


ANÁLISIS FÍSICO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS MONTÍCULOS DEL DEPÓSITO DE AVALANCHA DE ESCOMBROS LOCALIZADO EN EL ÁREA DE LAS NEREIDAS, FLANCO OCCIDENTAL DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ

Laura Vanessa Velásquez-Rocha¹; John Jairo Sánchez-Aguilar¹

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n2-2016006> 

Forma de citar: Velásquez, L.V., y Sánchez, J.J. 2016. Análisis físico de la distribución espacial de los montículos del depósito de avalancha de escombros localizado en el área de Las Nereidas, flanco occidental del Volcán Nevado del Ruiz. Boletín de Geología, 38(2): 93-100.

RESUMEN

Las avalanchas de escombros revisten una gran amenaza para las poblaciones aledañas a los volcanes. La rápida modificación de las geoformas dejadas por estos eventos hace difícil comprender la dinámica del deslizamiento, estimar su magnitud y evaluar el daño causado. Sin embargo, la prolongada preservación de los montículos a lo largo del curso de la avalancha se convierte en una herramienta para entender las características físicas de estos deslizamientos. En este trabajo se estudió un grupo de 281 montículos emplazados en el sector occidental del volcán Nevado del Ruiz en el área conocida como Las Nereidas. Se determinaron la distribución espacial y las dimensiones del emplazamiento mediante el posicionamiento con GPS en campo de los montículos individuales y el uso de ortofotos y topografía de alta resolución. Mediante la determinación del área de la base, se calculó una correlación negativa entre el área de los montículos individuales y su distancia a dos fuentes probables. Posteriormente, se determinó la fuente más probable para la avalancha y la dirección general de transporte, que fue en sentido NW, con cambios locales debido a controles topográficos. La movilidad (L/H) y su recíproco el coeficiente de fricción (H/L) se calcularon como 6,8 y 0,15, respectivamente. El análisis de la información investigada y los resultados permiten concluir que dicho emplazamiento corresponde a una avalancha de escombros con una edad inferior a 40.000 años, de magnitud menor, en la cual los materiales colapsaron desde una altura de 2,6 km y alcanzaron una distancia horizontal de 17,8 km (6,8 veces mayor que la altura de colapso), cubriendo un área total de 47,7 km² y transportando un volumen total de 5,05x10⁻³ km³, el cual se considera un valor subestimado.

Palabras clave: avalancha de escombros, colapso del edificio volcánico, montículos, dirección de transporte, movilidad, fricción.

PHYSICAL ANALYSIS OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF HUMMOCKS FROM THE DEBRIS AVALANCHE LOCATED IN THE AREA OF NEREIDAS, WEST FLANK OF NEVADO DEL RUIZ VOLCANO

ABSTRACT

Debris avalanches represent great hazard for communities neighboring volcanoes. Rapid modification of landforms during these processes makes it difficult understanding the dynamics of the slides, estimating their magnitudes and assessing their damage. The analysis of preserved hummocks along the path of avalanches, however, becomes a tool to interpret the physical characteristics of debris avalanches. In this work a group of 281 hummocks emplaced west of Nevado del Ruiz Volcano, in the Nereidas area, is studied. Both, the spatial distribution and dimensions of the emplacement are calculated using GPS-determined positions of individual hummocks as well as orthoimages and high-resolution topography. A negative correlation is found between the base area of hummocks and their distances to two probable sources. The most likely source area for the avalanche and a NW general direction of transport with some topography controls were also determined. The mobility of the avalanche (L/H) and its reciprocal the friction coefficient (H/L) were determined as 6.8 and 0.15, respectively. Analysis of the information and the results lead to the conclusion that the deposit corresponds to a minor debris avalanche younger than 40000 years, during which materials collapsed from a height of 2.6 km and reached a horizontal distance of 17.8 km (6.8 times greater than the collapse height), covering a total area of 47.7 km² and transporting an estimated total volume equal to 5.05x10⁻³ km³, which is considered an underestimate.

Keywords: debris avalanche, volcanic edifice collapse, hummocks, transport direction, mobility, friction.

¹ Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Colombia. Cra 30 45 – 03, Edificio 224. lvvelasquez@unal.edu.co, jjsanchez@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

Los volcanes son sistemas dinámicos y sus procesos representan una amenaza para las poblaciones que se encuentran a su alrededor. Aunque se ha avanzado en la comprensión de la dinámica de los volcanes aún no se ha documentado mucho sobre destructivas avalanchas de escombros (AE) en los flancos volcánicos (USGS, 1981; Yoshida *et al.*, 2012). Las erupciones volcánicas a menudo muestran precursores tales como cambios en los volúmenes de gas emitidos, en sismicidad o en la deformación del suelo asociada al ascenso de magma hacia la superficie; pero desafortunadamente, el colapso del edificio volcánico no está asociado directamente a estas señales y por lo tanto representa una mayor amenaza.

