se busca reducir la posibilidad de confusión en caso de una situación de alto riesgo.

\* 11. Un mapa para planeación de emergencias del volcán Popocatepetl, el cual está en función de los distintos sectores de riesgo, definidos a partir del mapa de peligros del volcán.

\* 12. Material impreso, tal como calendarios, trípticos y panfletos.

## PROPUESTA PARA MEJORAR EL SISTEMA DE AVISO Y ALERTAMIENTO HACIA LA POBLACIÓN ASENTADA EN LAS ZONAS DE RIESGO POR FLUJOS DE LODO EN EL POPOCATÉPETL



**Fotografía 18.** Sensor de vibración, cuya función es detectar el paso de flujos de lodo, mediante el reconocimiento de frecuencias características al paso de los mismos

Además de los equipos ya instalados y de los estudios que se vienen realizando, se recomienda lo siguiente para mejorar el sistema de vigilancia y monitoreo:

\* Instalar un juego de al menos dos microbarógrafos de alta ganancia, colocados cerca del cono volcánico para detectar explosiones y ondas de choque.

\* Instalar como mínimo dos sensores de vibración (fotografía 18) adicionales, con la finalidad de detectar las frecuencias de vibración característica de cualquier flujo que pueda dispararse desde la parte alta del volcán en caso de ocurrir un evento eruptivo capaz de fundir parte del hielo de los glaciares. Estos se colocarían en el sector noroeste del volcán, a una altura entre los 3,900 y 4,200 msnm, hacia la parte del Estado de México en la

## Obras de Retención

barranca de Amalacaxco. La información así generada podrá ser enviada y recibida vía telemetría en el Centro de Recepción de Datos del CENAPRED.

\* Instalar al menos un conjunto de 7 juegos de sensores de alambre (cada juego consta de tres alambres) cuya función es detectar el paso de flujos de lodo provenientes de la parte alta del volcán y cuyo origen puede ser por una lluvia extraordinaria o por un evento volcánico como el descrito en el párrafo anterior. Estos serían distribuidos de la siguiente manera:



**Fotografía 19.** En esta estructura se observan tres juegos de sensores de alambre (3 alambres en cada juego) energizados, cuya función es emitir una señal en caso de ser rotos al pasar un flujo de lodo

1. Tres juegos en la barranca de Amalacaxco
2. Dos juegos en la barranca de Yancuecole
3. Dos juegos en la barranca de Huiclástoc

Estas barrancas corresponden al sector NW del volcán en el Estado de México.

En caso de ocurrencia de un flujo de lodo, el frente de flujo rompe los alambres (fotografía 19) e inmediatamente es enviada una señal que puede recibirse

simultáneamente tanto en el Centro de Recepción de Datos del CENAPRED, como en las oficinas de Protección Civil del Estado y en las poblaciones que se encuentran a lo largo de las trayectorias de riesgo aguas abajo. De esta manera, los habitantes de los sectores de población en riesgo podrían desplazarse a sitios seguros previamente establecidos en lugares altos a fin de quedar fuera del alcance e impacto de este fenómeno que es sumamente destructivo.

\* Con lo anterior, también es necesario colocar altavoces en sitios estratégicos (fotografía 20) a fin de que la población pueda escuchar las señales de prealerta y alerta y así saber en qué momento deba desplazarse a los sitios seguros, donde lo deseable sería construir estructuras que sirvan de albergue temporal, ya que un flujo puede ocurrir en condiciones climatológicas adversas o inclusive de noche.



**Fotografía 20.** Altavoces colocados en lugares estratégicos, de tal manera que la población pueda escuchar claramente los mensajes de prealerta y alerta en caso de ocurrencia de flujos de lodo provenientes de la parte alta del volcán

\* Instalar al menos dos cámaras de vídeo (ver también fotografía 19), las cuales se ubicarán en sitios donde estén colocados los sensores de flujo y los de alambre para detectar flujos de lodo o lahares. Esto es, en la barranca de Amalacaxco, cuyas imágenes pueden llegar teleméricamente al Centro de Recepción de Datos del CENAPRED, donde se podrá tomar la decisión de enviar las señales de prealerta y alerta hacia las poblaciones



que se considere pueda llegar un flujo generado en la parte alta del volcán. Las imágenes también podrán ser grabadas en cintas de vídeo para su análisis posterior.

\* Definir y establecer los sitios seguros con sus correspondientes accesos en lugares altos, sobre todo en los poblados San Juan Tehuixtltlán, Popo Park, Ozumba de Alzate, San Vicente Chimalhuacán, Nepantla de Sor Juana Inés de La Cruz y San Andrés Tlalámac en el Estado de México, hacia donde la gente pueda desplazarse rápidamente por sí misma.

Debe mencionarse que los sistemas de aviso y alertamiento para el caso de ocurrencia de flujos de lodo, deberán operar en aquellas zonas donde la población está expuesta a éste fenómeno; a reserva de recomendar la reubicación de ciertos sectores que se encuentran asentados dentro y a la orilla de las barrancas de alto riesgo.

A este respecto, existe ya un estudio donde se definen para cada población particular las construcciones de mayor riesgo, con las observaciones y recomendaciones pertinentes.

\* Mejorar las rutas de acceso y evacuación, además de considerar la construcción y ampliación de algunos puentes, a fin de que la población pueda desplazarse a los sitios seguros lo más rápidamente posible ante alguna contingencia.

\* También es importante continuar los programas de prevención en las escuelas y organizar reuniones públicas con las autoridades locales de protección civil en las comunidades, a fin de aumentar su conocimiento del riesgo.

