

POSIBLE FLUJO DE LODO EN EL COSTADO ORIENTE DEL VOLCAN POPOCATEPETL

F. García¹, E. Ramos¹ y R. Domínguez^{1,2}

1. INTRODUCCION

A partir de las explosiones ocurridas el 21 de diciembre de 1994 en el volcán Popocatépetl, y con la consecuente emisión de cenizas, se determinó que con los volúmenes acumulados en las laderas y barrancas del volcán, sobre todo en la parte oriental debido al sentido del viento dominante, podrían verse afectadas algunas poblaciones por el arrastre de lodo con ceniza provocado por las lluvias. Por ello, en este estudio se pretende determinar el desplazamiento que tendría el lodo para una lluvia de características extraordinarias, así como la posibilidad de que este flujo pudiera afectar algún poblado cercano

El estudio consistió en hacer primeramente un reconocimiento del lugar para determinar los espesores de ceniza registrados hasta marzo del presente año, así como tomar muestras de material reciente y viejo para ser analizadas en laboratorio. Después se consideró que podría ocurrir una lluvia de características extraordinarias, con un período de retorno de 50 años, para simular el movimiento del flujo de lodo mediante fórmulas clásicas de hidráulica y determinar si este material podría afectar algún poblado. Finalmente se obtuvieron algunas conclusiones a partir de los resultados.

2. RECOPIACION DE INFORMACION

a).- Topografía

Se utilizó la cartografía topográfica de INEGI a escala 1:50,000 para la zona del volcán y sus alrededores, la cual quedó comprendida en 4 cartas, que tuvieron que unirse para formar un solo mosaico. Del plano se determinó que uno de los poblados más cercanos a la zona de mayor acumulación de ceniza es San Pedro Benito Juárez, por el que pasa la barranca " El Aguardientero ". Con los valores de las curvas de nivel se trazó el perfil de esta barranca (ver la figura 2.1), para determinar la longitud y pendiente de la misma, como lo muestra la tabla 2.1. En el estudio se considera que de los 5,300 a los 4,000 msnm el arrastre es por la ladera y de los 4,000 hasta los 2,350 msnm, a la altura del pueblo de San Pedro Benito Juárez, el arrastre es por el cauce.

¹ Centro Nacional de Prevención de Desastres. Delfín Madrigal No. 665, Pedregal Santo Domingo, C.U., Coyoacán, 04360, D.F

² Instituto de Ingeniería-UNAM. Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, D.F.

TABLA No. 2.1. PENDIENTES EN LA BARRANCA "EL AGUARDIENTERO"

ELEVACIÓN (msnm)	DIST. HORIZ. (m)	LONG. INCLIN. (m)	PENDIENTE S (Adimen.)
4600	150	180	0.6667
4500	170	197	0.5882
4400	170	197	0.5882
4300	190	215	0.5263
4200	200	224	0.5000
4100	200	224	0.5000
4000	300	316	0.3333
3900	320	335	0.3125
3800	160	189	0.6250
3700	300	316	0.3333
3600	340	354	0.2941
3500	370	383	0.2702
3400	340	354	0.2941
3300	280	297	0.3570
3200	500	510	0.2000
3100	560	569	0.1786
3000	500	510	0.2000
2900	650	658	0.1538
2800	680	687	0.1471
2700	700	707	0.1428
2600	900	906	0.1111
2500	1250	1254	0.0800
2400	1340	1344	0.0746
2300	1650	1653	0.0606

b).- Hidrología

Las estaciones climatológicas cercanas al volcán que cuentan con información, son:

* E.C. Antena Repetidora

* E.C. San Pedro Nexapa

Para un período de retorno de 50 años, los datos de lluvia regionales obtenidos del estudio "Análisis de la capacidad del Río de La Compañía" elaborado por el área de Riesgos Hidrometeorológicos del CENAPRED, 1994, son de 87.9 mm y 91.5 mm respectivamente, lo cual da una media aproximada de 90 mm.