Un importante ejemplo del colapso de un edificio volcánico ocurrió en 1980 cuando el sector norte del Monte Santa Helena (Estados Unidos) colapsó, como consecuencia su cumbre se redujo en 500 m de altura y el edificio volcánico perdió cerca de un tercio de su volumen. Antes de este evento los depósitos de avalancha de escombros (DAE) eran interpretados como depósitos de lahares o de flujos piroclásticos, e incluso como morrenas (Ui *et al.*, 2000).

Existe un creciente interés en investigar las características físicas de las AE y las diferencias que se producen en cuanto a la distribución espacial de los DAE, el volumen de roca transportada y la movilidad de la AE en diferentes volcanes, con el objetivo de entender la dinámica de las AE y estimar su magnitud. Sin embargo, debido al colapso en sí mismo y a la erosión posterior, los DAE comienzan a desaparecer y es difícil obtener evidencia geológica y geomorfológica del evento. En este sentido, los montículos se convierten en una importante alternativa ya que son rasgos geomorfológicos de pequeña escala que permanecen en el tiempo, distribuidos a lo largo del curso de la AE (Yoshida *et al.*, 2012).

El Volcán Nevado del Ruiz (VNR) es uno de los estratovolcanes activos más representativos de la Cordillera Central Colombiana, se localiza dentro del Complejo Volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín. Debido a su relevancia e importancia en el contexto geológico y social de nuestro país se estudiaron los probables DAE ubicados en la zona conocida como Las Nereidas al W del VNR. No se tiene conocimiento acerca de estudios o registros concretos de estos DAE. De manera relevante, en cuanto a investigaciones

en la zona se encontró que Thouret *et al.* (1990) sin mayor detalle señalan en un mapa la existencia de una cicatriz relacionada a una AE ubicada en el flanco del W del VNR con orientación en dirección W hacia la Quebrada Nereidas.

MARCO TEÓRICO

Avalanchas de escombros

Las AE son enormes masas de rocas deslizándose a velocidades superiores a 250 km/h. Se generan, entre otros, cuando un edificio volcánico colapsa, lo cual es provocado normalmente por la intrusión de magma nuevo, una explosión freática o un terremoto (Ui *et al.*, 2000).

Los DAE están caracterizados por dos facies de depósito, la primera incluye bloques de escombros y la segunda incluye una matriz de escombros. La facies de bloques se compone de grandes cuerpos de roca fracturados. La facies de matriz es una mezcla de grano fino de fragmentos volcánicos derivados de diversas partes del volcán fuente (Ui *et al.*, 2000).

Bajo las leyes de fricción de Coulomb, materiales granulares deben dejar de moverse horizontalmente a distancias 1,6 veces la altura de colapso. En contraste, si se desliza un volumen de 1 km³ de roca este alcanza distancias 10 a 15 veces más grandes que su altura de colapso, ésta es una de las propiedades más desconcertantes en el estudio de la dinámica de las AE (Shea and van Wyk de Vries, 2010). Se han propuesto diferentes modelos para explicar esta discrepancia con respecto a las predicciones teóricas (Shea and van Wyk de Vries, 2010). Campbell (1989) y Takarada *et al.* (1999) proponen el modelo de *plug flow*, el cual es el modelo más ampliamente aceptado (Yoshida *et al.*, 2012). Este modelo indica que cuando un material con un alto límite de elasticidad (es decir, que no se deforma fácilmente) se desliza, casi toda la cizalla se confina a sus bordes y su base, con la mitad de la cizalla total concentrada en el 8% más bajo del material en movimiento, su centro permanece casi sin deformarse y el material es simplemente empujado hacia adelante en masa. Esto explica las grandes distancias alcanzadas y adicionalmente la sutil relación estratigráfica que se ha observado se preserva dentro de los DAE. El alto límite de elasticidad sugiere que se mueve sobre un colchón de aire comprimido o que el material de grano fino dentro de la AE puede adquirir propiedades fluidas por el aire atrapado y arrastrado (Francis *et al.*, 2004).

