

Modelación de lahares por erupción del Popocatépetl

Juan Antonio García
María Vicenta Esteller

Centro Interamericano de Recursos del Agua
Universidad Autónoma del Estado de México

Un modelo para calcular las características hidrodinámicas de lahares basado en la teoría cinética de escurrimientos fluido-granulares en el régimen inercial, se aplica al caso de lahares originados por la posible erupción y el consecuente deshielo del casquete polar del volcán Popocatépetl, México. El modelo es capaz de reproducir los caudales, las alturas de flujo, las velocidades medias y las concentraciones de sólidos en las diferentes secciones de las cañadas más susceptibles a la ocurrencia de lahares. Estas se seleccionaron por sus condiciones geológicas y abrupta topografía. En función de las características hidráulicas del lahar y de la topografía del cañón, se pudo predecir el alcance de los lahares y las posibles zonas afectadas por estos, las cuales se encuentran localizadas en un radio de 30 km con respecto al cráter.

Palabras clave: lahares, Popocatépetl, erupción, régimen inercial, deshielo, arrastre de sedimentos, deposición, alcance.

Introducción

La reciente entrada en actividad del volcán Popocatépetl, el segundo más elevado de México (5420 m.s.n.m) y localizado en las proximidades de zonas densamente pobladas tales como México D.F., situada a 65 km, y Puebla situada a 45 km (ver ilustración 1), ha puesto en evidencia los peligros que una erupción de gran magnitud de este volcán puede generar. Uno de estos peligros es el deshielo del casquete polar a causa de los flujos piroclásticos; el caudal líquido generado puede ocasionar lahares como consecuencia del arrastre de grandes cantidades de sedimentos depositados en las barrancas que se originan cerca del cráter.

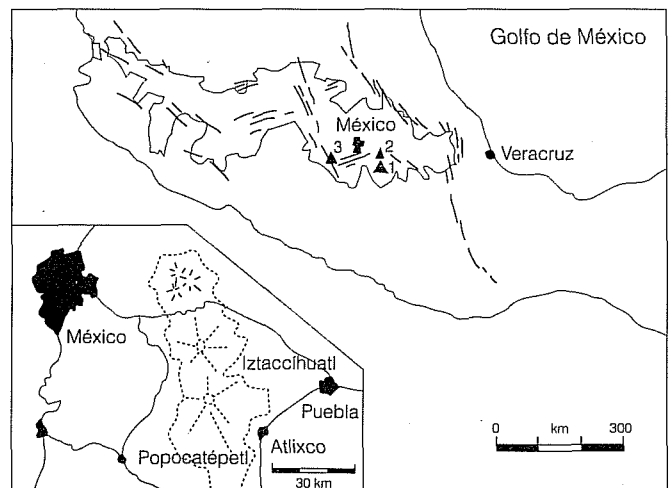
El lahar resultante puede ser de gran magnitud poniendo en peligro las poblaciones ribereñas. Casos similares se han producido en otros lugares del mundo; los más recientes en América Latina son el lahar del río Lagunillas que destruyó Armero (Colombia) y que causó 25 mil muertes en 1985 y el ocurrido en el Perú en 1970 destruyendo la población de Yungay y ocasionando 17 mil muertos.

Metodología

Delgado *et al.* (1988) han identificado a las cañadas Ventorrilla (que se transforma en cañada Nexpayantla), Barranca Seca y Río Atila, como las más susceptibles

