

Simulación de flujos Piroclásticos en el Volcán Galeras con el Código TITAN2D

Simulations of Pyroclastic Flows in Galeras Volcano using Titan2d Code

Ana María García Gallo¹, Hugo Fernando Murcia Agudelo^{*1},

Gloria Patricia Cortés Jiménez¹ & Carlos Andrés Laverde²

¹Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales,

Avenida 12 de octubre #15-47, Manizales, Colombia.

²Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, Calle 5B # 2-14, Loma de Cartagena, Popayán, Colombia.

*Autor correspondiente: hugofmur@yahoo.com. Fax: 576-8843018

Ana María García Gallo, Hugo Fernando Murcia Agudelo, Gloria Patricia Cortés Jiménez & Carlos Andrés Laverde (2011): Simulación de Flujos Piroclásticos en el Volcán Galeras con el Código Titan2d. GEOLOGÍA COLOMBIANA, Edición Especial, 36 No. 1, pp 135-162

Manuscrito recibido: 7 de julio 2011; aceptado: 16 de agosto 2011

Resumen

Durante los 4.500 años de formación del volcán Galeras, se diferencian seis períodos mayores de actividad eruptiva, dentro de los cuales el evento más común son los flujos piroclásticos, generados a partir del colapso parcial de una columna vulcaniana. Teniendo en cuenta diferentes escenarios de amenaza relativa, además del comportamiento del volcán y la magnitud de sus erupciones, en este trabajo se evalúa la distribución y alcance de posibles flujos piroclásticos en erupciones futuras, utilizando el código TITAN2D.

La aplicación del código en el volcán Galeras ayuda a representar la distribución de flujos piroclásticos recreados en diferentes escenarios, teniendo como base: la morfología actual del volcán y parámetros físicos, acorde con las condiciones relacionadas con el origen y evolución de los flujos, así como su interacción con la superficie sobre la cual fluye. El código provee una base para establecer las áreas que pueden ser afectadas por diferentes escenarios (recreados en 96 simulaciones), generados a partir del colapso de una columna vulcaniana a diferentes alturas, combinando volúmenes de 1×10^5 , 5×10^5 y 2×10^6 m³, con ángulos de fricción basal de 10, 12, 14, y 16°, y con direcciones iniciales de flujo, con origen en el cono activo, cada 45° alrededor del volcán Galeras. Los resultados muestran que uno de los parámetros que mayor influencia tiene en la distribución y alcance de los flujos piroclásticos simulados con el código TITAN2D, es el ángulo de fricción basal, como lo han demostrado autores en trabajos anteriores. Específicamente, al incrementar este valor, disminuye el alcance de los flujos piroclásticos. Para el caso particular del volcán Galeras, el incremento de 2° en el ángulo de fricción basal resulta en una disminución entre 1 y 2 km en el recorrido y alcance del flujo simulado.

Además del ángulo de fricción basal, el volumen del flujo y su velocidad inicial son los valores que mayor influencia tienen en el recorrido y depositación final de los flujos simulados. Igualmente, el tiempo máximo de simulación y el ángulo de fricción interno son parámetros que tienen una influencia importante en la evolución de los flujos, al determinar el momento de detenerse. Para el caso del volcán Galeras, el volumen es un parámetro importante, considerando que durante la actividad reciente del volcán Galeras (desde 1989 hasta el presente) sólo una porción del domo ha sido destruido en un solo episodio eruptivo, y que no se esperarían valores mayores a 5×10^5 m³ para ser involucrados en la generación de flujos piroclásticos; **en este sentido**, se logró determinar que **los flujos simulados con 1×10^5 m³** permanecen confinados dentro del anfiteatro, mientras que en algunos simulados con 5×10^5 m³, una porción del flujo sobrepasa hacia el noreste del mismo. **En cuanto** al tiempo de simulación utilizado, éste fue suficiente para no detener el flujo con velocidades mayores a 4 m/s, valor a partir del cual el avance del flujo en la simulación es mínimo.

Palabras clave: Volcán Galeras, Simulaciones con TITAN2D, Flujos piroclásticos, Erupciones vulcanianas.

Abstract

During the 4500 years of Galeras volcano evolution, six major periods of eruptive activity were registered, being the pyroclastic flows, originated from partial collapse of a vulcanian column, the most common event. By using different scenarios of relative hazard and considering the volcano behavior and the eruption magnitudes, this work evaluates the distribution and the maximum runout of pyroclastic flows in future eruptions, through TITAN2D code.

The assessment of TITAN2D code in Galeras volcano is a work that helps to illustrate the flow distribution originated from different scenarios, taking in account the recent morphology of the volcano and the physic parameters that represent the conditions related to the flow origin and its evolution as well as the interaction between the flow and the underling surface. The code provides a base to establish the affected areas by diverse scenarios (simulated in 96 simulations) generated from column collapse to different high, combining 1×10^5 , 5×10^5 and 2×10^6 m³ volumes with basal friction angle of 10, 12, 14 and 16°, and origin every 45° around the crater. The results of the simulations show that basal friction angles values is the parameter that most influence has had in the inundated area by the flow. The increasing of the basal friction angle values results in a decrease of the pyroclastic flow simulated runout. Specifically, a 2° increment in the basal friction angle produces in Galeras volcano a decrement between 1 and 2 km of the simulated flow runout.

Besides basal friction angle, the flow volume and its initial velocity are the values that most influence have in the final simulated flow runout and deposition. Equally, the deposition maximum time and the internal friction angle, are parameters that have an important influence in the flow evolution to define the time to stop it. For Galeras volcano, the volume is an important consideration, due to during its recent activity (since 1989 to nowadays) just one part of dome has been destroyed per eruptive episode and it is not expected volumes higher than 5×10^5 m³ involved in the pyroclastic flows generation; in this way, it was possible to evidence that all the pyroclastic flows simulated with 1×10^5 m³ volume, stay confined inside the caldera, while some of them, simulated with 5×10^5 m³ volume, exceed toward the northeast the external crater rim.

Keywords: Galeras volcano, TITAN2D simulations, Pyroclastic flows, Vulcanian eruptions.

INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el incremento de la capacidad computacional, las simulaciones numéricas de eventos volcánicos son comunes en relación a la definición de un solo evento o múltiples escenarios (Iverson et al. 1998; Canuti et al. 2002; Bonadonna et al. 2005, Magill et al. 2006). Específicamente, la simulación de flujos volcánicos (corrientes de densidad piroclástica, flujos y oleadas piroclásticas, avalanchas de escombros, lahares) es un tema de análisis e investigación a nivel mundial, debido al interés de reproducir sobre la morfología actual de un volcán, la evolución de tales flujos en caso de una erupción o de un evento asociado a ellos. No obstante, para determinar el peligro volcánico de una región se requiere, aún más, del reconocimiento del tipo y magnitud de los eventos pasados, distribución de sus depósitos y aproximaciones sobre la recurrencia (Murcia 2008). Posteriormente, a partir de la caracterización de los depósitos y la inferencia acerca de los flujos que los origina, es posible realizar una evaluación del comportamiento futuro de flujos volcánicos en términos de la probabilidad de distribución a partir de escenarios potenciales.

Teniendo en cuenta lo anterior, además de un modelo de elevación digital que representa la morfología actual, en este trabajo se presenta la distribución de los flujos piroclásticos a partir del colapso de columnas vulcanianas desde el cráter actual del volcán Galeras, realizando simulaciones con un código computacional versátil como es el código TITAN2D. Para el análisis se tuvo en cuenta la interpretación de los flujos piroclásticos producidos en el pasado (v. Calvache 1990), el registro del último proceso eruptivo que viene evolucionando desde 1989 y el conocimiento histórico e instrumental de erupciones en otros volcanes con comportamientos similares que han mostrado de una forma directa la evolución de las erupciones vulcanianas. Adicionalmente se realiza una evaluación del comportamiento del código a partir de los resultados obtenidos, en términos de parámetros como ángulo de fricción basal, y tiempo y volumen simulados.

VOLCÁN GALERAS

El volcán Galeras se localiza en el sur-occidente de Colombia, en el departamento de Nariño, 9 km al

occidente de su capital, la Ciudad de San Juan de Pasto, en las coordenadas $1^{\circ} 13' 43,8''$ N y $77^{\circ} 21' 33''$ W, con una altura de 4276 msnm. Entre las vías de acceso principales al área de influencia del volcán se encuentran la vía Circunvalar, que rodea totalmente el volcán comunicando las poblaciones de Catambuco, Yacuanquer, Consacá, Sandoná, La Florida, Nariño y Genoy con la capital; igualmente, se cuenta con un camino de herradura, conocido como Camino Real, que comunica San Juan de Pasto con la población de Consacá. En la zona de influencia del volcán se encuentran, además de Pasto con 312,759 habitantes (ubicado a 9 km del cráter), las poblaciones de Nariño con 3215 habitantes (a 7.3 km del cráter), La Florida con 1879 habitantes (a 10 km del cráter), Sandoná 10,780 habitantes (a 14 km del cráter), Consacá con 1712 habitantes (a 11.4 km del cráter), Yacuanquer (a 12.3 km del cráter), con 2431 habitantes y Santa Bárbara (a 9.2 km del cráter) con 2689 habitantes (DANE 2005), entre otras pequeñas poblaciones rurales (Figura 1).

De acuerdo a Calvache (1995) el volcán Galeras hace parte de un Complejo Volcánico (CVG) que yace dentro de un graben formado entre las Cordilleras Central y Occidental, conocido específicamente cómo la depresión interandina Cauca-Patía. El CVG está constituido por varias calderas pequeñas, conos de escorias y un volcán compuesto denominado volcán Galeras, que es el cono actualmente activo del complejo; su evolución está representada por la intercalación de eventos constructivo-destructivos que reflejan su historia. Según Calvache (1995), la evolución del CVG está definida por varias etapas establecidas de acuerdo a diferencias en las sucesiones volcánicas, agrupadas con base en particularidades morfológicas como grado de erosión, características glaciales, grado de erosión glacial, cambios abruptos de pendiente, posición estratigráfica relativa del centro eruptivo sospechado, litología y edad. Las etapas más antiguas son las denominadas Cariaco (1.1 Ma) y Pamba (<700 ka) que representan la actividad más occidental del Complejo, seguida de Coba Negra (560 ka), Jenoy (150-40 ka), Urcunina (12-5 ka) y Galeras (<4.5 ka años) que representa la actividad más reciente del mismo. La etapa Cariaco está representada por series de depósitos de flujos de lava, flujos de bloques-ceniza e ignimbritas, intercalados con depósitos de avalanchas de escombros; los productos de la actividad durante la etapa Pamba son depósitos de pómez soldados e intercalaciones de flujos de lava

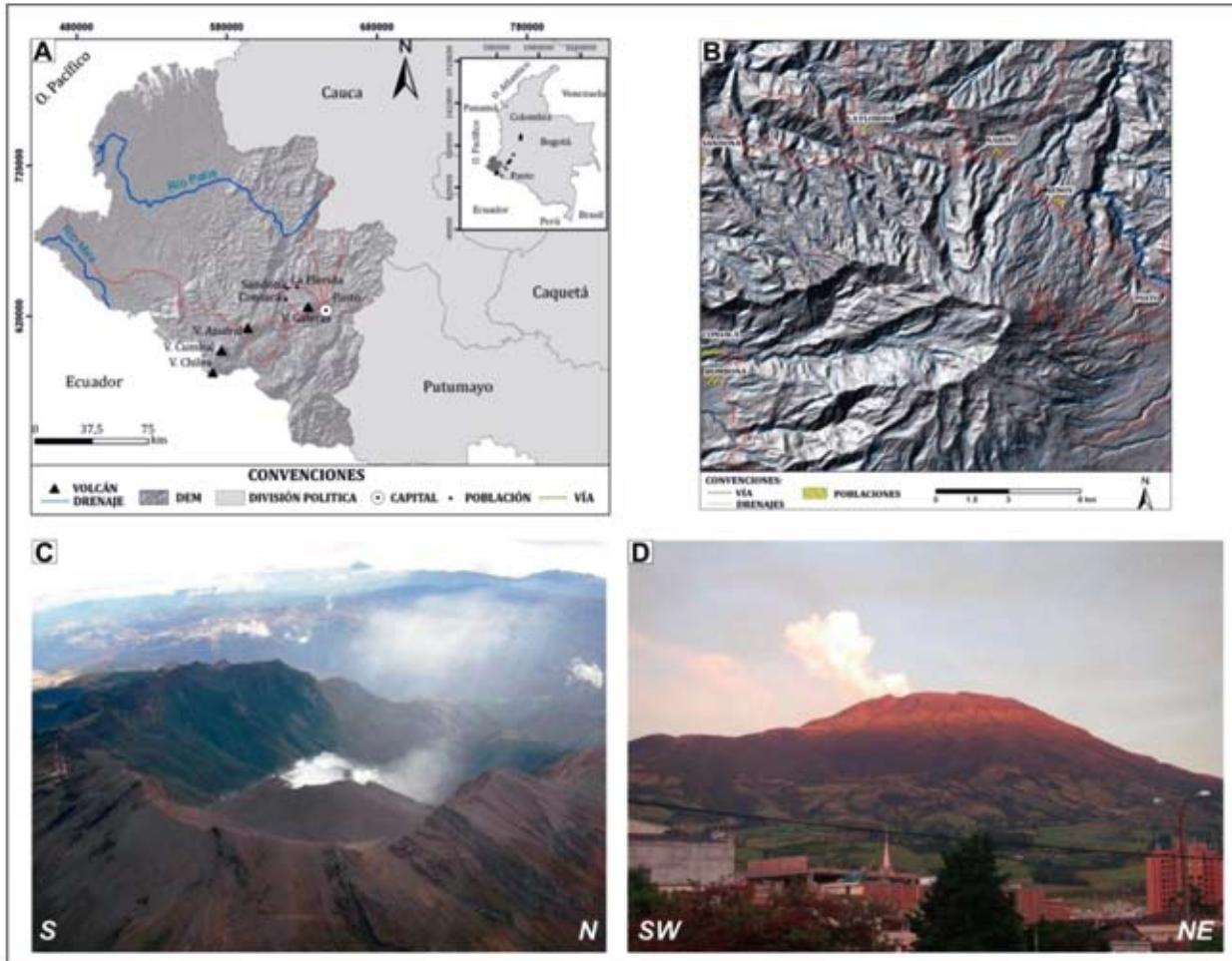


Figura 1. A. Localización del volcán Galeras dentro del departamento de Nariño. Nótese la vía circunvalar, la vía Panamericana hacia el norte (la cual conduce a Popayán), una vía al occidente (conduce a Tumaco), y las principales poblaciones aledañas. B. Mapa de sombras del volcán Galeras donde se observan las poblaciones aledañas sobre la vía Circunvalar: Genoy, Nariño, La Florida, Sandoná, Consacá, Bomboná y Pasto. C. Fotografía del Complejo Volcánico Galeras. Obsérvese el cráter actual del volcán Galeras dentro del anfiteatro del Complejo (imagen tomada de <http://intranet.ingeominas.gov.co/pasto/>). D. Fotografía del Complejo Volcánico Galeras, tomada desde la ciudad de Pasto (imagen tomada de <http://intranet.ingeominas.gov.co/pasto/>).