Características geomorfológicas de las avalanchas de escombros

Las superficies de los DAE muestran dos morfologías principales. Las primeras son montículos con bases circulares o elípticas, y las segundas son crestas. Shea and van Wyk de Vries (2010) señalan que los montículos se forman cuando las rocas que se deslizaron son heterogéneas. En general las AE producidas por el colapso del edificio volcánico dan lugar a una morfología de anfiteatro en la fuente y montículos en la superficie del depósito (Ui *et al.*, 2000).

Shea *et al.* (2008) estudiaron los montículos de DAE en el Volcán Mombacho (Nicaragua) y observaron que en general grupos de montículos alineados, que reflejan una dirección preferente, coinciden con la dirección de transporte de la AE.

Coefficiente de fricción y movilidad de la avalancha

La relación H/L es el coeficiente de fricción de la roca en contacto con el suelo, donde H es la altura de colapso y L es la distancia horizontal máxima recorrida. Generalmente $0,06 < H/L < 0,2$ para AE producto del colapso de un edificio volcánico, relación menor a la encontrada en las avalanchas no volcánicas de tamaño similar (Ui *et al.*, 2000). La movilidad de la avalancha

(L/H) es recíproco del coeficiente de fricción (Yoshida *et al.*, 2012).

Relación tamaño del montículo – distancia a la fuente

Entre los parámetros que expresan el tamaño de un montículo el más confiable es el área de la base ya que es poco afectada por los cambios del terreno posteriores a la ocurrencia de la AE. Yoshida *et al.* (2012) encontraron una ecuación que relaciona el tamaño final de los montículos (A) sobre la superficie de deslizamiento y su distancia a la fuente (D).

$$A = \alpha e^{(-\beta * D)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde α es el intercepto de una expresión de regresión lineal e indica el tamaño promedio inicial de los montículos a 0 km de distancia, y β es la pendiente de la expresión de regresión que indica la tasa de decrecimiento en el tamaño de los montículos con la distancia.

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la zona conocida como Las Nereidas, donde drenan el río Molinos, la quebrada Nereidas y el río Claro, a lo largo del flanco W del VNR (FIGURA 1).

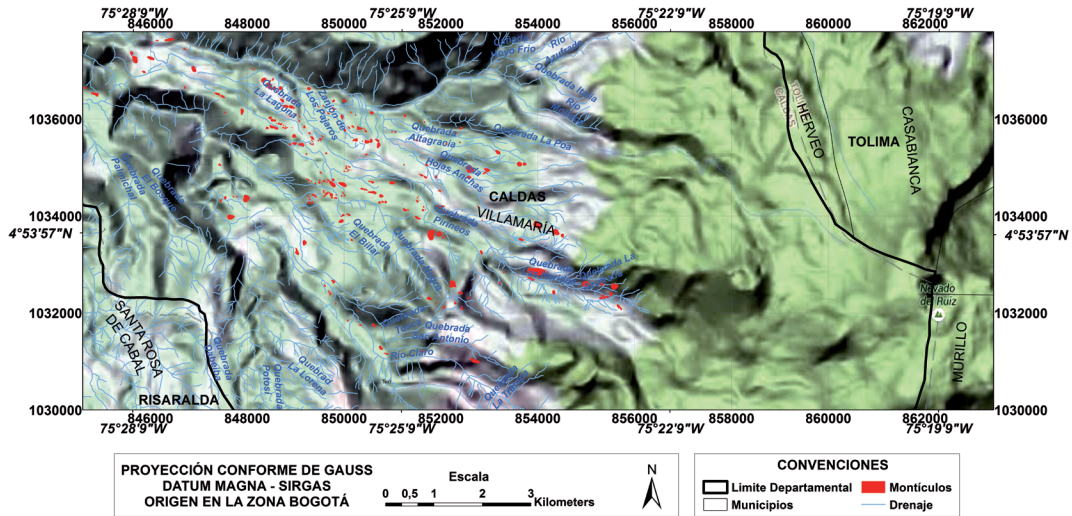


FIGURA 1. Mapa de la zona.

DATOS Y MÉTODOS

El trabajo de campo se enfocó en la medición de tres parámetros fundamentales, área de la base, altura y localización de los montículos. Primero, se determinó la localización y el perímetro de la base de

cada montículo usando un receptor manual de GPS, simultáneamente se realizó un registro fotográfico a partir del cual se determinó la altura (h) (FIGURA 2). Los perímetros de las bases de los montículos fueron digitalizados como polígonos usando ArcGIS™, sobre una ortofoto de la zona de estudio. A partir de

estos polígonos se calculó el área de la base (A) y la distancia (D) de cada montículo a la fuente de la AE (FIGURA 3).