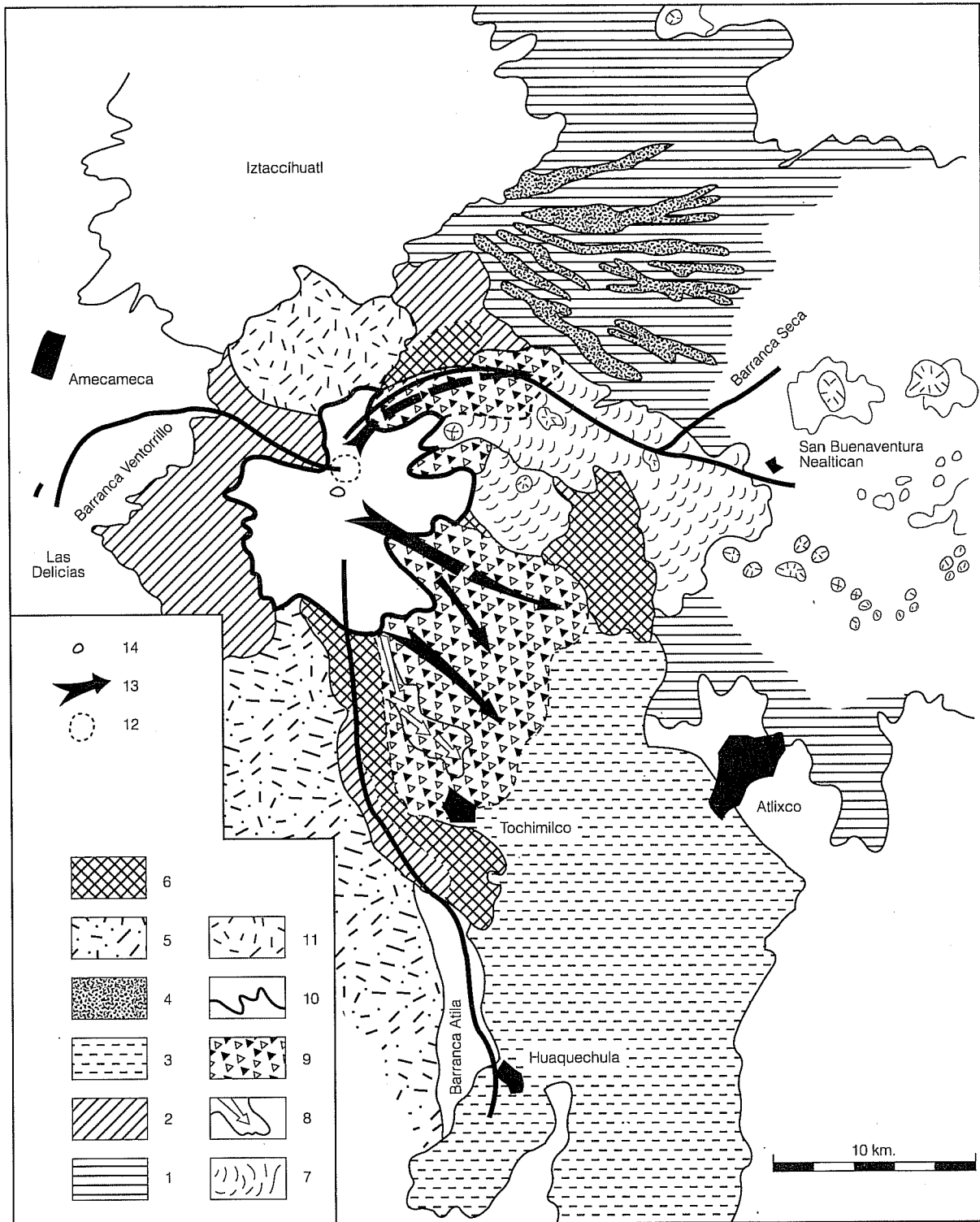
de producir lahares. Su localización, con respecto al cráter del Popocatépetl, se presenta en la ilustración 2. En este artículo se analizarán las características hidrodinámicas de los lahares que pueden producirse en las cañadas antes citadas que son, además, aquellas que aparentemente presentan mayores riesgos para las poblaciones ribereñas.

1. Situación del volcán Popocatépetl en el marco de la Provincia Volcánica Trasmexicana (Robin, 1984)



1.- Popocatépetl, 2.- Iztaccíhuatl, 3.- Nevado de Toluca

2. Esquema geológico del Popocatépetl y localización de las barrancas estudiadas (Robin, 1984)



1.- Sustrato volcánico y sedimentario, 2.- Andesitas y andesitas ácidas, 3.- Conglomerados, 4.- Lahares procedentes de Santiago Xalitzintla
 5.- Tobas retrabajadas, 6.- Dacitas, 7.- Andesitas recientes, 8.- Coladas de base, 9.- Superficies recubiertas por las erupciones de nubes ardientes, 10.- Límite esquemático del cono terminal, 11.- Tobas superiores, 12.- Gran cráter San Vicente, 13.- Principales direcciones tomadas por los flujos piroclásticos, 14.- Cráter actual

El volcán Popocatepetl conserva un casquete de hielo con, aproximadamente, 17.2 Mm³ de hielo en un área de 65 ha cubierta por *permafrost* (Carrasco, 1985), este casquete se amplía con la cubierta nival en un factor superior a 10 durante el invierno, lo cual evidencia el peligro de lahares. Para la estimación del volumen de deshielo nos basaremos en la fórmula de Meier, citada por Pierson (1992), que enunciamos a continuación:

$$Q = \frac{kT_0 t^{0.5}}{\pi\alpha^{0.5}} \quad (1)$$

donde

Q = flujo de calor de la capa piroclástica a la nieve [cal/cm²].

k = Conductividad térmica de los sedimentos [cal/cm.s.°C].

T_0 = temperatura inicial de los piroclastos [°C].

α = $k/c\phi_d$ difusividad térmica [cm²/s].

c = calor específico [cal/g °C].

ϕ_d = densidad de los piroclastos [g/cm³].

t = tiempo de contacto [s].

π = 3.1416

$$V = \frac{QA}{H_f \rho_n} \cdot 10^4 \quad (2)$$

donde

V = volumen de deshielo [m³].

A = área de contacto de los piroclastos sobre el hielo [m²].

H_f = calor de fusión del agua [79.7 cal/g].

ρ_n = densidad del hielo [0.9 g/cm³].

Los siguientes valores típicos de una erupción de escala considerable se tomaron de la literatura referente a episodios volcánicos: $k = 0.02$ [cal/cm.s.°C], $T_0 = 700$ [°C], $c = 0.2$ [cal/g°C] y $t = 20$ [min] (Fairchild, 1987; González-Ferrán, 1973 y García Aragón *et al.*, 1993).