Figure 1. A. Location of Galeras volcano inside of Nariño Department. Note the Circunvalar road, Panamericana road toward North (leading to Popayán), a road toward West (leading to Tumaco) and the main neighboring towns. B. Hillshade map of Galeras volcano region, showing neighboring towns over the Circunvalar road: Genoy, Nariño, La Florida, Sandoná, Consacá, Bomboná and Pasto. C. Photography of Galeras Volcanic Complex. Note the current crater of Galeras volcano, inside of the amphitheatre of the Complex (image taken of <http://intranet.ingeominas.gov.co/pasto/>). D. Photography of Galeras Volcanic Complex taken from Pasto city (image taken of <http://intranet.ingeominas.gov.co/pasto/>).

y flujos de bloques y ceniza; Coba Negra es la etapa más extensa del CVG, con secuencias de flujos de lava, unidades gruesas de flujos de escoria-pómez y ceniza con algunos depósitos de caídas; Genoy representa una secuencia de flujos de lava alternados con depósitos de flujos de bloques y ceniza, y depósitos de caída de ceniza; Urcunina, etapa en que colapsó la cima debido a la inestabilidad producida por la actividad hidrotermal, formando un anfiteatro abierto hacia el oeste, se caracteriza por la sucesión de flujos de lava, depósitos de flujos de bloques y ceniza, y avalanchas de escombros depositados al oeste del Complejo, hacia el río Azufral. Finalmente la etapa Galeras, que enmarca el cono actualmente activo, se caracteriza por estar formado por la alternancia de flujos piroclásticos y flujos de lava de composición andesítica y volúmenes relativamente pequeños.

Específicamente, Calvache (1990) define seis erupciones mayores para el volcán Galeras (i.e. etapa Galeras) diferenciadas por miembros, en las cuales el evento más común son los flujos piroclásticos, aunque también

se hayan generado flujos de lava, caídas piroclásticas, laharés, ondas de choque y proyectiles balísticos.

Los miembros son: miembro 4500 a AP, miembro 4000 a AP, miembro 2900 a AP, miembro 2300 a AP, miembro 1100 a AP y el miembro 1866. Durante los ~4500 años de la evolución del Galeras, se estima que ha depositado un reducido volumen de 0.7 km³ (en comparación con los depósitos de las etapas anteriores), en erupciones caracterizadas por ser explosivas, intermitentes y con columnas de baja altura catalogadas como vulcanianas (Calvache 1990). Durante el periodo eruptivo actual (desde 1989), la actividad eruptiva se ha caracterizado por la extrusión y destrucción explosiva de domos, la generación ondas de choque, la producción de columnas eruptivas con un máximo de 12 km de altura desde el cráter, la dispersión de ceniza a más de 200 km al sur, y proyectiles balísticos que han ocasionado incendios en las laderas del volcán. Tales erupciones son típicas vulcanianas, seguidas de construcción de nuevos domos que son los involucrados en parte por una nueva erupción (Figura 2).

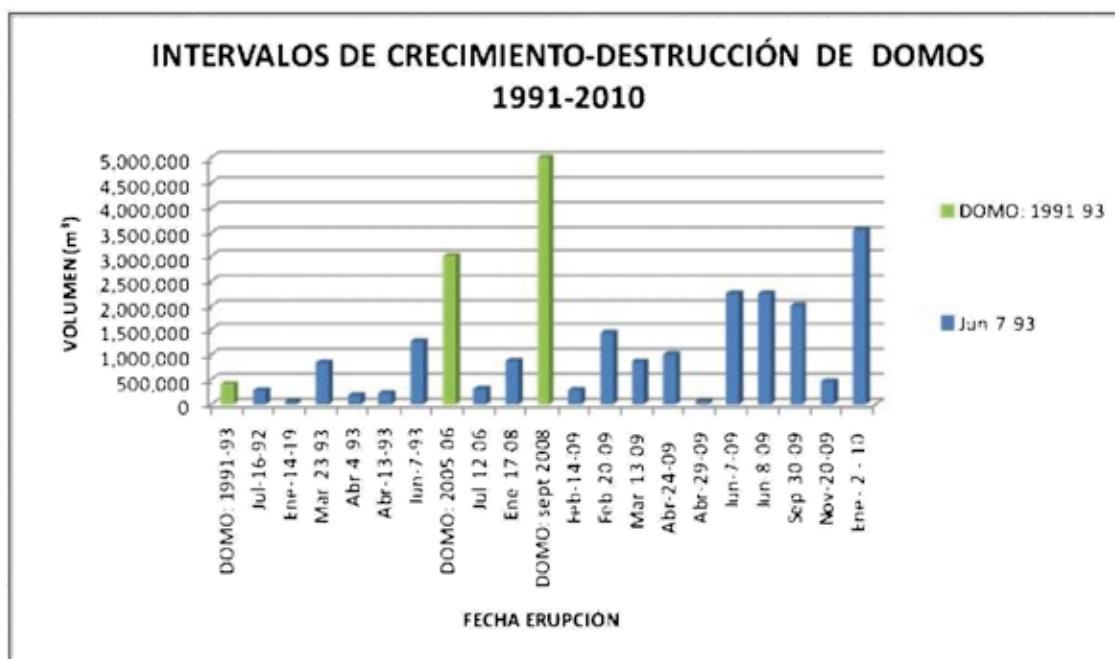


Figura 2. Periodos de crecimiento y destrucción (erupción) de domos en el volcán Galeras, desde el año 1991 hasta 2010.

Figure 2. Growth and destruction (eruption) periods for the Galeras volcano lava domes, since 1991 to 2010.

METODOLOGÍA

TITAN2D es un código desarrollado para simular flujos granulares sobre modelos de elevación digital de terrenos naturales, almacenados en un software de Sistema de Información Geográfica (GIS por sus siglas en inglés) de código abierto denominado GRASS (Patra et al. 2005). Este código fue desarrollado por el Grupo de Investigación de Flujos de Masa (GMFG por sus siglas en inglés) de la Universidad Estatal de New York en Buffalo – EEUU. TITAN2D es idóneo para simular flujos de masa “secos”, como flujos piroclásticos o avalanchas de escombros; no obstante, con la combinación correcta de parámetros, pueden simularse flujos con comportamientos similares a lahares (Cronin et al. 2004; Murcia 2008), teniendo en cuenta que actualmente no existe la posibilidad de adicionar cantidad de agua en los parámetros que definen las simulaciones.

Los resultados de salida generan una representación dinámica que finaliza con la distribución y espesores del depósito resultante (TITAN2D User Guide 2007), pudiéndose obtener también velocidades de flujo y alcance de los mismos en términos de recorrido, junto con las alturas del material depositado sobre el terreno. Los parámetros necesarios más importantes para la simulación incluyen los datos de densidad de malla del DEM, el volumen del flujo a simular, el tiempo de simulación, el ángulo de fricción interno dentro del flujo, el ángulo de fricción basal con el substrato representado por el DEM, la localización del inicio del flujo y la dirección inicial del mismo.

Parámetros necesarios

Para simular flujos piroclásticos con el código TITAN2D, se debe definir una serie de parámetros que representan escenarios eruptivos probables, teniendo como base una magnitud definida de un posible flujo volcánico. Tales parámetros corresponden al volumen, velocidad, coordenadas iniciales, entre otros inherentes al flujo, y que en conjunto ilustran o representan el comportamiento ante unas características morfológicas dadas; y unos parámetros de entrada específicos de flujos volcánicos dentro de un rango de eventos conocidos o geológicamente posibles. El código TITAN2D se ha empleado para la simulación de flujos piroclásticos en diferentes volcanes como son el volcán Misti, Perú (Delaite et

al. 2005) y el Little Tahoma Peak, EE.UU. (Sheridan et al. 2005), el volcán Colima, México (Bursik et al. 2005; Rupp et al. 2006), el volcán Chichón, México (Macías et al. 2008), el volcán Cerro Machín, Colombia (Murcia et al. 2010), el Mt. Taranaki, Nueva Zelanda (Procter et al. 2010), en donde los resultados han esclarecido las incertidumbres en la definición de parámetros introducidos para la simulación razonable de flujos con condiciones locales (Procter et al. 2010). TITAN2D opera en un sistema operativo LINUX; y el usuario puede controlar la simulación a través de los siguientes datos y parámetros de entrada:

Modelo de Elevación Digital (DEM)

Según Stevens et al. (2002), el desarrollo de un DEM apropiado provee la base para el modelamiento del flujo; en este sentido, un DEM con mayor resolución (5-30 m) genera representaciones más precisas, teniendo en cuenta que el DEM puede alterar significativamente los resultados de las simulaciones. Por ejemplo, en la simulación de flujos piroclásticos en el Mt Tanaraki, Nueva Zelanda se empleó un DEM con dimensión de celda de 20 m (v. Procter et al. 2010), mientras que para el volcán Cerro Machín se empleó un DEM con resolución de 50 m (v. Murcia et al. 2010). Para las simulaciones en el Galeras, se empleó un DEM con una resolución de 6 m, el cual fue generado a partir de una imagen de radar del sensor GEOSAR de 3 m de resolución (suministrada a INGEOMINAS por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC -). Es importante mencionar que el DEM fue re-muestreado a 6 m teniendo en cuenta la capacidad computacional con que se contaba para el desarrollo de las simulaciones. El DEM, necesario para ser usado en TITAN2D, fue depurado empleando herramientas de análisis espacial del software ArcGIS (versión 9.2) y exportado al formato nativo del programa GRASS, que soporta tanto información tipo raster como vectorial y posee herramientas de procesamiento digital de imágenes. El sistema de georeferenciación requerido es UTM - WGS84, siendo la zona 18N la que corresponde al área de estudio.

Tiempo máximo de simulación y número máximo de pasos

Estos valores, son la cuantificación necesaria para que el material fluya hasta un tiempo determinado por una cantidad específica de segundos (tiempo

máximo de simulación) o un número específico de pasos computacionales (número máximo de pasos); la simulación se detiene cuando alguno de estos dos umbrales es superado. La importancia de estos valores radica en la necesidad de detener el flujo cuando la velocidad sea muy baja (i.e. el flujo esté casi en reposo) para no desperdiciar tiempo de cálculo, o de dejarlo avanzar hasta que se alcance el equilibrio estático. La definición de este parámetro está directamente relacionado a la velocidad promedio final del flujo, en donde diferentes experimentos han evidenciado que su avance es mínimo cuando la velocidad es menor a 4 m/s (v. Murcia et al. 2010). En el presente trabajo, este valor fue el escogido para definir el tiempo de simulación. Experimentalmente se comprobó que con valores menores el flujo está muy cercano a su reposo.

Ángulo de fricción interna

Este valor corresponde a un parámetro físico directamente relacionado con la evolución del flujo volcánico. Su definición representa la fricción resultante de la interacción entre las partículas dentro del flujo (TITAN2D User Guide 2007). Su valor parece no tener mayor influencia ni en el recorrido del flujo ni en su distribución, como lo demostró Sheridan et al. (2005). Aunque no existe un valor específico, Procter et al. (2010) sugiere un valor de 30° , como fue igualmente utilizado por Macías et al. (2008) para realizar simulaciones de flujos piroclásticos en el volcán Chichón, México; mientras que Schilling (1998) y Oramas-Dorta et al. (2007) lo calibraron utilizando tiempos de viaje y áreas de inundación de flujos conocidos. Para el presente trabajo se empleó, como lo sugiere Murcia et al. (2010), un valor constante de 34° en todas las simulaciones, que es 1° por encima del ángulo de reposo natural (v. Walker, 1989).

Ángulo de fricción basal

Este valor corresponde a la pendiente mínima que debe tener una superficie inclinada para que el material colocado sobre ésta, se deslice por su propio peso desde su posición estática (TITAN2D User Guide 2007). Su valor, aunque puede ser variable, puede calcularse a partir del coeficiente de Heim H/L (Heim 1932) con base en el registro geológico, o a través de valores específicos para cada superficie. Por ejemplo, para el volcán Cerro Machín este valor fue definido en 15° , de acuerdo a experimentaciones del GMFG y a la distribución final

de los depósitos (Murcia et al. 2010); para el volcán Chichón, México, de $10\text{--}12^{\circ}$ para recrear los flujos ocurridos en la erupción de 1982 (Macías et al. 2008); y para el Mt Taranaki, Nueva Zelanda, entre 15 y 25° con base en la conclusión de un estudio donde se realizaron simulaciones con todas las combinaciones posibles de ángulos de fricción basal e interna a intervalos de 5° , evidenciándose que las áreas inundadas y la distancia recorrida de los flujos según el registro geológico es similar a los resultados obtenidos con estos (Procter et al. 2010). Para el caso de volcán Galeras, estos valores se definieron por correlación de valores obtenidos experimentalmente para diferentes superficies (Stinton et al. 2004; Tabla 1) en donde las superficies con depósitos glacio-fluviales ($9\text{--}17^{\circ}$), son las más semejante a las superficies encontradas en las laderas del volcán Galeras.

Tabla 1. Ángulos de fricción basal propuestos por Stinton et al. (2004), de acuerdo al coeficiente de fricción basal formado entre un flujo y la superficie sobre la que se desliza.

Table 1. Bed friction angles proposed by Stinton et al. (2004), according to bed friction coefficient formed between a flow and the surface over which this flow is sliding.

