

Ajuste del método Lahar-Z en el sector del volcán Nevado del Huila, con base en los flujos de escombros de 1994 y 2007

SETTING THE METHOD LAHAR-Z IN THE FIELD OF VOLCANO NEVADO DEL HUILA, BASED ON DEBRIS FLOWS IN 1994 AND 2007

CARLOS **Cardona**
BERNARDO **Pulgarín**
ADRIANA **Agudelo**
MARTA **Calvache**
MILTON **Ordóñez**
ÓSCAR **Manzo**¹

RESUMEN

En la zona de influencia del volcán Nevado del Huila, más específicamente en la cuenca del río Páez, han ocurrido flujos de escombros en periodos recientes, como los ocurridos en 1994 (de origen sismotectónico) y en 2007 (de origen volcánico, como consecuencia de la actividad eruptiva y su interacción con la masa glaciaria). Este hecho revela la recurrencia de estos eventos y, por tanto, la susceptibilidad que la cuenca del río Páez posee para la generación de este tipo de fenómenos, impactando enormemente a los pobladores asentados en su zona de influencia, con pérdidas de vidas humanas y daños a la infraestructura y al ecosistema. Con base en las evidencias dejadas por los flujos de escombros ocurridos en 1994 y 2007, fueron recolectados datos geológicos y topográficos directamente en campo con el fin de modelar el comportamiento de los flujos a lo largo de la cuenca del río Páez, siguiendo la metodología Lahar-Z propuesta por Iverson y otros (1998). Los resultados muestran que los valores obtenidos sobreestiman las áreas transversales de inundación y subestiman los volúmenes involucrados al ser comparados con los valores reales respectivos obtenidos de los levantamientos de campo.

Palabras clave

Flujos de escombros, método Lahar-Z, ajuste, modelamiento, área transversal de inundación.

ABSTRACT

In the catchment area of the volcano Nevado del Huila, more specifically in the Paez River basin, debris flows have occurred in recent periods, as occurred in 1994 (source seismotectonic) and 2007 (of volcanic origin). Based on the evidence left by debris flows occurred in 1994 and 2007, were collected geologic and topographic data directly in the field to model the behavior of flows along the Paez River basin, following the methodology Lahar -Z proposed by Iverson and others (1998). The results show that the obtained values overestimate the cross-sectional areas of flooding and underestimate the volumes involved when compared with the respective actual values obtained from field surveys. We conclude that the formula obtained has a better correlation between theoretical data and measurements in the field.

Key words

Debris flows, Lahar-Z method, setting, modeling, cross-sectional area of flooding.

Artículo recibido el 29 de agosto del 2009. Aprobado el 16 de diciembre del 2009.

1 Servicio Geológico Colombiano, bpulgarin@sgc.gov.co, aagudelo@sgc.gov.co, omanzo@sgc.gov.co, mcalvache@sgc.gov.co, mordonez@sgc.gov.co

Introducción

Dada la necesidad existente de realizar una aproximación teórica de las eventuales alturas de futuros flujos de escombros en la cuenca del río Páez y en respuesta a la necesidad de la comunidad afectada por estos fenómenos de conocer sobre sus posibles efectos, se realizó un modelamiento de flujos en dicha cuenca a partir del método Lahar-Z, el cual permite calcular alturas de llenado alcanzadas por un volumen hipotético de un flujo a través de una cuenca hidrográfica, a partir de una serie de datos topográficos y modelos de elevación del terreno. Se contó con la colaboración del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por su sigla en inglés) en el desarrollo de las simulaciones, tomando como base de datos los registros que existen sobre la cuenca del río Páez acerca de los flujos de escombros generados por el sismo ocurrido el 6 de junio de 1994 (Ingeominas, 1994) (figura 1) y los flujos generados por las erupciones del volcán Nevado del

Huila en febrero 18 y abril 19 de 2007, descritos en Ingeominas (2007 a y b) y Cardona y otros (2007a) (figura 2). Se escogieron 16 secciones transversales a lo largo de la cuenca, las cuales fueron tomadas como referencia para el escalamiento del método. Inicialmente, el método original de Lahar-Z revela alturas de llenado para la cuenca de 41 a 117 metros para los volúmenes modelados, en comparación con el dato de altura máxima de inundación (20 m) dejada por el flujo del 18 de abril de 2007 (Cardona 2007b). Por este motivo se plantea un escalamiento del método, donde se consideran los datos reales de campo (volumen, alturas alcanzadas y secciones transversales) de los flujos ocurridos sobre la cuenca, con el fin de recalcularse la fórmula utilizada en el Lahar-Z, ajustando el comportamiento de la curva del método, con los datos levantados en campo de los flujos de escombros ocurridos con anterioridad en la cuenca del río Páez.



► Figura 1. Depósito del flujo de escombros ocurrido en la cuenca del río Páez en el 1994 en la población de Belalcázar.



► Figura 2. Depósito del flujo de escombros ocurrido en la cuenca del río Páez en el 2007 en la población de Belalcázar.

