



***IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA
SIMULACIÓN DE FENÓMENOS VOLCÁNICOS, COMO SOPORTE EN LA
ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA DEL VOLCÁNICA DEL VOLCÁN
GALERAS – COLOMBIA***

INFORME TÉCNICO DE SIMULACIONES

En cumplimiento a la Sentencia de la Corte Constitucional T-269 de 2015

San Juan de Pasto, diciembre de 2015





Dirección de
Geoamenazas

***IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA
SIMULACIÓN DE FENÓMENOS VOLCÁNICOS, COMO SOPORTE EN LA
ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA DEL VOLCÁNICA DEL VOLCÁN
GALERAS – COLOMBIA***

INFORME TÉCNICO DE SIMULACIONES

En cumplimiento a la Sentencia de la Corte Constitucional T-269 de 2015

Por:

**SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
DIRECCIÓN DE GEOAMENAZAS**

San Juan de Pasto, diciembre de 2015

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	9
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	13
1. GENERALIDADES	17
1.1 LOCALIZACIÓN	17
1.2 OBJETIVO	19
2. FENÓMENOS VOLCÁNICOS	21
2.1 CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA	21
2.2 CAÍDA DE PIROCLASTOS	21
2.2.1 Piroclastos transportados por acción eólica	22
2.2.2 proyectiles Balísticos	22
2.3 LAHARES (Flujos de Lodo y de Escombros Volcánicos)	22
2.4 DOMOS Y FLUJOS DE LAVA	23
2.5 ONDAS DE CHOQUE.....	23
2.6 GASES VOLCÁNICOS.....	24
2.7 SISMO VOLCÁNICO ASOCIADO CON FRACTURA DE MATERIAL CORTICAL	24
3. MODELOS DIGITALES DEL TERRENO	25
3.1 MODELOS DIGITALES DE ELEVACION	25
3.2 MODELO DIGITAL DEL RELIEVE.....	26
4. CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA	27
4.1 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN TITAN 2D	27
4.1.1 Parámetros utilizados para las simulaciones	28
4.2 SIMULACIÓN DE CDP: FLUJOS DE ESCORIA	30
4.2.1 Geología.....	30
4.2.2 Parámetros utilizados para las simulaciones	30
4.2.3 Análisis de los resultados	31
4.3 SIMULACIÓN DE CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA versión 1997	31
4.3.1 Geología.....	32
4.3.2 Parámetros utilizados para las simulaciones	32
4.3.3 Análisis de los resultados	34
4.4 RESULTADOS FINALES CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA	35
5. CAÍDA DE PIROCLASTOS	37
5.1 SIMULACIÓN POR CAÍDA DE PIROCLASTOS TRANSPORTADOS EÓLICAMENTE	37
5.1.1 Herramienta de simulación Tephra2.....	38
5.1.2 Geología.....	39
5.1.3 Parámetros utilizados para las simulaciones	40

Servicio Geológico Colombiano

5.1.4	Análisis de los resultados	41
5.2	SIMULACIÓN POR CAÍDA DE PIROCLASTOS DE PROYECCIÓN BALÍSTICA.....	43
5.2.1	Geología.....	43
5.2.2	Herramienta de simulación Eject!.....	44
5.2.3	Parámetros utilizados para las simulaciones	45
5.2.4	Análisis de los resultados	46
6.	FLUJOS DE LAVA	49
6.1	HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN LAVA PL	49
6.2	GEOLOGÍA	50
6.2.1	Lavas de 1866	50
6.2.2	Lavas Fisurales.....	52
6.3	SIMULACIÓN	53
6.3.1	Parámetros utilizados en las simulaciones	53
6.3.2	Análisis de los resultados	57
7.	FLUJOS DE LODO Y FLUJOS DE ESCOMBROS (LAHARES)	59
7.1	HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN	59
7.2	GEOLOGÍA	62
7.3	SIMULACIÓN	63
7.3.1	Parámetros utilizados en las simulaciones.	63
7.3.2	Análisis de los resultados	63
8.	ONDAS DE CHOQUE	67
8.1	HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN.....	67
8.2	GEOLOGÍA	67
8.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN	67
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del volcán Galeras, principales drenajes y poblaciones en su área de influencia.....	17
Figura 2. Panorámica del Volcán Galeras, ladera NE desde Pullito Pamba en Genoy	18
Figura 3. Penetración de longitudes de onda.....	25
Figura 4. Modelo Digital de Elevaciones GeoSAR (2013) y Relieve derivado.....	26
Figura 5. Polarización e Imagen de Radar UAVSAR (2015).....	26
Figura 6. Ecuaciones de Conservación de Masa (1) y Momentum en X e Y (2-3)	27
Figura 7. CDP: Flujos de Escoria.....	31
Figura 8. Sección transversal N-S del volcán Galeras, en la que se muestran algunos parámetros morfométricos y se ilustran los lugares de origen de los flujos piroclásticos simulados	33
Figura 9. Recorrido de los flujos piroclásticos simulados en diferentes direcciones en el volcán Galeras, con un volumen de $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, 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	34
Figura 10. Zona que podría ser afectada por CDP (flujos y oleadas piroclásticas) generadas en erupciones del volcán Galeras	35
Figura 11. Principios para Caída de Piroclastos en el código Tephra	38
Figura 12. Entradas y salidas en el modelo de simulación Tephra.....	39
Figura 13. Análisis y estimación de volúmenes y distribución de los depósitos de caídas de ceniza y <i>lapilli</i> para la actividad eruptiva entre 1992 y 2010	40
Figura 14. Representación de simulaciones superpuestas y filtradas con los siguientes criterios: 0,1 mm a 1 cm, zona de amenaza baja (color amarillo); entre 1 cm y 10 cm, zona de amenaza media (color naranja); y mayor a 10 cm zona de amenaza alta (en color rojo)	42
Figura 15. Distribución de Caída Piroclástica por proyección balística en la erupción de Agosto 11-12 de 2004.....	43
Figura 16. Simulación computacional de proyectiles balísticos	46
Figura 17. Zonificación de la amenaza por proyectiles balísticos	47
Figura 18. Diagrama de flujo para simulación de lavas.....	50
Figura 19. En la fotografía se aprecian los depósitos de lava originados en el cráter (SGC), a la derecha en el mapa se observa el curso de las lavas localizada hacia el W del volcán Galeras y los espesores de los depósitos	51
Figura 20. Flujo de lavas de 1866 visto desde el valle del río Azufral de W hacia E (Stübel, 1906).....	51

Figura 21. Ilustración en planta del flujo de lavas de 1866 (Stübel, 1906) e interpretación sobre imagen de radar (UAVSAR, 2015), en la cual se contrasta la correlación espacial	52
Figura 22. Localización de los depósitos y espesores de lavas fisurales (Calvache, 1990)	52
Figura 23. Puntos de emisión posible de flujos de lava utilizados en la simulación	54
Figura 24. Distribución de los Depósitos de Lavas en el volcán Galeras	55
Figura 25. Parametrización de la lava emitida por pulsos	56
Figura 26. Áreas potencialmente afectadas por flujos de lavas.....	58
Figura 27. Dispersión de puntos de los valles inundados en área de sección transversal (A) en función del volumen del <i>lahar</i> (V). La gráfica muestra la línea de mejor ajuste de regresión logarítmica con la cual calcularon la constante de 0,05 para la ecuación de (A) en función (V) y los intervalos de confianza del 95% para la regresión (líneas discontinuas) y la predicción (líneas verdes) (Schilling, 2013).	60
Figura 28. Dispersión de puntos de áreas inundadas en planta (B) en función del volumen del <i>lahar</i> (V). La línea de regresión logarítmica de mejor ajuste, con la cual calcularon la constante de 200 para la ecuación (B) en función de (V) y los intervalos de confianza del 95% para la regresión (líneas discontinuas) y de predicción (líneas verdes), (Schilling, 2013).....	61
Figura 29. Sección transversal (A) y planimétrica (B) definidas para un <i>lahar</i> , que se utilizan en el programa LAHARZ. La relación H/L describe el alcance de la zona de peligro proximal a partir de la cual comienza la simulación (Iverson et al., 1998; Schilling, 2013).....	62
Figura 30. Resultados de las simulaciones de flujos de lodo volcánico (<i>lahares</i>) para un volumen de 3 millones de metros cúbicos correspondiente a los polígonos de color rojo el área de influencia del volcán Galeras.	64
Figura 31. Resultados de las simulaciones de flujos de lodo volcánico (<i>lahares</i>) para un volumen de 3 millones de metros cúbicos en el área proximal del volcán Galeras correspondiente a los polígonos de color rojo.	65
Figura 32. Zonificación para ondas de choque producidas por explosiones en el volcán Galeras, tomado de Córdoba y Del Risco (1998).	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ángulos de fricción basal propuestos por Stinton (2004), de acuerdo al coeficiente de fricción basal formado entre un flujo y la superficie sobre la que se desliza	29
Tabla 2. Parámetros de entrada para la simulación de caída de ceniza y lapilli.....	41
Tabla 3. Parámetros de entrada al modelo.....	53
Tabla 4. Espesor y Volumen de los depósitos de lavas	55
Tabla 5. Parámetros finales para la simulación de lavas en el código LavaPL	57

RESUMEN

El volcán Galeras, la etapa más reciente del Complejo Volcánico Galeras (CVG), es un volcán activo, cuyo registro geológico muestra un comportamiento predominantemente explosivo, de tipo vulcaniano, alternado con actividad efusiva. Presenta un registro histórico de actividad casi continua, con un último período de reposo entre 1950 y 1988, año en que se reactivó, por lo cual INGEOMINAS (hoy Servicio Geológico Colombiano, SGC) implementó su vigilancia permanente y comenzó estudios tendientes a la elaboración de un mapa de amenaza (elaborando tres versiones hasta 1997), aunque esta misma actividad impidió la realización de estudios geológicos detallados. En 2015, la Corte Constitucional de Colombia, mediante Sentencia T-269, ordena al SGC presentar una nueva actualización del mapa de amenaza volcánica. De acuerdo al plazo otorgado, y en cumplimiento de tal sentencia, se presenta dicha actualización, la cual se fundamenta en la evaluación de la amenaza volcánica que arrojó la revisión de la información: geológica disponible, histórica y de la actividad volcánica desde 1988 al presente, información base para la realización de simulaciones computacionales para los diferentes fenómenos volcánicos, cuyos resultados fueron considerados para la elaboración del mapa de amenaza, complementado con resultados de simulaciones llevadas a cabo para la tercera versión en 1997. Como foco principal, la evaluación de la amenaza considera el cráter principal del cono activo. De acuerdo al conocimiento del comportamiento eruptivo del volcán, los periodos de actividad pueden extenderse por varios años y las erupciones que podrían presentarse serían principalmente de carácter explosivo (incluyendo la formación y destrucción de domos), durante las cuales podrían generarse oleadas y flujos piroclásticos, caídas de ceniza y *lapilli*, proyectiles balísticos, *lahares*, ondas de choque y sismos volcánicos; flujos de lava pueden ocurrir, entre fases de actividad explosiva, como lo muestra el registro geológico.

En este informe se presenta la metodología en la simulación de los diferentes fenómenos, las herramientas de modelamiento y los resultados obtenidos; como resultado de las capacitaciones y asesoría de los Doctores Chuck Connor, Sylvain Charbonnier, Leah Courtland y Jorge Bajo del grupo de investigación VHUB – (*Collaborative Volcano Research and Risk Mitigation*) de las Universidad del Sur de la Florida y de la Universidad de Buffalo de los Estado Unidos, bajo la orientación del grupo de Geología del Área Técnica en Geoamenazas en cabeza de la Dra. M. Calvache del proyecto del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Para las simulaciones de los diferentes fenómenos volcánicos se utilizaron las herramientas LAVA PL (Connor *et al*, 2012) para flujos de lava, TITAN2D (Patra, *et al*,

Servicio Geológico Colombiano

2005) para flujos piroclásticos, TEPHRA2 (Bonadonna, *et al.*, 2005) para caídas de piroclastos transportados eólicamente, GET WIND (Courtland, 2015) para perfiles de viento, EJECT! (Mastín, 2003) para caída de piroclastos por proyección balística y LaharZ_py (Iverson *et al.*, 1998; Schilling, *et al.*, 1998) para *lahares*.

ABSTRACT

Galeras volcano, the most recent stage of Galeras Volcanic Complex (CVG), is an active volcano whose geological record shows a predominantly explosive behavior of Vulcanian type alternating with effusive activity. It has an historical record dating back to the XVI century of almost continuous activity, with a final rest period between 1950 and 1988, when it renewed activity; since then, INGEOMINAS (now the Colombian Geological Service, SGC) implemented its still ongoing monitoring and began studies aimed at developing a hazard map (updated in three versions until 1997), although said activity didn't allow any further detailed geological studies. In 2015, Colombia's Constitutional Court, in Ruling T-269, orders the SGC to present a new update of the volcanic hazards map. In accordance with the time period granted, and in compliance with the aforementioned ruling, the update is presented; it's based on the assessment of the volcanic threat given by the review of: available geological information, historical records and volcanic activity from 1988 to the present, base information used for conducting computer simulations for different volcanic phenomena, the results of which were considered for the preparation of the hazard map, supplemented by results of simulations carried out for the third version in 1997. The hazard assessment considered the main crater of the active cone as a main vent. According to the knowledge of the eruptive behavior of the volcano, the periods of activity may extend over several years and eruptions that might occur would be primarily of explosive nature (including the formation and destruction of domes), during which pyroclastic flows and surges, ash falls and lapilli, ballistic bombs, lahars, shock waves and volcanic earthquakes could be generated; Lava flows can occur between phases of explosive activity, as shown in the geological record.

This report presents the methodology in the simulation of the different phenomena, the modeling tools and the results obtained; As a result of the training and counseling of Drs. Chuck Connor, Sylvain Charbonnier, Leah Courtland and Jorge Bajo of the VHUB - (Collaborative Volcano Research and Risk Mitigation) research group at the University of South Florida and the University of Buffalo The United States, under the guidance of the Geology Group of the Technical Area in Geoamenazas headed by Dr. M. Calvache of the project of the Colombian Geological Survey (SGC).

For the simulations of the different volcanic phenomena we used the tools: Lava PL (Connor, et al., 2012) for lava flows, Titan2D (Patra, et al., 2005) for the pyroclastic flows, Tephra2 (Bonadonna, et al., 2005) for pyroclastic falls, Get Wind (Courtland,

Servicio Geológico Colombiano

2015) for Wind profiles, Eject! (Mastin, 2003) for ballistic projection pyroclasts and LaharZ_py (Iverson *et al.*, 1988; Schilling, *et al.*, 1998) for lahars.

INTRODUCCIÓN

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), en los últimos años y como parte del proyecto en Investigaciones Aplicadas a Amenazas y Riesgos Geológicos (AME13-07) de la Dirección de Geoamenazas, ha venido trabajando en la elaboración y actualización de los mapas de amenaza volcánica para los principales volcanes activos de Colombia. La metodología general para la elaboración de estos mapas se fundamenta en tres aspectos: *La reconstrucción de la actividad eruptiva del volcán*, soportada en los trabajos geológicos y en el análisis e interpretación de la actividad eruptiva histórica; *la evaluación de la amenaza volcánica*, en la cual como resultado de la fase anterior se definen los fenómenos volcánicos y los registros geológicos más recientes, y como referencia para los procesos de simulación, con lo cual finalmente, son evaluados y ajustados de acuerdo al conocimiento geológico y geomorfológico; en la fase final de *zonificación de la amenaza*, los fenómenos son categorizados de acuerdo a la amenaza que representan y en esta etapa se describe el recorrido, alcance y afectación de la amenaza.

La actualización del mapa de amenaza del volcán Galeras, en cumplimiento a la Sentencia de la Corte Constitucional T-269 de 2015, se realizó teniendo en cuenta el conocimiento geológico que sobre el volcán se tiene hasta la fecha (Calvache, 1990, 1995; Banks *et al.*, 1997; Calvache & Williams, 1997a y 1997b; Calvache *et al.*, 1997), tomando en consideración que la actividad volcánica de Galeras, desde su reactivación, ha sido una limitante para llevar a cabo estudios geológicos detallados adicionales, principalmente en el sector del cañón del río Azufral al occidente (W), donde su historia eruptiva posiblemente esté mejor expuesta. Sin embargo, es precisamente la constante actividad de Galeras la que proporciona la nueva información geológica utilizada en la presente actualización, la cual se complementa con el análisis de los reportes sobre actividad histórica, principalmente la consignada en trabajos más recientes (Espinosa, 2001, 2011; Torres & Gómez, en preparación) y el conocimiento sobre el comportamiento y estilo eruptivo del volcán (*i.e.*, Gómez & Torres, 1997; Stix *et al.*, 1997; Park *et al.*, 2011; Narváez, 2012; Torres, 2012; Ortega, 2012 e Informes Técnicos del OVSPasto), derivados del monitoreo continuo desde 1989, a cargo del Observatorio Vulcanológico y Sismológico del SGC en Pasto (<http://www.sgc.gov.co/Pasto.aspx>).

Las áreas que podrían ser amenazadas por los fenómenos volcánicos fueron delimitadas principalmente a partir de los resultados de nuevas simulaciones computacionales, empleando para ello modelos digitales de terreno (DEM). Estas simulaciones permiten tener un mejor acercamiento a la distribución de los fenómenos que podrían ser generados en erupciones futuras. Para el volcán Galeras, se llevaron a

Servicio Geológico Colombiano

cabo simulaciones de flujos de escoria con el código TITAN2D (Patra *et al.*, 2005); flujos de lava con los códigos LavaPL (Connor *et al.*, 2012) y LavaC (Richardson & Connor, 2014); caídas piroclásticas con los códigos Tephra2 (Bonnadonna *et al.*, 2005) y GetWind (Courtland, 2015). Estos programas hacen parte de las herramientas de simulación en línea del grupo de investigación internacional en volcanes y mitigación de riesgo VHUB (www.vhub.org). Contando con el apoyo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), para proyectiles balísticos se empleó el código Eject! (Mastin, 2001) y para *lahares*, el método LaharZ (Iverson *et al.*, 1998; Schilling, 2014). La parametrización de estas herramientas fue obtenida de los trabajos geológicos existentes y datos arrojados por la descripción de la actividad histórica y más reciente del volcán, consignados en SGC (en preparación).

Al no contar con nuevos datos geológicos, ni nuevas herramientas para la simulación de algunos fenómenos, se usaron los resultados de simulaciones llevadas a cabo anteriormente, como son los obtenidos por Hurtado & Cortés (1997) e INGEOMINAS (1997) para la simulación de flujos de ceniza y oleadas piroclásticas, empleados en la tercera versión del mapa de amenaza; los resultados de simulaciones para flujos piroclásticos de bloques y ceniza, generados en el volcán Galeras, presentados por García (2010) y García *et al.* (2011); y los resultados de simulación para ondas de choque de Córdoba & Del Risco (1998).

El presente informe se enfoca principalmente a la metodología y resultados obtenidos en la simulación de los diferentes fenómenos volcánicos para un escenario máximo esperado y definido por el grupo de trabajo de geología:

El capítulo 1. Generalidades, tiene como finalidad ubicar al lector en la zona de estudio, definiendo algunos aspectos generales del Complejo Volcánico Galeras.

El capítulo 2. Fenómenos volcánicos, conceptualiza los diferentes fenómenos volcánicos simulados para el volcán objeto de estudio.

En el capítulo 3. Modelo Digital de Elevaciones, se hace una breve descripción del MDE utilizado en las diferentes simulaciones.