Material / Superficie	Coeficiente de fricción basal	Ángulos de fricción basal
Hielo glaciar y nieve	0.037-0.50	2-26°
Depósitos aluviales	0.10-0.20	6-11°
Pendientes con vegetación	0.21-0.75	12-37°
Depósitos glaciofluviales	0.15-0.30	9-17°
Roca fresca	0.38-0.95	21-44°

Volumen simulado

Teniendo en cuenta que definir un rango de volúmenes simulados es un método que abarca y compensa la incertidumbre acerca del volumen de eventos posibles (Procter et al. 2010), para realizar las simulaciones en el volcán Galeras se definieron valores con base en los volúmenes reportados para los depósitos de flujos piroclásticos, tanto de este volcán como otros

con erupciones vulcanianas similares. Para el volcán Galeras se han reportado volúmenes entre $1*10^6$ y $2.9*10^6 \text{ m}^3$ (v. Calvache et al. 1997), para el volcán Colima, México, entre $4.5*10^5$ y $10*10^6 \text{ m}^3$ (Saucedo et al. 2005), y para el volcán Soufrière Hills, Monserrat de $7.0*10^6 \text{ m}^3$ (Druitt et al. 2002). Para el caso de las simulaciones por colapso de columna vulcaniana desde el cráter actual del Galeras, se simularon volúmenes de $1*10^5$, $5*10^5$ y $2*10^6 \text{ m}^3$, teniendo en cuenta que el valor mínimo es un valor muy probable en términos de dinámica eruptiva del volcán y que el valor máximo representa una erupción de gran magnitud.

Tasa y Tiempo de extrusión

La tasa de extrusión (expresada en m/s) es la tasa media a la que se expulsa material activamente desde la base del terreno o “punto” de emisión; inicialmente, el material es expulsado al doble de la tasa media y luego decrece linealmente hasta llegar a cero (TITAN2D User Guide 2007), dependiendo del valor del tiempo de extrusión. Estos dos parámetros están directamente relacionados al volumen que se simulará a través de la ecuación $V = A * T_{\text{ext}} * t_{\text{ext}}$ donde: V = Volumen a simular; A = es el área del cráter a través del cual el material será expulsado, T_{ext} es la tasa de extrusión del material; t_{ext} es el tiempo durante el cual el material es activamente extruido. Para este caso no existen estudios directos sobre los valores a utilizar, por lo que su definición queda a criterio del investigador. Igualmente, trabajos publicados, no mencionan el valor utilizado. En el caso del volcán Galeras se utilizaron valores de tasa de extrusión de 7.5 m/s para volúmenes de $1*10^5 \text{ m}^3$ y de 10 m/s para volúmenes de $5*10^5$ y $2*10^6 \text{ m}^3$, y valores de tiempo de extrusión de 5 segundos para volúmenes de $1*10^5$ y $5*10^5 \text{ m}^3$ y 20 segundos para volúmenes de $2*10^6 \text{ m}^3$.

Velocidad inicial

La velocidad inicial probable del flujo, asumiendo una altura de colapso, es posible determinarla partiendo del concepto de línea de energía de Hsü (1975), mediante la relación entre la energía cinética ($E_c = \frac{1}{2}mv^2$) y la energía potencial ($E_p = mgh$), siendo la velocidad equivalente a $v = \sqrt{2gh}$, donde g corresponde a la aceleración debida a la gravedad y h a la altura del colapso de la columna (Walker, 1989; Murcia et al. 2010). En erupciones vulcanianas, los colapsos de columna son relativamente bajos, como fue aplicado por ejemplo para el volcán Campi Flegrei, Italia, en donde se utilizaron alturas de colapso de columna

de 100 m (VEI=3) y 300 m (VEI=4). Un trabajo experimental de Walker (1989) realizado en el volcán Galeras, menciona alturas de colapso de 300, 600 y 900 m. Sin embargo, para el presente trabajo, se consideraron las erupciones típicas del volcán Galeras y volúmenes relativamente pequeños en donde el colapso de columna es más bajo. De esta manera se definieron alturas de colapso de 40, 50 y 100 m con volúmenes de $1*10^5$, $5*10^5$ y $2*10^6 \text{ m}^3$ respectivamente, obteniendo velocidades iniciales de 28, 30 y 45 m/s. En este punto es importante aclarar que estas velocidades solamente corresponden a las iniciales del flujo y no a las del recorrido del mismo, que realmente presentan valores mucho más bajos, teniendo en cuenta principalmente el efecto de disminución de la velocidad debido a los ángulos de fricción (principalmente el basal, como lo muestran los archivos de salida del TITAN2D durante el desarrollo de la simulación). Velocidades como las iniciales, no son posibles de obtener para el recorrido de flujos piroclásticos de estos volúmenes (al menos en el planeta Tierra). En la Figura 3, se presenta una ilustración del origen de los flujos en un corte a escala del volcán Galeras en dirección N-S, en donde se relaciona la altura de colapso de la cual depende la velocidad inicial.

Espesor mínimo del depósito final

El espesor final del depósito simulado varía dependiendo de la topografía, el material del substrato y el volumen inicial del flujo, entre otros. No obstante, un espesor mínimo del flujo debe ser especificado en el código para evitar que las celdas en la margen exterior del flujo almacenen una capa de material muy delgada, físicamente ficticia como lo demostró Stinton (2007). Para realizar simulaciones de flujos piroclásticos en el volcán Cerro Machín empleando volúmenes en el orden de 10^8 m^3 , se utilizó un valor del espesor mínimo de 1 m (Murcia et al. 2010). Para las simulaciones en el volcán Galeras se empleó un valor de 0.2 m considerando que el volumen simulado en el volcán es relativamente pequeño.

Coordenadas de origen y dirección de la simulación

Esta opción permite que el usuario defina las coordenadas de un punto a partir del cual se origina el flujo; este punto representa el punto central del cráter a través del cual el material piroclástico es activamente expulsado a la superficie, durante el tiempo que se especifique,

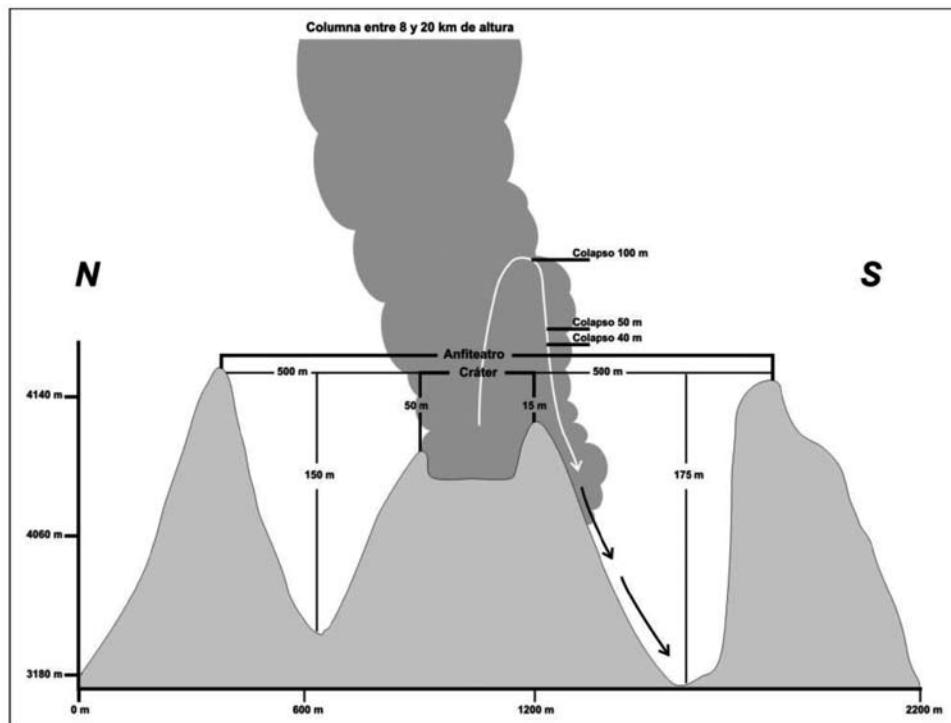


Figura 3. Sección transversal Norte-Sur del volcán Galeras, en la que se muestran algunos parámetros morfométricos y se ilustran los lugares de origen de los flujos piroclásticos simulados.

Figure 3. Galeras volcano North-South cross section, showing some morphometric parameters and the sources for the simulated pyroclastic flows.

dependiendo del volumen que se deseé simular; a partir de este punto se establece la dirección de la simulación que, en este caso, se definió de acuerdo a posibles direcciones de colapso de columna eruptiva (Figura 3). Los orígenes fueron definidos cada 45° sobre el cráter, con direcciones perpendiculares a la dirección del eje mayor de la elipse que representa el cráter.

RESULTADOS

Para representar los resultados de las simulaciones realizadas en el volcán Galeras con el código TITAN2D, se emplearon los programas para manejo de Sistemas de Información Geográfica GRASS (versión 6.0) y ArcGIS (versión 9.2). Los gráficos resultantes fueron divididos de acuerdo a las posibilidades de representación (recorrido de flujos, distribución de depósito y espesor, tanto durante el recorrido como durante la depositación), teniendo en cuenta que los resultados arrojados por el código muestran puntos en una malla computacional con las coordenadas del punto en X y Y, la altitud, el espesor del depósito y el momentum en X y Y. Para el volcán Galeras

se realizaron 96 simulaciones, variando los parámetros más importantes para el inicio del flujo como se describió en el ítem anterior. Cada escenario está definido por la combinación de una serie de parámetros variables, como son: la dirección preferencial de salida del flujo ($0, 45, 90, 135, 180, 225, 270$ y 315°), el volumen involucrado ($1 \times 10^5, 5 \times 10^5$ y $2 \times 10^6 \text{ m}^3$), la velocidad inicial (28, 30 y 45 m/s) y el ángulo de fricción basal (10, 12, 14 y 16°). Los demás parámetros de simulación, importantes para el desarrollo del flujo y su depositación, se consideraron igualmente como se describió en el ítem anterior. Cada una de las simulaciones es un escenario posible que, en este caso, se representó uniendo tanto el recorrido del flujo como la distribución de los depósitos.

Recorrido del flujo vs. Tiempo de simulación

Los archivos de salida del código TITAN2D permiten obtener, en tiempos expresados en segundos, la distribución de acuerdo al avance del flujo. Con el objetivo de representar el recorrido del flujo y su relación con respecto al tiempo para cada simulación, se graficaron

los archivos de salida de distribución del flujo a los 10, 50, 100 segundos y el archivo que representa el final de la simulación (velocidad promedio menor a 4 m/s) para los volúmenes de $1*10^5$ y $5*10^5$ m³ (Figuras 4 y 5). Para el volumen de $2*10^6$ m³ se graficaron los archivos de salida a los 10, 50, 100 y 210 segundos (Figura 6). Todas las representaciones tienen un ángulo de fricción basal de 12° y una dirección preferencial de salida del material de 180°, ya que es la dirección en que podemos visualizar más fácilmente el alcance del flujo.

Volumen del flujo vs. Ángulo de fricción basal

Con el objetivo de evaluar el contraste que existe en la distribución de los flujos piroclásticos al variar el ángulo de fricción basal y conservar el volumen, se graficaron los resultados obtenidos para volúmenes de $1*10^5$, $5*10^5$ y $2*10^6$ m³, en diferentes direcciones (0°, 45°, 90°, 135°, 225°, 270° y 315°) variando para cada uno de ellos el ángulo de fricción basal (10°, 12°, 14° y 16°). Los resultados obtenidos para cada volumen fueron sobrepuertos sobre un mismo DEM con el objetivo de representar mejor su variación.

Flujo con volumen de $1*10^5$ m³ vs. ángulo de fricción basal

Los flujos piroclásticos con volumen de $1*10^5$ m³ son los más pequeños simulados en el presente trabajo. Tales

simulaciones (32 con este volumen) fueron dirigidas empleando ocho ángulos iniciales, con el objetivo de obtener un amplio espectro de posibilidades de zonas afectadas. De esta manera, se presentan en ocho imágenes (Figura 7) los resultados de las simulaciones en cada una de las direcciones escogidas para la salida del material, resaltando en diferentes colores las zonas del recorrido de los flujos con respecto a la variación en el ángulo de fricción basal.

Flujo con volumen de $5*10^5$ m³ vs. ángulo de fricción basal

32 simulaciones con volúmenes de $5*10^5$ m³ fueron realizadas, en ocho direcciones a partir del cráter del volcán Galeras. En la Figura 8, se presentan ocho imágenes con los resultados de las simulaciones, resaltando en diferentes colores las zonas del recorrido de los flujos con respecto a la variación en el ángulo de fricción basal.

Flujo con volumen de $2*10^6$ m³ vs. ángulo de fricción basal

32 simulaciones con volúmenes de $2*10^6$ m³, fueron realizadas en ocho direcciones a partir del cráter del volcán Galeras. En la Figura 9, se presentan ocho imágenes de los resultados de las simulaciones resaltando en diferentes colores las zonas del recorrido de los flujos con respecto a la variación en el ángulo de fricción basal.