Marco teórico

Principios del método Lahar-Z

Lahar-Z es un conjunto de programas de computador basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) diseñado por Iverson et ál. (1998) del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), con el fin de delinear zonas de amenaza por flujos de escombros

en regiones volcánicas de una manera rápida, objetiva y reproducible con respecto a otros tipos de modelamientos de estos eventos. Iverson et ál. (1998) afianzaron este método a partir del escalamiento, la calibración y el tratamiento estadístico de datos (trayectorias, espesores, áreas, volúmenes, formas geométricas, etc.) de cerca de 30 flujos de escombros (lahares o flujos de escombros volcánicos) de gran

magnitud que han ocurrido en 9 volcanes del mundo, además del apoyo con más de 30 experimentos hidráulicos de canal en el laboratorio. El método se ejecuta de modo digital (programa Lahar-Z) en un sistema de información geográfico, utilizando uno de los módulos del Arc/INFO (Schilling, 1998). El mapa que se obtiene mediante este método es un contorno de inundación del flujo, producto de una simulación del comportamiento de un determinado volumen de flujo de escombros a través del valle de un río. En general, las investigaciones realizadas por Iverson et ál. (1998) dieron como resultado dos ecuaciones semiempíricas que relacionan el volumen (V) de un flujo dado con su respectiva área transversal de inundación (A) en un valle y también con su respectiva área longitudinal o área planimétrica de inundación (B). Las ecuaciones de tipo semiempírico, que encontraron estos investigadores para el método, son:

$$A = 0,05 * V^{2/3}$$

$$B = 200 * V^{2/3}$$

El área A es igual para todas las secciones transversales topográficas que se calculen en el valle y su

máxima altura con respecto al fondo del valle es el espesor de la inundación o flujo, delimita los límites laterales y superior de la inundación. El área B representa el área teórica en planta que alcanzará la inundación formada por el flujo a todo lo largo del valle e indica el límite longitudinal de la inundación.

Metodología propuesta para el escalamiento de lahar-Z a la cuenca del río Páez

Se seleccionaron 16 puntos (o secciones transversales) en la cuenca del río, donde se tenían datos de las alturas de las áreas mojadas para los flujos ocurridos en la cuenca en los años de 1994 y 2007. En estos puntos, después de la ocurrencia de los flujos, Ingeominas realizó labores de campo. Se tomaron alturas de área mojada, alturas de depósito, desniveles y tipo de material. La tabla 1 presenta las alturas de los puntos que se eligieron para el modelamiento, y en ellos se encuentran los siguientes sitios y poblaciones: Irlanda, Plan de Caloto, Tóez, Cohetandiyó, Mesa de Tálaga, Tálaga, Avirama, Guaduales (Belalcázar), Parque (Belalcázar), Normal (Belalcázar), Coquiyo, Cohetando, Guadualejo, Mesa de Cohetando, Ricaurte, Nátaga (figura 3).

Tabla 1. Alturas de los flujos de escombros ocurridos en 1994 y 2007, en las 16 secciones transversales seleccionadas

N.º	Sitio modelamiento	Distancia (m)	Altura (m)	
			1994	2007
1	Irlanda	23	19	7
2	Plan de Caloto	24	25	8
3	Tóez	28	25	14
4	Cohetandiyó	33	30	13
5	Mesa de Tálaga	39	25	9
6	Tálaga	39	20	9
7	Avirama	46	24	6
8	Guaduales (Belalcázar)	47.5	21	5
9	Parque (Belalcázar)	48	20	10
10	Normal (Belalcázar)	48.5	19	4
11	Coquiyo	51.5	28	9
12	Cohetando	56	20	10
13	Guadualejo	58	15	8
14	Mesa de Cohetando	63	25	10
15	Ricaurte	65	15	8
16	Nátaga	90	6	5

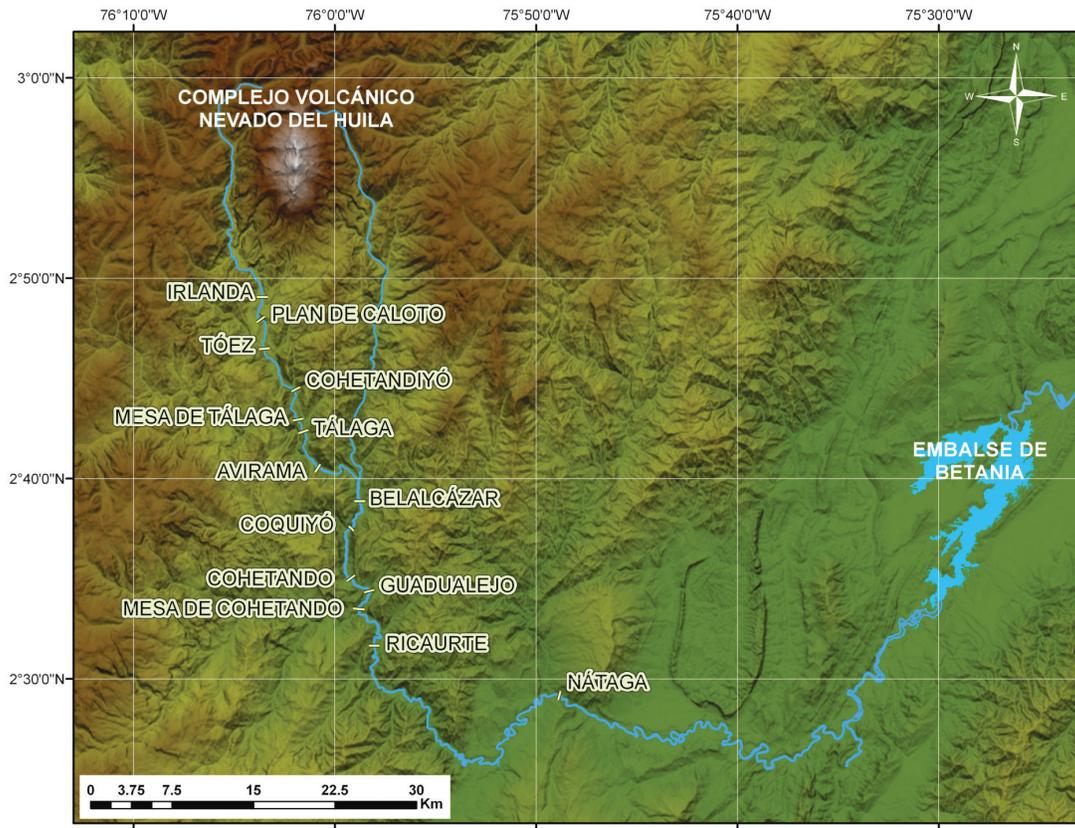


Figura 3. Localización de las secciones transversales seleccionadas en la cuenca del río Páez, zona de influencia del volcán Nevado del Huila.