FIGURA 2. Altura de cada montículo. La estaca de color rojo cerca a la base mide 0,5 m.



FIGURA 3. Esquema de medición de los parámetros para cada montículo. Tomado de Yoshida *et al.* (2012).

A partir de los datos de altura (h) y área (A) se calculó el volumen de cada montículo. Geométricamente se aproximó cada uno a la forma de un cono (FIGURA 4), siendo el volumen (V) igual a $1/3$ del área de la base por la altura:

$$V = \frac{1}{3} A \cdot h \quad \text{Ecuación 2}$$

Para calcular la movilidad de la avalancha (L/H) y su recíproco, el coeficiente de fricción (H/L), H se definió como la diferencia entre la altura de la fuente del colapso y la posición terminal de la avalancha (posición del montículo más lejano observable), y L como la distancia horizontal entre la posición terminal de la avalancha y la fuente del colapso (Yoshida *et al.*, 2012). El procedimiento descrito se aplicó a 281 montículos observados.

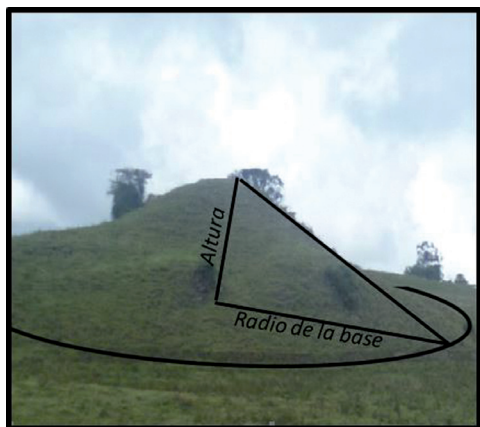


FIGURA 4. Esquema para el cálculo del volumen del montículo.

RESULTADOS

Distribución espacial de los montículos, dirección de transporte y posible fuente

La distribución espacial de los montículos se observa en la FIGURA 5, los polígonos amarillos corresponden a cada montículo en vista de planta. Siguiendo la metodología de Shea *et al.* (2008), se definieron grupos de montículos que mostraban un patrón de alineación y elongación en una dirección preferente (siluetas rojas, FIGURA 5). Estos grupos identificados coinciden con la dirección de transporte de la AE. Se definieron 30 tendencias compuestas por grupos de 2 a 9 montículos. La distribución espacial y la dirección de transporte de los montículos indican que la fuente de la AE tiene un origen al SE de la zona de estudio. Como fuentes alternativas del depósito, se utilizarán la cicatriz de DAE orientada en dirección W hacia la quebrada Nereidas identificada por Thouret *et al.* (1990) y el Cráter Arenas del VNR.

Relación área – distancia

Los polígonos sobre la ortofoto de la zona permitieron obtener el área de la base de cada montículo. Se hallaron las distancias horizontales entre cada posible fuente y el centro de cada montículo. Posteriormente se construyeron gráficas semi-logarítmicas de la distancia a cada fuente en función de distribución del área (FIGURA 6). Los montículos muestran un amplio rango de áreas para todas las distancias. Se calculó una regresión lineal que indica que el área de los montículos decrece exponencialmente con la distancia. Aplicando los métodos usados por Yoshida *et al.* (2010), se dividió el curso de la AE en lapsos de 500 m, para cada lapso se calculó la mediana del área de los montículos y la mediana de la distancia de los montículos a la fuente. La mediana se usó porque no es afectada por datos extremos, por lo que es más representativa que la media, para los datos obtenidos de los montículos (Triola, 2006). Los datos contenidos en los lapsos muy proximales a la fuente y los lapsos muy lejanos, fueron excluidos del análisis de regresión lineal debido a que el número de montículos era muy pequeño.

La relación entre el área de los montículos y su distancia a la fuente está descrita por la función $A = \alpha e^{(-\beta * D)}$. Los resultados se resumen en la TABLA 1. El valor absoluto del coeficiente de correlación señala como la fuente más probable es la cicatriz identificada por Thouret *et al.* (1990).