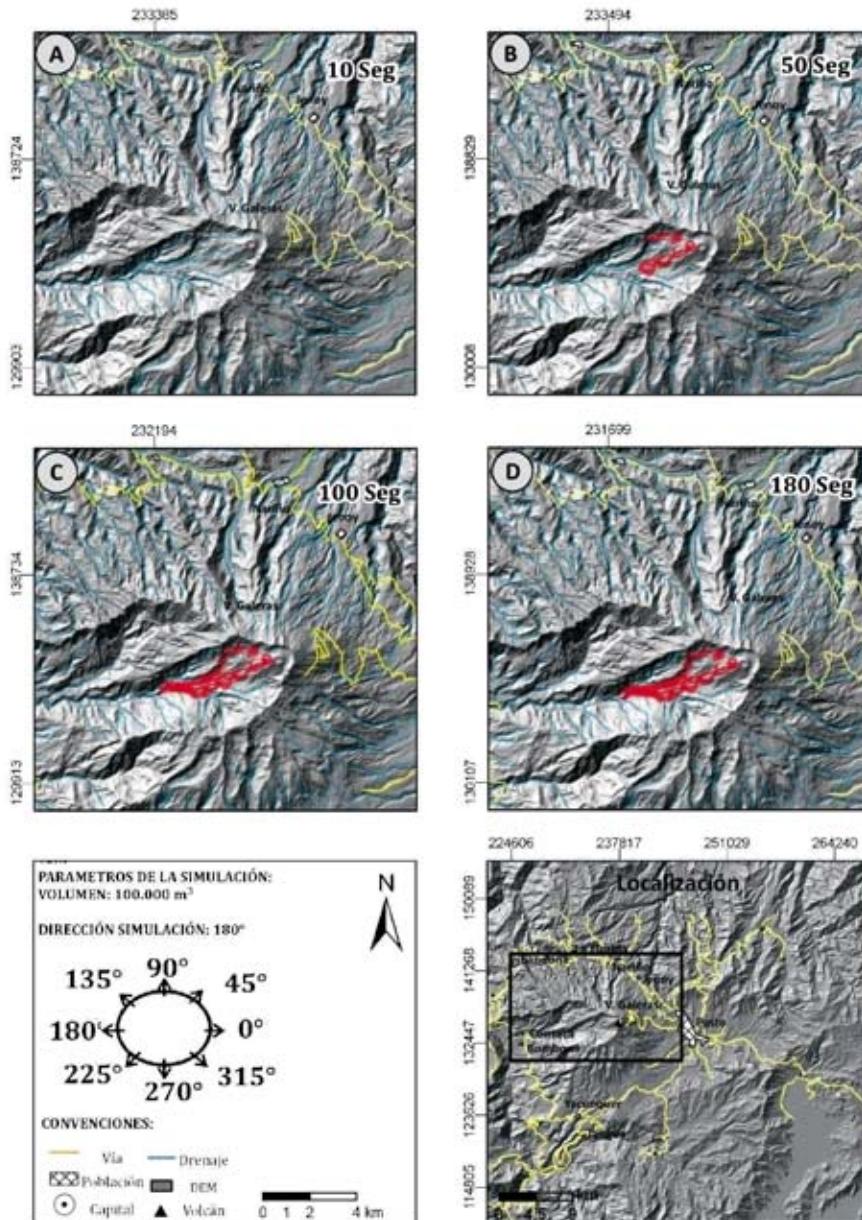


Figura 4. Representación del avance de un flujo piroclástico en el volcán Galeras con un volumen de 1×10^5 m³ y una dirección de salida de 180°, con ángulo de fricción basal de 12°. A. a los 10 s. B. a los 50 s. C. a los 100 s. D. a los 180 s. En la parte inferior derecha se resalta la zona detallada en las figuras A, B, C y D. Sistema de coordenadas empleado: UTM-WGS84, Zona 18N.

Figure 4. Representation of the advance for a pyroclastic flow in Galeras volcano, with a volume of 1×10^5 m³, initial output direction of 180°, bed friction angle of 12°. A. After 10 s. B. After 50 s. C. After 100 s. D. After 180 s. In the bottom-right part of the figure, it is highlighted the zone detailed in the figures A, B, C and D. Used georeference coordinate system: UTM-WGS84, 18N zone.

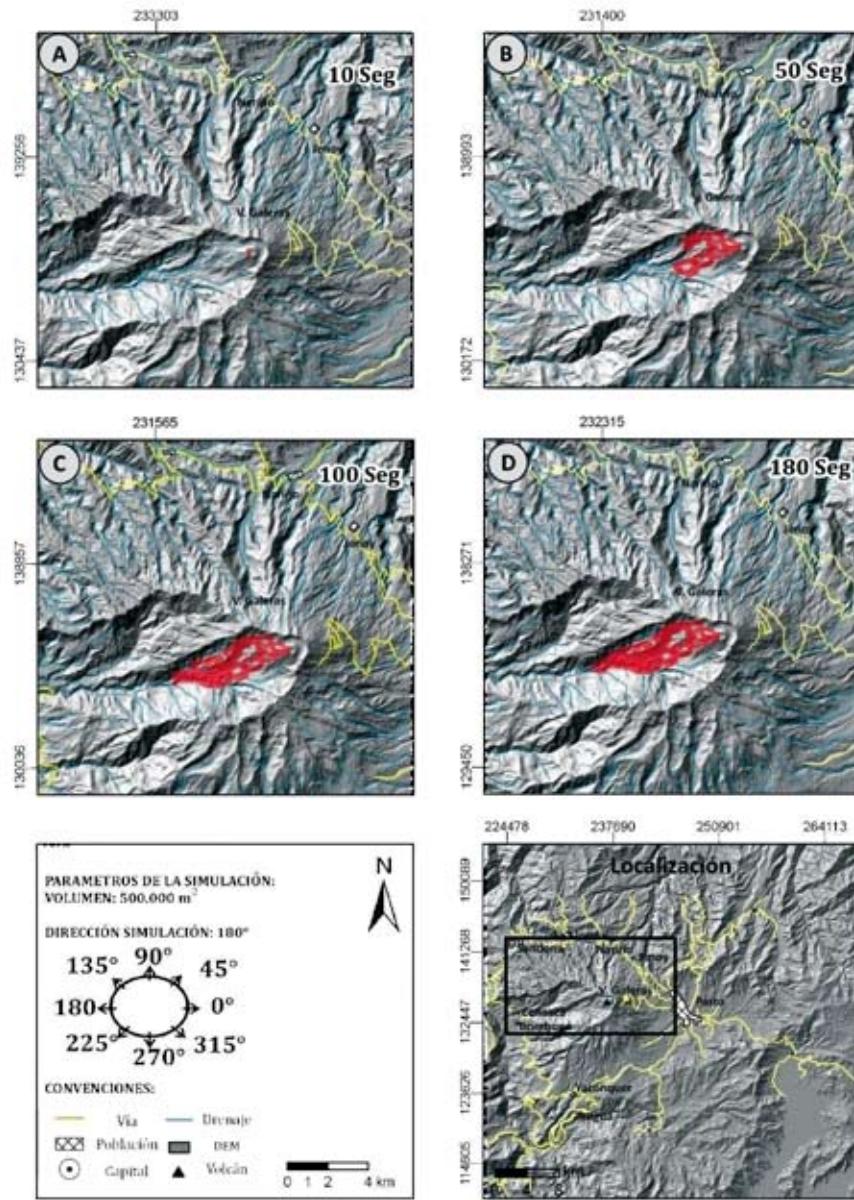


Figura 5. Representación del avance de un flujo piroclástico en el volcán Galeras con un volumen de $5*10^5 \text{ m}^3$ y una dirección de salida de 180° , con ángulo de fricción basal de 12° . A. a los 10 s. B. a los 50 s. C. a los 100 s. D. a los 180 s.

En la parte inferior derecha se resalta la zona detallada en las figuras A, B, C y D.

Sistema de coordenadas empleado: UTM-WGS84, Zona 18N.

Figure 5. Representation of the advance for a pyroclastic flow in Galeras volcano, with a volume of $5*10^5 \text{ m}^3$, initial output direction of 180° , bed friction angle of 12° . A. After 10 s. B. After 50 s. C. After 100 s. D. After 180 s. In the bottom-right part of the figure, it is highlighted the zone detailed in the figures A, B, C and D. Used georeference coordinate system: UTM-WGS84, 18N zone.

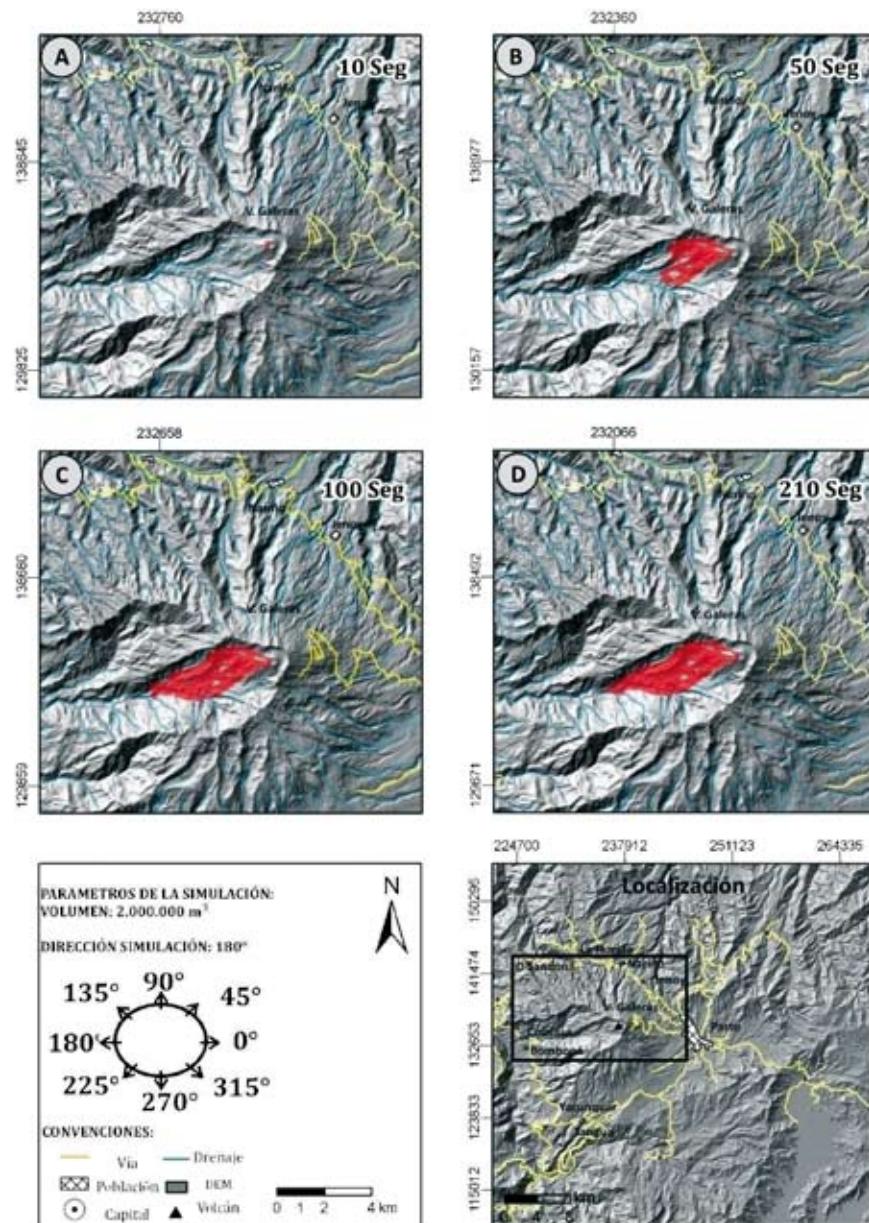


Figura 6. Representación del avance de un flujo piroclástico en el volcán Galeras con un volumen de $2*106 \text{ m}^3$ y una dirección de salida de 180° , con ángulo de fricción basal de 12° . A. a los 10 s. B. a los 50 s. C. a los 100 s. D. a los 210 s. En la parte inferior derecha se resalta la zona detallada en las figuras A, B, C y D. Sistema de coordenadas empleado: UTM, WGS84, 18N.

Figure 6. Representation of the advance for a pyroclastic flow in Galeras volcano, with a volume of $2*106 \text{ m}^3$, initial output direction of 180° , bed friction angle of 12° . A. After 10 s. B. After 50 s. C. After 100 s. D. After 210 s. In the bottom-right part of the figure, it is highlighted the zone detailed in the figures A, B, C and D. Used georeference coordinate system: UTM-WGS84, 18N zone.

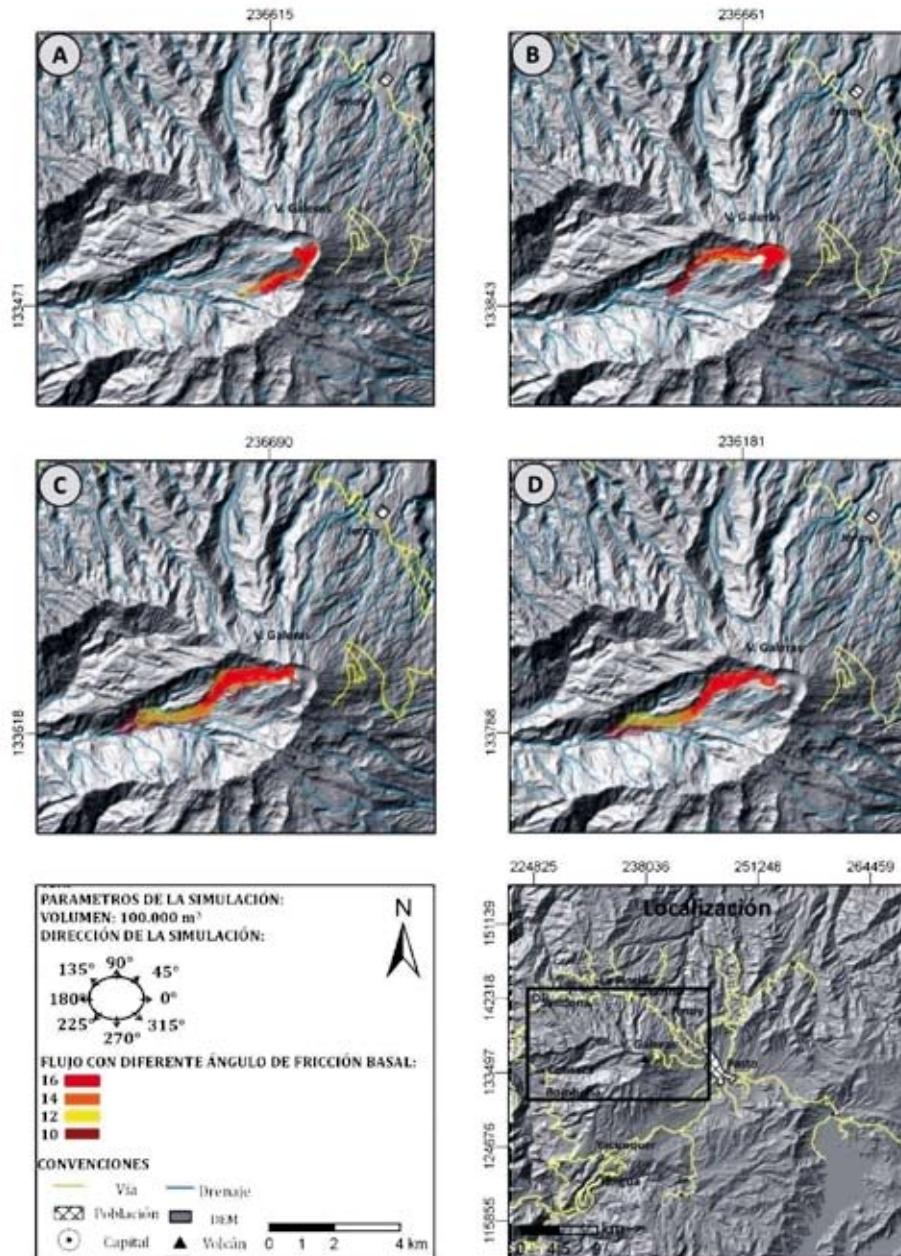


Figura 7. Recorrido de los flujos piroclásticos simulados en el volcán Galeras, en diferentes direcciones, con un volumen de 1×10^5 m³, variando el ángulo de fricción basal a 10, 12, 14 y 16°. A. en dirección inicial del flujo de 0°. B. en dirección de 45°. C. en dirección de 90°. D. en dirección de 135°. E. en dirección de 180°. F. en dirección de 225°. G. en dirección de 270°. H. en dirección de 315°, a partir del cráter actual. En la parte inferior derecha se resalta la zona ampliada donde se muestran los resultados. Sistema de coordenadas empleado: UTM-WGS84, Zona 18N.