Cálculo de áreas transversales

Con las alturas de los flujos en cada uno de los sitios, y con base en las secciones transversales a escala, se realizan los llenados de cada una de las secciones para determinar con certeza cuál ha sido el área mojada de la sección transversal inundada. En la figura 4 se toma como sección tipo el casco urbano de la

población de Belalcázar, llenando la sección a 10 m (altura del flujo de 2007) y 20 m (altura del flujo de 1994), dando una área total en las secciones transversales de 750 m² y 2474 m², respectivamente. Lo anterior se realiza en cada una de las secciones transversales de los sitios seleccionados.

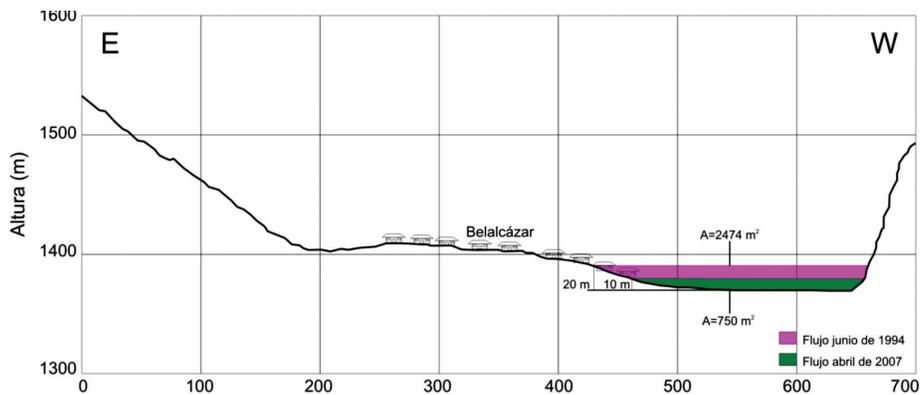


Figura 4. Sección transversal de Belalcázar, en la cual se muestran los llenados del valle del río Páez, con alturas de 10 m (flujo de 2007) y 20 m (flujo de 1994) para el cálculo de sus respectivas áreas transversales de inundación.

Cálculo del volumen

Calderón et ál. (1997) reportan que el material involucrado en el flujo de 1994 fue alrededor de 320 millones de m³ y que el elemento disparador del flujo de escombros fue un sismo de magnitud 6,4, localizado en la parte sur del edificio volcánico del Nevado del Huila, el cual desencadenó cerca de 3.000 deslizamientos superficiales en cercanías al área epicentral, cuyo material removido fluyó aguas abajo sobre el cauce del río Páez. Para el flujo de escombros (lahar) de abril de 2007, se realizaron dos aproximaciones para el cálculo del volumen involucrado:

1. Después de la ocurrencia del flujo de abril de 2007 se realizaron levantamientos geológicos y topográficos en la cuenca del río Páez, en los cuales se levantaron las secciones transversales reales y las alturas dejadas por los flujos de 1994 y de abril de 2007. Se realizó el cálculo de las respectivas áreas mojadas de dichos flujos, obteniendo que el área transversal de 2007 es 3,3 veces menor que la dejada por el flujo de 1994. Por tanto:

$$At(07) = \frac{At(94)}{3.3} \quad [1]$$

Siguiendo las ecuaciones del método Lahar-Z, entonces,

$$At = C * V^{2/3} \quad [2]$$

Entonces,

$$C * V(07)^{2/3} = \frac{C * 320'000.000^{2/3}}{3.3} \quad [3]$$

$$V(07) = 141827^{3/2} \quad [4]$$

Así, el volumen involucrado en el flujo de 2007 podría ser de 53.400.000 m³.

2. En la cuenca del río Páez existe una red para la detección temprana de flujos de escombros, la cual está compuesta por 7 estaciones (3 en la cuenca del río Símbola y 4 en la cuenca del río Páez). Dichas redes reportan, mediante valores de voltaje, los niveles de excitación del suelo al paso de flujos de material o agua sobre la cuenca, y por consiguiente, sirven para determinar cambios en los caudales de los mencionados ríos (figura 5).