En los capítulos del 4 al 7, explica brevemente la metodología y resultados obtenidos en las simulaciones de Corrientes de Densidad Piroclástica (CDP): Flujos de Escoria, Flujos de Lava, Caída de Piroclastos transportados por acción eólica y por proyectiles balísticos y *Lahares*.

Para dar cumplimiento a la actualización de lo ordenado por la Sentencia, se conformó un grupo de trabajo integrado por personal del SGC, tanto de la Sede Central, como de los Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos de Pasto, Popayán y Manizales: Marta Lucia Calvache, Directora Dirección de Geoamenazas SGC; Diego Gómez Martínez,

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

Servicio Geológico Colombiano

Coordinador del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto; Gloria P. Cortés, Coordinadora del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales. Geólogos: María Luisa Monsalve, Paola Narváez Obando, Indira Zuluaga, Ana María García y Julián Ceballos. Ingenieros: Carlos A. Laverde, Carlos J. Muñoz, Rafael Cárdenas, Roberto Torres. Geógrafo John J. Galarza. Contando con el apoyo de los geólogos: Bernardo Pulgarín, Natalia Pardo, Ana María Correa, Lilly Martínez y Ricardo Méndez. Y en gestión documental se recibió colaboración de Gabriela Quiroz.

1. GENERALIDADES

1.1 LOCALIZACIÓN

El volcán Galeras es catalogado como uno de los volcanes más activos de Colombia, corresponde al cono actual del Complejo Volcánico Galeras (CVG), definido por Cepeda (1985 y 1989) y redefinido por Calvache (1995, en Cortés & Calvache, 2002). Está localizado en el departamento de Nariño, en las coordenadas geográficas 1°13,31' Latitud N y 77°21,68' Longitud W, en el dominio geográfico de la depresión interandina Cauca-Patía entre las cordilleras Occidental y Central. Se encuentra a 9 km al occidente (W) de la ciudad de San Juan de Pasto, a 530 km al nororiente (NE) de la ciudad de Bogotá y a 60 km de la frontera entre Colombia y Ecuador (Figura 1). El volcán Galeras se encuentra ubicado dentro del Santuario de Flora y Fauna Galeras (SFFG), que hace parte del Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN, 2005).

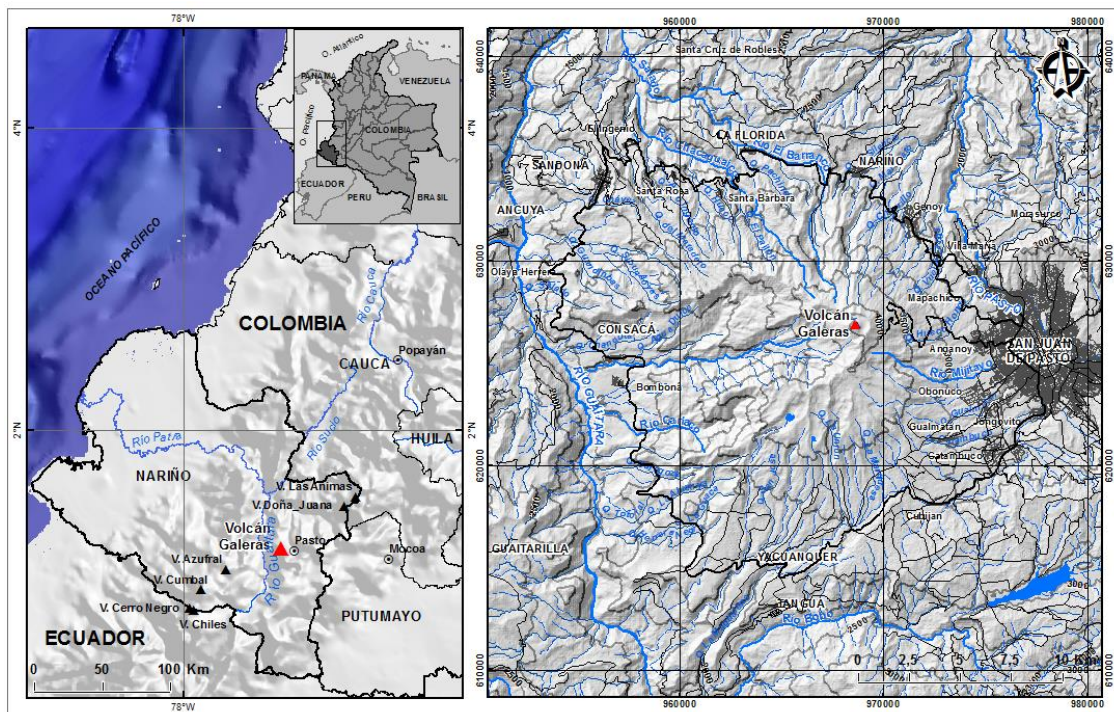


Figura 1. Localización del volcán Galeras, principales drenajes y poblaciones en su área de influencia

En la zona de influencia proximal del volcán se encuentran asentados los municipios de Pasto, con 440.000 habitantes (cabecera municipal a 9 km al este del cráter), Nariño con 4900 habitantes (cabecera municipal a 7,3 km al norte del cráter), La Florida con

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

Servicio Geológico Colombiano

9600 habitantes (cabecera municipal a 10 km al noroeste del cráter), Sandoná con 25.700 habitantes (cabecera municipal a 14 km al noroeste del cráter), Consacá con 9400 habitantes (cabecera municipal a 11,4 km al oeste del cráter), Yacuanquer con 11.000 habitantes (cabecera municipal a 12,3 km al sur del cráter) y Tangua con 9700 habitantes (cabecera municipal a 14,5 km al sur del cráter). Esta zona proximal al Galeras en total alberga cerca de 500.000 habitantes (DANE, 2011).

Al volcán Galeras se accede por medio de una carretera de 14 km en mal estado, que va de la ciudad de San Juan de Pasto (sector de Anganoy) hasta la cima del CVG. Existen numerosas vías alrededor de la zona de influencia del volcán, como: el “Camino Real” que antiguamente comunicaba la ciudad de San Juan de Pasto con la población de Consacá y que bordea la parte alta del CVG; el carreteable que comunica los corregimientos de Mapachico y Genoy con la ciudad de San Juan de Pasto, con una longitud de 9 km; la vía circunvalar de aproximadamente 108 km, parcialmente pavimentada, que comunica a San Juan de Pasto con los municipios de Nariño, La Florida, Sandoná, Consacá y Yacuanquer; así como carreteables que comunican las cabeceras municipales con sus veredas, como el de Consacá-Churupamba, al occidente (W) y los de Sandoná-Alto Jiménez e Ingenio-Alto Ingenio al noroccidente (NW).



Figura 2. Panorámica del Volcán Galeras, ladera NE desde Pullito Pamba en Genoy

Servicio Geológico Colombiano

En el CVG se originan ríos y quebradas que surten las bocatomas de los acueductos y riegos de cultivos, que benefician a las poblaciones asentadas en su zona de influencia. El drenaje es de tipo radial, teniendo al occidente (W), el río Azufral (que nace en el cono activo) y la quebrada Churupamba, afluentes del río Guáitara; al noroccidente (NW) los ríos Barranco y Chacaguaico y las quebradas, El Pailón, Panchindo y El Ingenio, tributarios del río Salado, que vierte sus aguas en el río Guáitara; hacia el norte (N) y nororiente (NE) las quebradas Maragato, Chorrillo, Tequendama, Genoy-Guaico, Agua Agria, El Vergel, El Guiaco, San Francisco, Los Saltos y El Salto, que vierten al río Pasto. En el sector oriental (E) y suroriental (SE) el río Mijitayo y las quebradas Midoro y Juanambú, afluentes del río Pasto.

1.2 OBJETIVO

El propósito de este informe, es la elaboración de un documento con el proceso llevado a cabo para realizar las simulaciones de los diferentes fenómenos volcánicos, mediante la incorporación de herramientas computacionales como insumo para la generación o actualización de los mapas de amenaza volcánica considerados como objeto de trabajo por parte de la Dirección de Geoamenazas del SGC.

2. FENÓMENOS VOLCÁNICOS

En este apartado se conceptualizan los diferentes fenómenos volcánicos asociados a la amenaza volcánica del Volcán Galeras.

2.1 CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA

Los flujos y oleadas piroclásticas son nubes de material incandescente compuestas por fragmentos de rocas, cenizas y gases calientes (de 300°C a > 800°C) que se mueven a grandes velocidades (de decenas a varios centenares de km/h) desde el centro de emisión por los flancos del volcán, tendiendo a seguir los valles. Se originan a partir del colapso gravitacional de columnas eruptivas, por colapso y explosión de domos o por colapso de flujos de lava. La mayoría de los flujos piroclásticos tienen dos partes: un flujo basal de fragmentos gruesos que se mueve a lo largo de la superficie del suelo y una nube turbulenta de ceniza que se eleva por encima del flujo basal. La ceniza puede caer desde esta nube en un área amplia siguiendo la dirección del viento. Las oleadas piroclásticas presentan un mayor contenido de gases y son más turbulentas, con una mayor distribución lateral, desplazándose en los valles y altos topográficos. Tanto el deshielo de masas glaciares como el represamiento de ríos y quebradas a causa de CDP pueden generar *lahares*. Las corrientes de densidad piroclástica destruirán todo a su paso y específicamente pueden causar: - Arrasamiento e incendio de los elementos expuestos en su trayectoria, debido a sus altas velocidades y temperaturas. - Cubrimiento y enterramiento del área expuesta, incluyendo obstrucción de cauces, relleno de depresiones topográficas e interrupción de vías. - Muerte de personas y animales por quemaduras e inhalación de ceniza caliente y gases. La probabilidad de sobrevivir al impacto de un flujo piroclástico es nula.

2.2 CAÍDA DE PIROCLASTOS

Las erupciones explosivas, son el tipo de actividad volcánica más potente, producen grandes cantidades de material fragmentado (piroclastos) que pueden ser expulsados por columnas eruptivas o flujos piroclásticos (corrientes de densidad piroclástica). Como consecuencia de estas erupciones los volcanes expiden a la atmósfera partículas fragmentadas (piroclastos) que de acuerdo a su tamaño se conocen como: ceniza (menor de 2 mm), lapilli (2 a 64 mm) y bloques y bombas (mayor de 64 mm). Las caídas de piroclastos se clasifican en:

2.2.1 Piroclastos transportados por acción eólica

La ceniza y el *lapilli* son transportados por el viento hasta zonas alejadas del volcán (cientos o miles de kilómetros) y depositados por efecto de la gravedad, formando capas que siguen la topografía preexistente y, en general, cubren un área muy extensa. Generalmente, la cantidad de piroclastos acumulados y su tamaño de grano disminuyen con la distancia al volcán. En la mayoría de las erupciones se producen caídas piroclásticas y su distribución dependerá de la dirección y velocidad del viento predominante. Las caídas de piroclastos pueden causar: - Oscurecimiento del ambiente. - Afectación a la salud humana y animal: afecciones respiratorias, irritación de los ojos y las vías respiratorias, intoxicaciones y alergias. - Daños en las infraestructuras y viviendas: cubrimiento y enterramiento, obstrucción de drenajes artificiales, colapso de techos y líneas de conducción eléctrica, corrosión a elementos metálicos. - En la agricultura y ganadería: pérdida parcial o total de cultivos y ganado. - Contaminación de fuentes de agua por sólidos y químicos. - Tormentas eléctricas y afectación al transporte aéreo y terrestre.

2.2.2 proyectiles Balísticos

Las bombas y los bloques (diámetro desde 64 mm hasta métricos) son expulsados con trayectorias parabólicas como proyectiles balísticos desde el cráter, a velocidades de decenas a centenares de metros por segundo. Por lo general, su distribución está restringida a una distancia menor a 10 km del punto de emisión. Los proyectiles balísticos causan destrucción de infraestructura, incendios de viviendas o forestales y muerte o lesiones graves a seres vivos por impacto directo.

2.3 LAHARES (FLUJOS DE LODO Y DE ESCOMBROS VOLCÁNICOS)

Son una mezcla de fragmentos de roca, arena, limo, arcilla, biomasa (vegetación, troncos de árboles arrastrados) y agua que se desplazan por los cauces de las quebradas y ríos. Un *lahar* en movimiento se presenta como una masa de concreto húmedo que carga fragmentos que varían desde arcilla hasta bloques de más de 10 metros en diámetro. Los *lahares* varían en tamaño y velocidad; *lahares* grandes, de cientos de metros de ancho y decenas de metros de profundidad, pueden fluir a varias decenas de metros por segundo. Estos tipos de flujos se pueden generar durante (primarios) o después (secundarios) de las erupciones volcánicas, por una variedad de mecanismos que permiten la interacción del agua con materiales volcánicos y no volcánicos. Según su contenido de materiales sólidos, en su orden de mayor a menor concentración, se denominan: flujos de escombros y flujos hiperconcentrados volcánicos, estos últimos son conocidos comúnmente como flujos de lodo volcánicos; un flujo de escombros puede diluirse y transformarse en un flujo hiperconcentrado. Las

fuentes de agua para formar *lahares* pueden provenir de nieve, de hielo, de lagos cratéricos, de lluvias, de corrientes fluviales o de reservorios de agua en el interior del volcán. Los *lahares* pueden causar: - Arrasamiento y destrucción de vegetación, cultivos y de las estructuras existentes a lo largo de su trayectoria (puentes, casas e infraestructura). - Relleno de cauces naturales y artificiales, además de inundación, enterramiento y aislamiento de grandes extensiones de terreno (por fuera del cauce). Por su velocidad y su energía, un *lahar* es un fenómeno muy peligroso y la probabilidad de sobrevivir a su impacto directo es mínima.

2.4 DOMOS Y FLUJOS DE LAVA

Son corrientes de roca fundida, que son emitidas por el cráter o por grietas en los flancos del volcán. Al salir del cráter forman lóbulos que tienden a canalizarse a lo largo de los valles; su velocidad y alcance dependen de su composición, la morfología del valle y las barreras topográficas que encuentren a su paso. Existen lavas fluidas y lavas viscosas: las primeras pueden extenderse hasta decenas de kilómetros desde el foco de emisión; mientras que las menos fluidas avanzan pocos kilómetros desde los focos eruptivos. Cuando las lavas son muy viscosas se acumulan en los centros de emisión, formando montículos escarpados o en forma de cúpula conocidos como domos de lava, que al enfriarse taponan estos centros de emisión; los domos pueden explotar o colapsar generando flujos piroclásticos. Los flujos de lava se mueven relativamente lento, de manera que las personas pueden alejarse de su trayectoria, sin embargo, todo en su camino será derribado, sepultado y quemado debido a sus altas temperaturas. Las lavas específicamente pueden causar: - Destrucción de infraestructura, enterramiento, quema de cultivos e incendios forestales. - Muertes atribuidas a los flujos de lava son a menudo debido a causas indirectas, tales como las explosiones cuando la lava interactúa con el agua, asfixia debido a los gases tóxicos acompañantes. En caso de que exista una erupción que genere flujos de lava, se debe poner particular atención al avance de los mismos hacia centros poblados o infraestructuras.

2.5 ONDAS DE CHOQUE

Es una onda de presión que se propaga a una velocidad mayor que la del sonido, producida durante la actividad explosiva de un volcán. Las ondas de choque pueden causar: vibración y rompimiento de ventanas, fisuras en paredes y líneas vitales, conmoción en las personas que se vean afectadas por este tipo de fenómeno.

2.6 GASES VOLCÁNICOS

Antes, durante y después de una erupción los volcanes emiten cantidades importantes de gases, siendo en su mayoría vapor de agua, al cual se suman ciertas concentraciones de CO₂ (dióxido de carbono), SO₂ (dióxido de azufre) y H₂S (sulfuro de hidrógeno) entre otros, los cuales se diluyen rápidamente en la atmósfera, de manera que no representan un peligro mayor para la salud humana. Sin embargo las concentraciones de CO₂ y CO (gases inoloros) en depresiones topográficas pueden llegar a causar la muerte. Una exposición prolongada a gases volcánicos puede provocar irritación de los ojos y problemas respiratorios.

2.7 SISMO VOLCÁNICO ASOCIADO CON FRACTURA DE MATERIAL CORTICAL

Los sismos generados por la actividad interna de un volcán generalmente no son de gran magnitud; sin embargo, se pueden registrar sismos sentidos, incluso con magnitudes superiores a 5. Los sismos volcánicos pueden ocasionar desde daños menores en la infraestructura y líneas vitales hasta colapso de viviendas; además pueden ocasionar diferentes tipos de movimientos en masa, dependiendo de la magnitud y la distancia al epicentro.

3. MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

Las imágenes obtenidas a partir de sensores remotos montados en plataformas aéreas capturan la elevación del terreno utilizando como fuente activa el radar, el cual emite señales de micro-ondas emitidas por sensores y posteriormente reflejadas por la superficie terrestre siendo detectadas por la antena del sistema de radar; la velocidad de propagación y la diferencia de fase en tiempo desde el momento en que se emite y se recibe la señal permite determinar la distancia y variación de altura del terreno.

3.1 MODELOS DIGITALES DE ELEVACION

Los modelos digitales de elevación son estructuras raster conformadas por celdas en la que se representa la variación altitudinal de la superficie, siendo posible generar modelos derivados como el de sombras, pendientes, orientación, rugosidad y también modelar las redes hídricas y la caracterización morfológica del terreno.

Es importante denotar que los modelos digitales del terreno definen la altura de la superficie sin discriminar la cobertura vegetal de la superficie del suelo, lo cual es una limitación en los procesos de modelamiento al utilizar Modelos Digitales de Superficie comúnmente conocidos como Modelos Digitales de Elevación (MDE), algunos de libre descarga como Aster y SRTM de NASA y Alos Palsar de JAXA - NASA.

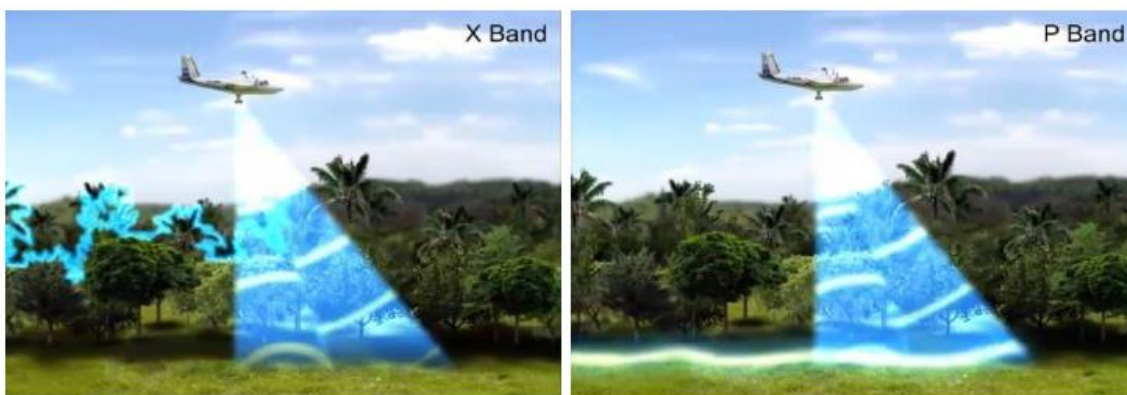


Figura 3. Penetración de longitudes de onda

Algunas casas comerciales ofrecen productos que diferencian el terreno de la cobertura vegetal como es el caso de las imágenes de radar GeoSAR (2007) lo cual es posible con longitudes de onda larga conocidas como banda P con resolución espacial de 5 m, que fue la obtenida para este proyecto.