La concentración media v_{avg} del lahar se puede estimar según el espesor de la capa sedimentaria susceptible de ser removida. Si la capa sedimentaria tiene espesor a_b la concentración promedio es

$$v_{avg} = \frac{a_b}{a_b + h} v_{max} \quad (3)$$

donde

h = altura de flujo sobre la capa sedimentaria [m].

a_b = espesor de la capa sedimentaria [m].

v_{max} = Concentración máxima de la capa sedimentaria [m³/m³].

Conocida la concentración máxima se puede conocer el caudal total Q_T (que incluye los sedimentos arrastrados) por medio de la siguiente fórmula (Takahashi, 1982),

$$Q_T = \frac{v_{max}}{v_{max} - v^*} Q_w \quad (4)$$

donde

v_{max} = concentración máxima admisible para el tipo de sedimento [m³/m³].

v^* = fracción de la concentración máxima que depende de la pendiente, el ángulo de reposo de los sólidos y las densidades respectivas del fluido y los sólidos, Takahashi(1978), [m³/m³].

Q_w = caudal líquido [m³/s].

Con las fórmulas anteriores se puede utilizar un modelo que nos permita relacionar la velocidad media del flujo y la altura de éste. El modelo en cuestión debe tener en cuenta las propiedades mecánicas particulares de la mezcla fluido-sólida que constituye un lahar. Por medio de ese modelo se pueden determinar las características hidrodinámicas importantes del lahar, tales como altura media de flujo, velocidad media, concentración media y caudal total, para el caso de cada una de las secciones consideradas.

Determinación del modelo hidrodinámico

Un flujo de escombros en el régimen inercial se puede idealizar como una mezcla fluido-granular, en la cual el fluido lo constituye el agua más la fracción fina y la fracción granular los sólidos gruesos. El modelo que se considerará se desarrolló para el caso de un flujo uniforme en secciones de canal de pendiente constante, formando un ángulo θ con la horizontal. Para la aplicación al caso del Popocatepetl consideramos los tramos con pendientes similares y dividiremos la longitud total de la cañada en el número de secciones conveniente de acuerdo a la topografía del cañón.

Se utilizó una metodología (García Aragón, 1996) que establece un balance entre las fuerzas propulsoras y las resistentes al movimiento, entre las cuales se encuentran los esfuerzos dispersivos producidos por las colisiones entre las partículas sólidas además de las fuerzas de fricción del fluido con la pared. De esta manera se logra encontrar una relación entre los valores promedio en la vertical de las siguientes variables: v_{avg} , la concentración media, U_{avg} la velocidad media y h la altura de flujo.

Se consideran partículas sólidas de diámetro promedio d y densidad ρ_s . El balance de fuerzas proporciona la siguiente expresión para la velocidad media sobre la sección (García Aragón, 1996)

$$U_{avg} = \sqrt{\frac{gh \sin \theta [(R-1) v_{avg} (1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi_d}) + 1]}{\frac{C_i}{2} + \frac{4Rd^2 g_2}{h^2} \tan \phi_d - \tan \phi}} \quad (5)$$

donde

U_{avg} = velocidad promedio del flujo [m/s]

$R = \rho_s / \rho_f$

ρ_f = densidad del fluido [kg/m³].

ρ_s = densidad de los sólidos [kg/m³].

ϕ = ángulo de fricción estático de los sólidos [°C].

ϕ_d = ángulo de fricción dinámico interno de los sólidos [°C].

θ = ángulo de la cañada con la horizontal [°C].

v_{avg} = concentración volumétrica promedio del flujo [m³/m³].

h = altura de flujo [m].

d = diámetro medio de los sólidos [m].

g = constante de aceleración de la gravedad, 9.81 [m/s²].

C_i = coeficiente de fricción en el lecho [n²g/h^{1/3}] (donde n es el coeficiente de fricción de Manning).

La expresión para g_2 proviene de la teoría cinética para escurrimientos granulares (Lun *et al.*, 1984), con la cual se estima la constante de Bagnold (1954) para el cálculo de los esfuerzos dispersivos

$$g_2 = \frac{5\sqrt{\pi}}{96} \left[\frac{1}{g_0} + \frac{16v_{avg}}{5} + \frac{64v_{avg}^2 g_0}{25} \left(1 + \frac{12}{\pi} \right) \right] \quad (6)$$

donde $g_0 = (1 - v_{avg}/v_{max})^{-2.5v_{max}}$, v_{max} es la máxima concentración posible para el tipo de partículas en consideración.