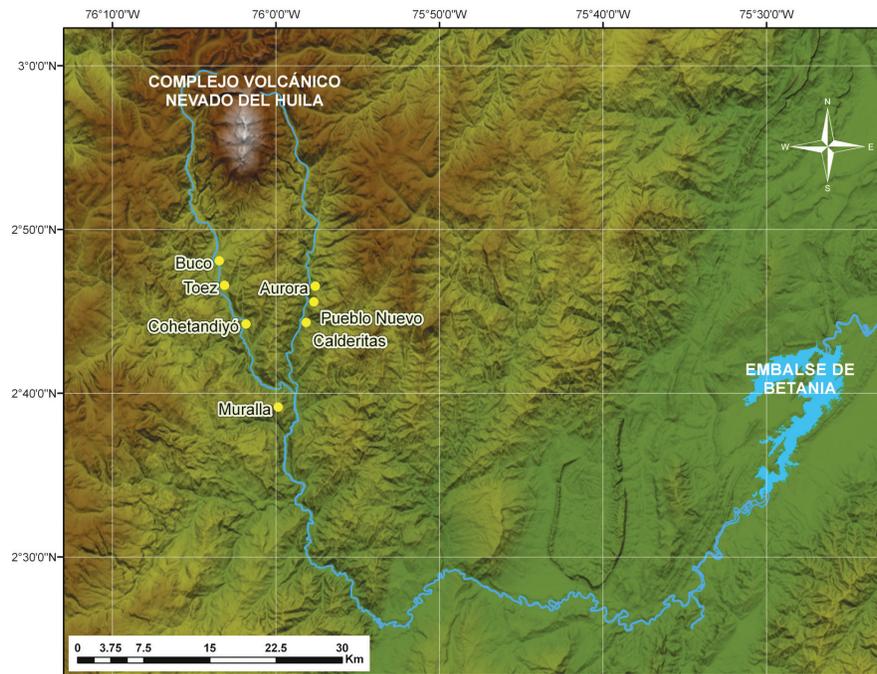


Figura 5. Red de estaciones detectoras de flujos de escombros del volcán Nevado del Huila.

En abril de 2007, la red registró el paso del flujo generado por la erupción del volcán Nevado del Huila (figura 6). Con los datos obtenidos se determinaron las velocidades aparentes del flujo, y los niveles de excitación del sitio a intervalos de 10 minutos; además, se calcularon las alturas máximas reales y el área mojada en cada una de las estaciones (750 m² en promedio); por consiguiente:

Si el caudal es:

$$Q = A * V \quad [5]$$

Q = caudal, A = área transversal, V = Velocidad.

Entonces,

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q * dt \quad [6]$$

V = volumen, Q= caudal, t= tiempo

Si se asume que el máximo nivel de excitación corresponde en tiempo al máximo flujo de material en el sitio y, por tanto, al área transversal de 750 m², se puede decir que el área bajo la curva corresponde al volumen total que fluyó de t₁ a t₂ (figura 6). Por consiguiente, realizando el cálculo de la integral, el volumen total sería de 55.534.142 m³.

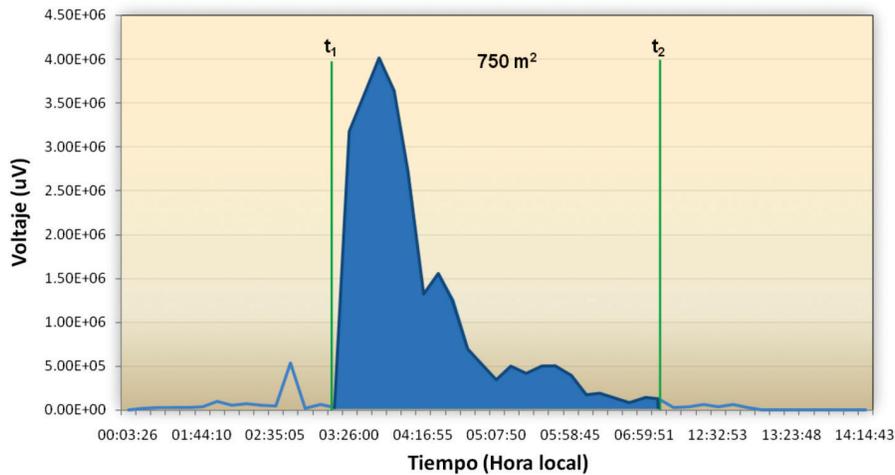


Figura 6. Gráfica obtenida de la estación de Tóez al paso del flujo generado en la erupción del volcán Nevado del Huila de abril de 2007.

Con las áreas transversales determinadas y los volúmenes involucrados en cada uno de los flujos, se plotean los valores encontrados y se comparan con los datos utilizados para determinar la ecuación general del método. En primera instancia, se observa en la gráfica que los puntos reales del terreno determinados para el volcán Nevado del Huila están muy por debajo del promedio general del método estándar, y aún más por fuera de la curva de confiabilidad del 95%, por lo tanto, si se realizan modelamientos con dicha ecuación, las áreas transversales determinadas a un volumen dado estarían sobreestimadas, y por consiguiente, las alturas alcanzadas por estos (figura 7).

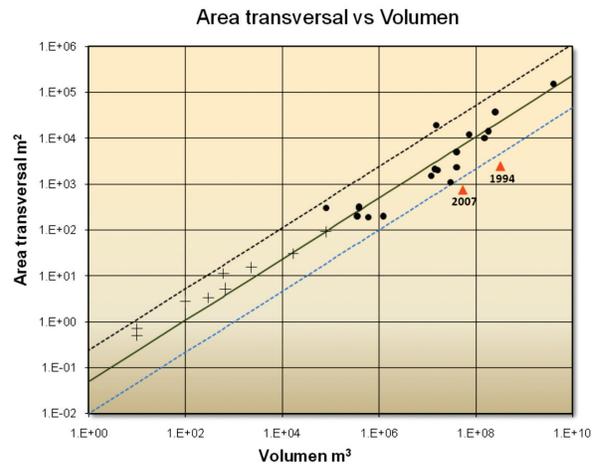


Figura 7. Comparación de los puntos obtenidos para los flujos de escombros ocurridos en el volcán Nevado del Huila en 1994 y 2007, y su comparación con los datos y regresión utilizada por el método Lahar-Z.