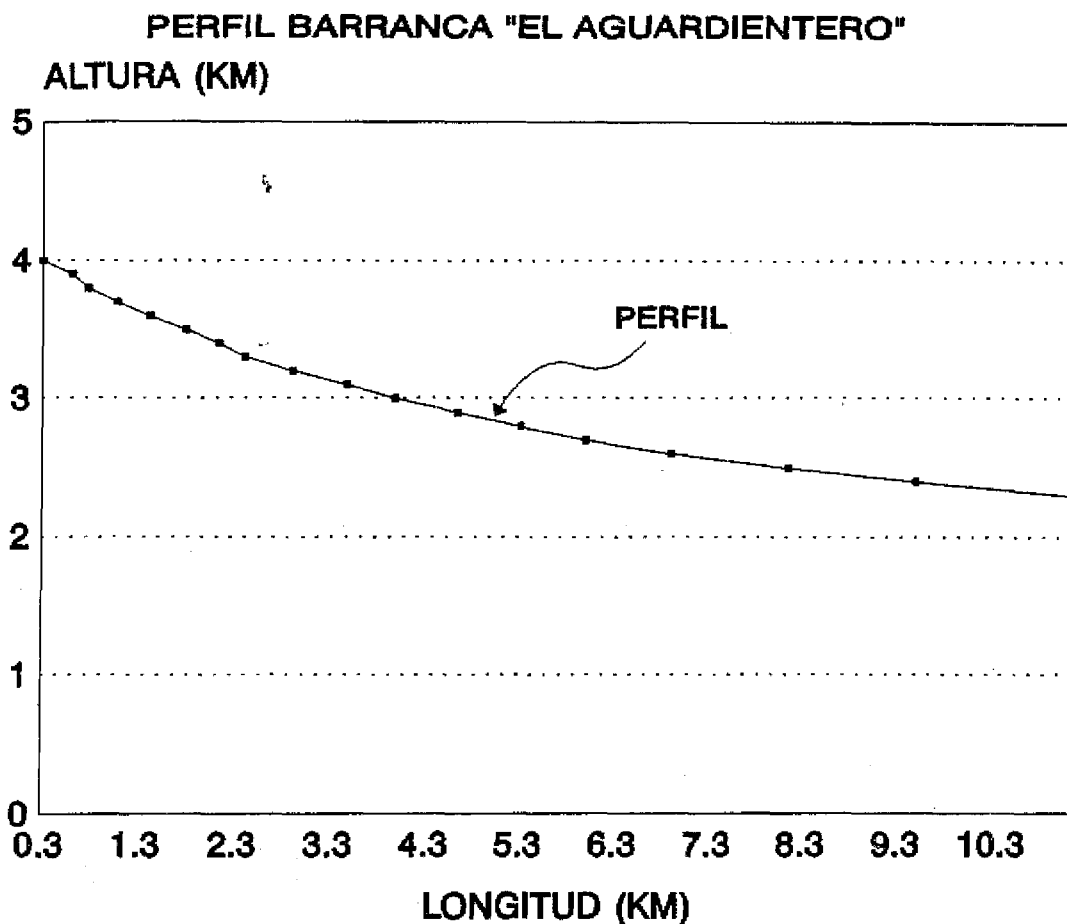


Figura 2.1. Perfil de la barranca "El Aguardintero".

3. VISITAS AL VOLCAN

Se hicieron varios recorridos tanto en helicóptero como en camioneta al volcán Popocatepetl para determinar los espesores de ceniza, así como la forma de las barrancas, tipo de vegetación, extensión de la población, etc. (ver las fotografías anexas).

Al visitar el lugar se determinó que los espesores fluctúan de 1 a 20 mm entre los 4,000 y los 5,300 msnm aproximadamente. Esto se puede corroborar en el mapa de isopacas elaborado por Martín del Pozzo, et al, 1995 (ver la figura 3.1), de donde se tomaron los valores promedio de la capa de ceniza, cerca del labio inferior y a los 4,000 msnm.

De la visita al campo se observó que la sección típica de la barranca en la elevación 3,000 msnm es aproximadamente trapecial, como se muestra en la figura 3.2, y que a los 2,350 msnm, donde se encuentra el pueblo de San Pedro Benito Juárez, es como se muestra en la figura 3.3. Como dato importante se señala que en este poblado no hay construcciones dentro de la barranca.