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

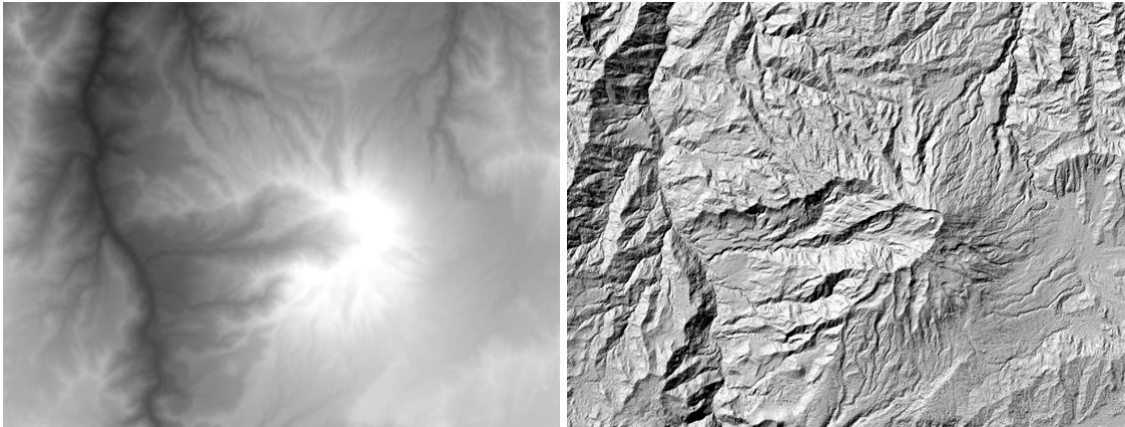


Figura 4. Modelo Digital de Elevaciones GeoSAR (2013) y Relieve derivado

3.2 MODELO DIGITAL DEL RELIEVE

Imagen de radar del proyecto UAVSAR (Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar) del JPL de la NASA, polarizada en sus componentes HH, HV y VV, la cual brinda características morfológicas del terreno y fue utilizada como apoyo para la identificación y delimitación de algunos tipos de depósitos.

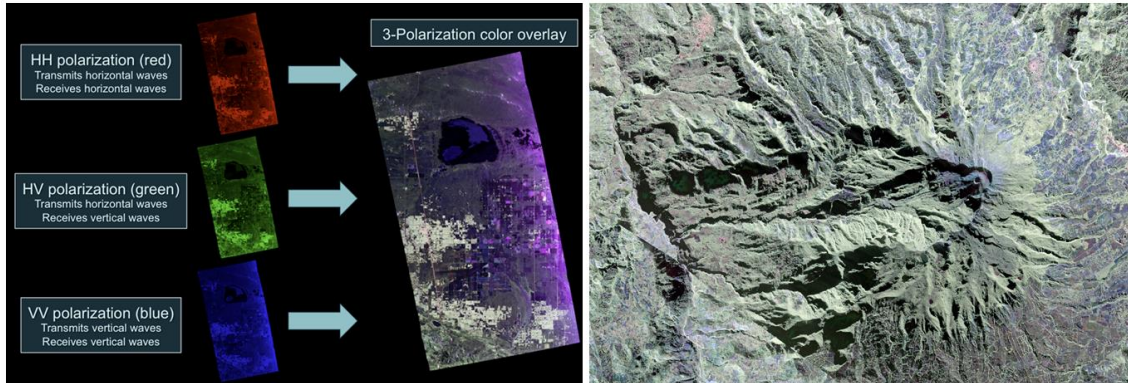


Figura 5. Polarización e Imagen de Radar UAVSAR (2015)

4. CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA

Las Corrientes de Densidad Piroclástica (CDP), son nubes de material incandescente compuesta por fragmentos de rocas, cenizas y gases calientes (de 300°C a > 800°C) que se mueven a grandes velocidades (de decenas a varios centenares de Km/h) desde el centro de emisión por los flancos del volcán tendiendo a seguir los valles. Se originan a partir del colapso gravitacional de columnas eruptivas y por la destrucción gravitacional y explosiva de domos y flujos de lava. La mayoría de los flujos piroclásticos tienen dos partes: un flujo basal, de fragmentos gruesos que se mueven a lo largo de la superficie del suelo y una nube turbulenta de ceniza que se eleva por encima del flujo basal.

En este apartado se disientirá sobre el aplicativo utilizado para la simulación, la metodología seguida y los resultados obtenidos.

4.1 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN TITAN 2D

Para el trabajo de modelamiento, se utilizó el código en línea TITAN 2D, el cual es un programa informático de libre acceso desarrollado por el grupo GMFG (Geophysical Mass Flow Group, 2007) en Suny Buffalo (EE.UU.). Para mayor información sobre el programa, consultar la documentación y casos de estudio dispuestos en <https://vhub.org> y <http://www.gmfg.buffalo.edu/>. El programa fue originalmente diseñado para simular flujos granulares secos con un área original de colapso sobre una superficie de terreno natural (Pitman *et al.*, 2003; Patra *et al.*, 2005), pero también es adecuado para simular corrientes de densidad piroclásticas que se generan del colapso de una porción importante de domos de lava, o bien a partir de colapso de columnas eruptivas pequeñas.

El programa está basado en las ecuaciones de la conservación de la masa y de Momentum y el modelo Mohr-Coulomb (Figura 6).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh \sin \alpha_x - \frac{1}{2}k_{actpass} \frac{\partial}{\partial x}(gh^2 \cos \alpha) + \tau_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(hvu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) = gh \sin \alpha_y - \frac{1}{2}k_{actpass} \frac{\partial}{\partial y}(gh^2 \cos \alpha) + \tau_y \quad (3)$$

Figura 6. Ecuaciones de Conservación de Masa (1) y Momentum en X e Y (2-3)

Las ecuaciones de conservación de masa y de momentum son resueltas utilizando un término de fricción de Coulomb para la interfaz entre el material granular y la superficie basal, y un término de fricción interna del flujo (Pitman *et al.*, 2003).

4.1.1 Parámetros utilizados para las simulaciones

Para realizar simulaciones de corrientes de densidad piroclástica en Titan2D, se requiere como parámetros de entrada:

4.1.1.1 Modelo Digital de Elevación - MDE

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)).

4.1.1.2 Tiempo de simulación y número máximo de pasos computacionales

Estos parámetros de entrada hacen referencia al tiempo de ejecución de la simulación; el usuario debe especificar los valores para el número máximo de pasos y el máximo de tiempo (seg) que se utilizaran para correr la simulación en el ordenador. La simulación que se esté realizando se detendrá cuando se llegue al número máximo de pasos establecidos o cuando se llegue al tiempo de simulación determinado por el usuario; por lo que es necesario que estos dos criterios sean lo suficientemente elevados para que la simulación del evento geológico termine satisfactoriamente o su velocidad sea considerablemente baja (esto es cuando el material simulado haya alcanzado el equilibrio estático), de lo contrario la simulación se detendrá antes de conseguir el resultado esperado. 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 las simulaciones realizadas por García, *et al.* (2011), 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.

4.1.1.3 Propiedades del material: ángulo de fricción interna y ángulo de fricción basal

Las propiedades del material están relacionadas con la aproximación a las características físicas y de reología del flujo; comúnmente se utiliza un valor de 34° para el ángulo de fricción interno, mientras que para el ángulo de fricción basal se tuvo en cuenta el cálculo del coeficiente de Heim y la clasificación que propone Stinton *et al.*, (2004) en donde se correlaciona las superficies sobre las que se mueven los flujos con

su respectivo coeficiente de fricción, definiendo un rango de ángulos de fricción basal asignados a cada superficie (Tabla 1).

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

Material superficie	Coefficientes 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°

4.1.1.4 Volumen simulado

El volumen simulado se establece con base a la geología a partir de los depósitos de referencia en la cual se determina el área de la superficie, el espesor encontrado y con lo cual se determina el volumen de referencia. 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.

4.1.1.5 Localización

Esta opción permite definir las coordenadas asignadas para el punto del cráter desde donde se originará la simulación (origen de la pila) y la dirección de colapso de la columna eruptiva que origina el flujo de Piroclastos.

4.1.1.6 Tasa y tiempo de extrucción

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, 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

Servicio Geológico Colombiano

= $A * T_{ext} * t_{ext}$ 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.

4.1.1.7 Velocidad inicial

La velocidad inicial probable del flujo, asumiendo una altura de colapso, es posible determinarla mediante la relación entre la energía cinética y la energía potencial, siendo la velocidad equivalente a $v=\sqrt{2gh}$, donde “g” corresponde a la aceleración debida a la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$) y “h”, a la altura del colapso de la columna (Murcia et al., 2010). Cabe aclarar que este parámetro de “velocidad inicial” se refiere a la componente horizontal del vector velocidad, que para el caso del colapso gravitacional de una columna eruptiva, se considera, en un uso apropiado de la herramienta Titan2D, como 0 m/s para la dirección horizontal del movimiento. En este caso, sólo se contempla una velocidad inicial en sentido vertical, que varía de acuerdo a la altura de colapso y la aceleración de la gravedad.

4.2 SIMULACIÓN DE CDP: FLUJOS DE ESCORIA

Los parámetros utilizados para correr la simulación de flujos de escoria fueron definidos y evaluados con base en la Geología y del asesoramiento de los expertos del grupo VHUB y por medio de la revisión del estado del arte referente a la aplicación de investigaciones para la simulación computacional de fenómenos volcánicos a nivel mundial.

4.2.1 Geología

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

4.2.2 Parámetros utilizados para las simulaciones

De acuerdo a la definición de los parámetros de entrada utilizados por el código Titan 2D, para los flujos de escoria (CDP concentradas) se consideró como parámetros de entrada una altura de colapso de columna eruptiva de 200 metros, un ángulo de fricción basal de 13 grados y un volumen de 6 millones de m^3 establecidos con base a la geología, tomando como referencia los datos de espesor encontrado en los depósitos de escoria.

Realizando los cálculos para obtener el coeficiente de fricción basal mediante la aplicación de la relación (H/L), tomando como referencia los puntos de interés desde el

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

cráter hasta los lugares con afloramientos del flujo de escoria, se obtiene un rango que oscila entre XXX y XXX que de acuerdo a Stinton *et al.*, (2004) se puede aplicar para trabajar con ángulos de fricción desde los XXXX hasta 13 grados.

4.2.3 Análisis de los resultados

El resultado de las simulaciones muestra que este tipo de flujo se canaliza aproximadamente 10 km por el valle del río Azufral, hasta sectores cercanos a Consacá; mientras que el volumen que sobrepasa la barrera topográfica del anfiteatro es una fracción pequeña del volumen total y toma una dirección preferencial noreste, avanzando el flujo 6 km por la quebrada Genoy-Guaico (SGC, en preparación). Los flujos de escoria quedan contenidos dentro de la zona de amenaza alta por CDP (Figura 7).

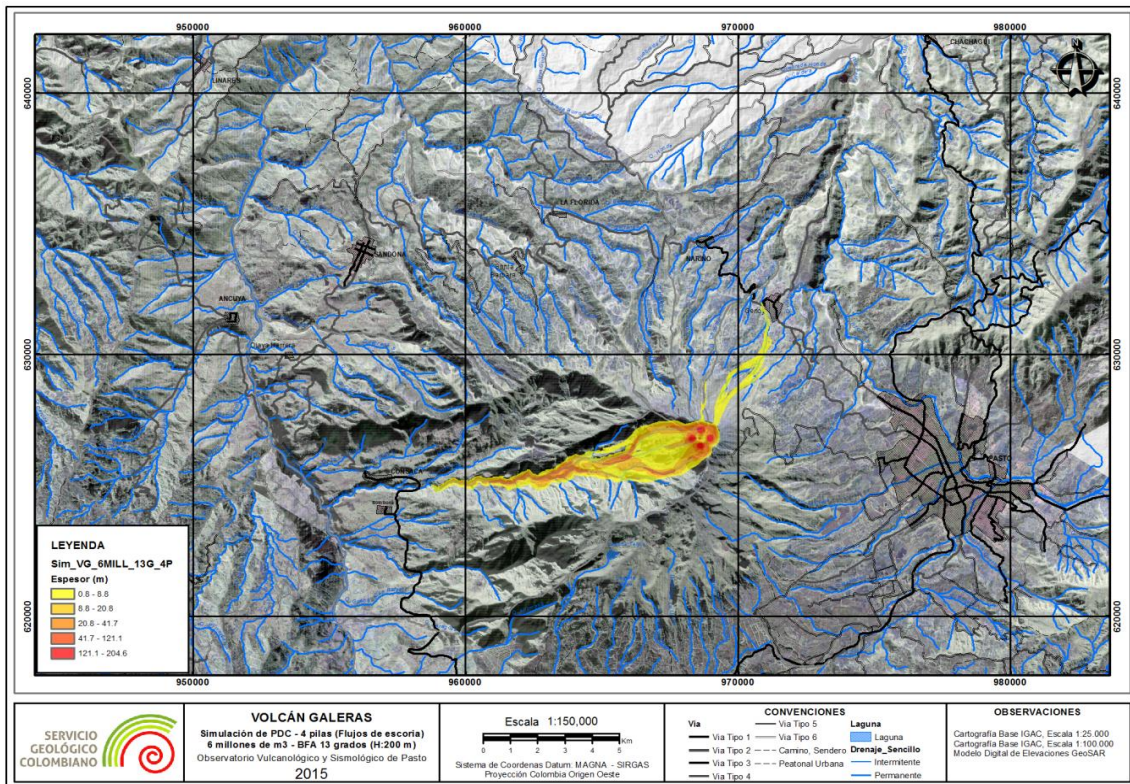


Figura 7. CDP: Flujos de Escoria

4.3 SIMULACIÓN DE CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA VERSIÓN 1997

Los depósitos de flujo identificados, a los cuales generalmente están asociadas oleadas, son de tres tipos principales: flujos de escoria, flujos de bloques y ceniza y flujos de

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

ceniza (Calvache, 1990; Banks *et al.*, 1997), los cuales afloran en las partes altas y en los valles de ríos y quebradas que nacen en el volcán y alrededor del CVG. Cualquiera de estos tipos de flujos piroclásticos es susceptible de generarse en erupciones futuras del volcán. Por consideraciones sobre la dinámica de las CDP y el conocimiento de que el área en su trayectoria sería totalmente afectada y arrasada, este tipo de fenómeno se zonifica como amenaza alta.

4.3.1 Geología

Desde el punto de vista geológico y de acuerdo a los trabajos de Calvache (1990), las unidades eruptivas geológicamente más recientes como Urcunina (12-5 ka), 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 (< 4,5 ka años), 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, lahares, ondas de choque y proyectiles balísticos.

Para la zonificación de la amenaza por CDP, al no contar con datos geológicos adicionales a los obtenidos a 1997, se tomó en esta actualización la zonificación por amenaza alta que para estos fenómenos se presentó en la tercera versión del mapa de amenaza (INGEOMINAS, 1997), la cual contempló, entre otros, las simulaciones de unidades con edad, distribución areal y alcance máximo de depósitos conocidos; para las simulaciones para flujos de bloques y ceniza, se tuvo en cuenta los resultados de García, *et al.* (2011).

4.3.2 Parámetros utilizados para las simulaciones

Para las simulaciones de flujos piroclásticos García, *et al.* (2011), definió los siguientes parámetros:

El modelo digital del terreno utilizado corresponde a una imagen de la plataforma GeoSAR de 3 metros de resolución espacial el cual fue remuestreado a 6 m debido a la capacidad computacional con que se contaba para el desarrollo de las simulaciones; este modelo se organizó en una estructura de datos en formato GRASS en coordenadas UTM Zona 18N, que es el sistema que acepta el código TITAN 2D.

Los ángulos de fricción basal, se definieron por correlación de valores obtenidos experimentalmente para diferentes superficies (Tabla 1), en donde las superficies con depósitos glacio-fluviales ($9-17^\circ$) son las más semejante a las superficies encontradas en las laderas del volcán Galeras. En las simulaciones por colapso de columna vulcaniana desde el cráter actual del Galeras, se determinaron volúmenes de $1 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5$ y $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, 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. Como puntos de origen de las simulaciones se determinaron pilas cada 45° sobre el cráter, con direcciones perpendiculares a la dirección del eje mayor de la elipse que representa el cráter. También se establecieron valores de tasa de extrusión de 10 m/s y valores de tiempo de extrusión de 5 segundos, para volúmenes de $5 \cdot 10^5$ y $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, respectivamente, como se observa en la Figura 8.

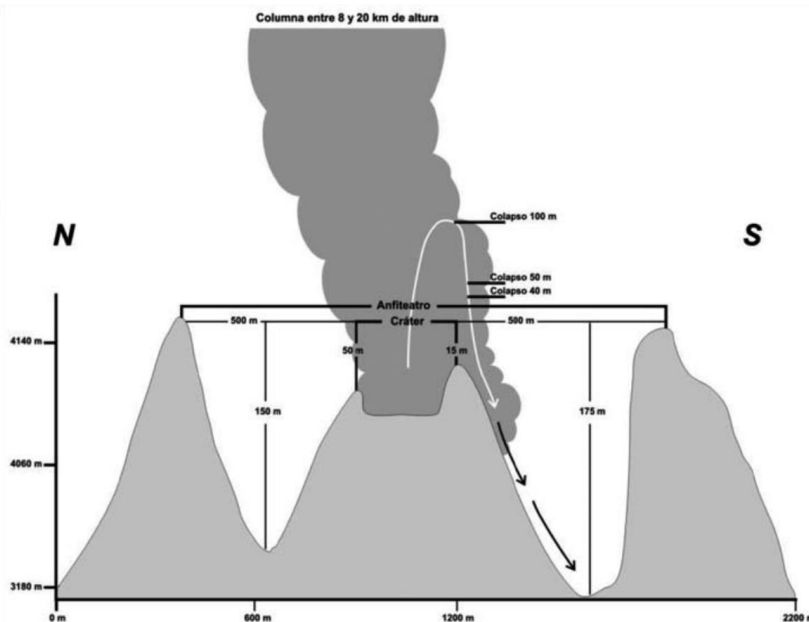


Figura 8. Sección transversal N-S del volcán Galeras, en la que se muestran algunos parámetros morfométricos y se ilustran los lugares de origen de los flujos piroclásticos simulados

García, *et al.* (2011), consideró que para las erupciones típicas del volcán Galeras y volúmenes relativamente pequeños en donde el colapso de columna es más bajo, las alturas de colapso probables están en el rango de 50 y 100 m para volúmenes de $5 \cdot 10^5$ y $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ respectivamente, y con velocidades iniciales de 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.

4.3.3 Análisis de los resultados

Los resultados de las simulaciones muestran que la distribución se restringe principalmente al interior del anfiteatro (Figura 9); y sólo algunos de los flujos simulados logran sobrepasarla, quedando contenidos, al igual que los flujos de escoria, dentro de la zona de amenaza alta definida para las CDP.