Método de escalamiento

Debido a los resultados obtenidos con el método de Lahar-Z convencional, se plantea el escalamiento de la ecuación general del método, tomando como base los datos obtenidos de los levantamientos geológicos y topográficos de alta resolución realizados después de la ocurrencia de los flujos. En dichos levantamientos se recopilaban las alturas de las áreas mojadas y de los depósitos asociados a cada uno de los flujos; además, se realizó un levantamiento topográfico de alta resolución de las secciones transversales. Como el método utiliza una ecuación de potencia de la forma:

$$Y = C * X^m \quad [7]$$

Donde

Y = área de la sección transversal, C = constante, X = Volumen del flujo, M = pendiente de la recta.

Se obtienen las secciones transversales variando los volúmenes entre 1 m³ y 1000 millones de m³, y decreciendo porcentualmente el valor del coeficien-

te C del modelo inicial con variaciones del 10%, y se trazan las curvas obtenidas. Inicialmente, los valores obtenidos para la cuenca del río Páez están cercanos al 80% de desviación del coeficiente C. Posteriormente, se realizó un tratamiento estadístico a los datos calculando el error de mínimos cuadrados de toda la muestra representada por 32 puntos (16 áreas transversales correspondientes al flujo de 1994 y 16 áreas del flujo de 2007), variando el coeficiente C en un intervalo del 80 al 95% con pasos de iteración del coeficiente C de 1. El mínimo error tiende al 88%. A continuación se realizó un escalamiento fino, variando el coeficiente C desde el 87 al 89%, con pasos de iteración del coeficiente C de 0,1. Los datos tiende a un mínimo error en el 88,2% de variación de C (figura 8a, 8b). La convergencia del error de mínimos cuadrados muestra que la curva que mejor representa los datos de campo es $A = 0.006 * V^{2/3}$. De acuerdo con la ecuación obtenida para la cuenca del río Páez, se realizaron los llenados de las secciones transversales a volúmenes involucrados de 53, 320, 600 y 1000 millones de m³.

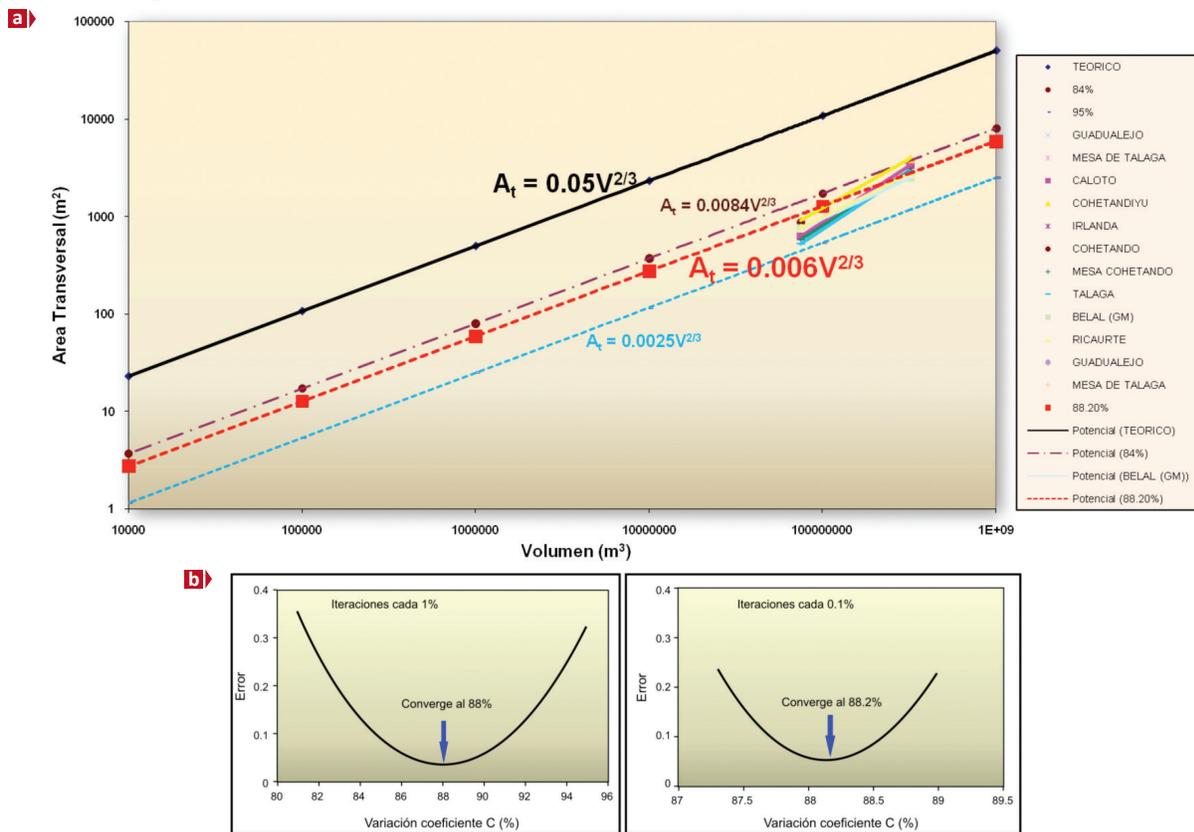


Figura 8. a) Ecuación obtenida del escalamiento y su ajuste a los datos observados en campo. b) Iteraciones y convergencia a un error mínimo para coeficiente C.

Resultados

Se realizaron las simulaciones tomando el modelo digital de la NASA de resolución 30 x 30 m, para la zona de influencia del volcán Nevado del Huila, y más específicamente para el río Páez, el cual nace en la parte alta del complejo volcánico Nevado del Huila, asumiendo volúmenes involucrados de 53, 320 600 y 1000 millones de m³. Los dos

primeros escenarios corresponden a los volúmenes estimados para las avalanchas ocurridas en la cuenca durante 2007 y 1994 respectivamente, los dos escenarios restantes (600 y 1000 millones) corresponde a lo que se estima podría suceder si se formara una avalancha sobre la cuenca con las condiciones actuales de estabilidad del edificio (figura 9).