Figure 7. Route of the simulated Galeras volcano pyroclastic flows, in several directions, using a volume of 1×10^5 m³, changing the bed friction angle to 10, 12, 14 and 16°. A. Initial flow direction at 0°. B. at 45°. C. at 90°. D. at 135°. E. at 180°. F. at 225°. G. at 270°. H. at 315°, from the active cone. In the bottom-right part of the figure, it is highlighted the zone detailed showing the results. Used georeference coordinate system: UTM-WGS84, 18N zone.

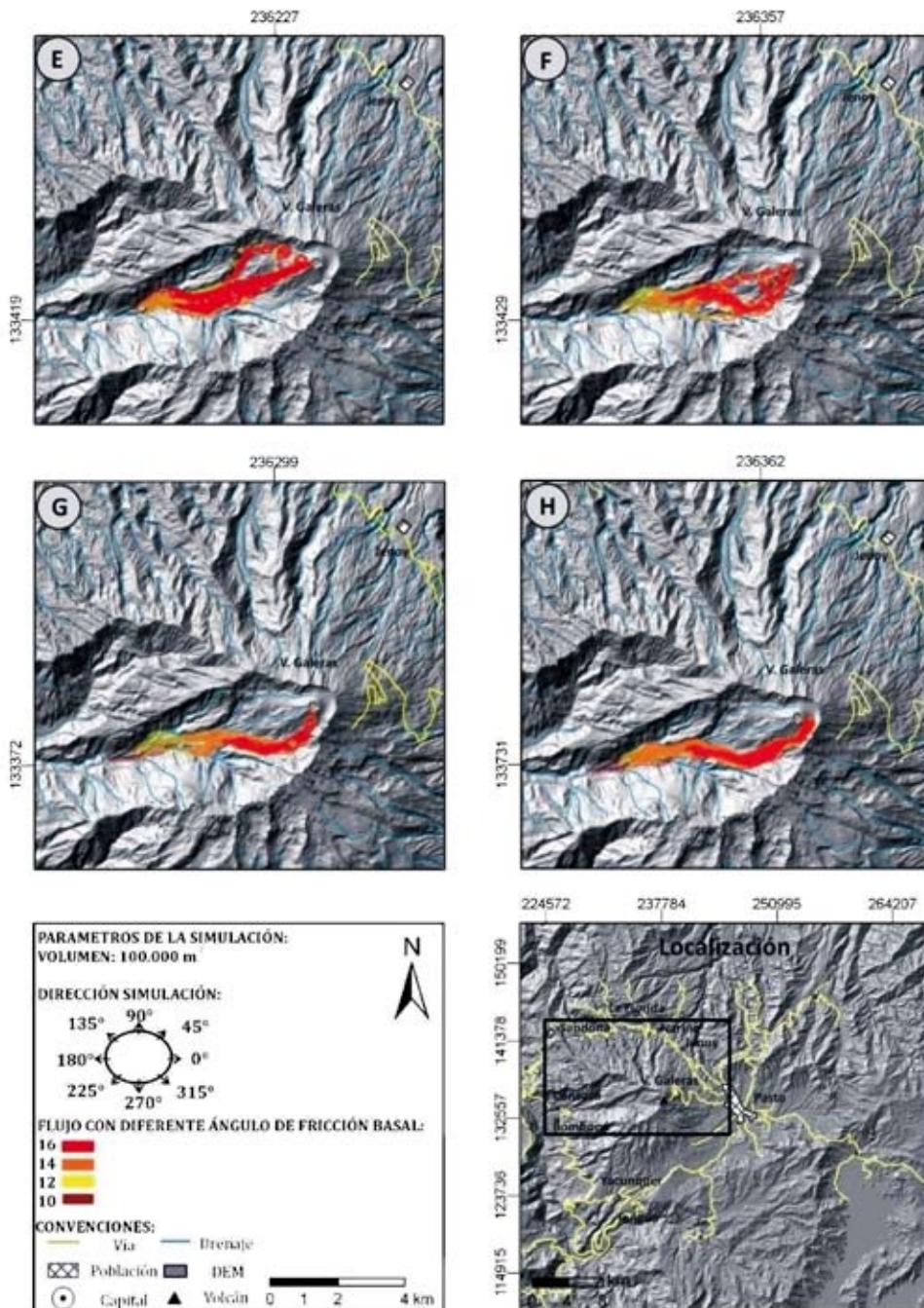


Figura 7. Continuación.

Figure 7. Continuation.

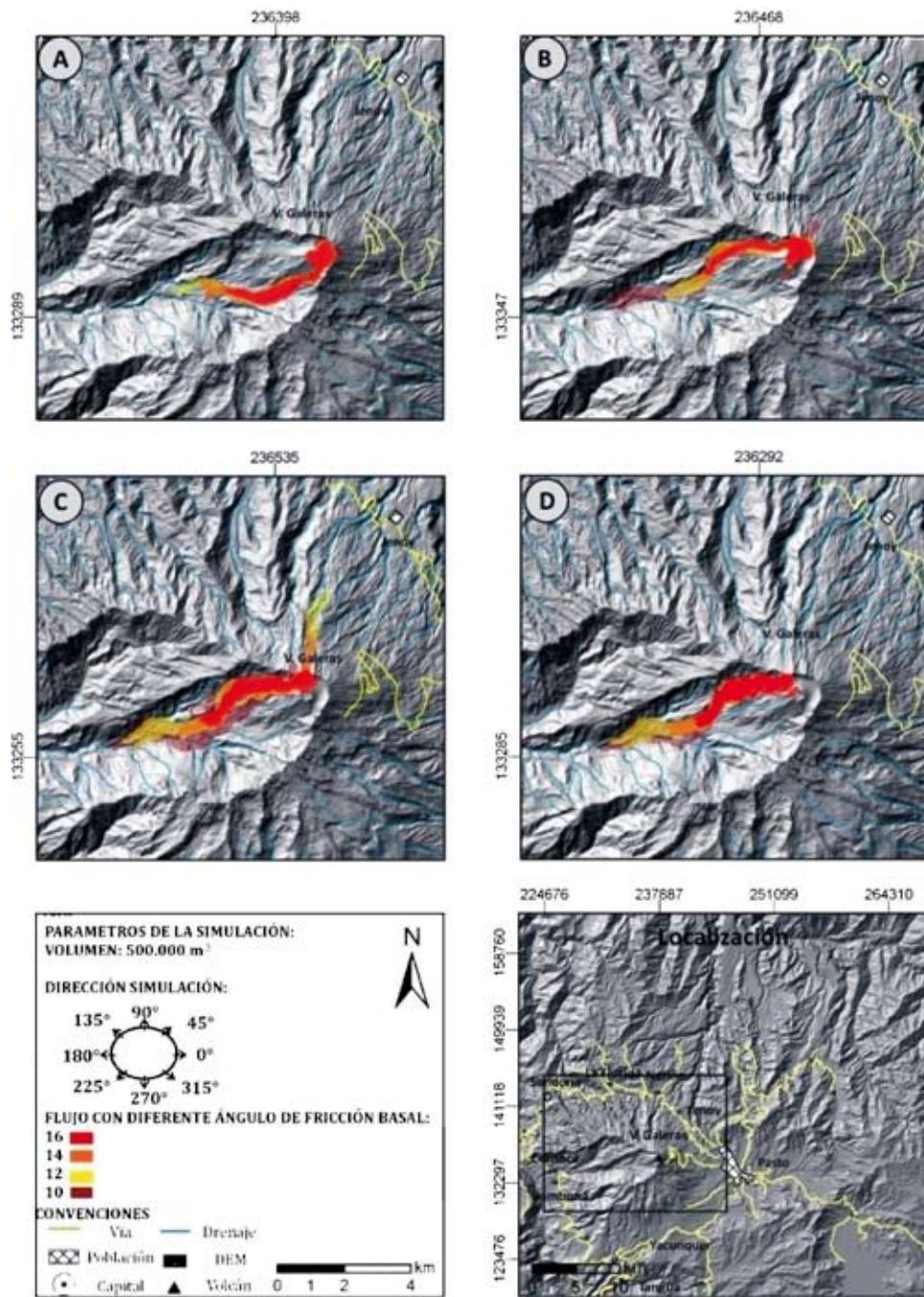


Figura 8. Recorrido de los flujos piroclásticos simulados en diferentes direcciones en el volcán Galeras, con un volumen de $5*10^5 \text{ m}^3$, variando el ángulo de fricción basal a 10, 12, 14 y 16°. A. en dirección inicial del flujo de 0°. B. en dirección de 45°. C. en dirección de 90°. D. en dirección de 135°. E. en dirección de 180°. F. en dirección de 225°. G. en dirección de 270°. H. en dirección de 315°, a partir del cráter actual. En la parte inferior derecha se resalta la zona ampliada donde se muestran los resultados. Sistema de coordenadas: UTM, WGS_84, 18N.

Figure 8. Route of the simulated Galeras volcano pyroclastic flows, in several directions, using a volume of $5*10^5 \text{ m}^3$, changing the bed friction angle to 10, 12, 14 and 16°. A. Initial flow direction at 0°. B. at 45°. C. at 90°. D. at 135°. E. at 180°. F. at 225°. G. at 270°. H. at 315°, from the active cone. In the bottom-right part of the figure, it is highlighted the zone detailed showing the results. Used georeference coordinate system: UTM-WGS84, 18N zone.

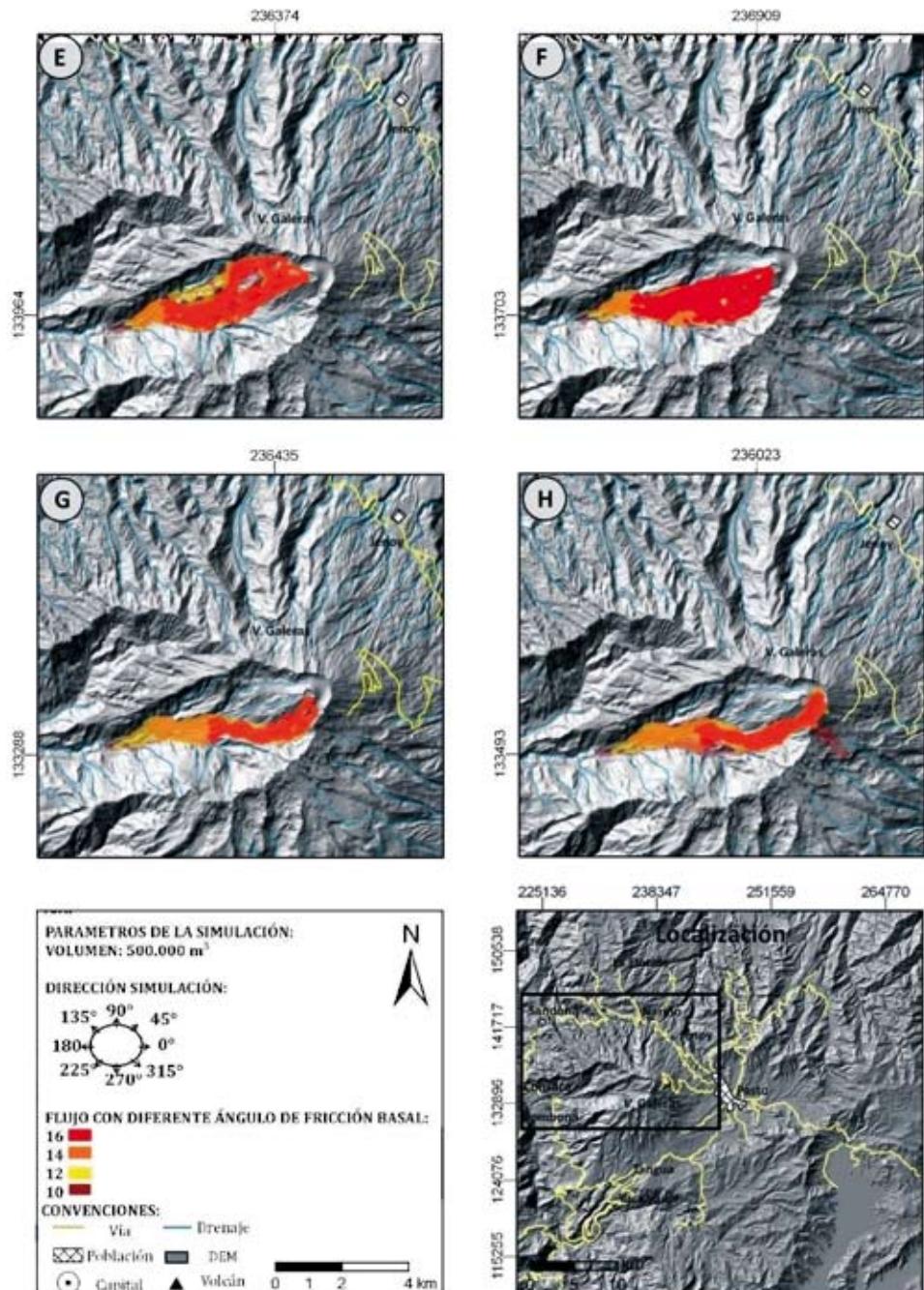


Figura 8. Continuación.

Figure 8. Continuation.