Aplicación al volcán Popocatepetl

Geología

El volcán Popocatepetl se enmarca dentro del Eje Neovolcánico Trasmexicano (Mooser, 1972 y Moran, 1985), en el que se definen numerosos aparatos volcánicos, entre los cuales cabe destacar el Iztaccíhuatl, Xinantécatl y el Nevado de Colima, entre otros. Todos ellos son volcanes compuestos de tipo estrato-volcán en los que han alternado las emisiones piroclásticas con las de lava. Los depósitos que integran el volcán en las par-

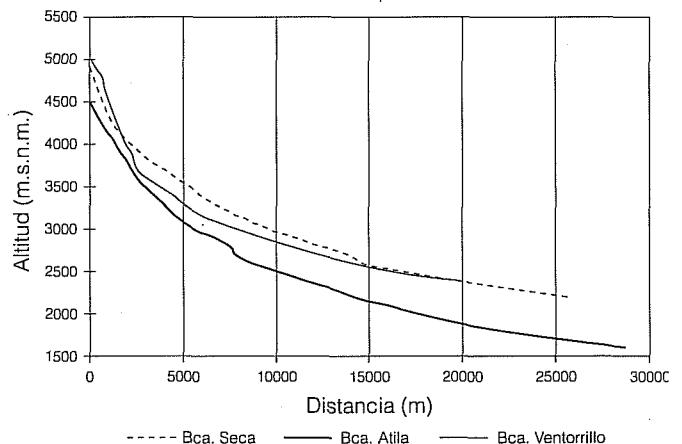
tes más altas son principalmente coladas de lavas que se intercalan con brechas y material piroclástico. En las zonas más bajas se distinguen depósitos de piroclastos de gran extensión cuyo origen está ligado tanto a depósitos por caída libre como por flujos de cenizas.

Se pueden diferenciar dos tramos que corresponden a dos diferentes etapas de la formación de este volcán, la primera es la responsable de la formación de un volcán de base y la segunda del cono reciente (Carrasco, 1985); aunque algunos autores definen una etapa de transición (Robin, 1984).

En lo que corresponde al volcán de base se han definido dos unidades, la inferior constituida por potentes coladas de lava de composición andesítica-basáltica, seguidas por otras de composición exclusivamente andesítica. La unidad superior está formada por una secuencia de lavas de composición variable, desde andesitas ácidas a dacitas, con intercalaciones de brechas volcánicas de lavas andesíticas con cemento arcilloso y algunas tobas andesíticas.

El cono principal del volcán presenta dos unidades claramente diferenciadas. La unidad inferior constituida por andesitas microlíticas que se presentan en forma masiva y con intercalaciones, de poco espesor, de brechas pumíticas y tobas de composición andesítica. Sus afloramientos se localizan en las partes inferiores del cono principal, llegando cuando menos hasta una altura de 3 700 m.s.n.m. La unidad superior está definida con base en una serie de andesitas porfídicas de tendencia ácida, las cuales se presentan en capas de hasta 5 m de espesor, con intercalaciones de piroclastos que muestran diferentes grados de consolidación. Los afloramientos de andesitas se observan en las inmediaciones del cráter ya que al ser materiales ácidos de alta viscosidad, se movilizan poco del punto

3. Perfiles topográficos de las cañadas que se originan en la cima del Popocatepetl



1. Diámetro medio de los sólidos

Altitud msnm	Cañadas		
	Ventorrillo	Barranca Seca	Atila
> 4 800	5 mm	5 mm	5 mm
4 800 – 4 000	10 mm	5 mm	5 mm
4 000 – 3 100	3 mm	3 mm	3 mm
3 100 – 2 500	2 mm	2 mm	2 mm
< 3 100		1 mm	1 mm

de emisión mientras que los productos piroclásticos se dispersan en una gran extensión en torno al cráter.

Estos piroclastos son tanto de caída libre como de flujo. Los de caída libre, con espesores hasta de 15 m, se distribuyen en forma más homogénea y a grandes distancias (hasta 20 km del cráter). En estos materiales se definen varias capas de material pumítico con fragmentos irregulares de tamaño variable (diámetro entre 5 y 64 mm) y con espesores que oscilan entre 10 y 30 cm. En el nivel superficial la constitución del depósito es primordialmente de cenizas finas con un diámetro medio de 0.16 mm. Se observan fragmentos de lapilli pumítica de color amarillo y de un diámetro entre 2 y 4 mm.

Los flujos piroclásticos se distribuyen exclusivamente en los valles próximos al cráter. Son materiales de composición andesítica, con escasa clasificación y de tamaño muy variable, desde cenizas (0.125 mm) hasta bloques (20 cm) predominando la matriz fina. Su espesor varía entre 3 y 8 metros.

Los depósitos glaciares se localizan en la Barranca Ventorrillo y son bloques angulosos de lava andesítica con diámetros comprendidos entre 0.5 y 1 m, cementados por una matriz arcillosa.

Parámetros utilizados en el modelo hidrodinámico

La anterior discusión nos lleva a clasificar el material de las barrancas estudiadas de la siguiente forma:

3. Tramos de modelación de cañadas

Tramo	Ventorrillo		Barranca Seca		Atila	
	Distancia km	Elevación msnm	Distancia km	Elevación msnm	Distancia km	Elevación msnm
1	0.0 – 2.0	5 100 – 4 000	0.00 – 1.32	5 100 – 4 200	0.0 – 1.42	5 100 – 4 000
2	2.0 – 2.4	4 000 – 3 800	1.32 – 7.57	4 200 – 3 200	1.42 – 4.93	4 000 – 3 100
3	2.4 – 7.0	3 800 – 3 100	7.57 – 15.8	3 200 – 2 550	4.93 – 10.1	3 100 – 2 500
4	7.0 – 15.0	3 100 – 2 650	15.8 – 29.4	2 550 – 2 100	10.1 – 19.6	2 500 – 1 900
5	15.0 – 24.0	2 650 – 2 300	–	–	19.6 – 28.7	1 900 – 1 600