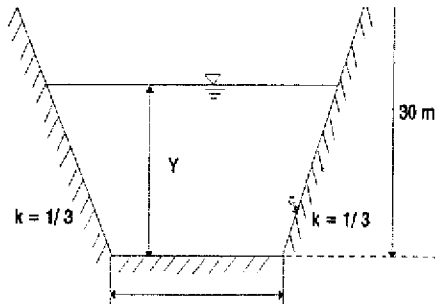


Figura 3.2. Sección de la Barranca "El Aguardintero" a la elevación 3,000 msnm.

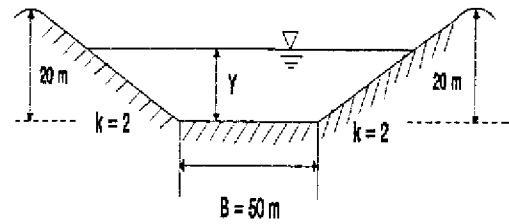


Figura 3.3. Sección de la barranca "El Aguardintero" a la elevación 2,350 msnm.

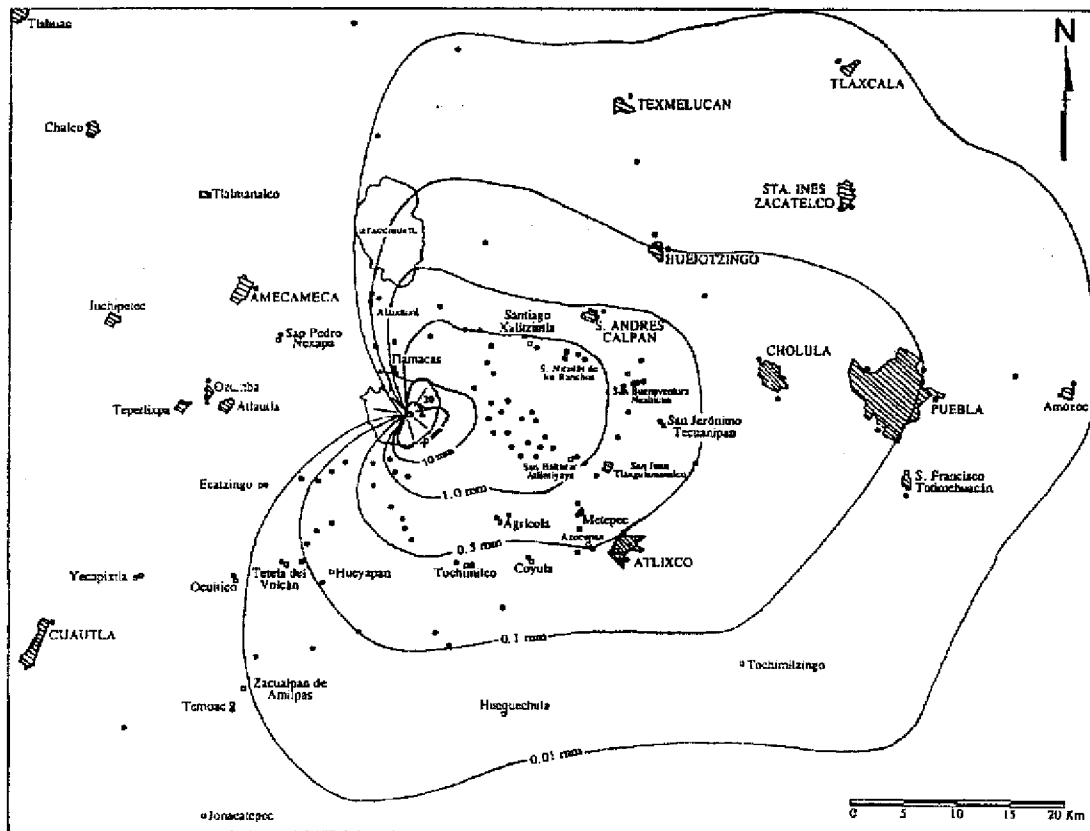


Figura 3.1. Mapa de isópacas donde se muestra la distribución de cenizas y los principales poblados (tomado de Martín Del Pozzo, et al, 1995)