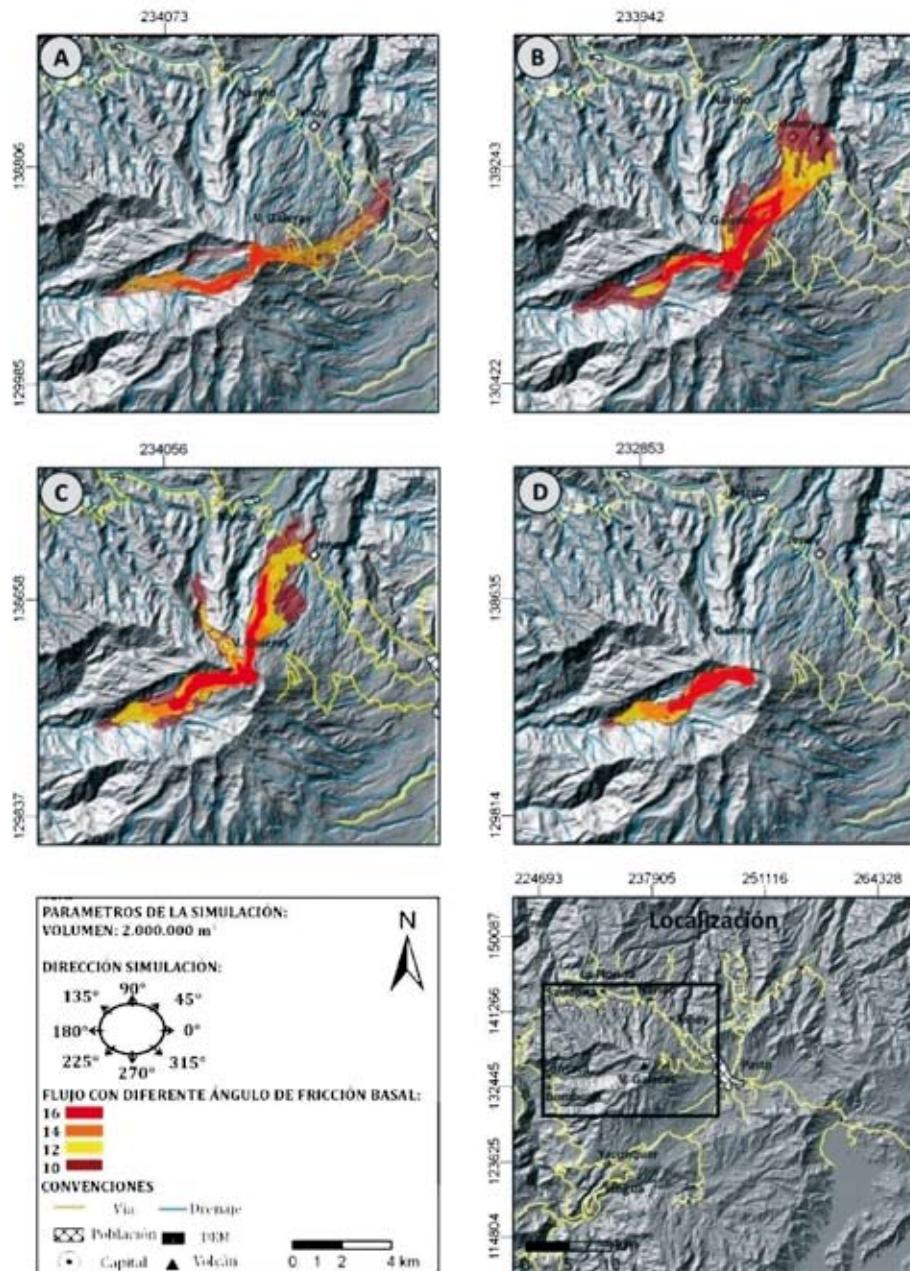


Figura 9. Recorrido de los flujos piroclásticos simulados en diferentes direcciones en el volcán Galeras, con un volumen de 2×10^6 m³, variando el ángulo de fricción basal a 10, 12, 14 y 16°. A. en dirección inicial de flujo de 0°. B. en dirección de 45°. C. en dirección de 90°. D. en dirección de 135°. E. en dirección de 180°. F. en dirección de 225°. G. en dirección de 270°. H. en dirección de 315°, a partir del cráter actual. En la parte inferior derecha se resalta la zona ampliada donde se muestran los resultados. Sistema de coordenadas empleado: UTM-WGS84, Zona 18N.

Figure 9. Route of the simulated Galeras volcano pyroclastic flows, in several directions, using a volume of 2×10^6 m³, changing the bed friction angle to 10, 12, 14 and 16°. A. Initial flow direction at 0°. B. at 45°. C. at 90°. D. at 135°. E. at 180°. F. at 225°. G. at 270°. H. at 315°, from the active cone. In the bottom-right part of the figure, it is highlighted the zone detailed showing the results. Used georeference coordinate system: UTM-WGS84, 18N zone.

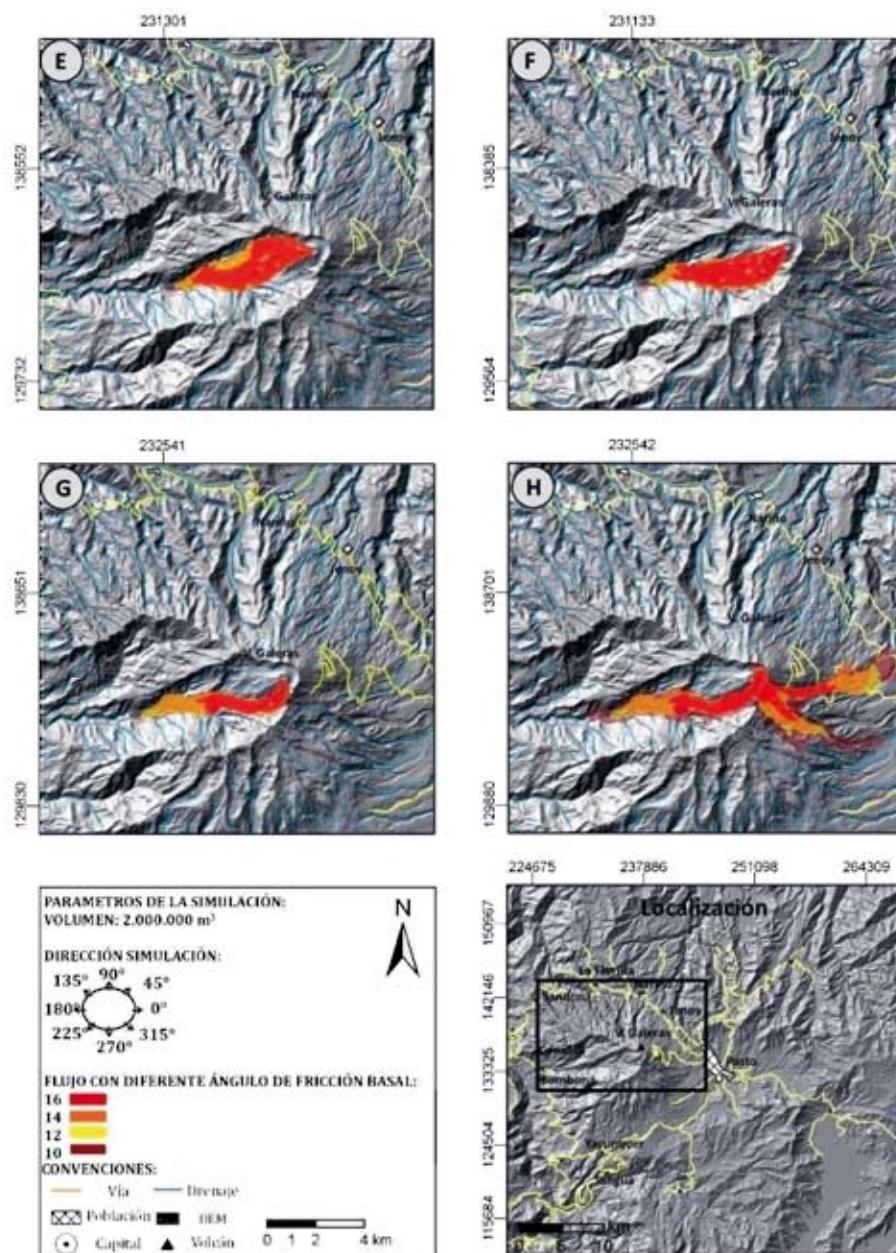


Figura 9. Continuación.

Figure 9. Continuation.

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de las simulaciones con el código TITAN2D para la distribución de flujos piroclásticos se recrearon a partir de la gradación del incremento relativo del evento eruptivo, representado por volúmenes de $1*10^5$, $5*10^5$ y $2*10^6$ m³, combinados con ángulos de fricción basal de 10, 12, 14 y 16°. De la representación gráfica de las simulaciones se puede deducir de manera general (como fue mencionado por Sheridan et al. 2005), que el código TITAN2D es altamente sensible a la variación del ángulo de fricción basal, modificando la movilidad del flujo, lo que se evidencia en la diferencia de alcance y distribución de los flujos simulados.

Recorrido del flujo vs. tiempo de simulación

Como se describió anteriormente, el tiempo de la simulación está determinado por un valor que es correspondiente con un valor menor a 4 m/s de la velocidad final promedio del flujo. Teniendo en cuenta esto, a partir de la representación gráfica de las simulaciones en dirección inicial de 180°, con 12° de fricción basal, a determinados intervalos de tiempo (Figuras 4, 5, 6), se puede deducir que el avance del flujo es mínimo después de los primeros 100 segundos de simulación, aunque la velocidad final promedio mantenga un valor superior al escogido como el límite. Este comportamiento se debe a que después de determinado tiempo de simulación el material continúa moviéndose sobre los depósitos formados por el material extruido anteriormente, haciendo que la velocidad final promedio se mantenga alta; no obstante, cuando el material recorre zonas nuevas en el DEM, la velocidad disminuye de tal forma que el avance es muy bajo. Específicamente, en la simulación del flujo piroclástico con volumen de $1*10^5$ m³ (Figura 4), durante los primeros 10 segundos se observa que el depósito ha alcanzado 0.2 km (en línea recta respecto al punto de emisión), mientras que a los 50 segundos el flujo piroclástico ya ha alcanzado 3 km del cráter y a los 100 segundos ha avanzado hasta 5 km del mismo, distancia que prácticamente no aumenta, teniendo en cuenta que la simulación continúa hasta los 180 segundos donde recorre 5.4 km (durante los últimos 80 segundos el flujo sólo avanzó 0.4 km).

En la simulación del flujo piroclástico con volumen de $5*10^5$ m³ (Figura 5) a los 10 segundos el flujo ha recorrido 0.2 km (en línea recta respecto al punto de emisión); a los 50 segundos, 3.1 km; a los 100 segundos, 5.3 km; para finalmente alcanzar 5.8 km de distancia

a los 180 segundos (es decir, durante los últimos 80 segundos el flujo avanzó 0.5 km). En la simulación del flujo piroclástico con volumen de $2*10^6$ m³ (Figura 6), durante los primeros 10 segundos el flujo ha avanzado 0.2 km (en línea recta respecto al punto de emisión); a los 50 segundos el flujo ha recorrido 3.2 km; a los 100 segundos, 5.4 km; para finalmente alcanzar 6 km de distancia a los 210 segundos (es decir, durante los últimos 110 segundos el flujo avanzó 0.6 km).

En términos del área cubierta por el flujo piroclástico durante su recorrido, se puede observar una diferencia importante en su amplitud (ancho del flujo) al comparar todas las simulaciones. La mayor amplitud del flujo simulado con volumen de $1*10^5$ m³, medida en el depósito final es de 1 km (con un área recorrida de 2 km²); la mayor amplitud del flujo de $5*10^5$ m³ es de 1.4 km (con un área recorrida de 5 km²); y la mayor amplitud de flujo de $2*10^6$ m³ es de 1.6 km (con un área recorrida de 6 km²). De manera general, el área cubierta por los flujos simulados con $1*10^5$ y $5*10^5$ m³ es similar y su diferencia radica en que el flujo simulado con $5*10^5$ m³ sobrepasó más altos topográficos, como se ve representado en la distribución más uniforme del recorrido del flujo; este hecho se puede comprobar al observar que la cantidad de espacios en los que no hay influencia del flujo se incrementan al disminuir el volumen simulado. El área más grande en la que no hubo influencia de los flujos simulados con volúmenes de $1*10^5$ y $5*10^5$ m³, dentro del anfiteatro, se encuentra a aproximadamente 1.3 km al oeste del cráter, en donde existe una barrera topográfica formada por depósitos recientes del volcán Galeras (i.e. Etapa Galeras); los flujos simulados con $2*10^6$ m³ casi cubren la barrera.

Volumen, dirección del flujo y ángulo de fricción basal (σ)

La relación que existe entre el área afectada por un flujo piroclástico y el ángulo de fricción basal (σ) es inversamente proporcional, es decir: el área sobre la que se distribuye el flujo incrementa al disminuir el ángulo de fricción basal; esto es razonable debido a que un menor ángulo, representa una menor fricción del flujo con la superficie sobre la que se desliza, menor la resistencia a fluir y por ende, el flujo se dispersa sobre un área mayor. En general, la forma en que se dispersa el flujo al variar el ángulo de fricción basal es similar, pero el alcance del flujo es mayor al disminuir su valor. Igualmente, se observa que la dirección, a partir de la cual se origina el flujo, controla en gran medida su distribución, ya que

dependiendo de esta dirección inicial varía la topografía sobre la cual el flujo circula.

Volumen de $1*10^5$ m³ vs. Ángulo de fricción basal

Entre los resultados de la simulación de flujos piroclásticos con volumen inicial de $1*10^5$ m³ se observa que el flujo simulado en todas las direcciones, es confinado por la depresión morfológica dentro del anfiteatro; incluso al variar el ángulo de fricción basal, el flujo no la sobrepasa. En general, el recorrido de los flujos con este volumen se distribuyen hacia el oeste del cráter (donde se encuentra el anfiteatro del Complejo Volcánico) variando su distribución de acuerdo con la dirección de salida del material. La dispersión cuando la dirección de salida es 0 y 45° es relativamente pequeña en comparación con los resultados que muestran las simulaciones realizadas en las otras direcciones, en donde la dispersión es más amplia. Al simular en dirección de 0° con ángulo de fricción basal de 10 y 12°, la diferencia en la distribución es poca, debido a que parte del flujo se deposita hacia el norte del cráter, donde los flujos simulados con los demás ángulos de fricción basal no llegan.

De las simulaciones con $1*10^5$ m³, en las ocho direcciones (0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 y 315°), con ángulo de fricción basal de 10°, la mayor distribución la presentan las simulaciones con dirección inicial de 270° (6.3 km) y 315° (6.5 km), mientras que la menor distribución la presentan los flujos simulados en dirección de 0° (2.4 km). De todas las simulaciones, en las que se puede definir que existe menor diferencia en la distribución, al variar el ángulo de fricción basal, son las realizadas en dirección de 0 y 45°, debido a que el material choca contra la pared interna del anfiteatro haciendo que el avance del flujo sea mínimo (Figura 4).