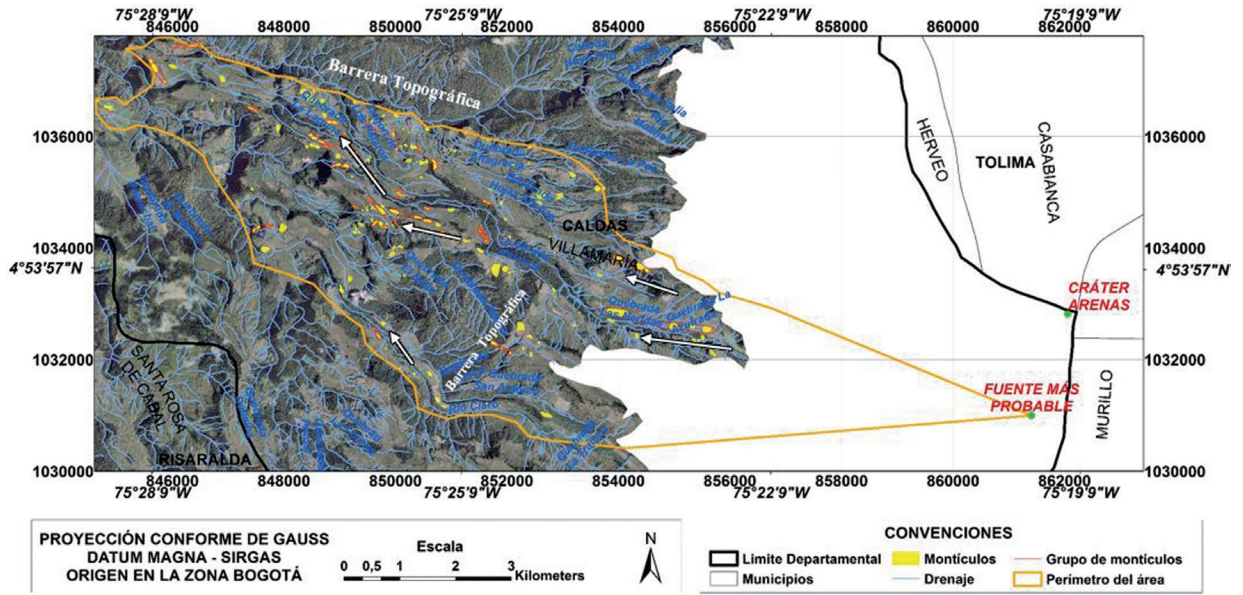


FIGURA 5. Ortografía de la avalancha de escombros y análisis de sus montículos. Las flechas indican la dirección de transporte indicada por los grupos de montículos.

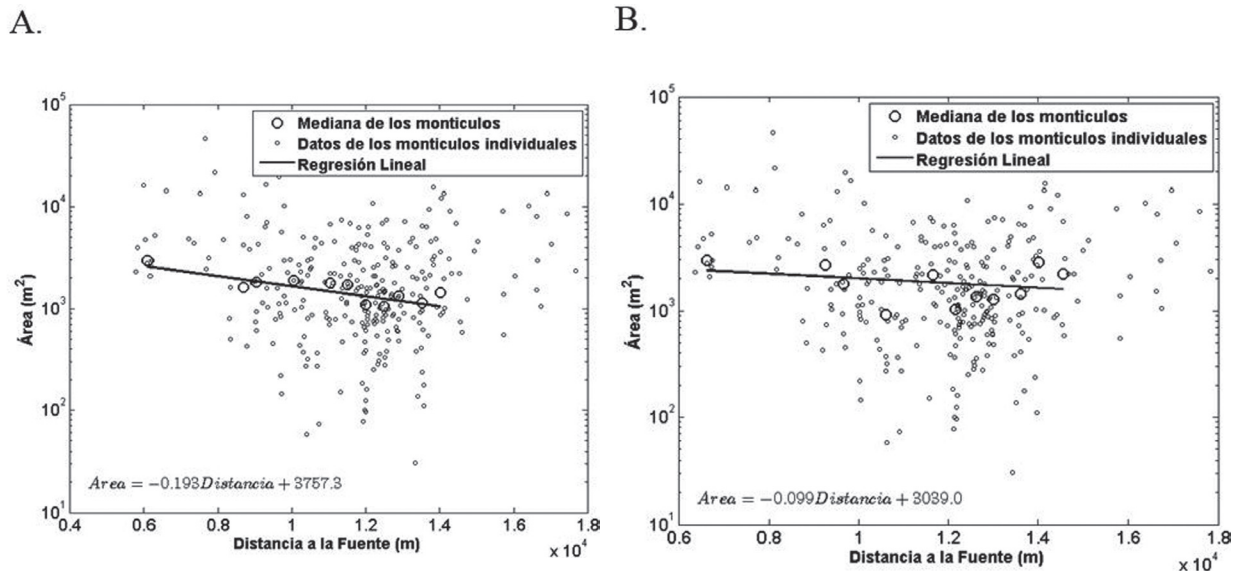


FIGURA 6. Gráfica semi-logarítmica y regresión lineal de la distribución del área de los montículos con la distancia a la Fuente. A. Cicatriz identificada por Thouret *et al.* (1990). B. Cráter Arenas.