Se tomaron muestras de ceniza tanto nueva como vieja para ser analizadas en laboratorio y determinar su peso específico, distribución granulométrica, diámetro medio de las partículas y velocidad de caída

4. ANALISIS DE LA CENIZA EN LABORATORIO

A medida que la ceniza se aleja del cráter al ser expulsada por éste, el tamaño de las partículas disminuye, de tal forma que a elevaciones menores de los 3,500 msnm prácticamente es como talco. A finales de febrero de 1995 se llevó a cabo un recorrido por la parte oriental del cráter, tomando muestras de ceniza a elevaciones entre los 4,900 y 5,000 msnm tanto de capas nuevas como viejas. En la tabla 4.1 se muestran los resultados del análisis de laboratorio.

TABLA No. 4.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL LABORATORIO

CENIZA Parte sur-oriental Elev. 4900-5000 msnm	Diámetro medio de las partículas, D_{50} (mm)	Peso Específico del material sólido (Adimensional)
NUEVA	0.16	2.71
VIEJA	0.20	2.66

En la tabla anterior, aparece que la ceniza nueva tiene mayor peso específico que la vieja, y esto se debe que al medir volúmenes iguales, resulta que la ceniza nueva al ser de menor diámetro en sus granos deja menores intersticios, redundando en un peso específico mayor y dando por tanto el valor de 2.71

A fines de marzo, se llevó a cabo otra visita por todo el trayecto de la barranca "El Aguardientero" tomando muestras de ceniza nueva (acumulada de diciembre a esta fecha) y vieja (depositada en eventos anteriores a diciembre de 1994), a una elevación de 3,100 msnm. Se encontró que la ceniza vieja es más gruesa y de coloración oscura, mientras que la nueva es más fina y clara, como talco. A estos materiales se les efectuaron pruebas de velocidad de sedimentación, colocándolos en una probeta con una columna de agua de 12 cm, en la que se observó que la ceniza vieja tenía una velocidad muy alta, ya que se depositó en el fondo rápidamente, mientras que la ceniza nueva prácticamente quedó en suspensión, cabe señalar que a este material no se le efectuaron pruebas de granulometría por lo que no se tiene una tabla como la 4.1 que corresponde a las muestras de febrero de 1995.

5. PROCESO MATEMATICO

Al formarse un flujo de lodo con la ceniza por la acción del agua de lluvia, una parte de dicha ceniza viajará en el fondo del cauce y otra se transportará en suspensión. Por ello, el análisis se realizó de la manera siguiente:

a).- Ceniza transportada en el fondo del cauce

Esta ceniza es la de mayor tamaño y por tanto la que tendría mayor problema si llegara a ocurrir una lluvia de características extraordinarias, ya que tiende a depositarse en algún lugar intermedio del recorrido formando represas, por lo que su análisis se hará en forma detallada considerando las fórmulas de arrastre de sólidos que se encuentran en la literatura. Debe tenerse en cuenta que dichas fórmulas no están diseñadas para fenómenos como el de interés pero servirán como un estimador de los volúmenes de sólidos que se podrían esperar.

b).- Ceniza transportada en suspensión

La ceniza más fina tiene menos efecto en una posible inundación de lodo, ya que viajará en suspensión junto con el agua de lluvia, hasta llegar a una zona plana o de baja pendiente, donde con el tiempo tenderá a depositarse formando nuevas capas de sedimento. De acuerdo con lo observado en campo, esto último no tendrá consecuencias

graves para la población anteriormente apuntada, por lo que no se consideró necesario efectuar el análisis para esta ceniza fina.