2. Pendientes de cañadas

Altitud msnm	Cañadas		
	Ventorrillo	Barranca Seca	Atila
5 000 – 4 000	0.590	0.454	0.346
4 000 – 3 800	0.590	0.176	0.346
3 800 – 3 100	0.163	0.176	0.225
3 100 – 2 500	0.068	0.073	0.109
2 500 – 2 200	0.028	0.034	0.063
2 000 – 1 900	–	–	0.063
1 900 – 1 600	–	–	0.033

El espesor medio de la capa sedimentaria es de 5m, $a_b = 5$ m. Los valores de los ángulos de fricción estático y dinámico se tomaron de la literatura de mecánica de suelos, (Terzaghi, 1956). Valores típicos para granulometrías con diámetros medios del orden de 5 mm (ver cuadro 1) son $\phi = 25^\circ$, aumentando ligeramente según el incremento de tamaño y descendiendo a la inversa. Para el ángulo de fricción dinámica se utilizaron los resultados de Savage *et al.* (1984), quienes comprueban que éste es ligeramente superior al estático cuando las tasas de corte son altas como es nuestro caso, en promedio tomanos una diferencia de 2 grados.

Las pendientes de las cañadas se dedujeron de los planos topográficos. Los perfiles se muestran en la ilustración 3 y las pendientes en el cuadro 2.

Se efectuó el cálculo de las velocidades y elevaciones de los lahares para cada uno de los tramos con características topográficas y geológicas similares. En vista de que las pendientes en elevaciones superiores a 3 100 m son mayores de 0.15, se considera un alto riesgo de transporte masivo de material y según Takahashi (1978) para esos casos el valor $v_* = 0.9 v_{max}$.

De acuerdo a las características topográficas y geológicas se seleccionaron los siguientes tramos para calcular las características hidrodinámicas del lahar (cuadro 3).

4. Casquete polar y cubierta nival

	Ventorrillo	Barranca Seca	Atila
Invierno (nieve)	2.3 km ²	1.4 km ²	2.0 km ²
Verano (hielo)	0.435 km ²	0.095 km ²	0.05 km ²

La variable más difícil de estimar es el área de contacto (A) de los piroclastos con la cubierta nival. En efecto, esta área depende no sólo de la intensidad de la erupción del volcán sino de la época del año en la cual ocurra, puesto que la cubierta nival varía según sea invierno o verano. En vista de esta incertidumbre utilizamos dos casos extremos; los valores de la cubierta nival en un mes de invierno típico (enero), tomados como el área aferente a la cañada por encima de 4000 msnm y aquellos del casquete permanente tomados del trabajo de Carrasco (1985). El cuadro 4 presenta esos valores.

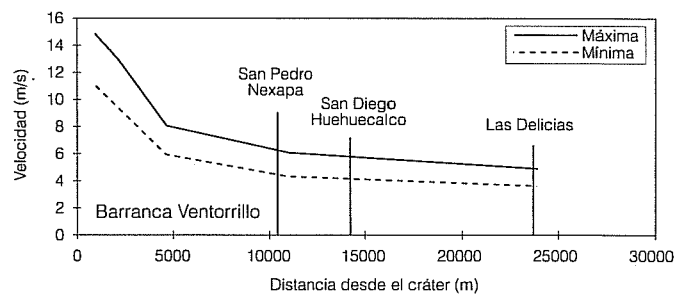
Considerando el caso más extremo como aquél en que se deshiele el 50% de la cubierta invernal y el menos extremo el deshielo total del casquete en las condiciones de verano, se obtuvieron los siguientes resultados (cuadro 5).

Los resultados muestran que en el primer kilómetro los lahares presentan características de flujos hiperconcentrados cuya característica es tener concentraciones volumétricas menores a 0.35. En el caso del Popocatepetl se obtienen en ese primer kilómetro concentraciones tan bajas como 0.22 para la Barranca Seca. A medida que avanzan incrementan su concentración hasta valores cercanos a 0.5, típicas de flujos de escombros *debris flows*, en los cuales los esfuerzos dispersivos gobiernan el comportamiento mecánico del flujo.

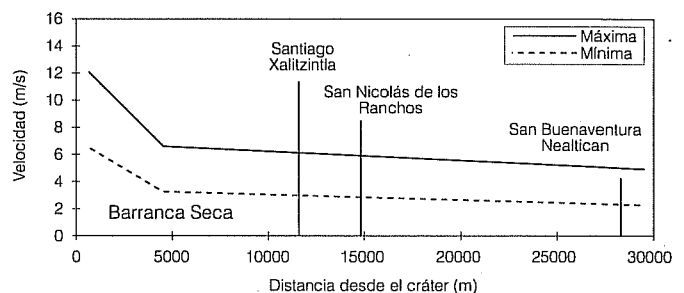
En estos casos las fórmulas tradicionales de resistencia al flujo, como la de Manning, entre otras, no son capaces de representar adecuadamente los esfuerzos de cizallamiento en el fondo, García Aragón (1996). Para el tramo de menor pendiente en cada una de las barrancas hay una disminución ligera de la concentración por volumen entre 5 y 15%, debido al natural aumento de altura de flujo. Las alturas de flujo en general son moderadas excepto en el último tramo de baja pendiente donde aumentan a cerca de 3 m para los lahares máximos, lo cual evidencia el peligro en las áreas cercanas a la zona de deposición.