TABLA 1. Resultados de la relación entre el área - distancia para las dos posibles fuentes.

Fuente	α	β	Coefficiente de correlación
Cicatriz	3.757,3116	-0,19333	-0,8643
Cráter Arenas	3.039,0545	-0,09919	-0,3174

Volumen de la masa colapsada y área cubierta

A partir de los datos de área de la base y altura de los montículos, se aplicó la ecuación $V = \frac{1}{3} A \cdot h$ para determinar el volumen de cada montículo individual. La suma total de los volúmenes calculados corresponde a un volumen de masa colapsada de $5,05 \times 10^{-3} \text{ km}^3$.

Asumiendo como mejor fuente la cicatriz propuesta por Thouret *et al.* (1990), siguiendo la dirección de transporte inferida y la geomorfología del área, y considerando la distribución general de los montículos, se definió el área total cubierta por estos depósitos (FIGURA 5) que se estima es de 47,7 km².

Movilidad y fricción

La distancia vertical H recorrida por la AE se definió como la diferencia entre la altura de la fuente del colapso y la altitud terminal de la AE (altitud del montículo más lejano). Dado que la fuente se encuentra a una altura de 5.000 m y el montículo más alejado a la fuente está a una altura de 2.375 m, se calcula que $H=2,6$ km. La distancia horizontal L recorrida por la AE definida como la distancia horizontal entre la posición terminal de la AE y la fuente del colapso, fue determinada como $L=17,8$ km. En consecuencia, la movilidad de la avalancha (L/H) es igual a 6,8 y el recíproco coeficiente de fricción (H/L) tiene un valor de 0,15.

DISCUSIÓN

Fuente de la avalancha

Una revisión bibliográfica de los trabajos realizados en la zona de interés permitió reconocer que hasta el momento no se ha realizado ningún tipo de trabajo que indique la existencia en el área de DAE. Thouret *et al.* (1990) plantean la existencia de una morfología en forma de anfiteatro en el sector occidental del volcán, asociando esta geoforma a la cicatriz dejada por el deslizamiento de una AE, lo que se constituye en la única evidencia que hasta el momento se halla identificado en la zona la ocurrencia de un evento de este tipo.

Yoshida *et al.* (2012) señalan en su trabajo sobre las AE que existe una fuerte correlación entre el tamaño de los montículos y su distancia a la fuente. En este sentido, el coeficiente de correlación de -0,8643 que se obtuvo, señala como fuente más plausible la cicatriz reconocida por Thouret *et al.* (1990), en comparación a otra fuente como el Cráter Arenas.

Dinámica de la avalancha

La orientación de los grupos de montículos identificados refleja que localmente la AE se movilizó en múltiples direcciones (flechas en la FIGURA 5), estos cambios pudieron ser inducidos por controles topográficos. La dirección general de transporte a lo largo del curso de la AE fue en sentido noroccidente.

En las regiones centro y norte de la zona de estudio, la distribución espacial de los montículos y las direcciones de transporte identificadas reflejan que existió un control topográfico importante, los montículos se ubicaron principalmente entre los cauces de la quebrada Nereidas y el río Molinos. Allí se observa como las direcciones de transporte divergen en dos sentidos, la AE se extiende en forma de abanico como es intuitivo, pero la distribución espacial de los depósitos se ve limitada al norte por una gran barrera topográfica. En el sector proximal a la fuente algunos montículos se emplazaron sobre formas topográficas de pendiente alta lo que sugiere una gran energía de deslizamiento de la AE. En la región sur de la zona, la distribución espacial de los montículos y su orientación reflejan que el transporte estuvo controlado por el cauce del río Claro y por una barrera topográfica notoria ya que los montículos divergen a lado y lado de ésta. Por último, en la región terminal de la AE las direcciones de transporte cambian drásticamente, los montículos son escasos y su orientación es más aleatoria debido a que en este punto la energía ha disminuido.

La forma de los montículos individuales es variable e irregular, el tamaño de la base es mayor en el extremo proximal del depósito y disminuye hacia el extremo distal. El área está correlacionada negativamente con la distancia a la fuente siguiendo una función exponencial de la forma $A = 3.757,3116 e^{(-0,1933*D)}$ (FIGURA 6, TABLA 1).