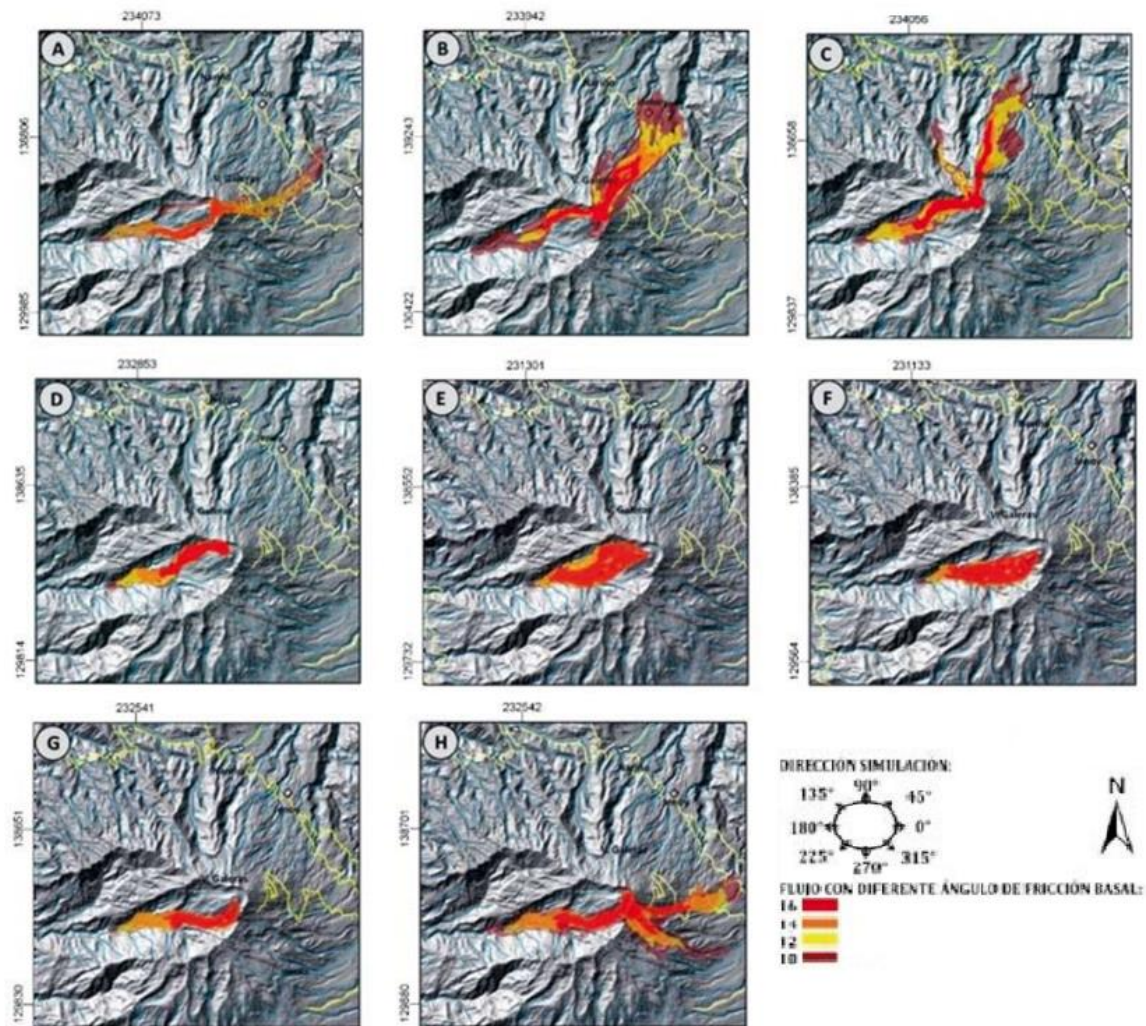


Figura 9. Recorrido de los flujos piroclásticos simulados en diferentes direcciones en el volcán Galeras, con un volumen de $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, variando el ángulo de fricción basal a 10, 12, 14 y 16°. A: en dirección inicial de flujo de 0°. B: en dirección de 45°. C: en dirección de 90°. D: en 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

4.4 RESULTADOS FINALES CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA

En la tercera versión del mapa de amenaza volcánica de Galeras (INGEOMINAS, 1997), la zonificación de la amenaza alta por CDP, retomada en esta actualización, integró la información geológica y geomorfológica con los resultados de las simulaciones computacionales de estos fenómenos, obtenidas siguiendo el concepto de línea de energía (Malin & Sheridan, 1982), implementado en las herramientas Flow2D (Sheridan & Macias, 1992) y Flow3D (Kover, 1995; Sheridan & Kover, 1996). En dichas simulaciones se emplearon parámetros como fricción basal, viscosidad y turbulencia, los cuales fueron definidos a partir del registro geológico de flujos piroclásticos de ceniza (CDP más diluidos que los flujos de escoria y los flujos de bloques y ceniza), consideraciones morfológicas y topográficas del edificio volcánico actual, además de datos experimentales de otros volcanes; la Figura 10, presenta la zonificación para CDP en esta actualización.

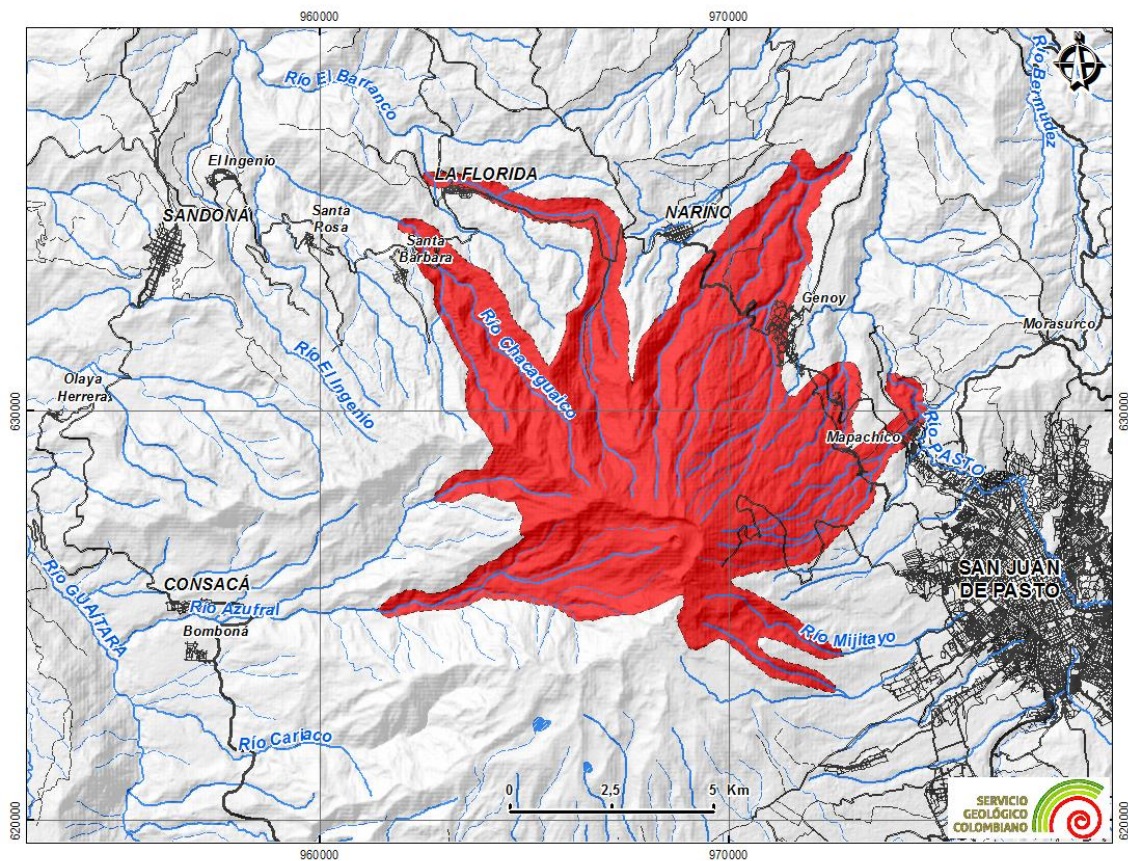


Figura 10. Zona que podría ser afectada por CDP (flujos y oleadas piroclásticas) generadas en erupciones del volcán Galeras

El comportamiento más turbulento de las CDP más diluidas explica su mayor facilidad de sobrepasar la barrera topográfica del anfiteatro y, por lo tanto, la mayor distribución

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

Servicio Geológico Colombiano

de sus depósitos en la parte externa del mismo, afectando zonas rurales de los municipios de Pasto (principalmente, Genoy y Mapachico), La Florida, Sandoná y Consacá (valles alto y medio del río Azufral), además de áreas urbanas de los municipios de Pasto (zona de Briceño) y La Florida.

5. CAÍDA DE PIROCLASTOS

Durante una erupción volcánica, los piroclastos que son emitidos a través de una columna eruptiva son transportados eólicamente (por acción del viento) si son de tamaños de hasta 64 mm (ceniza y *lapilli*); los piroclastos de mayor tamaño a este son emitidos como proyectiles balísticos (bloques y bombas volcánicas).

En el volcán Galeras, el registro geológico de emisiones de piroclastos de caída se conserva en las partes altas del volcán y corresponde a depósitos de ceniza y *lapilli* y bloques y bombas emitidas como proyectiles balísticos durante erupciones históricas. Este es el fenómeno que ha caracterizado la actividad más reciente y que ha permitido catalogarla como de tipo vulcaniano. En el registro geológico, en varias de las unidades eruptivas se encuentran depósitos de caída piroclástica, pero debido a procesos erosivos y de movilización no existe una continuidad en su registro que permita la elaboración de mapas de espesores de depositación (isópacas), para conocer su distribución.

En este apartado se disenterá sobre el aplicativo utilizado para la simulación, la metodología seguida y los resultados obtenidos.

5.1 SIMULACIÓN POR CAÍDA DE PIROCLASTOS TRANSPORTADOS EÓLICAMENTE

Como consecuencia de las erupciones explosivas, los volcanes emiten a la atmósfera a través de una columna eruptiva, partículas fragmentadas (piroclastos) que debido a su tamaño (ceniza, menor de 2 mm; *lapilli*, de 2 a 64 mm), son transportadas por el viento hasta zonas alejadas del volcán (cientos o miles de kilómetros) y depositadas por efecto de la gravedad, formando capas que siguen la topografía preexistente y cubriendo áreas comúnmente extensas. En general, la cantidad de piroclastos acumulados y su tamaño de grano disminuyen con la distancia al volcán; su distribución dependerá de la dirección y velocidad del viento predominante en el momento de la erupción. Este fenómeno generalmente acompaña la mayoría de las erupciones en un volcán, aunque sus depósitos son fácilmente “borrados” del registro geológico, debido principalmente a la erosión tanto eólica como fluvial.

5.1.1 Herramienta de simulación Tephra2

Tephra2 es una herramienta computacional diseñada por Bonadonna *et al.*, (2005) y desarrollada en colaboración con la Universidad de South Florida y de Hawaii, para pronosticar la acumulación de Tephra en erupciones volcánicas explosivas.

La simulación de piroclastos transportados por el viento utilizando este código, se fundamenta en la combinación de modelos numéricos de seguimiento de partículas (Euler o Lagrange) que busca emular la posición de la nube de ceniza y tephra en el tiempo y el espacio; y de modelos de advención y difusión (Euler) que describen la difusión, transporte, sedimentación y acumulación de piroclastos finos sobre el terreno en relación con la fuente de liberación de las partículas. Tephra2 incorpora en su código, parámetros asociados a la erupción, a la partícula, atmosféricos y de caída; como resultado se obtiene la acumulación de tephra y ceniza en la superficie en masa por unidad de área (Courtland, *et al*, 2014).

La erupción volcánica genera una columna de partículas de piroclastos y gases a altas temperaturas, eyectada hacia la atmosfera según la energía liberada en el proceso. La columna se extiende varios kilómetros sobre el cráter y se va disipando poco a poco a medida que alcanza altura y la masa del material es afectada por su peso, la fuerza de la gravedad, la pérdida de energía y las corrientes atmosféricas.

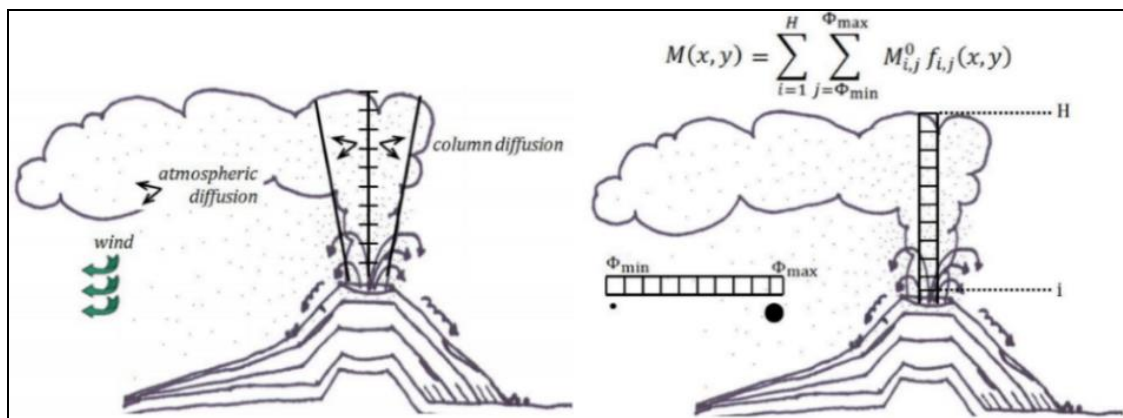


Figura 11. Principios para Caída de Piroclastos en el código Tephra

En las imágenes de la Figura 11, se observa la difusión de la masa producto de la erupción a lo largo de la columna, hasta alcanzar su punto máximo, en la cual los piroclastos finos (cenizas) se esparcen en dirección del viento y aquellos más gruesos

caen por acción de su peso y la gravedad. Se considera H como la altura de la columna, M la masa liberada en la erupción, ϕ el diámetro variable de las partículas.

Tephra2 incorpora en su código parámetros de la erupción, de la partícula, parámetros atmosféricos y de la superficie de caída (Grid), como se observa en la Figura 12. En los parámetros de la erupción se define la localización y altura del volcán, la masa a simular la cual depende del tipo de erupción esperada, el tamaño de las partículas, la altura de la columna y los pasos o divisiones de la columna que en el análisis están relacionados con los perfiles de viento y afectan la dispersión de las partículas de ceniza.

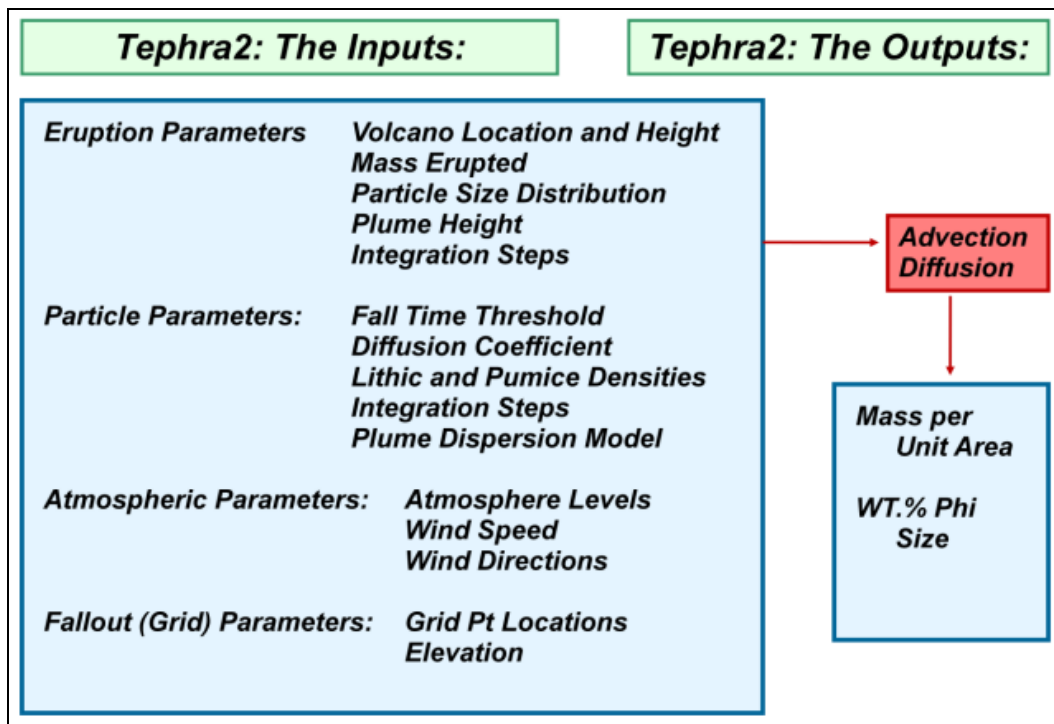


Figura 12. Entradas y salidas en el modelo de simulación Tephra

5.1.2 Geología

Para zonificar la amenaza por caída de piroclastos transportados eólicamente, se empleó como insumo principal las isópacas de los eventos eruptivos entre 1992 y 2010 (lapso en el cual se han presentado las más altas columnas eruptivas y los mayores volúmenes de ceniza y *lapilli* emitidos, de los que se tenga registro), dado que evidencian las direcciones y áreas de depositación de los piroclastos de caída en este periodo (Figura 13).