En las ilustraciones 4-9 se muestran la variación de velocidad y caudal con la distancia al cráter, igualmente se muestran las poblaciones que pueden ser alcanzadas por el lahar. Las velocidades disminuyen progresivamente con la distancia al cráter, desde valo-

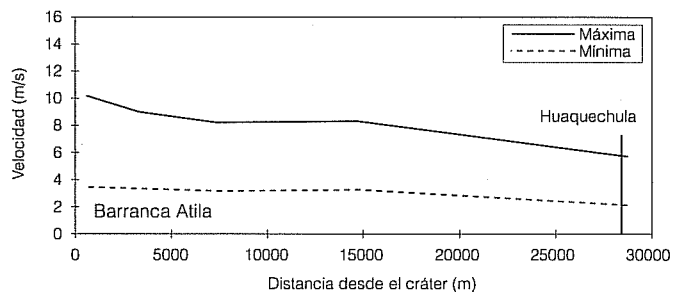
4. Velocidades calculadas para condiciones máximas y mínimas. Barranca Ventorrillo



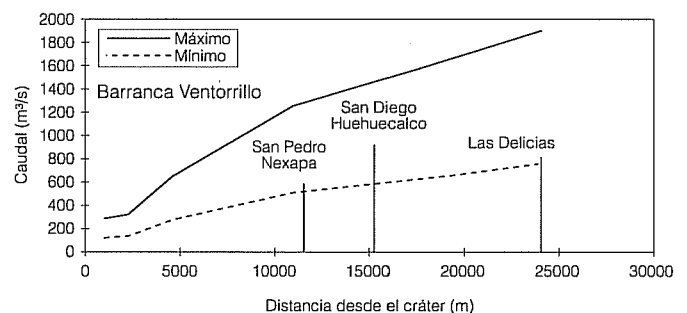
5. Velocidades calculadas para condiciones máximas y mínimas. Barranca Seca



6. Velocidades calculadas para condiciones máximas y mínimas. Barranca Atila



7. Caudales calculados para condiciones máximas y mínimas. Barranca Ventorrillo



5. Lahares resultantes para condiciones máximas y mínimas de deshielo

Tramo 1 (m)	Ventorrillo 0 – 2 000		Barranca Seca 0 – 1 325		Atila 0 – 1 425	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Concentración	0.32	0.33	0.22	0.22	0.35	0.38
Velocidad (m/s)	14.38	10.87	12.00	6.41	10.23	3.37
Caudal (m³/s)	275.20	117.48	169.20	26.91	156.48	8.09
Altura (m)	0.62	0.36	0.47	0.14	0.51	0.08

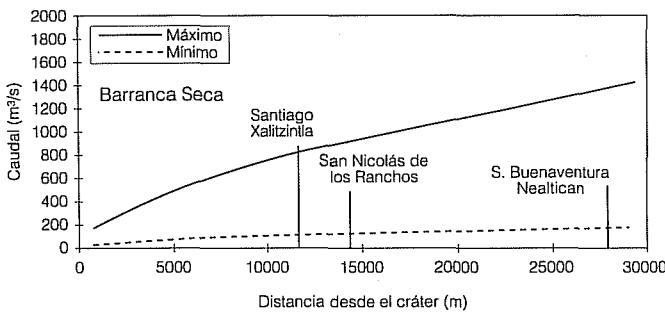
Tramo 2 (m)	Ventorrillo 2 000 – 2 400		Barranca Seca 1 325 – 7 575		Atila 1 425 – 4 925	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Concentración	0.35	0.36	0.41	0.45	0.48	0.53
Velocidad (m/s)	12.92	9.29	6.63	3.32	9.22	3.29
Caudal (m³/s)	310.00	130.10	453.4	65.8	387.40	19.8
Altura (m)	0.48	0.28	1.14	0.33	0.70	0.10

Tramo 3 (m)	Ventorrillo 2 400 – 7 000		Barranca Seca 7 575 – 15 850		Atila 4 925 – 10 125	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Concentración	0.44	0.47	0.51	0.45	0.50	0.57
Velocidad (m/s)	8.04	5.90	6.21	3.06	8.31	3.13
Caudal (m³/s)	653.10	272.50	830.20	117.60	724.70	40.10
Altura (m)	1.16	0.66	1.67	0.48	1.09	0.16