Cuando una masa volcánica colapsa se rompe en bloques más pequeños, que sufren adicional rompimiento durante el deslizamiento hasta su emplazamiento. Debido a que los montículos están compuestos por tales masas de roca, el área inicial de los montículos a 0 km de distancia que se calculó como 3.757,3116 m² es equivalente al tamaño de los bloques que inicialmente fueron generados en la fuente.

Se calculó un coeficiente de fricción (H/L) igual a 0,15 que, según señalan Ui *et al.* (2000), se encuentra dentro del rango de 0,2 y 0,06 que corresponde efectivamente a una AE producto del colapso de un edificio volcánico. Esta información es de gran importancia en términos de prevención de este tipo de eventos. Con la relación entre H y L es posible establecer zonas de riesgo para futuras AE. Si conocemos la altura de la que colapsaría la masa de rocas volcánicas, en términos generales, se podría estimar la distancia máxima de desplazamiento.

La movilidad de la avalancha (L/H) es igual a 6,8; dicho de otra manera, la distancia máxima alcanzada por la AE fue 6,8 veces mayor que la altura de colapso. Esta particular relación se explica mediante el Modelo de *plug-low*; la gran distancia alcanzada se

debe presumiblemente a que durante el deslizamiento la roca se mueve sobre un colchón de aire comprimido y/o el material de grano fino dentro de la avalancha adquiere propiedades fluidas debido al aire atrapado y arrastrado durante el movimiento. La movilidad calculada es menor en comparación a avalanchas de características similares (*H* similares, ocurridas en estratovolcanes) (TABLA 2). Yoshida *et al.* (2012) señalan que la movilidad está relacionada con la tasa de decrecimiento que en este caso se obtuvo igual a -0,1933. Es decir, este valor tan pequeño indica que debido a la gran movilidad de la avalancha fue poca la ruptura de los bloques generados inicialmente al colapsar la masa de roca.

TABLA 2. Comparación entre los depósitos de avalancha ubicada al occidente del Volcán Nevado del Ruiz en la zona de Las Nereidas y otros depósitos ubicados en otras partes del mundo. ¹Ui *et al.* (2000). ²Este trabajo.

Depósitos	Altura <i>H</i> (km)	Distancia <i>L</i> (km)	<i>H/L</i>	<i>L/H</i>	Volumen (km ³)
1956 – Bezmyianny ¹	2,4	18	0,13	7,5	0,8
Pungarehu – Taranaki ¹	2,6	31	0,08	11,9	7,5
1980 - St. Helena ¹	2,55	24	0,11	9,4	2,5
Las Nereidas ²	2,6	17,8	0,15	6,8	0,005

Magnitud y edad de la avalancha

La AE se extendió cubriendo un área de 47,7 km² y transportó un volumen de roca estimado de 5,05 x 10⁻³ km³ hasta una distancia máxima de 17,8 km, deslizándose desde una altura de colapso de 2,6 km. En comparación con otros DAE estudiados en otras partes del mundo (TABLA 2), en donde el volumen se calculó a partir la cicatriz en la fuente, el volumen que se estimó es comparativamente mucho menor, lo que indica estaría subestimado posiblemente debido a que en ausencia de mayor información sobre de la fuente, el volumen se calculó aproximando los montículos a una forma cónica. Esto causaría un valor subestimado ya que las formas de los montículos varían de uno a otro siendo en algunos casos de cimas redondeadas. Adicionalmente, se desconoce el volumen de material erosionado y no se calculó el volumen de los depósitos bajo los montículos, que tienen una morfología aproximadamente plana y de los cuales se desconoce su espesor.

En comparación con el DAE “Holoceno” del Volcán Socompa que transportó un volumen de roca de 15 km³ una distancia de 35 km y es considerada una de las AE más grandes del mundo, se concluye que los DAE

en Las Nereidas corresponden a una AE de magnitud menor.

Grand y Handszer (1989) señalan la existencia de un flujo piroclástico en la zona de Las Nereidas que denominaron la Ignimbrita de Río Claro-Molinos. En cuanto a su geomorfología describen extensas mesetas de pendiente suave hacia el W formadas por los depósitos de flujo piroclástico, disectados por el río Claro, el río Molinos y la quebrada Nereidas. Proponen una edad para las ignimbritas de 40.000 a 90.000 años basada en una datación obtenida por el método de huellas de fisión. Thouret *et al.* (1990) le asigna a este flujo piroclástico una edad K-Ar de 200.000 años. Como se mencionó antes, los cauces de los ríos Claro y Molinos, y la quebrada Nereidas controlaron la dirección de transporte de la AE. En este sentido, los DAE debieron haberse emplazado posterior a la ocurrencia de los depósitos de ignimbritas, es decir, deben tener una edad menor a 40.000 años.