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

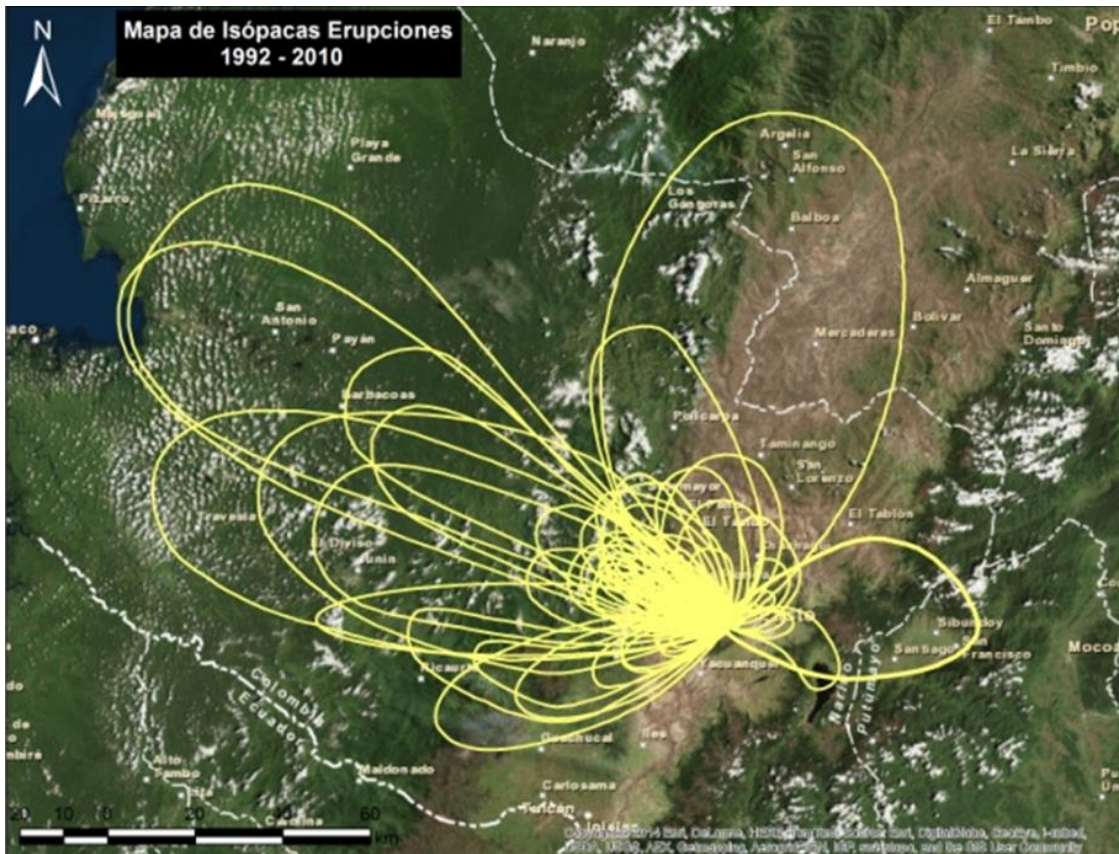


Figura 13. Análisis y estimación de volúmenes y distribución de los depósitos de caídas de ceniza y lapilli para la actividad eruptiva entre 1992 y 2010

5.1.3 Parámetros utilizados para las simulaciones

Complementariamente, se llevaron a cabo 1200 simulaciones computacionales con la herramienta *Tephra2* (Bonnadonna *et al.*, 2005), que emplea como parámetros de entrada principales: la información de velocidad y dirección del viento en la zona (extraídos de la base de datos de NOAA, entre 1985 a 2014); una masa eruptiva de $1,5 \times 10^{10}$ kg, altura de la columna eruptiva de 16050 m, densidad y granulometría del material emitido, datos que fueron obtenidos a partir de la revisión e interpretación de la actividad histórica del volcán y de la información de la actividad y los depósitos de ceniza dejados en las diferentes emisiones de este material desde su reactivación (Cortés & Calvache, 1993; Cortés & Raigosa, 1994; Cortés & Raigosa, 1997; Cortés *et al.*, 2010; lo cual se resume en la siguiente tabla:

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

Tabla 2. Parámetros de entrada para la simulación de caída de ceniza y lapilli

PARAMETROS	VALOR
Altura de la columna	16050 m
Masa de la erupción	1.5 x10 ¹⁰ Kg
Tamaño máximo de grano	-4 φ
Tamaño mínimo de grano	4 φ
Tamaño medio de grano	0 φ
Desviación estándar del tamaño de grano	1.5
Coordenadas Este y Norte del cráter (UTM)	237471 E; 135100 N
Elevación del cráter	4050 msnm
Constante de Eddy	0.04
Coefficiente de difusión	678 m ² /s
Umbral del tiempo de caída	1'000.000 s
Densidad de clastos pequeños (líticos)	2500 kg/m ³
Densidad de clastos grandes (pómez)	1000 kg/m ³
Capas de la columna	100
Modelo de columna	0
Proporción de la columna	0.7

5.1.4 Análisis de los resultados

Para el caso de la actualización del mapa de amenaza del volcán Galeras, se tienen 1200 simulaciones, las cuales han sido procesadas de acuerdo a la metodología establecida. Una vez transformadas en una plataforma GIS, se genera una grilla con los valores de espesores de tefra para cada simulación realizada, con el objeto de delimitar las diferentes zonas de amenaza por caída piroclásticas para el volcán, acorde con los criterios del SGC para las delimitaciones de zonas de amenaza por este fenómeno. Esta zonificación se hizo condicionando las áreas por depositación así: entre 0,1 mm a 1 cm como la zona de amenaza baja (en color amarillo), a una distancia de 150 km desde el punto de emisión; entre 1 cm y 10 cm como zona de amenaza media (en color naranja), a una distancia de 57 km desde el punto de emisión y mayor a 10 cm de espesor, hasta la parte más cercana al cráter del volcán delimita la zona de amenaza alta (en color rojo), a una distancia de 10 km desde el punto de emisión (Figura 14); los resultados de las simulaciones muestran una dirección preferencial WSW.

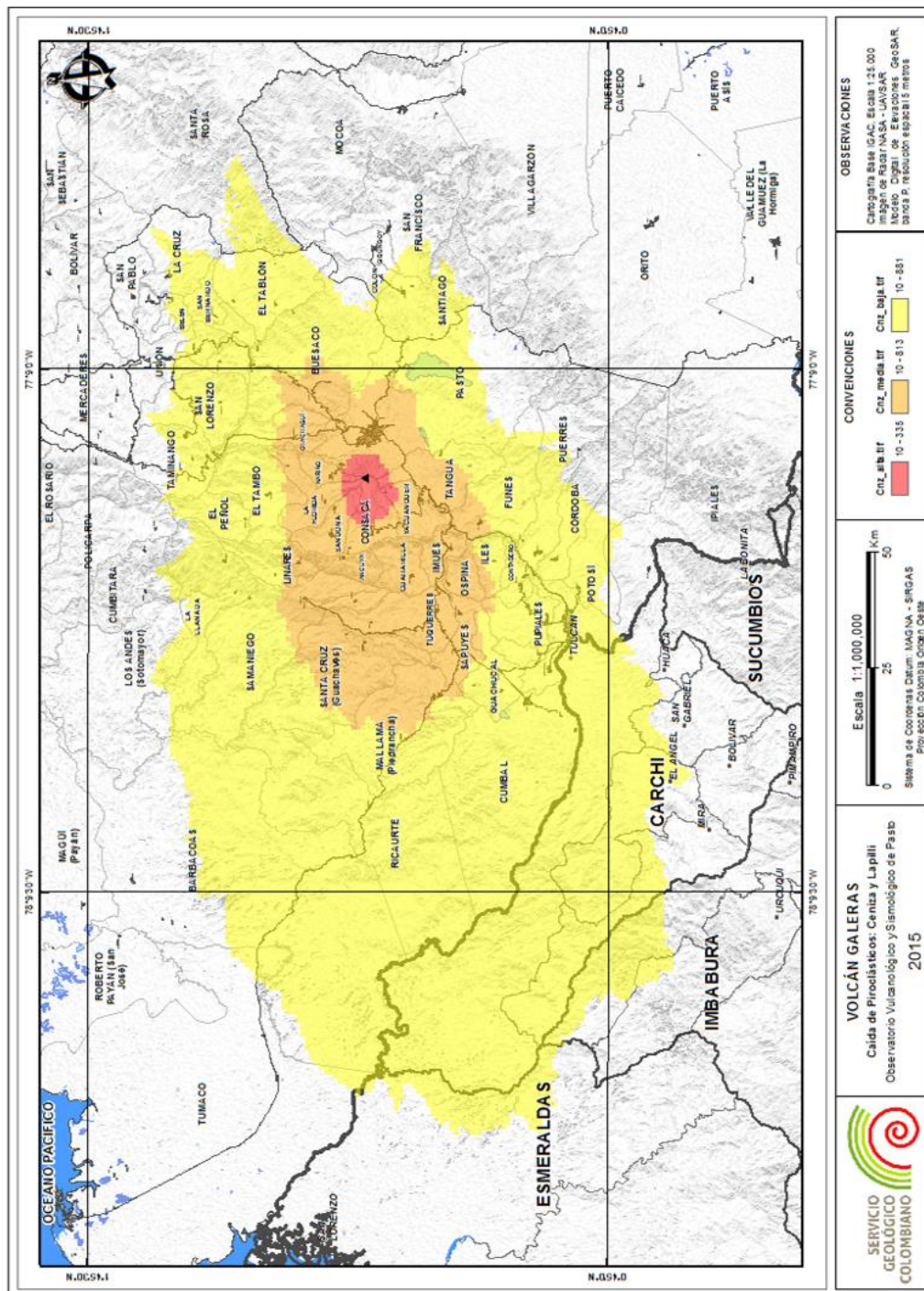


Figura 14. Representación de simulaciones superpuestas y filtradas con los siguientes criterios: 0,1 mm a 1 cm, zona de amenaza baja (color amarillo); entre 1 cm y 10 cm, zona de amenaza media (color naranja); y mayor a 10 cm zona de amenaza alta (en color rojo)

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

5.2 SIMULACIÓN POR CAÍDA DE PIROCLASTOS DE PROYECCIÓN BALÍSTICA

En una erupción volcánica, piroclastos de caída con tamaños mayores a 6,4 cm (bloques y bombas volcánicas) son emitidos a altas temperaturas, siguiendo trayectorias balísticas; la distancia que pueden alcanzar depende de su velocidad inicial, densidad y tamaño. Los fragmentos de orden métrico, al caer, pueden producir cráteres de impacto incluso mayores a 10 m de diámetro.

5.2.1 Geología

La caída de bloques y bombas volcánicas, generada por actividad explosiva de destrucción de domos, ha ocurrido comúnmente en la actividad histórica y reciente del volcán Galeras. El registro geológico se presenta en las partes altas del volcán, correspondiendo, principalmente, al material emitido en la mayoría de las erupciones ocurridas después de su reactivación y en la cual en las actividades entre 1992 y 2010, se han recogido muestras y se han realizado análisis y estimaciones de la distribución, tamaños, espesores de bloques y bombas.

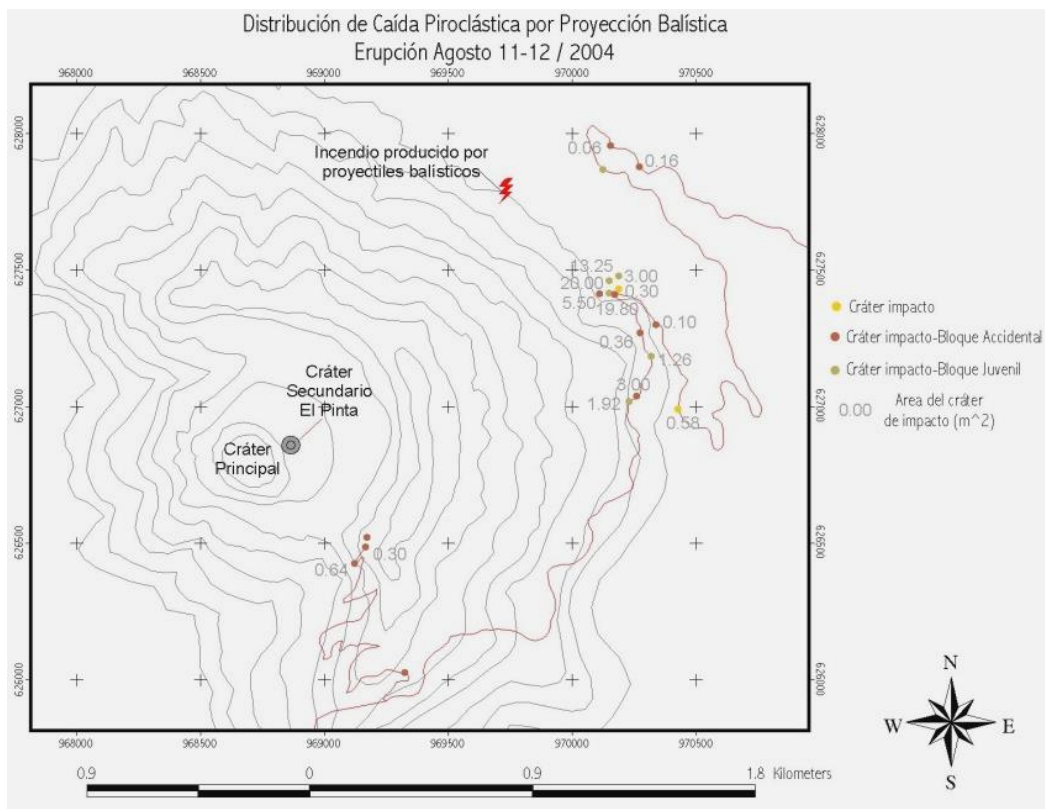


Figura 15. Distribución de Caída Piroclástica por proyección balística en la erupción de Agosto 11-12 de 2004

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

5.2.2 Herramienta de simulación Eject!

El código Eject! creado por L. Mastin (2003) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), calcula las trayectorias de proyectiles balísticos expulsados durante erupciones volcánicas, relacionando matemáticamente la velocidad inicial, el ángulo de disparo, la masa y forma del balístico y por otro lado la resistencia y velocidad del viento; las ecuaciones que gobiernan la simulación de los proyectiles balísticos se pueden consultar en el manual de la herramienta.

Los parámetros de entrada del aplicativo Eject!, son:

- Velocidad inicial del balístico: Es la velocidad con que salen disparados los balísticos al momento de una erupción y pueden alcanzar velocidades iniciales entre 100 y 300 m/s y por lo tanto desarrollar elevada energía cinética impartiendo un alto impacto al caer (VHUB, 2013).
- Ángulo de expulsión: Es un factor incidente en la trayectoria de un proyectil balístico y se determina como el ángulo de salida o expulsión del proyectil desde su punto de emisión, valores comunes fluctúan entre un rango de 45° y 60°
- Velocidad del viento de cola: El viento de cola incide en el desplazamiento del balístico, un viento a favor o de cola hace que el proyectil se desplace más lejos, la velocidad del viento depende de la época y las condiciones climatológicas del momento, y comúnmente se puede establecer a partir de los registros históricos diarios de velocidad del IDEAM para un periodo de años.
- Distancia vertical del punto de caída del bloque por debajo del punto de despegue: Este parámetro podría precisarse como la distancia máxima vertical donde geológicamente se han encontrado piroclastos trasportados balísticamente.
- Distancia de la zona de fricción reducida cerca al punto de emisión del proyectil: Estudio y evidencias en erupciones han determinado que los bloques cuando son expulsados están envueltos inicialmente en una nube de tephra y otros fragmentos que se mueven aproximadamente a la misma velocidad que los bloques grandes y por lo tanto proporcionan poca o ninguna resistencia al avance; el grado en que la resistencia se reduce y la distancia sobre la cual la fricción es menor que el aire del ambiente no está aún bien definida; por lo tanto este parámetro es determinado de manera un poco arbitraria, como la distancia desde el punto de emisión sobre la cual se reduce la fricción (r_d), puede tener un valor probable que este entre algunas decenas a unos cientos de metros.

Servicio Geológico Colombiano

- Elevación del punto de despegue del balístico: Hace referencia a la altura sobre el nivel del mar del punto de emisión (cráter) desde donde los proyectiles balísticos son eyectados.
- Temperatura atmosférica en la cima del volcán y al nivel del mar (°C): Determinada de datos atmosféricos del IDEAM y mediciones realizadas por el equipo de monitoreo y vigilancia volcánica del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (OVSP).
- Gradiente térmico (°C/Km): El gradiente térmico se determina como el descenso de temperatura en grados centígrados (°C) a medida que se asciende del nivel del mar a la cima del volcán; este valor se ingresa como un valor absoluto, Mastín (2004).
- Coeficiente de resistencia del aire (C_d): Fuerza de magnitud que ofrece resistencia al desplazamiento del balístico en su trayectoria hasta que ésta es dominada por la fuerza de la gravedad. El aplicativo permite definir un valor constante o variable que es calculado internamente en función de la altura.
- Forma del proyectil: Los tipos de forma de los proyectiles contemplados en el aplicativo Eject! son: Cúbicos, esféricos y balísticos.
- Densidad del balístico (Kg/m^3): Corresponde a las densidades de los líticos hallados en sitio.
- Diámetro (m) o área (m^2) de la sección transversal del balístico: Depende del tamaño de los balísticos entre bombas y bloques hallados en sitio

5.2.3 Parámetros utilizados para las simulaciones

Los parámetros de entrada, como densidad, tamaño y alcance de los fragmentos, se tomaron de los reportes de la actividad histórica y de la información obtenida de la actividad eruptiva entre 1992 y 2010, por personal del SGC (Cortés & Calvache, 1993; Cortés & Raigosa, 1994; Cortés & Raigosa, 1997; y www.sgc.gov.co/Pasto.aspx); adicionalmente, se emplearon datos de velocidades de bloques medidos experimentalmente en otros volcanes, para erupciones vulcanianas.

Se realizaron alrededor de 144 simulaciones para proyectiles balísticos de orden métrico, con velocidades entre 100 y 120 m/s y para proyectiles centimétricos con velocidades también entre 350 y 400 m/s, en las 16 direcciones principales de la rosa de los vientos (Figura 16).

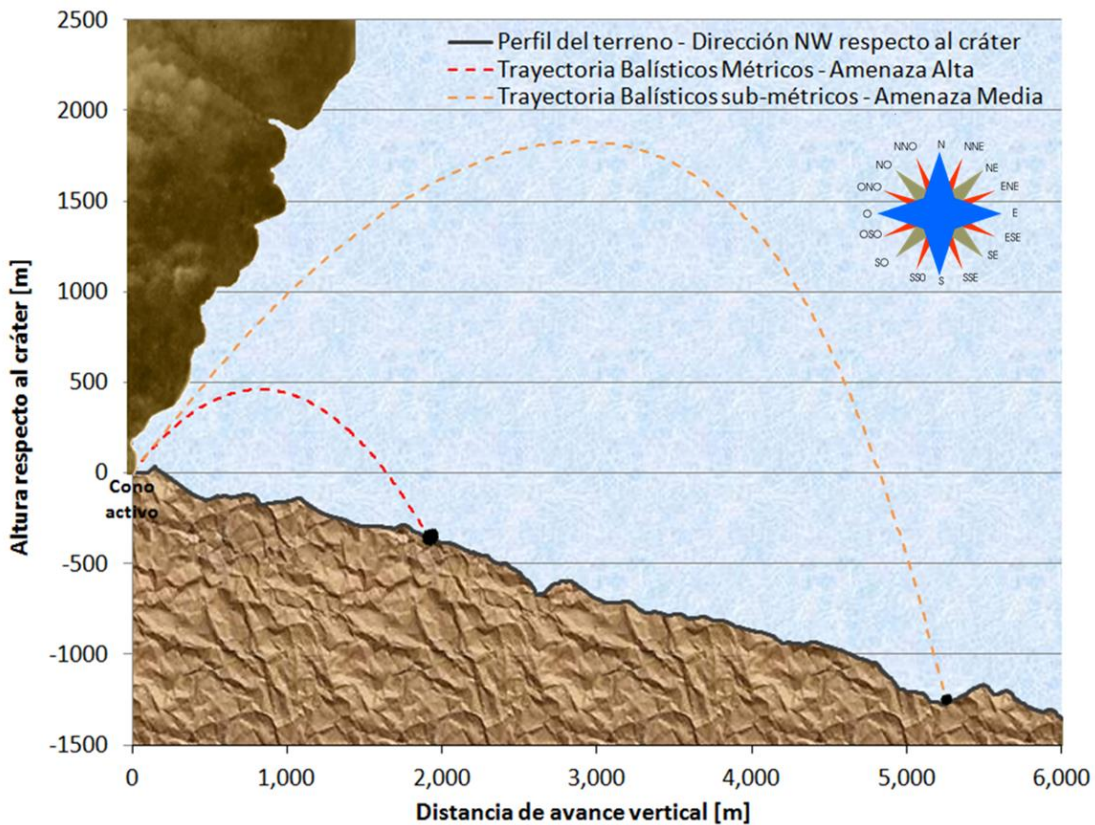


Figura 16. Simulación computacional de proyectiles balísticos

5.2.4 Análisis de los resultados

La Figura 17 muestra la zonificación para proyectiles balísticos. La zona designada como amenaza alta es el resultado del área que puede ser afectada por bloques de tamaños del orden métrico, los cuales presentan alcances entre 1,6 y 2,3 km respecto al cráter principal, correspondiendo el alcance máximo a la dirección oeste-noroeste (WNW). La amenaza media se define a partir de los resultados de las simulaciones del área que puede ser afectada por bloques de tamaños de orden centimétrico, los cuales tendrían alcances entre 4,4 y 5,3 km respecto a la fuente, correspondiendo su alcance máximo a la dirección noroccidente (NW); adicionalmente, se tuvo en cuenta que para esta zona el número de bloques por unidad de área puede ser menor. Debido a la peligrosidad del impacto directo de un proyectil balístico, no se considera amenaza baja por este fenómeno.