\* Organizar simposios y talleres relacionados con el riesgo volcánico, conducidos por las autoridades locales, consejos municipales, unidades y comités de protección civil y público en general.

\* Programar y efectuar más ejercicios de evacuación con las comunidades de riesgo, dependiendo de la actividad volcánica y del grado de riesgo en cada una de ellas.

\* Organizar y dar cursos de entrenamiento sobre mitigación de riesgo volcánico.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En éste trabajo, se establecen los principios y criterios generales para el cálculo del volumen de agua de fusión y del material, producto de los flujos de lodo que pudieran ser generados a partir del glaciar noroeste en caso de ocurrir una erupción moderada de material de alta temperatura.

Con ésta información pueden también realizarse simulaciones de flujos de lodo hacia los sectores de riesgo, sólo que es necesario contar con el simulador de flujos BOSS DAMBRK, mediante el cual se podrán generar distintos escenarios para definir zonas de riesgo por éste fenómeno; además de poder aplicarse para cualquier tipo de flujos, ya sean volcánicos o de escombros en zonas no volcánicas.

## Obras de Retención

Para ello, es necesario contar con un mapa topográfico a escala 1:2,000 ó mejor de las zonas de interés a fin de poder cuantificar los depósitos de lahar del pasado, ya que sólo de esa manera se podrá, mediante simulaciones numéricas, reconstruir los escenarios y conocer los volúmenes aproximados de material generados en eventos pasados.

Adicionalmente, ésta topografía conjuntamente con fotografías aéreas a escala 1:10,000 por ejemplo, permitirá construir secciones de barranca, las cuales son útiles y necesarias en la misma modelación de los escenarios.

Esto último también es importante, ya que sólo de esta manera se podrán diseñar y proponer un cierto tipo y número de obras Sabo, capaces de detener y almacenar el material así calculado con apoyo de trabajo de campo.





## BIBLIOGRAFÍA

- Ashida, K., Takahashi, T. and Mizuyama, T., 1981. Study on bed load equations for mountain streams. Jour. Japan Soc. Erosion Control Eng.; in Japanese. Vol. 107, pp. 9-17.
- Brown, C. B., 1950. Engineering Hydraulics. Ed. by: H. Rouse; John Wiley and Sons, Inc. New York; pp.774-799.
- Crandell, D. R., 1971. Postglacial lahars from Mount Rainier volcano, Washington. U.S. Geol. Surv.. Prof. Paper 667, 73 pp.
- Lorenzo, J. L., 1964. Los glaciares de México. Monografías del Instituto de Geofísica, UNAM, No. 1, Segunda Edición, 123 p.
- Delgado, H., Arciniega, R. y Calvario, D., 1986. Los glaciares del Popocatepetl y el Iztaccihuatl. Comunicaciones Técnicas, Serie Investigación; Inst. de Geof. UNAM, No. 31, 20 p.
- Delgado, H., 1988. Report on the glaciers of Mexico. In: Haeberli and Müller (eds.), Fluctuation of Glaciers 1980-1985 (Vol. 5), A contribution to the Global Environmental Monitoring System (GEMS) and International Hydrological Programme, World Glacier Monitoring Service, International Commission on Snow and Ice. International Association of Hydrological Sciences, United National Environmental Programme and UNESCO, 28 pp.
- Delgado, H., 1993. The glaciers of Popocatepetl volcano, (Mexico). Changes and causes. Program and abstracts. First International Conference on Climatic Change in Mexico, Taxco, Gro., p.27.
- Delgado, H. y Brugman, M., 1995. Monitoreo de los glaciares del Popocatepetl. Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995. Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres y Universidad Nacional Autónoma de México. p. 221-241.
- Meyer-Peter, E. and Muller R., 1948. Formulas for bed-load transport. Proc. 2nd IAHR Meeting; Stockholm; pp. 39-64.
- Ramos, E., 1997. Numerical simulation of a possible mudflow, from melted ice on Popocatepetl volcano, Mexico. Sabo Technical Centre, M. O. C.-JICA, Japan; 54 pp.
- Yamada, T., 1997. Volcanic Disaster Countermeasures. Textbook for the Group Training Course in Volcanology and Volcanic Sabo Engineering; Vol. 1, JICA, Japan; 57 pp.

### **Créditos**

El material presentado en esta obra proviene de la documentación que el Instituto de Protección Civil del Estado de México ha reunido sobre esta materia y la investigación fue realizada por el Ing. Esteban Ramos Jiménez con el apoyo del M.en I. Alonso Echavarría Luna del Centro Nacional de Prevención de Desastres de la Secretaría de Gobernación.

La dirección editorial estuvo a cargo del Arq. Miguel Ángel Cruz Guerrero, Director General del Instituto de Protección Civil y la Producción fue hecha por Israel Domínguez Jaimes.





# **Instituto de Protección Civil del Estado de México**

**Oficinas en Toluca:**

**Urawa No. 100**

**Oficina 119, Col. Izcalli IPIEM. C.P. 50050**

**Tels. (01722) 280-63-92, Fax (01722) 280-63-94.**

**Oficinas en Tecámac:**

**Km 37 de la Carretera Federal México-Pachuca,**

**Col. Hueyotenco, C.P. 55740**

**Tels. (0155) 59-36-42-66, Fax (0155) 59-36-42-63.**

[www.edomexico.gob.mx/ipc](http://www.edomexico.gob.mx/ipc)