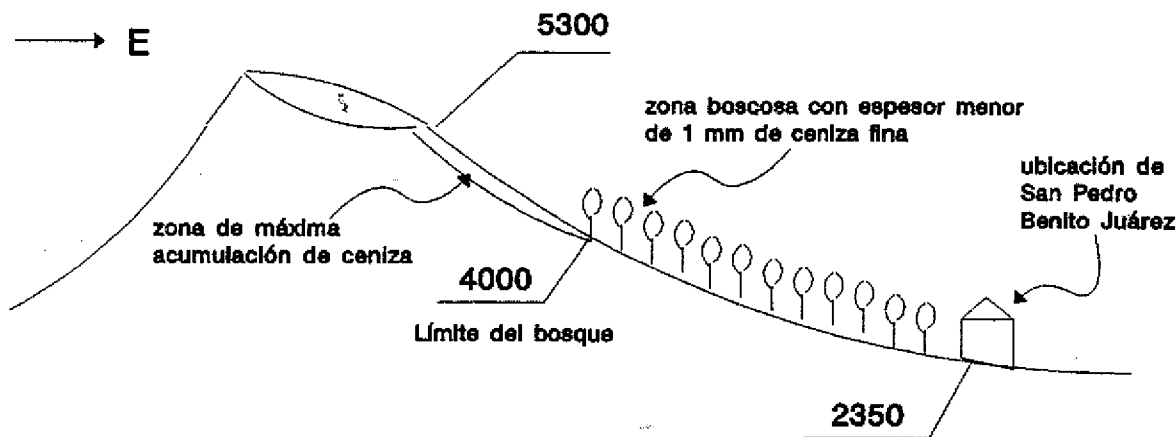


Figura 5.1. Esquema para el análisis del arrastre de material sólido por etapas.

c).- Arrastre de la ceniza gruesa

El estudio de la ceniza gruesa, con diámetro medio igual a 0.18 mm, se hará en dos partes; el flujo sobre la ladera (entre los 5,300 y 4,000 msnm) y el flujo en el cauce, sobre la barranca "El Aguardientero" (entre los 4,000 y 2,350 msnm) donde se tiene una zona boscosa y los coeficientes de rugosidad serán por consiguiente muy grandes (ver la figura 5.1).

i) .- Flujo en ladera

De acuerdo con el plano topográfico, se tiene un área aproximada de aportación de la ladera a la barranca de 2,000,000 m². Si se supone una capa promedio de ceniza gruesa de 5 mm, el volumen de ceniza acumulada resulta:

$$\text{Vol. ceniza} = 2,000,000 (0.005) = 10,000 \text{ m}^3$$

Si se considera una lluvia extraordinaria de 90 mm, con una duración de 1 hora, el volumen de lluvia que se acumula en la ladera es igual a:

$$\text{Vol. lluvia} = 2,000,000 (0.09) = 180,000 \text{ m}^3$$

Al tipo de terreno de la ladera del volcán le corresponde un coeficiente de escurrimiento de 0.20, (valor obtenido del Manual de Hidráulica Urbana de la DGCOH, 1986) para un suelo arenoso escarpado con pendientes mayores de 0.07. Por tanto, el volumen de escurrimiento directo es igual a:

$$\text{Vol. esc. dir.} = 180,000 (0.20) = 36,000 \text{ m}^3$$

Para el análisis del material sólido que se arrastra en el fondo se utilizó la fórmula de Engelund-Hansen¹, la cual ofrece una mejor representación del transporte de sedimento sobre laderas:

$$q_s = \frac{0.05 C^{1/3}}{(D_r - 1)^2 \sqrt{g} D_{50}} q_l^{5/3} S^{5/3} \dots\dots\dots 1$$

donde:

- q_s gasto sólido total unitario, en $m^3/seg-m$.
- D_{50} diámetro medio geométrico de las partículas, en m.
- g aceleración de la gravedad
- D_r densidad específica relativa del material; es adimensional y toma un valor aproximado de 2.65
- q_l gasto líquido unitario, $m^3/seg-m$.
- C coeficiente de Chezy, en $m^{1/2}/seg$.
- S pendiente de la ladera, adimensional

Esta fórmula está hecha para una ladera de ancho unitario, por lo que ésta se seccionó en 800 partes, todas de 1 m de ancho. Así, el volumen de escurrimiento directo para cada una de las laderas unitarias será de:

$$Vol. \text{ esc. dir.} = 36,000 / 800 = 45 \text{ m}^3.$$

Para calcular el gasto líquido que interviene en la fórmula de arrastre de material sólido, se supone un hidrograma de gasto constante, como el mostrado en la figura 5.2.