CONCLUSIONES

Se documentaron aspectos geomorfológicos y se calcularon parámetros físicos de los montículos ubicados al occidente del VNR en el sector conocidos como Las Nereidas, utilizando ArcGISTM, el software matemático MATLABTM y análisis estadísticos.

Los DAE ubicados en el sector de Las Nereidas corresponden a una AE de magnitud menor (en comparación con el DAE “Holoceno” del Volcán Socompa) ocurrida hace menos de 40.000 años, que se movilizó en sentido NW. La masa de roca colapsó desde una altura de 2,6 km, donde los bloques creados tenían un área inicial de 3.757,3 m², dichos bloques fueron muy poco fracturados a lo largo del deslizamiento, el cual ocurrió horizontalmente por una distancia de 17,8 km, es decir 6,8 veces mayor que la altura de colapso, cubriendo un área total de 47,7 km².

Todos los datos documentados en esta investigación representan un aporte importante al conocimiento de la zona occidental del VNR. La correlación negativa entre el tamaño de los montículos y su distancia a la fuente, la particular relación entre la altura de colapso y la distancia máxima recorrida por los DAE revelan información de la magnitud y movilidad de la avalancha, que a menudo son difíciles de estimar a partir de las geoformas conservadas en la fuente. En este sentido, la información documentada aquí permite no solo entender mejor la dinámica de las AE, sino estimar el peligro y alcance de futuros eventos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Departamento de Geociencias, a la Facultad de Ciencias, y a la Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, por el apoyo logístico y académico para la realización de este trabajo. Igualmente agradecen a ISAGEN por suministrar los datos de topografía de alta resolución y por apoyo logístico en campo. Los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos contribuyeron a mejorar el trabajo.

REFERENCIAS

- Campbell, C. S. 1989. The stress tensor for simple shear flows of a granular material. *Journal of Fluid Mechanics*, 203: 449-473.
- Francis, P., and Oppenheimer, C. 2004. *Volcanoes*. Oxford University Press, New York, 521p.
- Grand, M., y Handszer, A. 1989. Naturaleza y dinámica de un flujo piroclástico en la zona de Nereidas, departamento de Caldas. Trabajo de Grado, Universidad de Caldas, 136 p.
- Shea, T., van Wyk de Vries, B., and Pilato, M. 2008. Emplacement mechanisms of contrasting debris avalanches at Volcán Mombacho (Nicaragua), provided by structural and facies analysis. *Bulletin of Volcanology*, 70: 899-921.
- Shea, T., and van Wyk de Vries, B. 2010. Collapsing volcanoes: the sleeping giants' threat. *Geology Today*, 26: 72-77.
- Takarada, S., Ui, T., and Yamamoto, Y. 1999. Depositional features and transportation mechanism of valley-filling Iwasegawa and Kaida debris avalanches, Japan. *Bulletin of Volcanology*, 60: 508-522.
- Thouret, J.C., Cantagrel, J., Salinas, R., and Murcia, A. 1990. Quaternary eruptive history of Nevado del Ruiz (Colombia). In: S.N. Williams (Ed), *Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, I*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41: 225-251.
- Triola, M. 2006. *Estadística*. Pearson, México, 872p.
- Ui, T., Takarada, S., and Mitsuhiro, Y. 2000. Debris avalanches. In: *Encyclopedia of Volcanoes*, Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S. R., Rymer, H., and Stix, J. (Eds), Academic Press, San Diego, 1442p.
- United States Geological Survey-USGS. 1981. The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, Geological Survey Professional Paper 1250. Lipman, P.W., and Mullieaux, D.R (Eds). United States Government Printing Office, Washington D. C, 873p.
- Yoshida, H., Sugai, T., and Ohmori, H. 2010. Longitudinal downsizing of hummocks by the freely-spreading volcanic debris avalanches in Japan. *The Quaternary Research*, 49: 55-67.
- Yoshida, H., Sugai, T., and Ohmori, H. 2012. Size-distance relationships for hummocks on volcanic rockslide-debris avalanche deposits in Japan. *Geomorphology*, 136: 76-87.

Trabajo recibido: diciembre 20 de 2014

Trabajo aceptado: septiembre 18 de 2015

Manuscrito publicado en internet: noviembre 20 de 2015