Volumen de $5*10^5$ m³ vs. Ángulo de fricción basal (σ)

Entre los resultados de la simulación de flujos piroclásticos con volumen inicial de $5*10^5$ m³ se observa que en el flujo simulado a 0, 45, 90 y 315° alrededor del cráter, una pequeña cantidad sobrepasa el anfiteatro, mientras que los flujos con dirección de salida del material a 135, 180, 225 y 270°, no lo logran. Al simular en dirección inicial de 0°, con σ de 12°, el flujo recorre mayor distancia, debido a que parte del flujo se deposita

fuerza del anfiteatro, lo que no ocurre al simular flujos con los demás ángulos de fricción basal.

En todas las simulaciones realizadas con volumen de $5*10^5$ m³ existe un claro contraste en la distribución de los depósitos al variar el ángulo de fricción basal. El área cubierta por todos los flujos piroclásticos simulados con volumen de $5*10^5$ m³ disminuye al aumentar el valor del ángulo de fricción basal: con σ de 10° los flujos abarcan 11 km²; con σ de 12°, abarcan 9 km²; con σ de 14°, abarcan 8 km²; y con σ de 16°, abarcan 7 km²; en general, al disminuir 2° la fricción basal, los flujos simulados abarcan alrededor de 1 km² más.

Volumen de $2*10^6$ m³ vs. Ángulo de fricción basal (σ)

Entre los resultados de la simulación de flujos piroclásticos con volumen inicial de $2*10^6$ m³ se observa que en los flujos simulados a 0, 45, 90 y 315° alrededor del cráter, sobrepasan el anfiteatro, mientras que los flujos con dirección inicial de 135, 180, 225 y 270°, no lo logran.

El contraste en la distribución de flujos piroclásticos, al variar el ángulo de fricción basal, es notorio en todos los flujos simulados, siendo más notorio en el flujo simulado en dirección de 315°. Comparando todos los flujos simulados con volumen de $2*10^6$ m³, la mayor dispersión la alcanzan los flujos simulados en dirección inicial de 45°: con σ de 10°, los flujos abarcan un área de 38 km²; con σ de 12° los flujos abarcan 26 km²; con σ de 14°, abarcan 18 km²; y con σ de 16° abarcan 12 km².

DISCUSIÓN

Comportamiento del código TITAN2D

Tiempo de simulación

Al realizar las simulaciones, el tiempo de simulación (t_{\max}) controla ampliamente la velocidad promedio final del flujo, ya que empleando un menor tiempo de simulación el volumen es menor y por ende, menor es el tiempo necesario para que el flujo se detenga. Por ejemplo, para obtener una velocidad promedio final menor a 4 m/s, al simular flujos con volumen de $1*10^5$ m³, se necesitó un t_{\max} entre 120 y 180 segundos; al simular flujos con volumen de $5*10^5$ m³, se necesitó un t_{\max} entre 150 a 200 segundos; y con volumen de $2*10^6$ m³, se necesitó un

t_{\max} entre 230 y 250 segundos. No obstante, no sólo el volumen influye de manera importante en el tiempo de simulación necesario, sino también la dirección de salida del material, el ángulo de fricción basal, entre otros; al parecer, la influencia de la dirección de salida del material se debe a que cuando el flujo pasa sobre una superficie topográfica poco accidentada, como ocurre en zonas al oeste del volcán, el flujo se acelera; mientras que si el flujo se desplaza sobre una superficie rugosa y con altos topográficos, como ocurre en zonas al este del volcán, la velocidad disminuye más rápidamente. Específicamente, se encontró que cuando la dirección de la simulación es de 45, 90 y 135° se hace más difícil encontrar un valor de t_{\max} con el que la simulación alcance una velocidad promedio final menor a 4 m/s.

Ángulo de fricción basal

Los valores para el ángulo de fricción basal que se emplearon para realizar las simulaciones en el volcán Galeras, tuvieron en cuenta los trabajos de Stinton et al. (2004) quien define valores de acuerdo a coeficientes de

fricción establecidos para diferentes superficies sobre la que circula un flujo; en este sentido, el valor que más se asemeja al material de las laderas del volcán Galeras, por el cual se desplazarían los flujos piroclásticos, son los depósitos glacio-fluviales, con valores de ángulo de fricción basal entre 9° y 17°. En el presente trabajo se simularon flujos empleando valores para el ángulo de fricción basal de 10°, 12°, 14° y 16° evidenciando que el código TITAN2D es muy sensible a la variación del ángulo de fricción basal en términos del recorrido y distribución final de depositación; al aumentar su valor, disminuye la distancia recorrida y el área “inundada” por el flujo piroclástico. Por ejemplo, en la Figura 10 se observa que al aumentar 2° de fricción basal la distancia recorrida por los flujos simulados con volumen de 1×10^5 m³, disminuye entre 1 y 2 km. En la Figura 11 se observa que al aumentar 2° de fricción basal el área total inundada por los flujos simulados en todas las direcciones es mayor, siendo la diferencia más notoria en los flujos simulados con volumen de 2×10^6 , donde al aumentar 2° el ángulo de fricción basal, disminuye el área inundada por el flujo simulado en alrededor de 10 km².

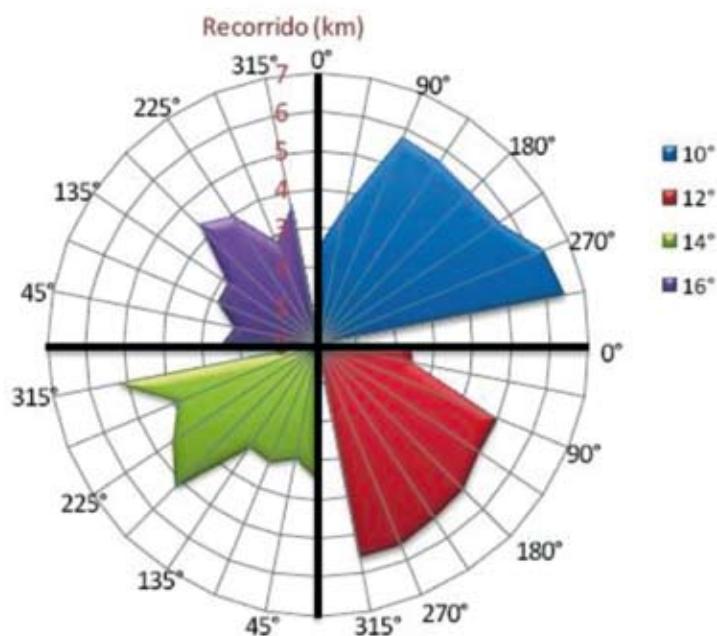


Figura 10. Distancia recorrida por los flujos piroclásticos simulados con volumen de 1×10^5 m³ en relación al ángulo de fricción basal.

Figure 10. Distance covered by the simulated pyroclastic flows, using a volume of 1×10^5 m³, in relation to the bed friction angle.

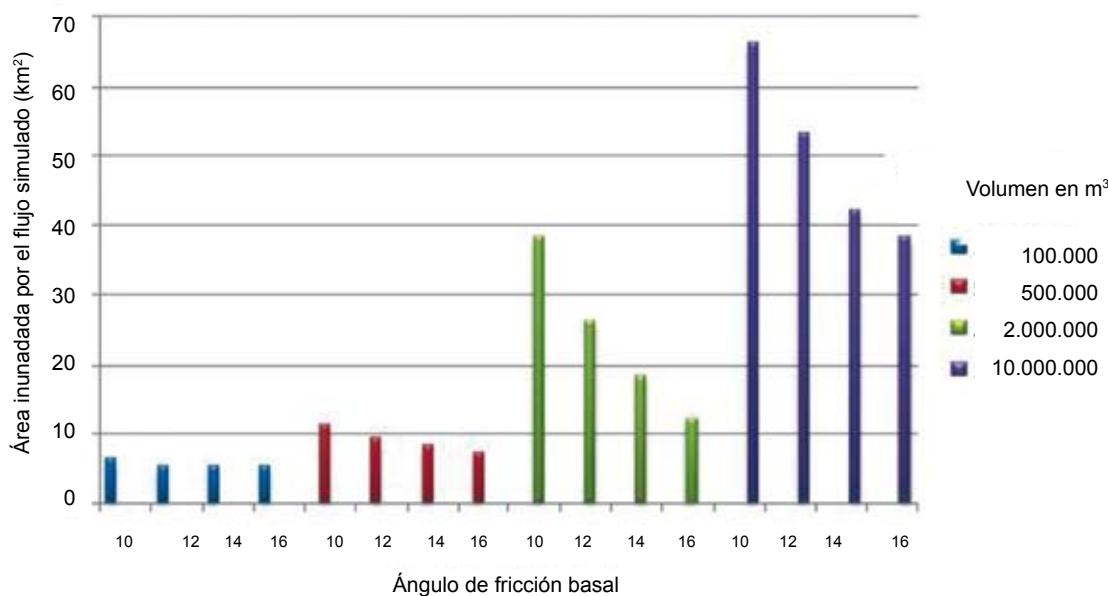


Figura 11. Relación del área total inundada por los flujos piroclásticos simulados en todas las direcciones al variar el ángulo de fricción basal.

Figure 11. Relation between the flooded total area by the simulated pyroclastic flows in all the initial directions, changing the bed friction angle.

Escenarios simulados

Para definir los escenarios a simular a partir de una erupción desde el cráter actual del volcán Galeras, se tuvo en cuenta la evolución y características de flujos piroclásticos en diferentes volcanes del mundo, el comportamiento actual del volcán y el registro geológico de los depósitos de flujos piroclásticos definidos por Calvache (1990, 1995) teniendo en cuenta que, como lo mencionan Saucedo et al. (2005), éstos proveen una base sólida para el modelamiento de las áreas y niveles de amenaza por flujos piroclásticos asociados con el próximo escenario probable. Con base en esta información, se escogieron los parámetros que permiten representar tales escenarios e interpretar la distribución y el espesor de los depósitos (v. Macías et al. 2008). Entre estos parámetros, el volumen de material de la columna eruptiva que colapsa para convertirse en flujo piroclástico es uno de los más importantes. En este sentido, para definir los volúmenes a simular en el volcán Galeras, inicialmente se tomaron como punto de referencia volúmenes de flujos piroclásticos reportados en volcanes que tienen comportamiento similar, como lo es el volcán Colima, donde, teniendo en cuenta

volúmenes de flujos piroclásticos recientes, se realizaron simulaciones con volúmenes de $3 \times 10^5 \text{ m}^3$, $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ y $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ (como el evento máximo posible) (Sulpizio et al. 2010). Conociendo que el volumen mínimo empleado para simular los flujos piroclásticos durante una erupción vulcaniana en el volcán Colima es de $3 \times 10^5 \text{ m}^3$ y que el volumen del domo es similar al del volcán Galeras para el periodo 1991 a 1992, se decidió realizar simulaciones de flujos piroclásticos con un volumen similar de $5 \times 10^5 \text{ m}^3$; un volumen menor de $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ que represente un flujo piroclástico que involucre parcialmente el domo; y un volumen de $2 \times 10^6 \text{ m}^3$, que simule un volumen cercano al reportado por Calvache (1990) para el miembro 2300.

Es importante aclarar que la generación de un flujo piroclástico de $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ sería de gran magnitud, conociendo el comportamiento del volcán Galeras. Como punto de referencia se tiene, por ejemplo, el volcán Soufrière Hills, Monserrat, donde el volumen estimado del domo es de $75 \times 10^6 \text{ m}^3$ ($72 \times 10^6 \text{ m}^3$ más grande que el domo del volcán Galeras) y los flujos piroclásticos generados alcanzan volúmenes de $7 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Druitt et al. 2002). Durante la erupción en 1996, cuando el domo del Soufrière Hills tenía un volumen

de $6.5 * 10^6 \text{ m}^3$ (el doble del domo del volcán Galeras de $3 * 10^6 \text{ m}^3$), se formaron flujos piroclásticos con volúmenes entre 0.2 y $9 * 10^6 \text{ m}^3$; para el primer caso menor que el 0.5 % del volumen total del domo se convirtió en flujo piroclástico y para el segundo caso, $4.5 * 10^5 \text{ m}^3$ más del volumen total del domo se depositó como flujo piroclástico. Mientras que el volumen máximo estimado de un domo del volcán Galeras, para el periodo de actividad actual, está entre $3 * 10^6 \text{ m}^3$ y $5 * 10^6 \text{ m}^3$; y los depósitos de los flujos piroclásticos según el registro geológico varían entre $1.2 * 10^6$ y $2.9 * 10^6 \text{ m}^3$. En definitiva no hay certeza en el porcentaje del domo que sería destruido durante una erupción vulcaniana, ni el volumen de la columna que se convertiría en flujo piroclástico. Es evidente que en algunas erupciones, un volumen mayor al volumen total del domo es involucrado, como en las erupciones del volcán Unzen con un volumen de domo de $9.4 * 10^7 \text{ m}^3$ y flujos piroclásticos de $1.17 * 10^8 \text{ m}^3$ (Nakada et al. 1999); y en otras, sólo un pequeño porcentaje del domo es expulsado. Aunque se puede emplear información geológica para delimitar el área que será potencialmente afectada por flujos piroclásticos en el futuro, además de información acerca del porcentaje del domo implicado durante la erupción de volcanes con actividad similar, existe una gran incertidumbre en la magnitud del flujo que puede generarse. Para el caso del volcán Galeras, asumiendo un comportamiento similar a la actividad desde 1989, donde sólo una porción del domo ha sido involucrado en las erupciones, es factible que en caso de que se originen flujos piroclásticos, éstos no sean mayores a $5 * 10^5 \text{ m}^3$, que fue el volumen intermedio simulado.

Representación de los resultados

Para la representación gráfica de los resultados, se presentaron las simulaciones de los flujos piroclásticos en función de su distribución durante el recorrido y depositación, teniendo en cuenta un valor final mínimo de 0.2 m de espesor. En algunos casos, aunque la distribución es similar simulando volúmenes diferentes, los espesores máximos de depositación son los valores que definen la diferencia.