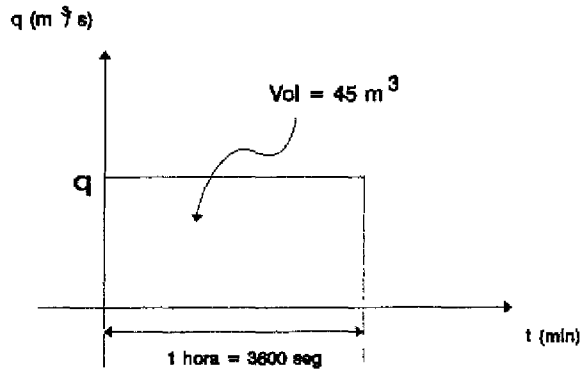


Figura 5.2. Hidrograma ocasionado por la lluvia.

El gasto líquido se obtiene como; $q = vol / t = 45 / 3600 = 0.0125 \text{ m}^3/s$

Además se tiene que:

- $n = 0.06$
- $S = 0.55$
- $D_r = 2.65$
- $D_{50} = 0.00018 \text{ m}$
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

como la ladera es de ancho unitario se tomó la sección transversal en forma de rectángulo; así el valor "C" de Chezy resulta:

$$C = y^{1/6} / n, \text{ donde } y = (q n / S^{1/2})^{3/5} = 0.016 \text{ m, por tanto. } C = (0.016)^{1/6} / 0.06 = 8.37$$

Al sustituir en la fórmula de Engelund-Hansen se obtiene:

$$q_s = 0.0164 \text{ m}^3/\text{s}$$

Si la lluvia dura 1 hora, el volumen de ceniza arrastrado en una ladera de ancho unitario es de:

$$\text{Vol.}^i_k = 0.0164 \text{ m}^3/\text{s} (3600 \text{ s}) = 59.04 \text{ m}^3$$

y el volumen de ceniza arrastrado en toda la ladera será.

$$\text{Vol total de ceniza arrastrada} = 59.04 (800) = 47,232 \text{ m}^3$$

Observando lo anterior, se deduce que el volumen de ceniza arrastrada es mayor al volumen de ceniza depositada, lo que implica que todo el volumen depositado ($10,000 \text{ m}^3$) será arrastrado hasta el inicio de la barranca "El Aguardientero".

ii).- Flujo en cauce

Entre los 4,000 y los 2,350 msnm, el flujo será en un cauce, con la sección típica de la barranca que se muestra en la figura 5.3.

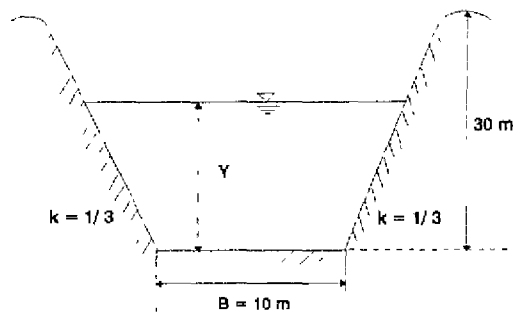


Figura 5.3 Sección típica de la Barranca "El Aguardientero"

Además debido a la vegetación abundante en la barranca (ver las fotografías anexas), se estimó un coeficiente de rugosidad $n = 0.07$ (valor obtenido de los apuntes de Hidráulica II, Sotelo G., Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.).

Como se mencionó antes, dentro de la barranca no se tiene acumulación importante de ceniza, ya que el grueso de las capas medidas no rebasan 1 mm, por lo que sólo se tomará en consideración la ceniza que aporta la ladera, es decir, $10,000 \text{ m}^3$.

El análisis del flujo de agua sobre la barranca se hará por tramos cortos, para determinar el volumen depositado en cada tramo.