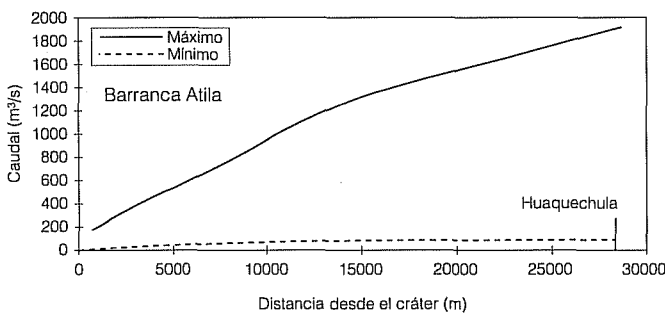
Tramo 4 (m)	Ventorrillo 7 000 – 15 000		Barranca Seca 15 850 – 29 375		Atila 10 125 – 19 625	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Concentración	0.45	0.49	0.43	0.529	0.50	0.58
Velocidad (m/s)	6.06	4.27	5.01	2.34	8.30	3.16
Caudal (m³/s)	1 256.00	512.40	1 443.20	204.10	1 324.20	73.10
Altura (m)	2.07	1.20	2.88	0.87	1.47	0.21

Tramo 5 (m)	Ventorrillo 15 000 – 24 000		Barranca Seca		Atila 19 625 – 28 675	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Concentración	0.43	0.48	–	–	0.48	0.58
Velocidad (m/s)	4.82	3.54	–	–	5.71	2.00
Caudal (m³/s)	1 298.00	783.10	–	–	1 933.90	103.30
Altura (m)	3.33	2.21	–	–	2.82	0.43

8. Caudales calculados para condiciones máximas y mínimas. Barranca Seca



9. Caudales calculados para condiciones máximas y mínimas. Barranca Atila



res superiores a 10 m/s (incluso 14 m/s), hasta valores inferiores a 5 m/s, presentándose diferencias importantes entre los casos máximos y mínimos analizados.

Los caudales que se presentan en las ilustraciones 7-9 por el contrario aumentan con la distancia al cráter, encontrándose máximos de 1928 m³/s, 1443 m³/s y 1933 m³/s para las barrancas Ventorrilla, Barranca Seca y Atila, respectivamente. La diferencia de caudales entre los casos máximo y mínimo es muy grande debido a la fuerte influencia del caudal de deshielo inicial. Ese caudal de deshielo inicial depende en gran parte del área del casquete polar lo cual demuestra el grave riesgo de una erupción en época de invierno.

Al comparar las distancias de alcance de los lahares calculados en este trabajo, con el alcance definido en el mapa de peligro del volcán Popocatepetl (Instituto de Geofísica, 1995), observamos que nuestras predicciones afectan áreas menos extensas.

Los lahares calculados por las barrancas Ventorrillo y Seca alcanzan zonas de depósito en alturas de 2300 msnm y 2100 msnm (distancias desde el cráter de 24 km y 29.4 km, respectivamente) y el de Atila cerca de la cota 1600 msnm (distancia desde el cráter 28.7 km). Las anteriores zonas de deposición se estimaron en función de las pendientes que son menores de 0.034

($\theta = 1.95^\circ\text{C}$) y de las velocidades que son menores a 5 m/s, las cuales no son propicias para que se mantenga el flujo de un lahar con concentraciones de sólidos tan importantes (mayores de 40%). Takahashi (1985) propone la siguiente fórmula para calcular si una pendiente dada es propicia para deposición

$$G = \frac{0.6 (\rho_s - \rho_f) g (v_*) \cos \theta}{(\rho_s - \rho_f) (v_*) + \rho_f} - g \sin \theta \quad (7)$$

donde

ρ_f = densidad del fluido [kg/m³].

ρ_s = densidad de los sólidos [kg/m³].

θ = ángulo de la cañada con la horizontal [°C].

v_* = concentración volumétrica máxima [m³/m³].

g = aceleración de la gravedad, 9.81 [m/s²].

Si el valor de G es mayor que cero, la pendiente de ángulo θ es propicia para deposición. En el caso de la Barranca Ventorrilla $G = 2.61$ [m/s²] para $\theta = 1.6^\circ\text{C}$, en el caso de Barranca Seca $G = 2.55$ [m/s²] para $\theta = 1.95^\circ\text{C}$, y en el caso de Atila $G = 2.57$ [m/s²] para $\theta = 1.89^\circ\text{C}$.

Conclusiones

Los resultados de la modelación de los lahares muestran que para condiciones hidrológicas críticas y erupción volcánica violenta, se generan lahares de magnitud considerable, con caudales mayores de 1400 m³/s en cada una de las cañadas estudiadas. El lahar de la cañada Ventorrillo presenta pendientes y velocidades de deposición a partir del km 24, aguas abajo del poblado de San Pedro Nexapa y en su planicie de inundación se encuentra el poblado de Las Delicias. El lahar de la cañada Barranca Seca también presenta pendientes y velocidades de deposición a 29.4 km del cráter. En su transcurso alcanza los pueblos de Santiago Xalitizintla y San Nicolás de los Ranchos y en su planicie de inundación se encuentra el poblado de San Buenaventura Nealticán. Por su parte el lahar de Barranca Atila presenta características de deposición sólo hasta el kilómetro 28.7. En su transcurso no afecta poblados de consideración, pero el poblado de Huaquechula podría encontrarse en su planicie de inundación.