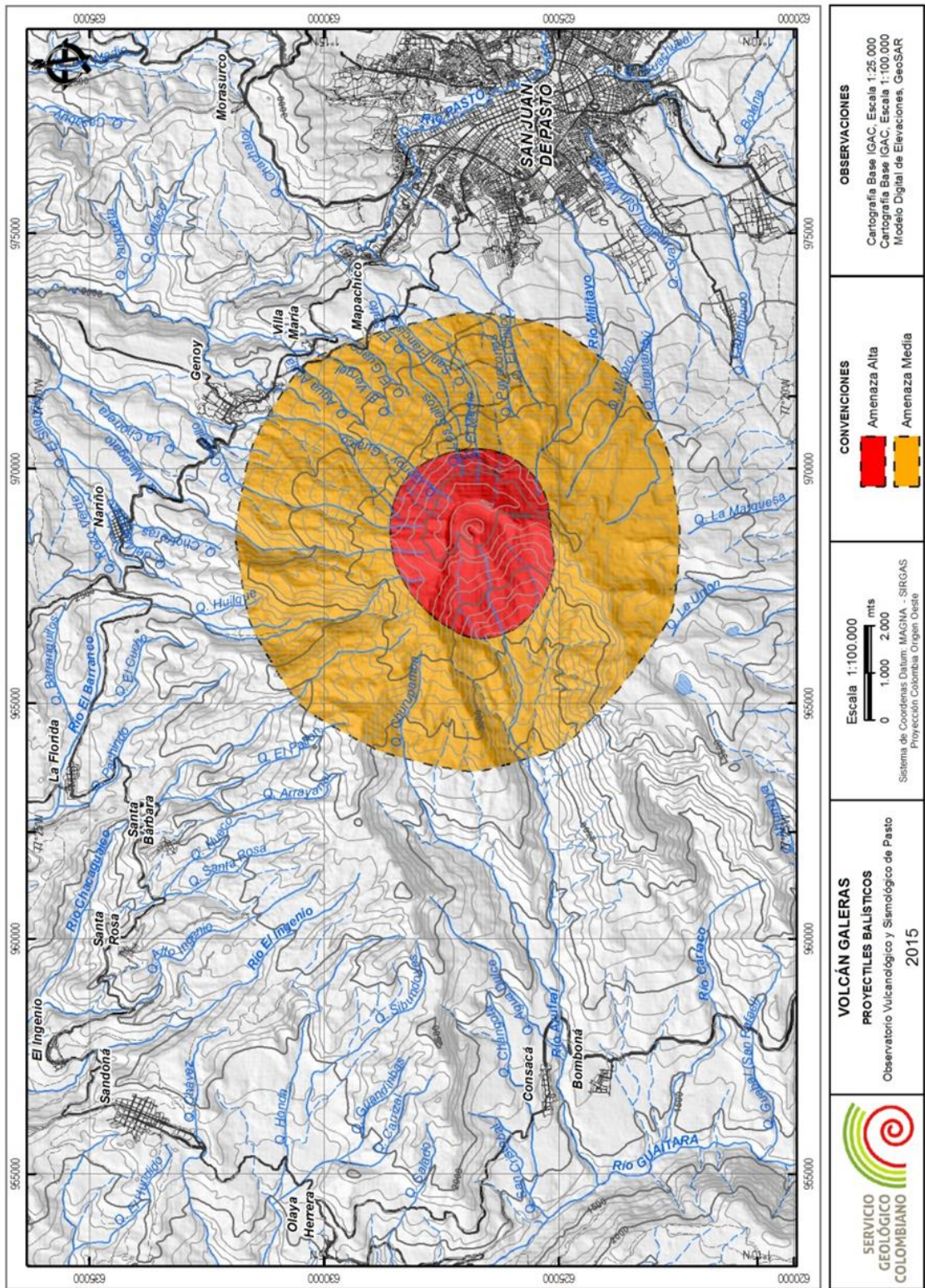


Figura 17. Zonificación de la amenaza por proyectiles balísticos

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

6. FLUJOS DE LAVA

Los flujos de lava Son corrientes de roca fundida, que son emitidas por el cráter o por grietas en los flancos del volcán. Al salir del cráter forman lóbulos que tienden a canalizarse a lo largo de los valles; su velocidad y alcance dependen de su composición, la morfología del valle y las barreras topográficas que encuentren a su paso. Existen lavas fluidas y lavas viscosas: las primeras pueden extenderse hasta decenas de kilómetros desde el foco de emisión; mientras que las menos fluidas avanzan pocos kilómetros desde los focos eruptivos. Cuando las lavas son muy viscosas se acumulan en los centros de emisión formando montículos escarpados o en forma de cúpula conocidos como domos de lava, que al enfriarse taponan estos centros de emisión; los domos pueden explotar o colapsar, generando flujos piroclásticos. Los flujos de lava se mueven relativamente lento, de manera que las personas pueden alejarse de su trayectoria, sin embargo, todo en su camino será derribado, sepultado y quemado debido a sus altas temperaturas (<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/lava/index.php>).

En este apartado se disenterá sobre el aplicativo utilizado para la simulación, la metodología seguida y los resultados obtenidos.

6.1 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN LAVA PL

El algoritmo LavaPL desarrollado por Chuck y Laura Connor (2012) en la Universidad del Sur de la Florida, simula el recorrido del flujo de lava en función de la pendiente máxima del terreno, delimitando el área probable de inundación; los parámetros de entrada del modelo son: El punto de emisión, el volumen y espesor del flujo y el volumen o pulso del flujo a partir del cual se va a distribuir el volumen total a simular (Connor *et al.*, 2012 – Charbonnier S., 2013). Este código se fundamenta en parámetros físicos medibles de los depósitos como el espesor, área, longitud y volumen y no relaciona directamente las propiedades dinámicas ni la composición de los flujos, sin embargo el código, asocia la viscosidad en función del número de pulsos y el espesor del flujo, incrementando o por el contrario disminuyendo el avance de los mismos.

En la Figura 18 se observa la metodología, tomando como referencia los datos de entrada para llevar a cabo la simulación, el procesamiento interno que distribuye entre las celdas del MDE los pulsos de lavas que se distribuyen en función de la pendiente a medida que alcanzan el espesor esperado, para obtener finalmente como resultado el área de afectación o inundación y las alturas alcanzadas por los flujos de lava.

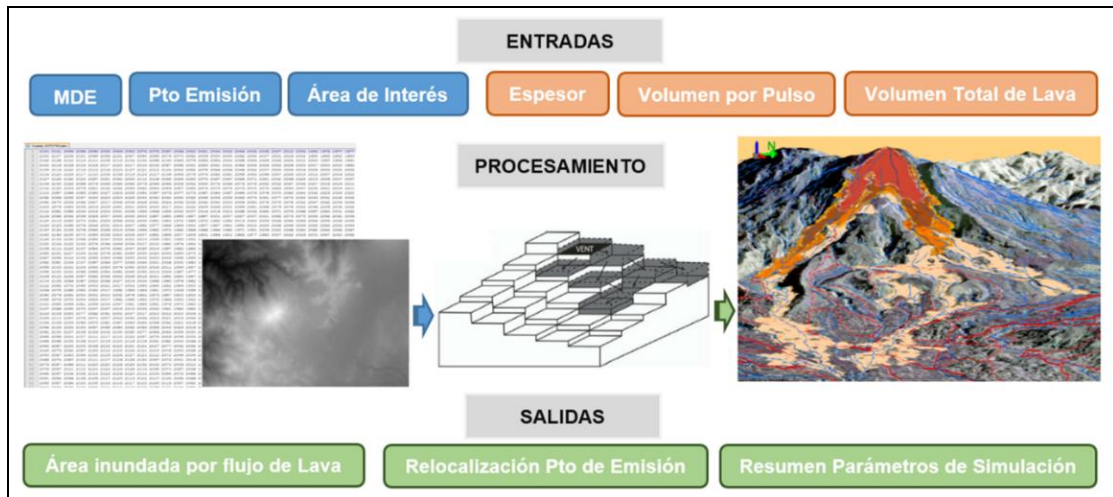


Figura 18. Diagrama de flujo para simulación de lavas

6.2 GEOLOGÍA

En el VG, el registro geológico de los depósitos de flujos de lava, indican actividad eruptiva desde el cráter central distribuyéndose hacia el occidente (W) del cono en la parte alta del río Azufra y actividad de tipo fisural cuyo registro se encuentra en el flanco nororiental (NE) del edificio antiguo del complejo volcánico Galeras (CVG), por las quebradas el Guaico denominado depósito Mapachico y entre las quebradas San Francisco y El Chilco nombrado depósito San Francisco. Por su composición, todas las lavas asociadas al VG se caracterizan por ser de viscosidad media baja a media (Calvache, 1990).

6.2.1 Lavas de 1866

Se localizan hacia el occidente (W) del cono activo del volcán Galeras, al interior del anfiteatro en la cuenca alta y media del río Azufra; estas lavas son poco fluidas y por lo tanto más viscosas que las lavas fisurales de este volcán. Estas lavas están repartidas en 9 flujos con un espesor promedio de 15 m y una longitud aproximada de 5 Km sobre el cauce del río Azufra (Calvache, 1990).



Figura 19. En la fotografía se aprecian los depósitos de lava originados en el cráter (SGC), a la derecha en el mapa se observa el curso de las lavas localizada hacia el W del volcán Galeras y los espesores de los depósitos

En los registros históricos, los vulcanólogos Reiss y Stübel ilustraron los flujos de lavas del volcán Galeras originados en octubre de 1866, “...pero desde Consacá es posible observar permanentemente el “horno” de la montaña: como ráfagas de fuego, se movía la masa de lava ardiente montaña abajo hacia el valle de Consacá...” (Espinosa, 2001).

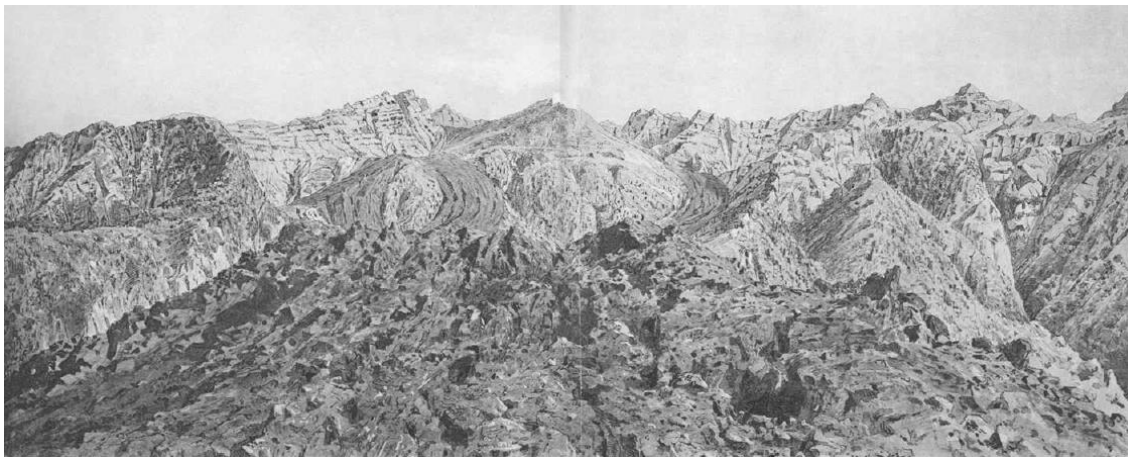


Figura 20. Flujo de lavas de 1866 visto desde el valle del río Azufral de W hacia E (Stübel, 1906).

Al respecto, E. Friendlander hace en 1936 el siguiente relato: “... Las últimas erupciones, año de 1866, fueron como su antecedentes, terribles invasiones de lavas pedregosas, consistentes principalmente en basaltos vídriosos... enorme torrente de lava hacia Consacá.” (Espinosa, 2001).

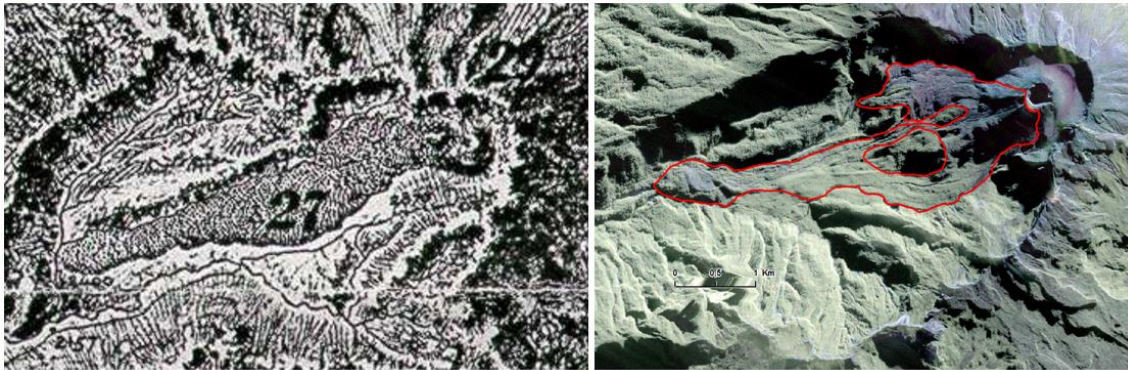


Figura 21. Ilustración en planta del flujo de lavas de 1866 (Stübel, 1906) e interpretación sobre imagen de radar (UAVSAR, 2015), en la cual se contrasta la correlación espacial

6.2.2 Lavas Fisurales

Se identifican dos depósitos de flujos de lava de tipo fisural en el flanco nororiental (NE) del edificio antiguo (CVG); el depósito denominado Mapachico que nace en la cabecera de la quebrada El guaico sobre los 3200 msnm con un espesor que varía entre 2 y 5m y una longitud aproximada de 2 km para un volumen de 1'764.000 m³; y el depósito San Francisco que nace en la cabecera de la quebrada Payacanes sobre los 3200 msnm. Con un espesor que varía entre 3 y 4 metros y una longitud aproximada de 1,6 km, para un volumen de 594.000 m³. (Calvache, 1990).

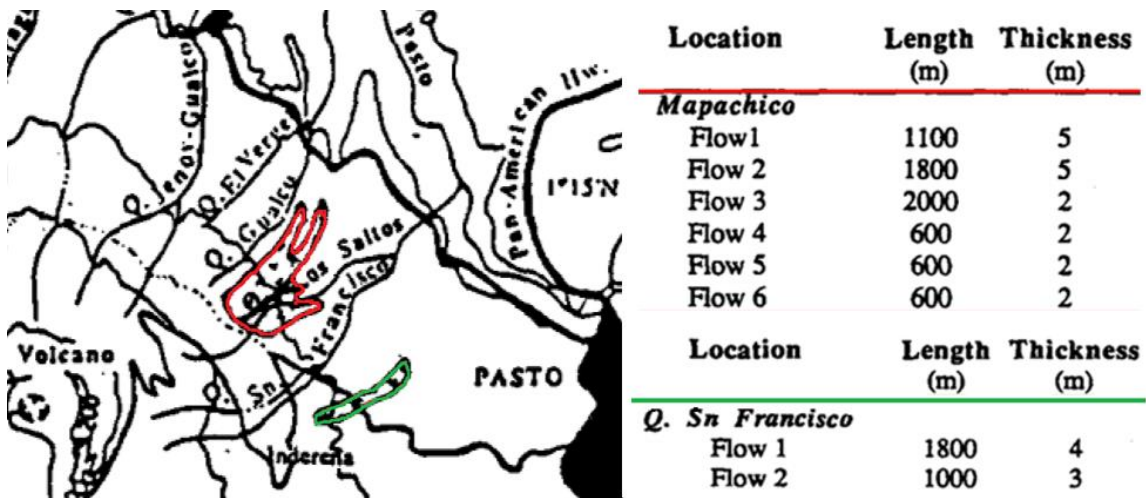


Figura 22. Localización de los depósitos y espesores de lavas fisurales (Calvache, 1990)

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

6.3 SIMULACIÓN

Para la simulación de flujos de lava se utilizaron los códigos Lava PL y Lava C (Connor *et al.*, 2012 y Richardson & Connor, 2014). Se llevaron a cabo simulaciones, tanto para flujos de lava emitidos desde el cráter activo, como para lavas de flanco, las cuales podrían ser emitidas en zonas de debilidad, dadas por fallas, que afectan la ladera nororiental (NE) del CVG, principalmente en sitios de superposición de los antiguos edificios volcánicos.

6.3.1 Parámetros utilizados en las simulaciones

Para seleccionar los parámetros de entrada para las simulaciones de flujos de lavas, se reinterpretaron y delinearón los depósitos mediante imagen de radar UAVSAR obtenido del proyecto NASA - JPL, mientras que el espesor se tomó de los datos consignados en Calvache (1990); con los cuales se determinó el volumen. Los puntos posibles de emisión se determinaron en y alrededor del cono activo y para las lavas fisurales en la ladera nororiental del volcán en sectores de posible debilidad estructural. El volumen de lava emitida por pulso se parametrizó comparando los resultados con el avance de los depósitos. Parámetros químicos que determinan la composición y por lo tanto la viscosidad o fluidez del flujo tomados de Calvache (1990) son controlados en LavaPL a partir del espesor del flujo: a mayor espesor mayor viscosidad y a menor espesor más fluidez.

Tabla 3. Parámetros de entrada al modelo

Modelo Digital de Elevación	En coordenadas proyectadas y formato ASCII
Puntos de Emisión	En coordenadas proyectadas (m)
Parámetros Físicos	Espesor del flujo de Lava (m) Volumen de Lava emitida por pulso (m ³) Volumen Total de Lava a ser distribuida (m ³)

6.3.1.1 Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

La superficie del relieve del complejo volcánico sobre el cual se realizan las simulaciones, se obtuvo de la banda p de la imagen de radar del proyecto GeoSAR (2013) la cual fue remuestreada a una resolución espacial de 25 m, con el objetivo de reducir el tiempo de simulación en el algoritmo Lava PL, de semanas a horas cuando se procesan volúmenes grandes o bajos pulsos de emisión.

6.3.1.2 Puntos de emisión

Para la simulación de los flujos de lavas emitidas desde el volcán Galeras se ha determinado como puntos de emisión uno en el cono volcánico principal y seis alrededor; para las lavas fisurales se determinó cuatro posibles puntos de emisión que más que puntos representan un área de debilidad estructural por los fallamientos de Romeral y Buesaco, sobre los 3600 msnm donde se demarca cambio de pendiente correspondiente a la zona que delimita las unidades eruptivas del Complejo Volcánico de Galeras (CVG).