El gasto líquido que entrará en cada sección del cauce por la acción de la lluvia es aproximadamente de $q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}$. Este valor se obtiene de multiplicar el área de captación de la sección de la barranca por la lámina de lluvia, y de suponer un coeficiente de escurrimiento de 0.30 (para suelos areno-arcillosos escarpados). Por otra parte, el gasto líquido que llega a la primera sección de la barranca por la aportación de la ladera es de $10 \text{ m}^3/\text{s}$

Para determinar el arrastre de material sólido en el fondo del cauce, se utiliza la fórmula de Engelund²,

$$q_{BT} = \frac{0.05 V^2 \gamma (RS)^{3/2}}{\sqrt{g} (\gamma_s - \gamma)^2 D_{50}} \dots$$

donde:

q_{BT} gasto sólido, en m^3/s .

V velocidad del flujo, en m/s , que se obtiene de las fórmulas típicas de la hidráulica para canales trapeciales, en función del gasto, pendiente, rugosidad y sección de la barranca, suponiendo flujo establecido.

γ peso específico del agua, equivale a $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$.

γ_s peso específico del material sólido, equivale a $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$.

R radio hidráulico, en m.

S pendiente del cauce, adimensional.

D_{50} diámetro medio de las partículas, equivale a 0.00018 m .

Con estos valores se obtuvo la tabla 5.1, donde se muestra el número de secciones en que se separó el cauce para su análisis. Además se presentan los valores obtenidos para la pendiente de cada sección, el gasto líquido, el radio hidráulico y el tirante normal para flujo establecido, obtenido con la fórmula de Manning. También se indica la velocidad del flujo, el gasto sólido obtenido con la fórmula de Engelund, el volumen del material sólido que pasa por una sección de la barranca, así como el material sólido retenido, para finalmente hacer un análisis de los valores obtenidos.

La tabla 5.1 muestra en la penúltima columna el volumen de material sólido que fue arrastrado hasta el final de cada sección una vez terminada la lluvia. Estos valores se obtuvieron al multiplicar el gasto sólido q_{BT} por 3600 seg, que es el tiempo que dura la lluvia. En la misma tabla, la última columna indica el material sólido retenido en cada tramo y se obtiene al restar el volumen sólido que entra en la sección menos el volumen sólido arrastrado al final. Si esta operación da un valor negativo, indica que no se retiene material y por consiguiente todo el que llega es arrastrado hasta el final del tramo. Por ej. en el primer tramo llegan 10.000 m^3 de material sólido que aporta la ladera y salen $51\,622 \text{ m}^3$, de tal forma que el material retenido es igual a $9,948\,378 \text{ m}^3$

Algunas consideraciones que se hicieron en las dos primeras secciones de la barranca fueron: en la primera sección disminuye la rugosidad a $n = 0.03$ debido a la acumulación de ceniza, la cual tapa en gran parte la vegetación, y el aumento de la pendiente natural a 0.65. En la segunda sección por los mismos motivos se tiene que $n = 0.04$ y $S = 0.64$. En las secciones siguientes, se considera que no tendrá efecto importante el arrastre de la ceniza, por lo que conservan sus características originales de rugosidad y pendiente.

TABLA No. 5.1. RESULTADOS DEL MATERIAL SÓLIDO ARRASTRADO EN EL CAUCE, ASÍ COMO DEL RETENIDO

ELEV. msnm	LONG. (m)	S	q_b (m ³ /s)	R	Y_n (m)	V (m/s)	q_{br} (m ³ /s)	Vol. sol. (m ³)	Vol. sol. Ret. (m ³)
3900	316	0.6500	10.2	0.0921	0.0930	5.4820	0.01434	51.622	9948.378
3800	335	0.6400	10.4	0.1112	0.1123	4.6235	0.01322	47.596	4.0265
3700	189	0.6250	10.6	0.1549	0.1589	3.3352	0.01092	39.301	8.295
3600	316	0.3333	10.8	0.1880	0.1939	2.7852	0.00396	14.249	25.052
3500	354	0.2941	11.0	0.1970	0.2035	2.7031	0.00332	11.950	2.299
3400	383	0.2702	11.2	0.1882	0.1941	2.8849	0.00311	11.193	0.7569
3300	354	0.2941	11.4	0.2248	0.2332	2.4445	0.00331	11.909	0
3200	297	0.3570	11.6	0.2345	0.2437	2.3720	0.00447	16.093	0
3100	510	0.2000	11.8	0.2293	0.2380	2.4787	0.00197	7.075	4.1187
3000	569	0.1786	12.0	0.2496	0.2600	2.3078	0.00163	5.879	1.1958
2900	510	0.2000	12.2	0.2552	0.2661	2.2926	0.00197	7.108	0
2800	658	0.1538	12.4	0.2598	0.2710	2.2874	0.00136	4.901	0.9779
2700	687	0.1471	12.6	0.2817	0.2949	2.1363	0.00125	4.514	0.3865
2600	707	0.1428	12.8	0.3120	0.3242	1.9501	0.00116	4.193	0.3210
2500	906	0.1111	13.0	0.3210	0.3342	1.9221	0.00081	2.918	1.2754
2400	1254	0.0800	13.2	0.3433	0.3630	1.8182	0.00049	1.765	1.1529