Específicamente, en algunos lugares la distribución de los flujos exhibe espacios asociados a altos topográficos, los cuales representan lugares de no depositación o de depositación menor a 0.2 m (e.g. dentro del anfiteatro, al noroeste del cráter, los flujos simulados con volúmenes de $1 * 10^5$ y $5 * 10^5 \text{ m}^3$ no cubren un sector considerable)

que, en caso de ser necesario, podría ser utilizado para localizar instrumentos de medición para el monitoreo de la actividad volcánica. A diferencia de lo anterior, los flujos simulados con volúmenes de $2 * 10^6 \text{ m}^3$ se distribuyen de manera más uniforme, cubriendo el área que atraviesan durante su recorrido casi completamente.

Implicaciones de la amenaza

Actualmente la evaluación de la amenaza para el volcán Galeras se basa en la zonación probabilística de fenómenos asociados con erupciones que han ocurrido en los últimos 5000 años y en otros fenómenos que no aparecen en el registro geológico, como ondas de choque y proyectiles balísticos (Hurtado y Cortés 1997). El mapa de amenaza consiste de tres zonas diferentes: alta, media y baja. La zona de amenaza alta está definida principalmente por la distribución de depósitos de flujos piroclásticos, mientras que la zona de amenaza baja se define por los depósitos de caída piroclástica; la zona de amenaza media es una zona de transición que no incluye flujos piroclásticos encontrados en el registro geológico aunque sí, posibles flujos piroclásticos de magnitudes mayores y lahares (Hurtado y Cortés 1997). Los resultados del presente trabajo son un insumo para ser integrado tanto en procesos de actualización de la evaluación de la amenaza volcánica del Galeras como ante una actividad mayor a la actual, en condiciones relativamente similares a las observadas desde 1989.

CONCLUSIONES

La utilización del código TITAN2D en el volcán Galeras, es en una herramienta de conocimiento relevante para evaluar los resultados de una posible evolución de una erupción en términos del comportamiento y distribución de posibles flujos piroclásticos.

Uno de los parámetros que mayor relevancia tiene al simular flujos piroclásticos con el código TITAN2D es el ángulo de fricción basal; en este trabajo se evidencia, como lo han demostrado autores en trabajos anteriores, que este parámetro ejerce una marcada influencia en la distribución y alcance de los flujos piroclásticos. Para el caso del volcán Galeras, una relación aproximada del incremento de 2° en el ángulo de fricción basal resulta en una disminución entre 1 y 2 km de recorrido del flujo simulado. Tal recorrido aumenta cada vez más con el incremento del volumen simulado.

Además del ángulo de fricción basal, el volumen del flujo y su velocidad inicial, son los valores que mayor trascendencia tienen en el recorrido y deposición final del flujo simulado. Igualmente, el tiempo máximo de simulación y el ángulo de fricción interno, son parámetros que tienen una influencia importante en la evolución de los flujos, al determinar el momento de detenerse; por esta razón, se debe prestar atención a los valores elegidos, que en este caso definieron el tiempo de simulación suficiente para no detener la simulación con velocidades mayores a 4 m/s, valor a partir del cual el avance del flujo es mínimo.

Aunque diversos escenarios fueron simulados (definidos principalmente por volúmenes de $1*10^5$, $5*10^5$ y $2*10^6$ m³), teniendo en cuenta la evolución de las erupciones vulcanianas, el comportamiento reciente del volcán Galeras y los volúmenes de posibles flujos piroclásticos en actividad futura, no se esperaría que superen valores de $5*10^5$ m³. La distribución de los flujos simulados con estos volúmenes abarcan un área entre 40 y 50 km² y ninguno sobrepasa el área definida como amenaza alta en el mapa de amenaza volcánica. Los flujos simulados con volumen de $1*10^5$ m³ permanecen confinados dentro del anfiteatro, aunque algunos de los flujos simulados con volumen de $5*10^5$ m³ logran sobrepasarlo. En consecuencia, la amenaza directa de los flujos piroclásticos a partir de un colapso de columna por una erupción vulcaniana generada desde el cráter actual, aún teniendo en cuenta el mayor avance de la nube acompañante, no lograría afectar ninguna población alrededor del volcán (excepto por el material que sea removido en forma de lahar). No obstante, se hace énfasis en el hecho de que los fenómenos volcánicos simulados empleando el código TITAN2D son flujos piroclásticos generados por colapso de columna eruptiva vulcaniana y no se tienen en cuenta otro tipo de fenómenos dirigidos como los blast volcánicos.

Finalmente, debe tenerse en cuenta que cualquier simulación en volcanes puede generar discusión en términos de la diferencia de los resultados con respecto al registro geológico. En este sentido, diversas hipótesis pueden ser planteadas: A. El código no es el más adecuado para simular flujos en el volcán. B. Los parámetros que

se emplearon para simular los flujos que aparecen en el registro geológico no representan la magnitud de los eventos ocurridos o no son los valores adecuados para realizar las simulaciones. C. El evento formador de los depósitos no fue el simulado.

Para el caso del volcán Galeras, en donde los resultados obtenidos presentan una diferencia importante tanto con el registro geológico como con el área de amenaza vulcánica alta, es posible pensar que el colapso de una columna vulcaniana desde el cráter actual no haya sido el proceso que haya generado algunos de los depósitos definidos en los últimos 4500 años y que, por ende, los parámetros empleados o el código utilizado, no sea el adecuado para representar posibles flujos con comportamientos similares a los ocurridos anteriormente. Sin embargo, es importante considerar que la distribución de los flujos simulados en el presente trabajo sólo representa los resultados del código TITAN2D, que intenta recrear una aproximación a la realidad. A pesar de esto, las simulaciones consideran la morfología actual y en este sentido, los resultados son aproximaciones con una validez importante, puesto que la topografía, sobre la cual se movilizan los flujos, sufre cambios por los mismos depósitos dejados por los flujos anteriores; y, en consecuencia, el alcance y distribución de nuevos flujos, sobre una nueva morfología, podría diferir del registro geológico.

Agradecimientos

Al personal del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, sin quienes este trabajo no hubiera sido posible realizarse; en especial a César Vega por su colaboración para con la instalación y funcionamiento de los programas aplicados; a Sofía Navarro y Laura Téllez por su colaboración en el manejo digital de las imágenes. A Diego Gómez del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto por sus acertados comentarios en la versión final del trabajo. Este estudio hizo parte del trabajo de grado desarrollado para el programa de Geología por Ana María García dentro de la línea de investigación de simulación de flujos volcánicos que tiene el Grupo de Geología de Volcanes (GGV) de Ingeominas.

REFERENCIAS

- Alberico, I., Lirer, L., Petrosino, P., Scandone, R. (2002): *A methodology for the evaluation of long-term volcanic risk from pyroclastic flows in Campi Flegrei (Italy) – Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 116: 63-78.
- Bonadonna, C., Connor, C. B., Houghton, B. F., Connor, L., Byrne, M., Laing, A. & Hincks, T. (2005): *Probabilistic modeling of tephra dispersion: hazard assessment of a multi-phase eruption at Tarawera, New Zealand* - Journal of Geophysical Research, 110, B03203, doi: 10.1029/2003JB002896.
- Bursik, M., Patra, A., Pitman, E.B., Nichita, C., Macías, J.L., Saucedo, R., Girina, O. (2005): *Advances in studies of dense volcanic granular flows* - Reports on Progress in Physics 68: 271-301.
- Calvache, M.L. (1990): Geology and Volcanology of the Recent Evolution of Galeras Volcano, Colombia (Thesis master of science). 1-75 p. Louisiana State University, USA.
- Calvache, M.L. (1995): The geological evolution of Galeras volcanic complex (PhD Thesis). 89 p. Arizona State University, USA.
- Calvache, M. L.; Cortés, G. P.; Williams, S. N. (1997): *Stratigraphy and chronology of the Galeras Volcanic Complex, Colombia* - Journal of Volcanology and Geothermal Research, 77: 5-19.
- Canut I, P., Casagli I, N., Catani, F. & Falorni, G. (2002): *Modeling of the Guagua Pichincha volcano (Ecuador) lahars* - Physics and Chemistry of the Earth, 27: 1587 –1599.
- Cronin, S., Procter, J., Patra, A., Sheridan, M.F., Dalbey, K. (2004): *Evaluating a 2-D granular-flow numerical model for prediction of lahars from Crater Lake at Ruapehu*. 26th New Zealand Geothermal Workshop, Geological Society of New Zealand, New Zealand Geophysical Society.
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia) (2005): <http://www.dane.gov.co/censo/> (26/10/2010).
- Delaite G., Thouret J-C., Sheridan M., Labazuy P., Stinton A., Souriot T., Westen C-V. (2005): *Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars* - Z. Geomorphology. N. F., 140: 209-231.
- Druitt, T.H., Young, S.R., Baptie, B., Bonadonna, C., Calder, E.S., Clark, A.B., Cole, P.D., Harford, C.L., Herd, R.A., Luckett, R., Ryan, G., VOIGHT, B. (2002): *Episodes of cyclic Vulcanian explosive activity with fountain collapse at Soufrière Hills Volcano, Monserrat* - Geological Society, London Memoirs, 21: 281-306.
- Heim, A. (1932): *Bergsturz und Menschenleben*. Fretz and Wasmuth, 218 p. Zurich.
- Hurtado, A.D., Cortés J, G.P. (1997): *Third version of the hazard map of Galeras Volcano, Colombia* - Journal of Volcanology and Geothermal Research, 77: 89-100.
- Hsü, K.J. (1975): *Catastrophic debris streams generated by rockfalls*. Geological Society of America Bulletin, 86: 129-140.
- Iverson, R.M., Schilling, S.P., Vallance, J.W. (1998): *Objective delineation of lahar hazard zones downstream from volcanoes* - Geological Society of America Bulletin, 110: 972-984.
- Macías, J.L. Capra, L., Arce, J.L., Espíndola, J.M., García-Palomo, A., Sheridan, M.F. (2008): *Hazard Map of El Chichón volcano, Chiapas, México: Constraints posed by eruptive history and computer simulations*. - Journal of Volcanology and Geothermal Research, 175: 444-458.
- Magill, C.R., Hurst, A.W., Hunter, L.J., BLONG, R.J. (2006): *Probabilistic tephra fall simulation for the Auckland Region, New Zealand* - Journal of Volcanology and Geothermal Research, 153: 370-386.
- Murcia, H.F. (2008): Depósitos de lahar del Complejo Volcánico Tacaná y depósitos fluviales en el abanico de Tapachula, Chiapas, México (MSc Thesis). 153 p. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Murcia, H.F., Sheridan, M.F., Macias, J.L., Cortés, G.P. (2010): *Titan2d Simulations of pyroclastic flows at Cerro Machín volcano, Colombia: Hazards implications*.- Journal of South American Earth Sciences, 29: 161-170.

- Nakada, S., Shimizu, H., Ohta, K. (1999): *Overview of the 1990–1995 eruption at Unzen Volcano* - Journal of Volcanology and Geothermal Research, 89: 1-22.
- Orramas Dorta D, Toyos G, Oppenheimer C, Pareschi Mt, Sulpizio R, Zanchetta G. (2007): *Empirical modelling of the May 1998 small debris flows in Sarno (Italy) using LAHARZ* - Natural Hazards, 40: 381-396.
- Patra, A.K., Bauer, A.C., Nichita, C.C., Pitman, E.B., Sheridan, M.F., Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Stinton, A.J., Namikawa, L.M., Enschler, C.S. (2005): *Parallel adaptive simulation of dry avalanches over natural terrain* - Journal of Volcanology and Geothermal Research, 139: 1-22.
- Procter, J.N., Cronin, S.J., Platz, T., Patra, A., Dalbey, K., Sheridan, M., Neall, V. (2010): *Mapping block-and-ash flow hazards based on TITAN2D simulations: a case study from Mt. Taranaki, N.Z.* Geophysical Mass Flow Modelling Group, State University of New York at Buffalo - Natural Hazard, 53: 483-501.
- Rupp, B., Bursik, M., Namikawa, L., Webb, A., Patra, A.K., Saucedo, R., Macías, J.L., Renschler, C. (2006): *Computational modeling of the 1991 block and ash flows at Colima Volcano, México*. In: SIEBE, C., Macías, J.L., Aguirre-Díaz, G.J. (Eds.), *Neogene-Quaternary Continental Margin Volcanism: A Perspective from México*. Penrose Conference Series, Geological Society of America Special Paper, 402: 237-252 p.
- Saucedo, R., Macias, J.L., Sheridan, M.F., Bursik, M.I., Komorowski, J.C. (2005): *Modeling of pyroclastic flows of Colima Volcano, Mexico: implications for hazard assessment* - Journal of volcanology and geothermal research, 139: 103-115.
- Schilling, S.P. (1998): *Laharz: Gis programs for automated mapping of lahar inundations hazard zones* - US Geological Survey Open-File Report, 98-638.
- Sheridan, M.F., Stinton, A.J., Patra, A., Pitman, E.B., Bauer, A., Nichita., C.C. (2005): *Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington* - Journal of volcanology and geothermal research, 139: 89-102.
- Stevens, N. F., Manville, V., & Heron, D. W. (2002): *The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitized map contours and interferometric SAR at Ruapehu and Taranaki volcanoes, New Zealand*.- Journal of Volcanology and Geothermal Research, 199: 89-105.
- Stinton, A.J., Sheridan, M.F., Patra, A., Dalbey, K., Namikawa, L. (2004): *Incorporation of variable bed friction into TITAN2D mass-flow model: application to Little Tahoma Peak Avalanches (Washington)*. Acta vulcanológica, 16: 153-164.
- Stinton, A.J. (2007): Effects of changes in valley geomorphology on the behavior of volcanic mass-flows (PhD Thesis). 160 p. State University of New York at Buffalo, Buffalo, USA.
- Sulpizio, R., Capra, L., Sarocchi, D., Saucedo, R., Gavilanes-Ruiz, J.C., Varley, N.R. (2010): *Predicting the Block-and-ash flow inundation areas at Volcán de Colima (Colima, Mexico) based on the present day (February, 2010) status* - Journal of volcanology and geothermal research, 193: 49-66.
- Titan2d User Guide (2007): Geophysical Mass Flow Group (GMFG). State University of New York at Buffalo, USA, Release 2.0.0, 2007.07.09, http://www.gmfg.buffalo.edu/software/titan_userguide.pdf (02/10/2010).
- Walker, G.P.L. (1989): *Report on volcanology mission to Colombia*. Internal Report. 7 p. University of Hawaii, Honolulu, USA.