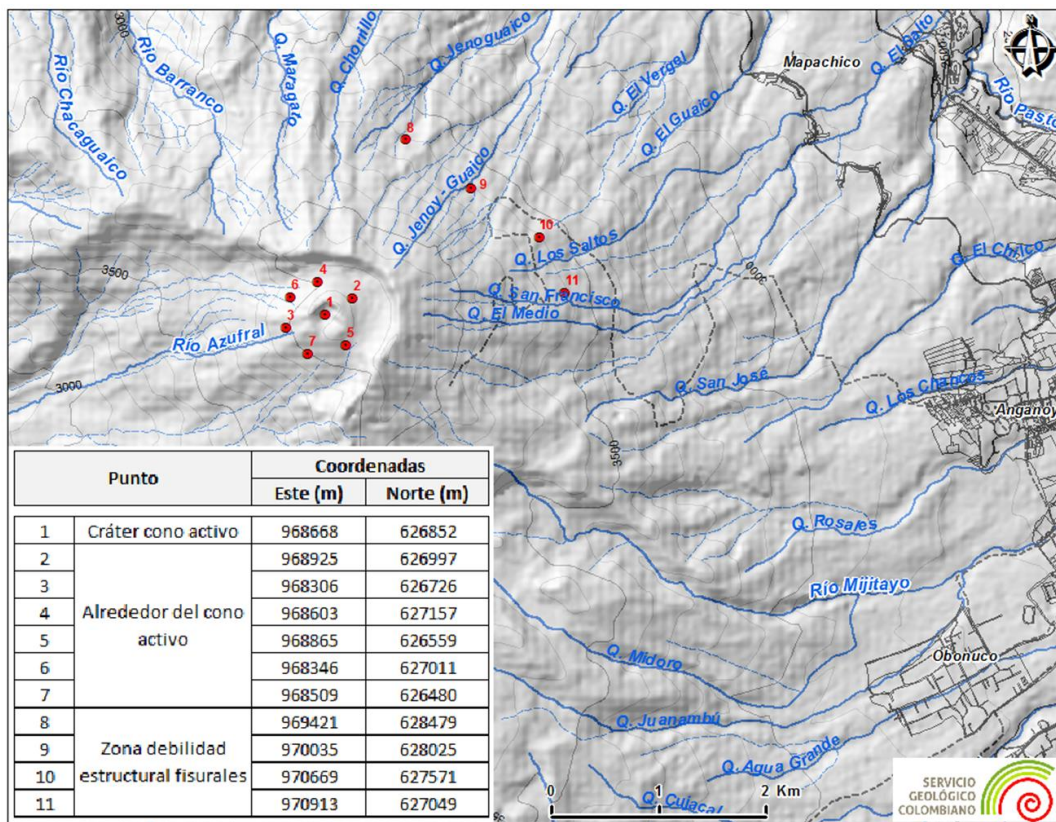


Figura 23. Puntos de emisión posible de flujos de lava utilizados en la simulación

6.3.1.3 Volumen y espesor

Para determinar el volumen a simular se tomó como referencia el registro geológico de los depósitos de lava de 1866 y de lavas fisurales los cuales fueron reinterpretados y delimitados por las geólogas M.L. Monsalve y P. Narváez sobre la imagen de radar de la plataforma NASA - UAVSAR (2015) y los espesores promedios de los depósitos fueron tomados de Calvache (1990).

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

Tabla 4. Espesor y Volumen de los depósitos de lavas

	Lavas Cono Volcánico 1866	Lavas Fisurales Mapachico - San Fco
Volumen	50 millones m3	3 millones m3
Espesor	15 m	2 m

En la Figura 24 se observa la distribución de los depósitos originados en el cráter y que corresponde a la erupción de 1866 y de las lavas fisurales Mapachico y San Francisco, delimitados a través de interpretación geológica.

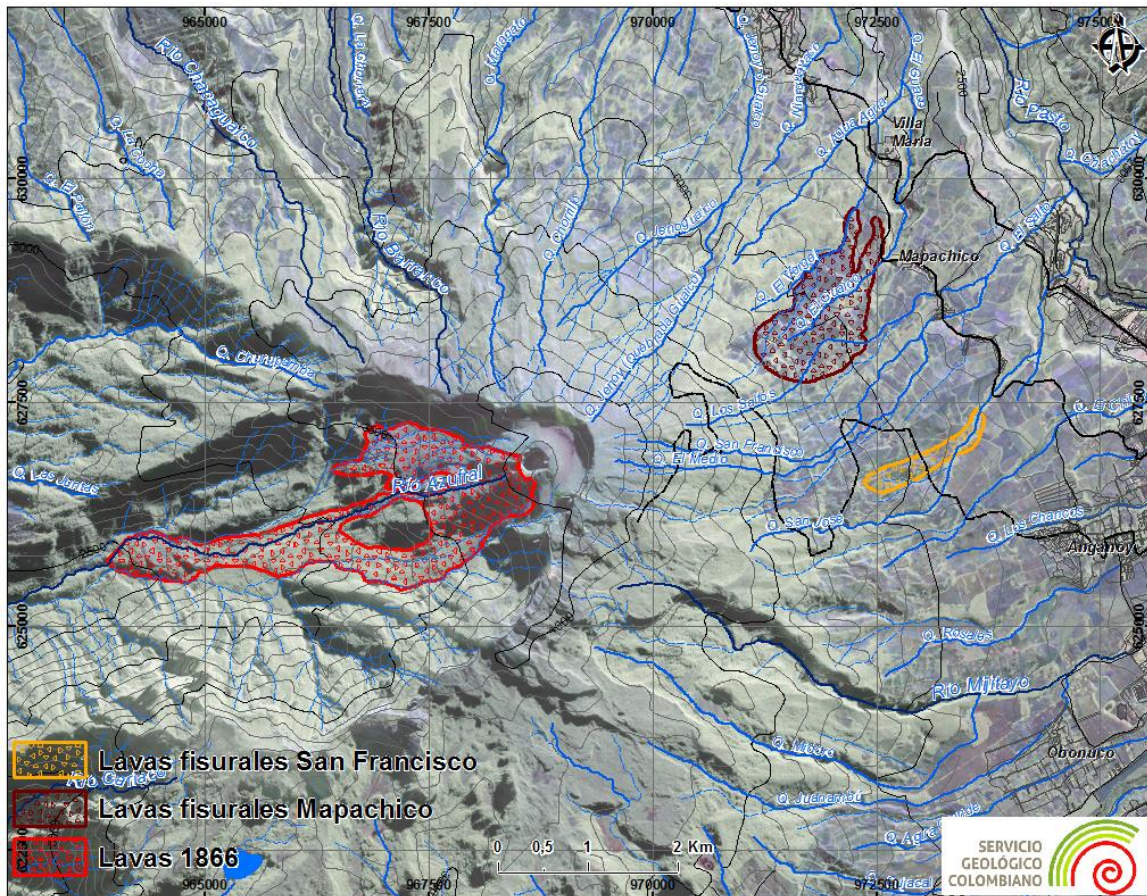


Figura 24. Distribución de los Depósitos de Lavas en el volcán Galeras

6.3.1.4 Volumen de lava emitida por pulso

El volumen total a simular se distribuye en pulsos o tasa de emisión, por lo cual Charbonnier (2013) propone el cálculo analítico del pulso en función del volumen acumulado por la celda del MDE obtenido del área del pixel y espesor del depósito:

$$Volumen_{pulso} = Superficie\ Celda_{MDE} \times Espesor$$

Para determinar el pulso, el MDE tiene un tamaño de la celda de 25 m de lado, y espesor promedio de los depósitos de lava para las emitidas del cráter principal es de 15 m y para las lavas fisural de 2 m; por lo tanto los pulsos calculados respectivamente son de $10.000\ m^3$ y $1250\ m^3$, adicionalmente se consideran pulsos de $25.000\ m^3$, con el objetivo de comparar el avance de las lavas simuladas con respecto al depósito.

Para las pruebas de parametrización del pulso, se simulan flujos de lavas desde diversos puntos de emisión con un volumen total de 50 millones de m^3 para las lavas de 1866 y de 3 millones de m^3 para las lavas fisurales.

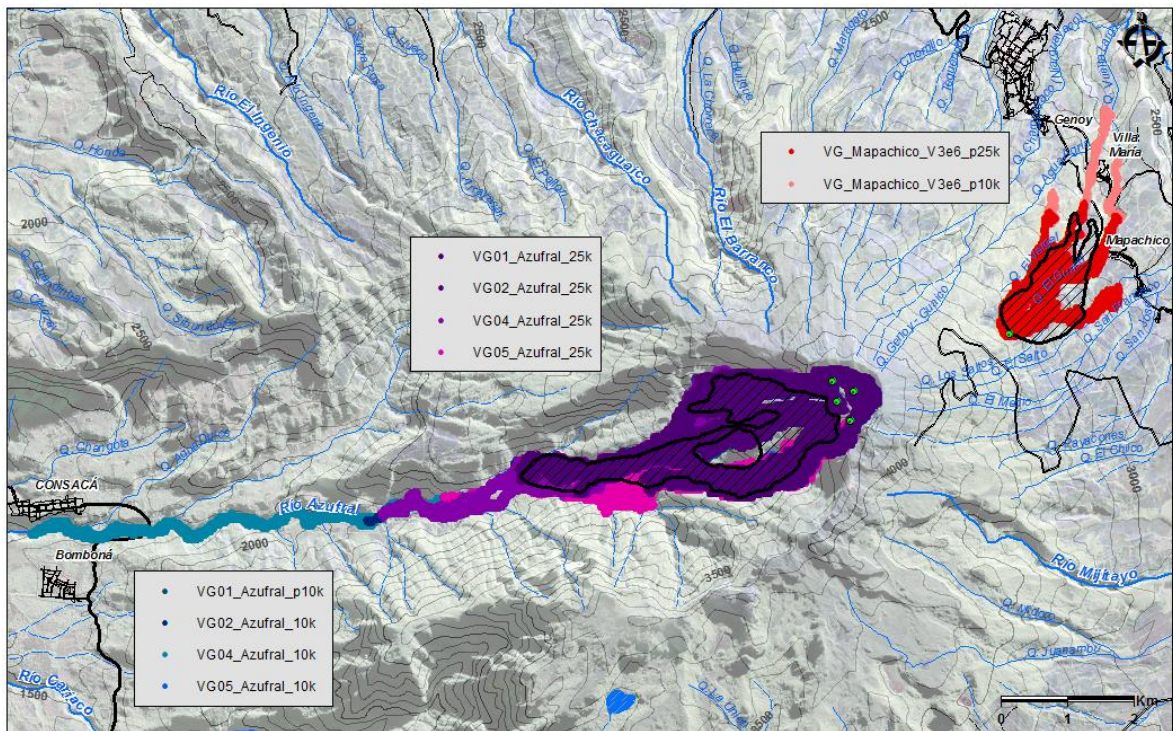


Figura 25. Parametrización de la lava emitida por pulsos

Servicio Geológico Colombiano

Como resultado se observa en la figura que flujos menores a 10.000 m^3 , tienden a ser muy fluidos, alcanzando largas distancias superando los depósitos de las lavas de 1866 y fisurales; pulsos conservadores de 25.000 m^3 , se considera que caracterizan en gran medida las condiciones de emisión de las lavas que originaron los depósitos de referencia.

En las simulaciones desarrolladas se consideraron los siguientes parámetros finales y de entrada en el código LavaPL, tanto para las lavas potenciales de ser originadas desde el cráter activo, como para posibles lavas de tipo fisural.

Tabla 5. Parámetros finales para la simulación de lavas en el código LavaPL

	Lavas Cono Volcánico 1866	Lavas Fisurales Mapachico - San Fco
Modelo Digital de Elevaciones	GeoSAR resolución espacial 25 m	
Puntos de Emisión	7	4
Volumen	50 millones m3	3 millones m3
Espesor	15 m	2 m
Flujo distribuido por Pulso	25.000 m3	

6.3.2 Análisis de los resultados

En los resultados se observa la fuerte correlación de las lavas con la topografía, la cual sigue la dirección de máxima pendiente, encauzándose por los cauces de los ríos y quebradas.

- **Lavas originadas del cráter**

El área que podría ser afectada por este tipo de fenómeno incluye las partes altas del volcán en el la cuenca del rio Azufral, hasta una distancia de aproximadamente 7,5 km, para flujos de lava emitidos por el cráter central, sin afectar zonas pobladas.

- **Lavas Fisurales**

Hacia el flanco nororiental (NE) del edificio antiguo, los flujos de lava fisurales emitidos desde los puntos escogidos para la simulación podrían descender por la hondonada de la quebrada Genoy – Guaico llegando cerca a la circunvalar a una distancia aproximada de 4 km, otros flujos podrían descender por las laderas y valles alrededor de las quebradas El Vergel, Los Saltos y San Francisco avanzando en promedio 2,5 km

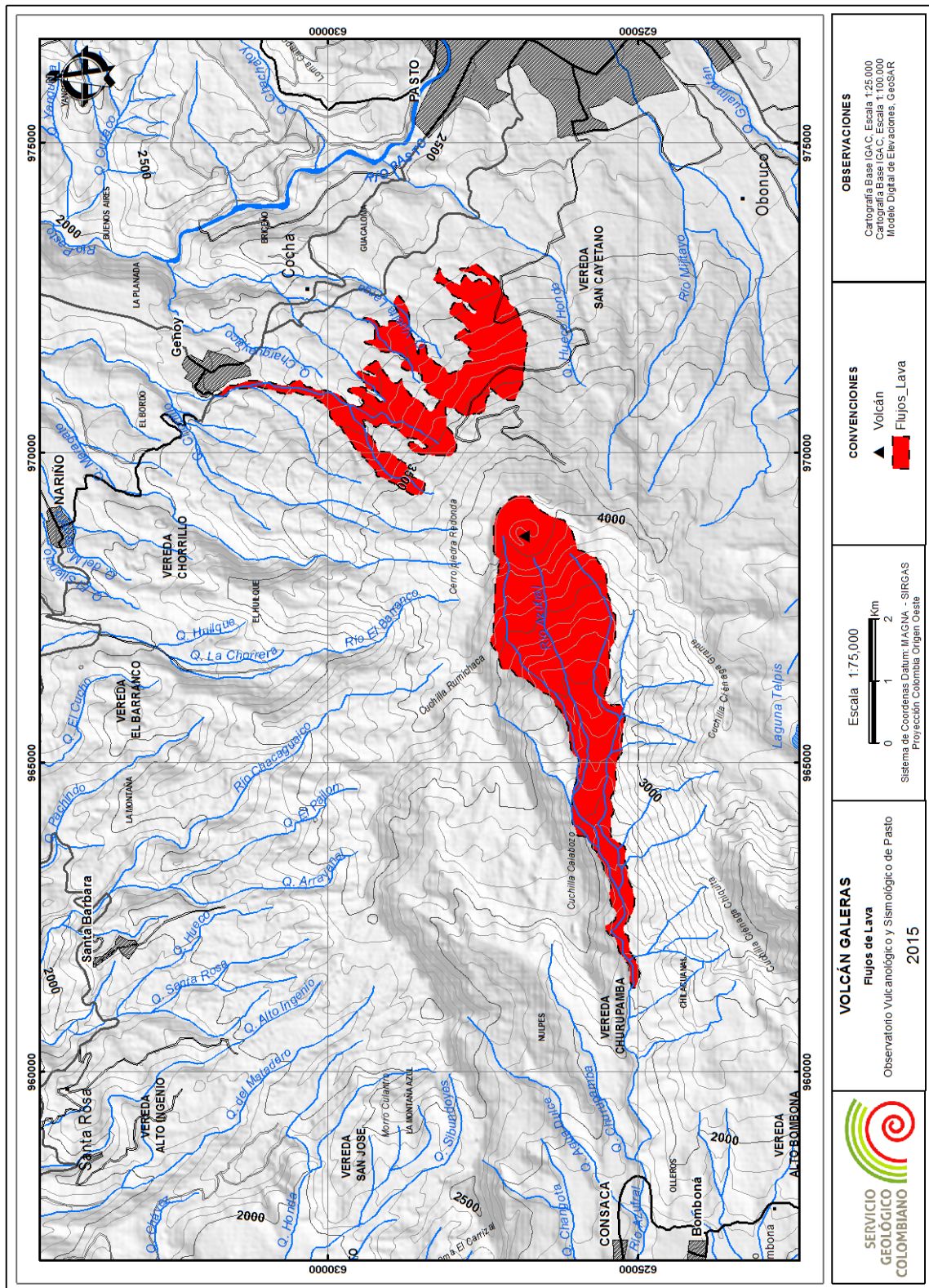


Figura 26. Áreas potencialmente afectadas por flujos de lavas

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

7. FLUJOS DE LODO Y FLUJOS DE ESCOMBROS (LAHARES)

Los *lahares* son una mezcla de agua, partículas sólidas y fragmentos de roca de diferentes tamaños, que pueden incorporar biomasa y que se desplazan por los cauces y valles de las quebradas y ríos. Según su contenido de materiales sólidos, en su orden de mayor a menor concentración, se denominan: flujos de escombros y flujos hiperconcentrados volcánicos (Vallance & Iverson, 2015), estos últimos son conocidos comúnmente como flujos de lodo volcánicos (Delgado, 2002). Un flujo de escombros puede diluirse y transformarse en un flujo hiperconcentrado. Los *lahares* varían en velocidad y tamaño, pueden fluir a varias decenas de metros por segundo, dependiendo de la pendiente del terreno, y pueden alcanzar grandes distancias a partir de su punto de origen. Estos fenómenos se pueden generar directa o indirectamente por actividad volcánica, durante (primarios) o después (secundarios) de las erupciones, por una variedad de mecanismos que permiten la interacción del agua con materiales volcánicos y no volcánicos. Las fuentes de agua para formar *lahares* pueden provenir de nieve, de hielo, de lagos cratéricos, de lluvias o de corrientes fluviales o reservorios de agua en el interior del volcán.

Para establecer cuál sería el comportamiento de los *lahares* en el volcán Galeras, se efectuaron simulaciones asistidas por computador, con énfasis en los drenajes que nacen en el volcán con el fin de evaluar la amenaza y el alcance de este fenómeno.

7.1 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Para efectuar las simulaciones de *lahares* en el volcán Galeras se utilizó el software *Laharz_py*, del Servicio Geológico de Los Estados Unidos (USGS). La teoría y funcionamiento de este método se puede consultar en (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998). Cabe resaltar que este método funciona con ecuaciones semiempíricas, que involucran conservación de la masa y del volumen, sin tener en cuenta introducción o sustracción de volúmenes ajenos a aquel que se simula. El método tiene dos ecuaciones fundamentales que lo gobiernan e indican que, tanto el área transversal de inundación (sección transversal) como el área planimétrica de inundación (en planta), son directamente proporcionales al volumen involucrado en el evento.

$$A = 0,05 V^{2/3} \quad \text{y} \quad B = 200 V^{2/3}$$

De las ecuaciones “A” es el área planimétrica de la inundación y “B”, es el área transversal de la inundación. Este método fue concebido y calibrado a partir del estudio y tratamiento estadístico de datos de áreas transversales y en planta de inundaciones

causadas por 27 lahares y flujos de escombros ocurridos en 9 volcanes del mundo y para varios experimentos de canal (Figuras 27 y 28).

Para las simulaciones sobre el volcán Galeras, se efectuó una recalibración sobre en las ecuaciones mencionadas anteriormente, con el fin de tener valores más ajustados a las características de los drenajes del volcán, en donde se aplicó un grado de confianza del 95%, modificando la ecuación que relaciona al área de la sección transversal $A = 0,05 V^{2/3}$, donde $cA= 0,05$, obteniendo nuevos valores de $cA= 0,00885267$ para un escenario mínimo probable y $0,28348224$ para un escenario máximo probable.