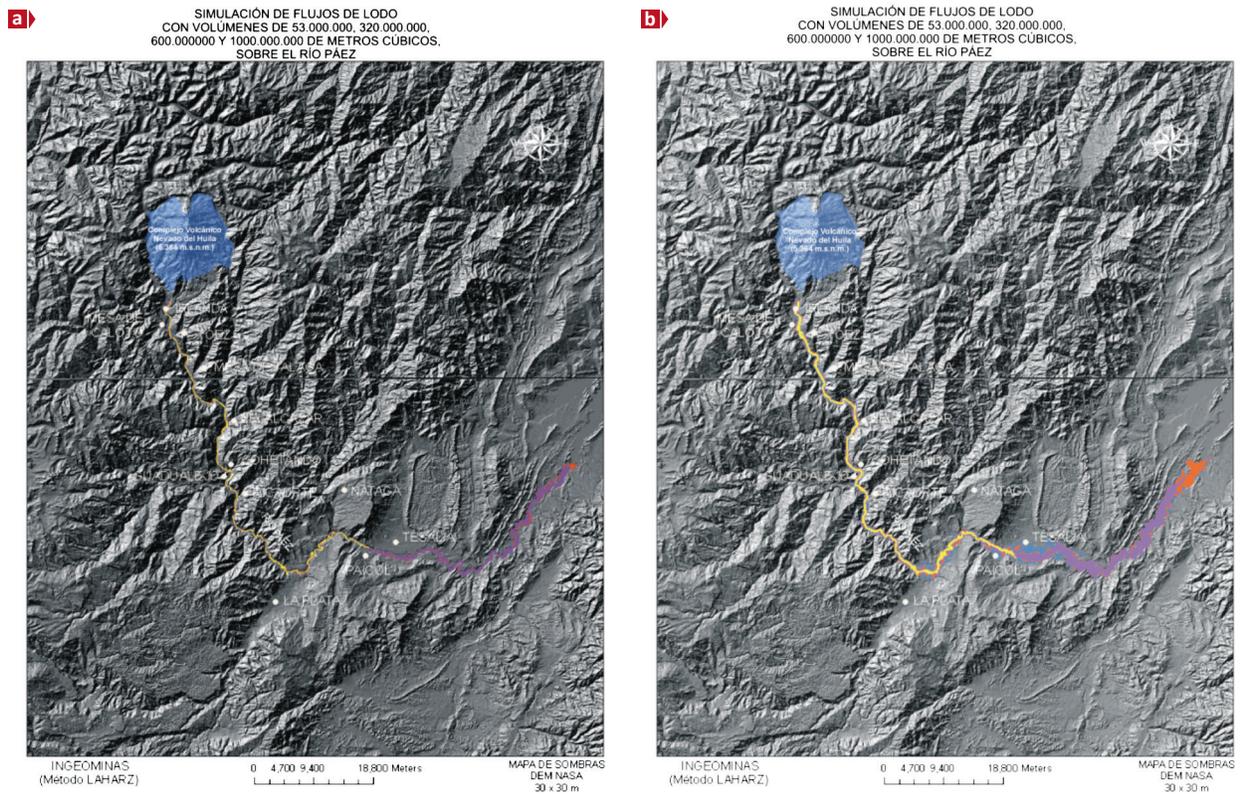


Figura 9. Modelos de terreno donde se observa las simulaciones obtenidas tomando como base el modelo digital de la NASA de resolución 30 x 30 m, para volúmenes involucrados de 53, 320, 600 y 1000 millones de m³, a) ecuación escalada $A_1 = 0,006V^{2/3}$. b) ecuación estándar $A_1 = 0,05V^{2/3}$.

Después de realizar el modelamiento, los resultados obtenidos muestran que si se toma la curva de Lahar-Z convencional, las alturas obtenidas en cada uno de los puntos seleccionados tienen valores superiores en 4 veces al ser comparados con las observaciones realizadas en el terreno; en consecuencia, dicha valoración sobreestima el comportamiento real de la cuenca al paso de flujo con un volumen determinado. De igual forma, se mo-

deló con la ecuación escalada después de realizar el tratamiento matemático y estadístico a los 32 puntos que conforman la muestra. Los resultados obtenidos para altura de áreas mojadas, ancho de la inundación y áreas transversales, presentan una menor desviación de los datos obtenidos con los datos observados en campo, con una desviación total de la muestra cercana al 5% (tabla 2, figura 10).

Tabla 2. Comparación de las alturas reales y simuladas en la sección de Belalcázar, a volúmenes involucrados de 53, 320, 600 y 1000 millones de m³

Sección transversal	Distancia (km)	Flujo 1994			Flujo 1994		
		Altura (m) real	Altura (m) Lahar-Z escalado	Altura (m) Lahar-Z estándar	Altura (m) real	Altura (m) Lahar-Z escalado	Altura (m) Lahar-Z estándar
Irlanda	23	7	8	36	19	24	65
Caloto	24	8	12	35	25	31	65
Tóez	28	14	10	37	25	23	58
Cohetandiyó	33	13	9	51	30	29	90
Mesa de Tálaga	39	9	7	35	25	28	62
Tálaga	39	9	10	36	20	26	69
Avirama	46	6	9.5	29	24	28	64
Guaduales (B)	47.5	5	6	27	21	20	63
Parque (B)	48	10	8	31	20	22	63
Normal (B)	48.5	4	8	30	19	22	60
Coquiyó	51.5	9	8	26	28	26	75
Cohetando	56	10	7	34	20	25	72
Guadalejo	58	8	7	36	15	23	60
Mesa de Cohetando	63	10	11	45	25	29	84
Ricaurte	65	8	9	31	15	25	76
Nátaga	90	5	6	36	6	21	69
		8,44	8,47±0,7	34,69±7,93	21,06	25,13±1,78	68,44±14,29