En condiciones hidrológicas favorables sólo el lahar de la Barranca Ventorrillo presenta un riesgo considerable, puesto que el único glaciar permanente del Popocatepetl se encuentra precisamente en esa vertiente.

Como conclusión podemos decir que el riesgo de lahares en el Popocatepetl se incrementa de manera importante en los meses de invierno diciembre-febre-

ro, durante los cuales una erupción con flujos piroclásticos del volcán puede ocasionar caudales considerables de deshielo, los cuales de acuerdo a las condiciones geológicas y topográficas del volcán Popocatepetl se pueden convertir en lahares que pueden poner en riesgo algunos poblados situados a una distancia menor de 30 km del cráter.

Recibido: noviembre, 1996

Aprobado: noviembre, 1997

Referencias

- Bagnold, R.A. 1954. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proc. Royal Soc. London* A225:49-63.
- Carrasco Nuñez, G. 1985. *Estudio geológico del volcán Popocatepetl*. Tesis profesional. México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 138 p.
- Delgado, G.H., N.G. Carrasco, F.G. Urrutia y B.M. Casanova. 1988. Analysis of the eruptive records of the Popocatepetl volcano, México. *Proceedings of the Kagoshima intl. conference on volcanoes*. Japan.
- Fairchild, L.H. 1987. The importance of lahar initiation processes. In: J.E. Costa and G.F. Wieczorek(editors), *Debris flows/Avalanches: Process, recognition and mitigation*. Geol. Soc. Amer., reviews in *Eng. Geol.*, 7, pp. 51-61.
- García Aragón, J.A. 1996. An improved hydraulic shear stress model for rapid highly concentrated flow. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 34(5).
- García Aragón, J.A. 1992. *Experimental and analytical observations of granular-fluid mixtures down inclines*. Ph. D. thesis, McGill University, Montreal.
- García Aragón, J.A y S.B. Savage. 1993 Kinetic theory approach to the Nevado del Ruiz 1985 debris flow. *Proceedings Hydraulics 1993*, ASCE, conferencia en San Francisco, July 25-30.
- González-Ferrán, O. 1973. Description of volcanic eruptions-Chile. *Bull. Volc. Eruptions* 11:41-42.
- Lun, C.K.K, S.B. Savage, D.J. Jeffrey y N. Chepurniy. 1984. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flow-field. *J. Fluid Mech.* 140:223-256.
- Mooser, F. 1972. El eje Neovolcánico Mexicano, debilidad cortical pre-Paleozóica reactivada en el Terciario. *Memoria de la II Convención Nacional de la Sociedad Geológica Mexicana*, Mazatlán, Sinaloa, p.186-187.
- Moran, Z.D. 1985. *Geología de la república mexicana*. Publicado por el Ints. Nal. de Geol. y Est. y la Fac. de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, p. 55-57.
- Pierson, T.C., R. Janda, J.C. Thouret, y C. Borrero. 1992. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition lahars. *J. of Volcanology and Geothermal Research*, No. 2.
- Robin, C. 1984. Le Volcan Popocatepetl (Mexique): structure, evolution pétrologique et risques. *Bull Volcanol.* 47-1:1-23
- Savage, S.B y M. Sayed. 1984. Stresses developed by dry cohesionless granular materials sheared in an annular shear cell. *J. Fluid Mechanics* 142:391-430.
- Takahashi, T. 1978 Mechanical characteristics of debris flows. *ASCE Journal of Hydraulic Division* 104:1153-1169.
- Takahashi, T. 1981 Estimation of potential debris flows and their hazardous zones; soft countermeasures for a disaster. *Journal of Natural Disaster Science* 3(1):57-89.
- Terzaghi, K. 1956. *Theoretical soil mechanics*. USA:John Wiley and Sons.

Abstract

García, J.A. & M.V. Esteller. "Modelling of lahares resulting from the eruption of Popocatepetl volcano". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol XIII. Num. 2, pages 57-65. May-August, 1998.

A hydraulic model based on the kinetic theory for granular flow is developed to calculate the hydrodynamic characteristics of lahars that may be formed by a possible eruption of the Popocatepetl volcano, in Mexico, and the melting of the polar snow cap. The model is capable of reproducing the mixture flow rates, mean velocities, flow depths and mean solid concentrations in several reaches of the gorges most likely to form lahars, beginning at the volcano's summit. The gorges were selected based on geological and topographical conditions. Depositional areas of lahars were predicted considering the lahar's hydraulics and the gorges' topographical characteristics. Risk areas are located within a 30 km radius of the volcano's summit.

Key words: Lahars, Popocatepetl, eruption, inertial regime, melting snow, sediment transport, deposition, reach.

Dirección institucional de autores:

Juan Antonio García, María Vicenta Esteller

Universidad Autónoma del Estado de México, CIRA-FI-UAEM
Cerro de Coatepec, CU, Toluca Estado de México
Teléfono: (729) 65550 y 65551
Email: jgarcia@coatepec.uaemex.mx