6. ANALISIS DE RESULTADOS

Del análisis del arrastre de ceniza en la ladera se determinó que todo el volumen de ceniza acumulado será arrastrado hacia la barranca, para una lluvia con las características similares a las tomadas en cuenta aquí; esto se debe a la gran pendiente en la ladera.

Una vez hecho el estudio del arrastre de la ceniza en el cauce, se encontró que la mayor parte de ella quedará retenida en la primera sección del cauce (a una elevación entre los 4,000 y 3,900 msnm), como se puede ver en la tabla anterior. El volumen retenido en ese tramo será de 9,948 m³, que es prácticamente el que se arrastró en la ladera y que se calculó previamente como 10,000 m³. Después, este material se irá depositando paulatinamente aguas abajo, hasta llegar a la población únicamente un volumen de ceniza de 1.765 m³, que para cuestiones prácticas se considera despreciable.

7. CONCLUSIONES

Como conclusión del estudio se puede decir que:

- * El volumen de ceniza que se ha acumulado en las laderas del volcán Popocatepetl a causa de la actividad posterior al 21 de diciembre de 1994, al ser arrastrado en forma de lodo por la acción de la lluvia, no causará problema a la población de San Pedro Benito Juárez, debido a la abundante vegetación que se encuentra a lo largo de la barranca "El Aguardientero", que servirá para retener la mayor cantidad de ceniza.

- * Se estudió únicamente la barranca " El Aguardintero", por que representa las condiciones más desfavorables para el arrastre de lodo, debido a que:
 - Es la que tiene mayor volumen de ceniza de aportación
 - Es la que pasa por el poblado más cercano al volcán en la parte sur-oriente.
- * Como las demás barrancas son de características similares a la de "El Aguardintero" y pasan por poblados más alejados que San Pedro Benito Juárez, se puede establecer que tampoco tendrán problemas de posibles flujos de lodo.
- * Las casas que han invadido el cauce de las barrancas tendrán problemas de inundación, no por la ceniza, sino por las corrientes naturales de agua que han ocurrido en ellas durante muchos años.

Como observación del presente trabajo, se menciona que debido a la poca cantidad de ceniza caída en esta zona del volcán, no fue suficiente como para formar un flujo de lodo; sin embargo, se debe considerar que si el fenómeno se prolonga durante algunos años o si llegara a ocurrir la caída de ceniza en cantidades considerables del orden de 5 o más cm durante un lapso de tiempo corto, entonces seguramente sí daría lugar a la formación de un lahar o flujo de lodo que pudiera dañar a algunas poblaciones ubicadas en algunos de los cauces naturales. Por tanto, es recomendable seguir observando y midiendo el fenómeno a fin de poder efectuar un cálculo similar al presente para cualquier trayectoria particular en la periferia del edificio volcánico

8. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Martín Jiménez y Adolfo Contreras del área de Riesgos Hidrometeorológicos del CENAPRED, su valioso apoyo en el trabajo de campo, así como también a los Sres. Marcos Galicia, Lauro Ponce y Francisco Galicia, de Protección Civil de Amecameca, Méx., por el muestreo efectuado en el costado oriental del cráter, sobre el volcán Popocatepetl. De la misma manera, agradecemos los comentarios y revisión efectuadas por los Doctores Roberto Meli, Mario Ordaz, Jesús Gracia y Servando De la Cruz-R