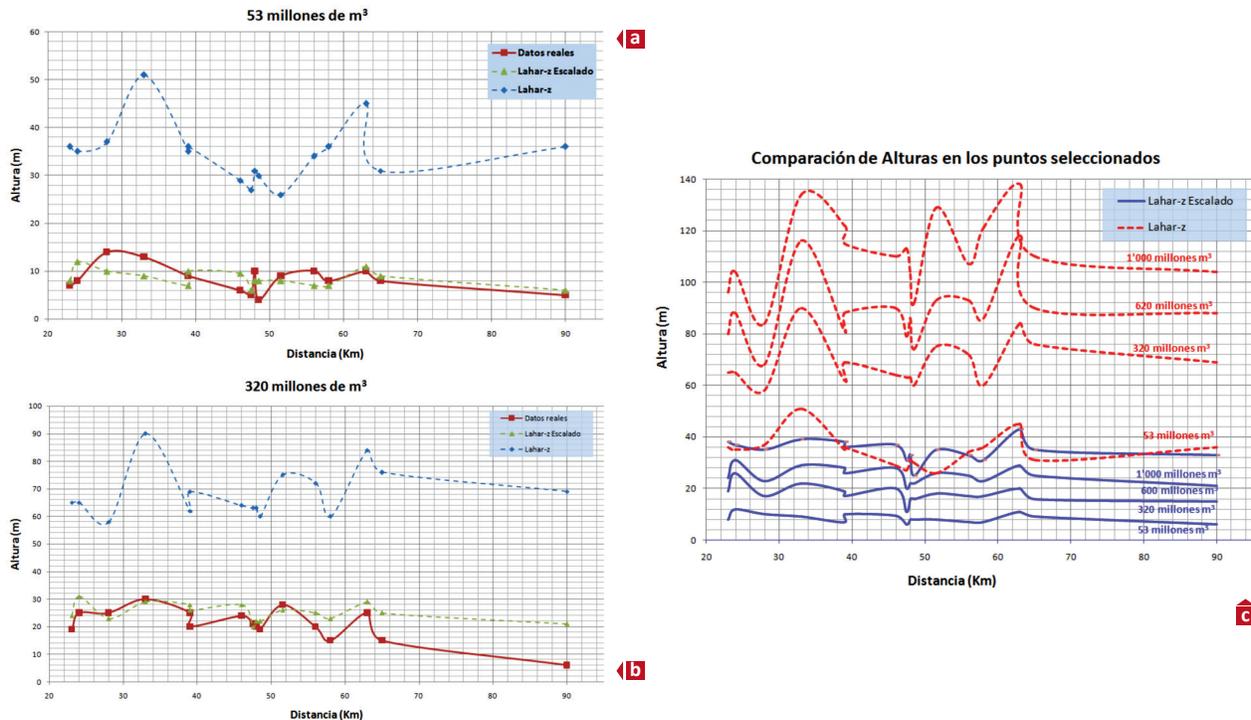


Figura 10. Comparación distancia desde el punto de origen del flujo hasta cada sección transversal vs las alturas reales y las encontradas con el método estándar de Lahar-Z y el método escalado para el flujo de 53 millones de m³. a) y 320 millones de m³. b). Nótese que el método de escalamiento representa de una mejor forma lo ocurrido realmente en la cuenca. c) Comparación de las alturas encontradas en las simulaciones de los diversos volúmenes involucrados con los dos métodos, se observa que el método convencional sobreestima en 4 veces las alturas reales alcanzadas por los flujos.

Para el caso de la sección transversal de Belalcázar, debido a que en este punto se encuentra el principal centro poblado de la cuenca, se realizó un tratamiento especial realizando 4 perfiles topográficos de alta resolución de sur a norte, con el fin de levantar con mayor nivel de detalle las alturas reales de los flujos ocurridos en 1994 y 2007, y modelar las posibles alturas alcanzadas por flujos con volúmenes de 600 y 1000 millones de m³. Del modela-

miento realizado se resalta que: 1. Las alturas encontradas con la ecuación escalada tienen errores de ± 5 m al ser comparadas con los datos levantados en campo. 2. Los flujos modelados de 600 y 1000 millones de m³ dan como resultado que la cabecera municipal llegaría a verse comprometida al paso de dichos flujos, los cuales alcanzarían alturas de 34 y 42 m, respectivamente (figura 11).

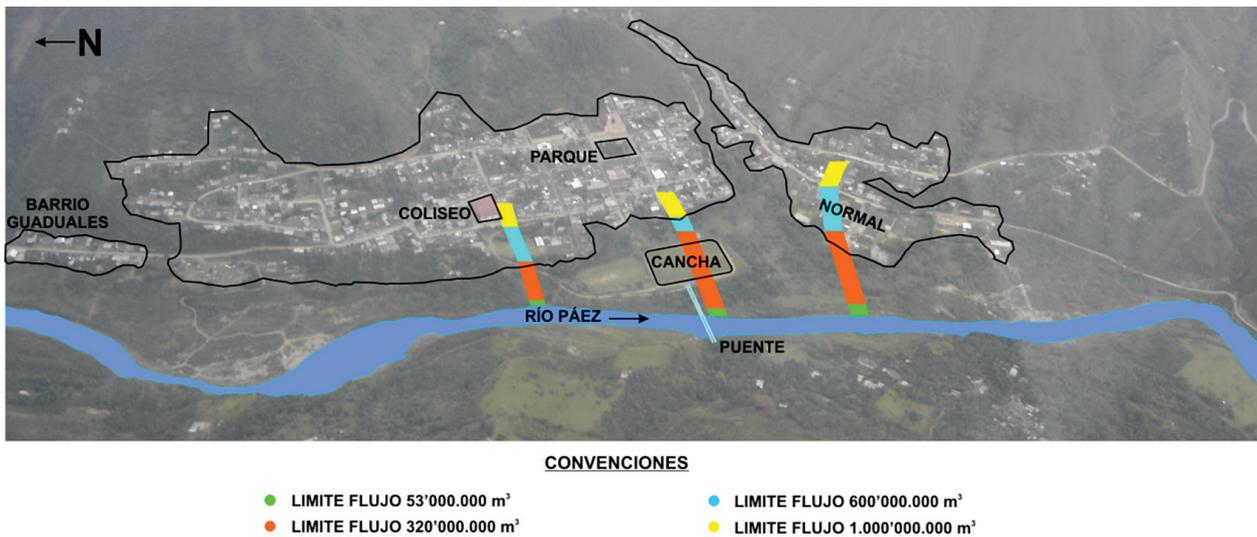


Figura 11. Alturas determinadas en las simulaciones de Lahar-Z con la ecuación escalada y volúmenes involucrados de 53, 320, 600 y 1000 millones de m³, en el casco urbano de Belalcázar, municipio de Páez-Cauca (Colombia).

Discusión y conclusiones

La importancia de contar con medidas geológicas y topográficas de las evidencias asociadas a los flujos de escombros ocurridos en la cuenca en épocas recientes, así como la disponibilidad de datos históricos, son un insumo básico como datos de entrada para el método planteado.

El método de escalamiento propuesto en el presente trabajo y las simulaciones obtenidas, con base en la ecuación determinada, proporcionan una mejor aproximación al comportamiento natural asumido por los flujos de escombros ocurridos en la cuenca del río Páez. Los valores reales y teóricos presentan desviaciones promedio de ± 5 m, pueden utilizarse para propósitos de actualización del mapa de amenaza volcánica del Nevado del Huila, ayudando de esta forma a la toma de decisiones en

periodos de crisis volcánica e incluso al reordenamiento futuro de la cuenca.

Los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas mediante la ecuación convencional de Lahar-Z muestran que los valores reales y teóricos presentan desviaciones de hasta 4 veces al comparar los datos de altura de los flujos ocurridos en 1994 y 2007, sobreestimando las áreas transversales de inundación. Según Iverson et ál. (1998), el método está diseñado para simular de manera rápida y objetiva los posibles límites de inundación de flujos de escombros de origen volcánico, pero con desviaciones de hasta un orden de magnitud, por lo cual la utilización del método convencional restringe las evaluaciones más finas del comportamiento de un flujo sobre una cuenca determinada.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar sus más sinceros agradecimientos al personal que labora en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, los cuales intervinieron en las labores de recolección

de datos en campo y el procesamiento de información; de igual forma, al doctor Schilling del USGS, que colaboró con la realización de las simulaciones iniciales para el Nevado del Huila con el método de Lahar-Z estándar. 📌

Referencias

- Calderón, Y., Ávila, G. & Ojeda, J. (1997). *Estudio de amenazas y zonificación geológica de la cuenca del río Páez*. 2nd Pan-am. Symp. Landslides, 2nd COBRAE, Río de Janeiro.
- Cardona, C., Agudelo, A., Calvache, M., Pulgarín, B., Santacoloma, C., Monsalve, M., Bolaños, R., Manzo, O., Narváez, A., Trujillo, N. & Sarmiento, C. (2007a). *Proceso eruptivo del volcán Nevado del Huila*. Popayán: Ingeominas.
- Cardona, C., Pugarín, B., Agudelo, A., Santacoloma, C., Calvache, M., Schilling, S. P., Lockhart, A. & Jeffrey, M. (2007b). *1994 and 2007 Debris Flows on the Páez River Valley (Colombia): Calibrating the plot of the Lahar Method*. Popayán: Ingeominas.
- Ingeominas. (1994). El sismo de Páez, Cauca, 6 de junio de 1994. Evaluación de emergencia, Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres de Colombia (SNPAD), Bogotá: Ingeominas.
- Ingeominas (2007a). Informe semestral de actividad de los volcanes del Cauca, I semestre de 2007. Popayán: Ingeominas.
- Ingeominas (2007b). Notes on Huila April 18th lahar. Popayán: Ingeominas.
- Ingeominas(2008). http://intranet.ingeominas.gov.co/popayan/Proceso_eruptivo_volc%C3%A1n_Nevado_del_Huila, Last Access: 4.5.2008.
- Iverson, R. M., Schilling, S. P. & Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin* 110(8), 972-984.
- Pulgarín, B., Cardona, C., Calvache, M., Lockhart, A. & White, R. (2007) Huila Lahars Caused by Rapid, Voluminous Water Expulsion. Popayán: Ingeominas.
- Pulgarín, B. (1996). *Evaluación de amenaza y vigilancia volcánica del complejo volcánico Nevado del Huila*. Popayán: Ingeominas.
- Schilling, S. P (1998). Lahar; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. Open-File Report. USGS series. Report number 98-638.