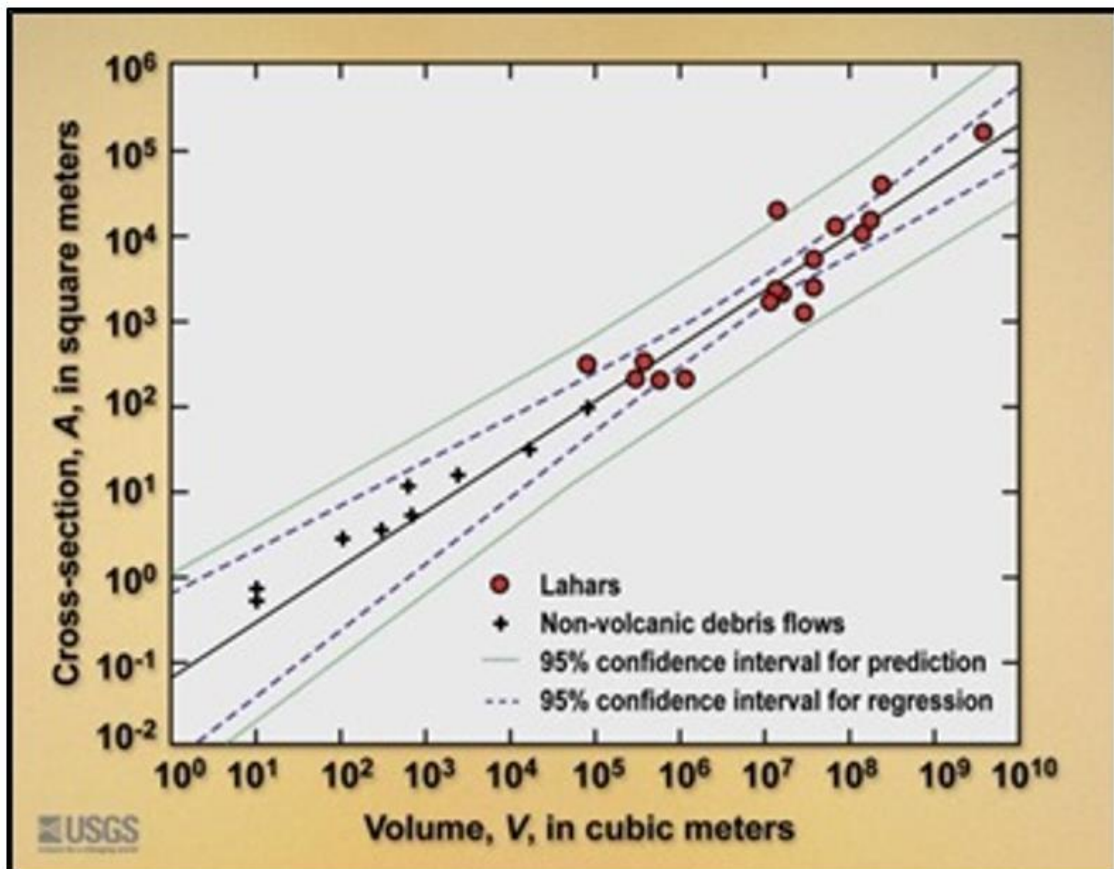


Figura 27. Dispersión de puntos de los valles inundados en área de sección transversal (A) en función del volumen del *lahar* (V). La gráfica muestra la línea de mejor ajuste de regresión logarítmica con la cual calcularon la constante de 0,05 para la ecuación de (A) en función (V) y los intervalos de confianza del 95% para la regresión (líneas discontinuas) y la predicción (líneas verdes) (Schilling, 2013).

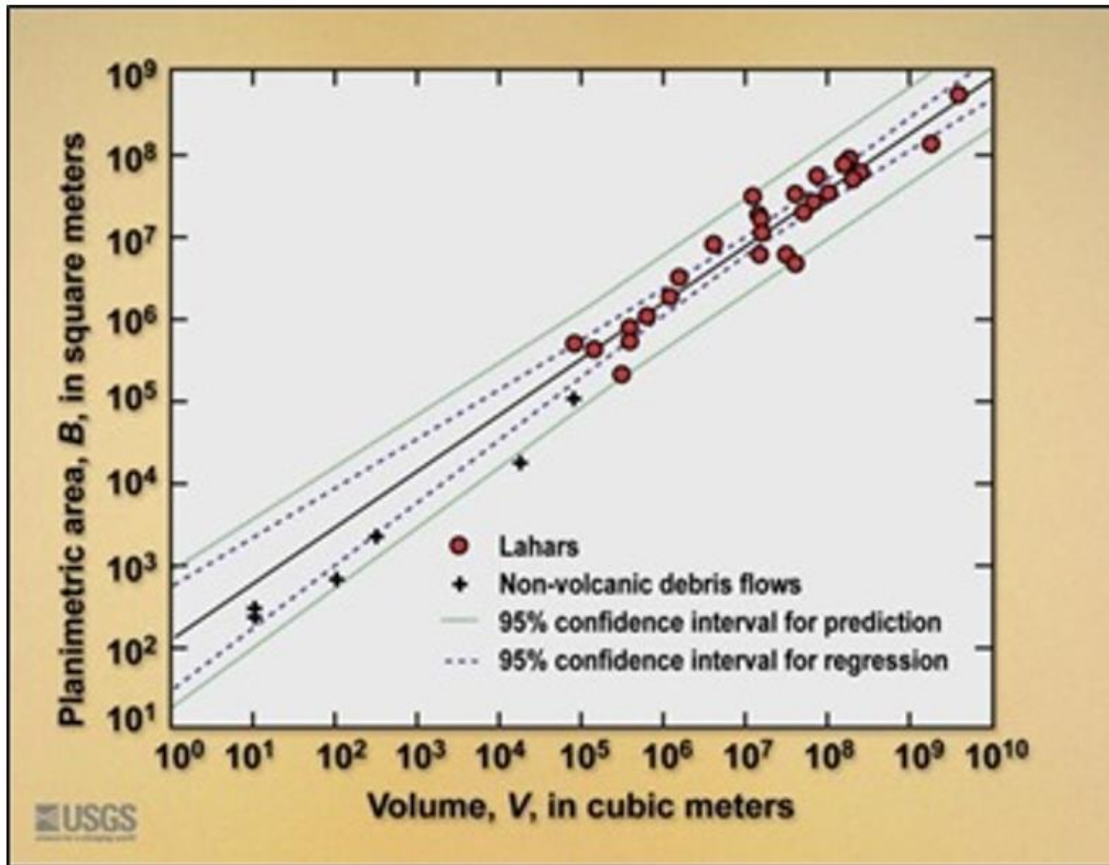


Figura 28. Dispersión de puntos de áreas inundadas en planta (B) en función del volumen del *lahar* (V). La línea de regresión logarítmica de mejor ajuste, con la cual calcularon la constante de 200 para la ecuación (B) en función de (V) y los intervalos de confianza del 95% para la regresión (líneas discontinuas) y de predicción (líneas verdes), (Schilling, 2013).

Laharz_py está escrito en el lenguaje de programación *Python* y se ejecuta dentro de *ArcGIS* (versión 10 o posterior) como un conjunto de *scripts* que son agrupadas dentro de un conjunto de herramientas de *ArcGIS* (*ArcToolbox*). Estas herramientas utilizan las ecuaciones mencionadas, un modelo de elevación digital (DEM); volúmenes de *lahar* especificados por el usuario, basados en registros históricos y en el conocimiento geológico del área; una relación H/L , o cono de pendiente, que delimita una zona proximal al cono volcánico (Figura 29) y que intenta abarcar la mayoría de las cabeceras de los drenajes que nacen en el cono (y por la que puede esparcirse un *lahar* en la parte alta), a través de los cuales se van a realizar las simulaciones que se van a correr aguas abajo del límite de ese cono y por cada cañón o drenaje. También se puede escoger un punto arbitrario del cañón para comenzar la simulación, sin tomar un cono de pendiente, método utilizado en las simulaciones para el volcán Galeras.

Para el modelo de elevación digital (DEM) se utilizaron los modelos de resolución de 12.5 metros ALOS PALSAR de la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) y el modelo de superficie (DSM: Digital Surface Model) de 3 metros de resolución espacial, generado a partir de imágenes de radar (Banda X, 3 cm de longitud de onda) del sensor de radar aerotransportado GEOSAR.

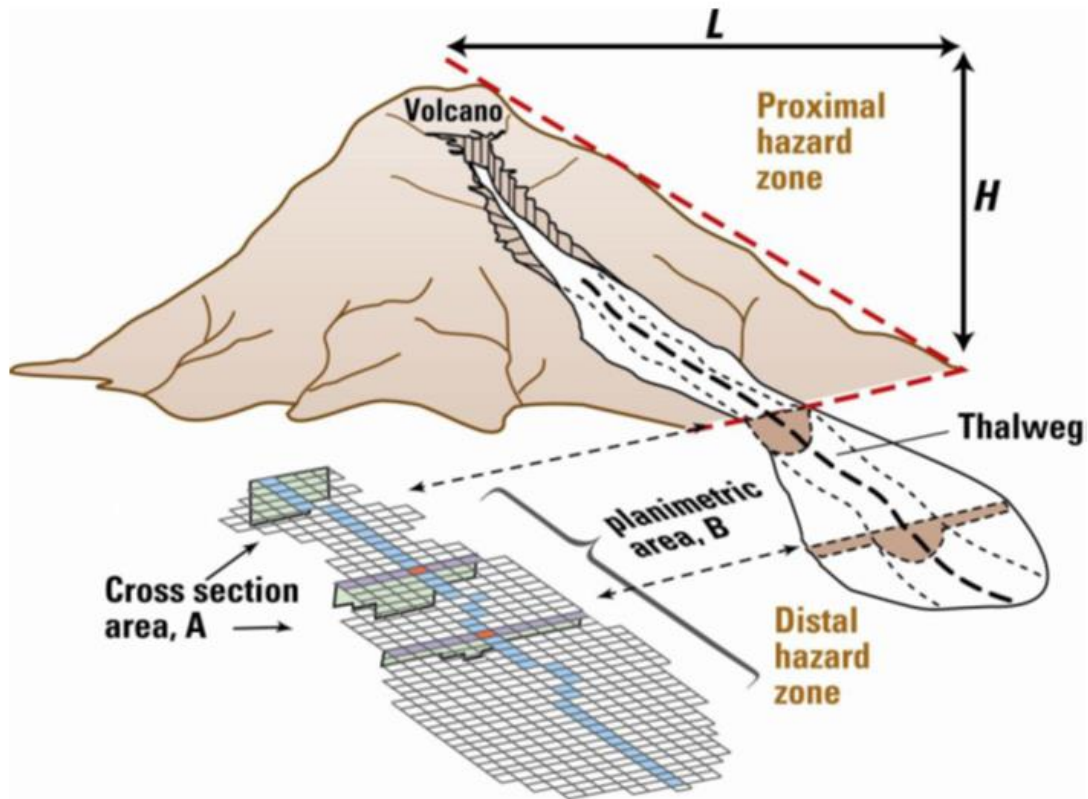


Figura 29. Sección transversal (A) y planimétrica (B) definidas para un *lahar*, que se utilizan en el programa LAHARZ. La relación H/L describe el alcance de la zona de peligro proximal a partir de la cual comienza la simulación (Iverson et al., 1998; Schilling, 2013).

Antes de iniciar las simulaciones, se efectuó un tratamiento de calidad a los modelos de elevación digital (DEM), utilizando herramientas en ArcGIS de análisis hidrológico y llenado (*Fill*), para identificar errores, efectuando automáticamente el llenado de hundimientos en el DEM, que con frecuencia contienen elevaciones erróneas, en donde la dirección del flujo no está bien definida.

7.2 GEOLOGÍA

El volcán Galeras presenta depósitos de *lahares* en las unidades eruptivas del registro geológico, formados posiblemente por la transformación de CDP al incorporar agua en su recorrido, la removilización de material posterior al evento eruptivo o a la

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

desestabilización de represamientos. Teniendo en cuenta los mecanismos que pueden detonar este tipo de eventos, se tomó como referencia los depósitos descritos por Calvache (1990), para determinar los parámetros de simulación de este fenómeno, empleando la herramienta LAHARZ (Schilling, 1998; Schilling, 2014) y de esta manera definir las áreas que podrían llegar a ser afectadas.

7.3 SIMULACIÓN

Para efectuar las simulaciones de lahares se utilizó el software LaharZ_py, creado por el Dr. Schilling para el Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS en 1998 y se realizaron simulaciones en las diferentes vertientes que nacen en las partes altas alrededor del volcán Galeras.

7.3.1 Parámetros utilizados en las simulaciones.

Con respecto a los volúmenes de *lahar* a simular, se efectuaron simulaciones de hasta 3 millones de metros cúbicos teniendo en cuenta las características de la dinámica eruptiva y el registro geológico del volcán las cuales evidencian que los *lahares* que se pueden generar, corresponderían a la transformación de Corrientes de Densidad Piroclástica (CDP) al incorporar agua en su dinámica de transporte y canalizarse por los principales drenajes; o a través de removilización de material piroclástico posterior a una erupción volcánica por las lluvias o represamientos.

7.3.2 Análisis de los resultados

Se efectuaron simulaciones computacionales con un escenario para un volumen de 3 millones de metros cúbicos de *lahar*, utilizando un modelo digital de elevación de 12.5 metros por pixel para los drenajes correspondientes a los ríos Azufral, Barranco, Chacaguaico, Guáitara, Pasto y las quebradas Churupamba, Maragato, y Chorrillo (Figura 30). Hacia el flanco Oriental y Suroriental del volcán Galeras sobre los drenajes de la quebrada Midoro y el río Mijitayo los cuales arriban a la ciudad de Pasto se hicieron simulaciones con el mismo volumen de *lahar* empleando un modelo digital de elevación con una resolución de 3 metros por pixel (Figura 31).

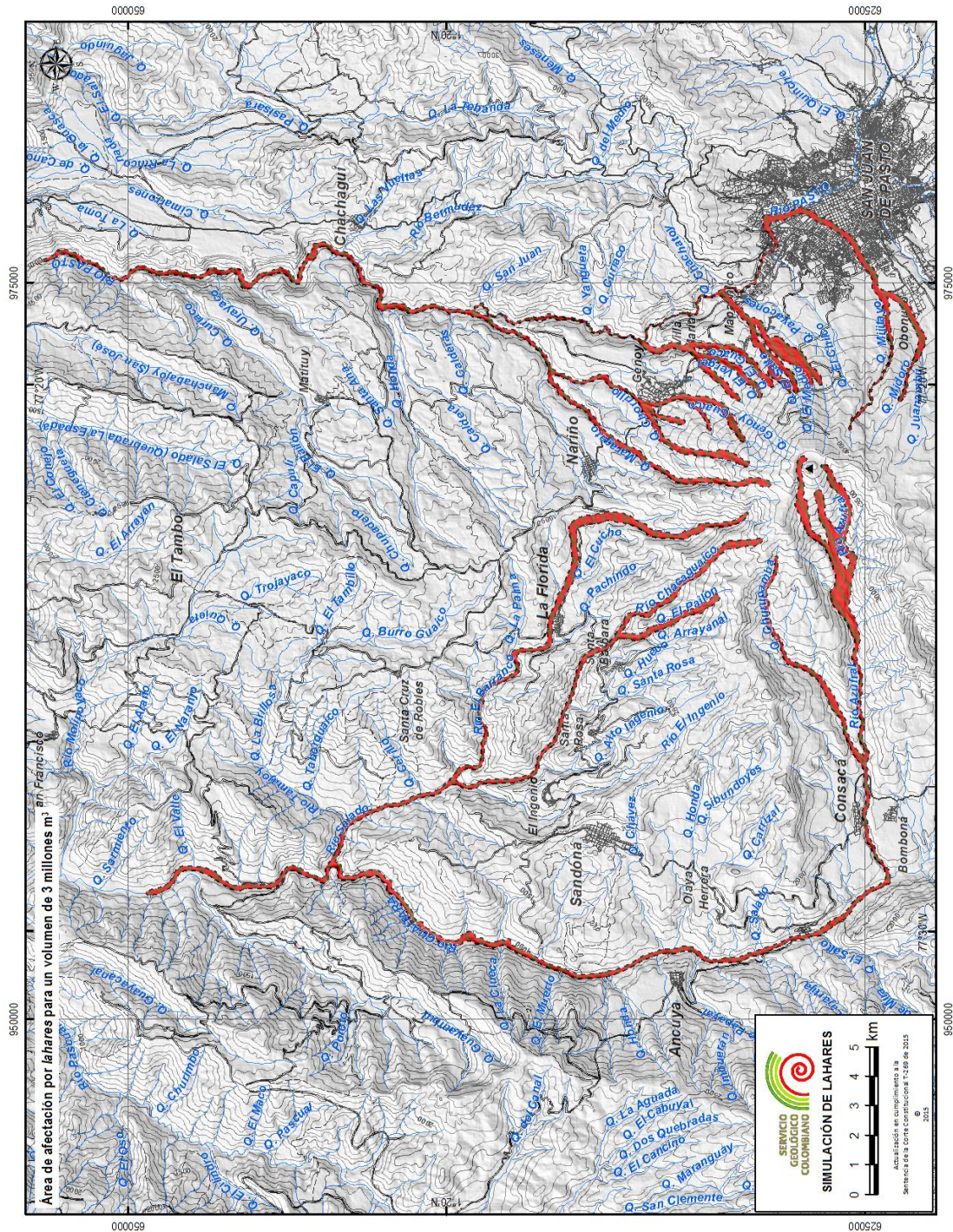


Figura 30. Resultados de las simulaciones de flujos de lodo volcánico (*lahares*) para un volumen de 3 millones de metros cúbicos correspondiente a los polígonos de color rojo el área de influencia del volcán Galeras.

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

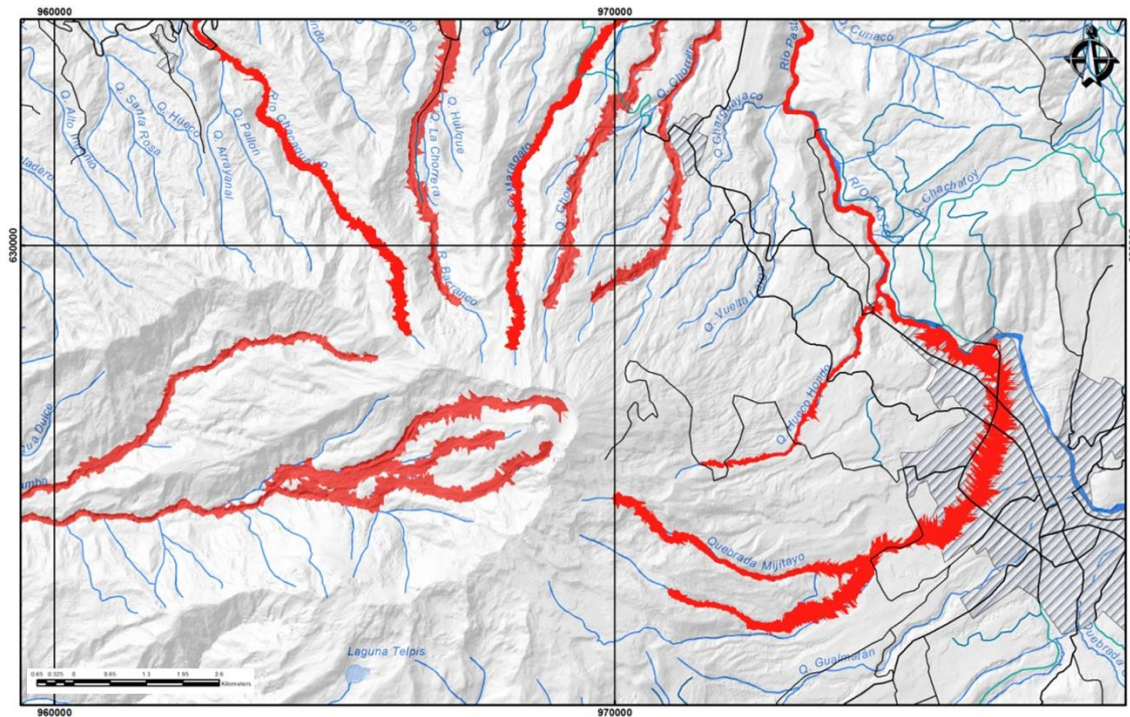


Figura 31. Resultados de las simulaciones de flujos de lodo volcánico (*lahares*) para un volumen de 3 millones de metros cúbicos en el área proximal del volcán Galeras correspondiente a los polígonos de color rojo.

Los resultados obtenidos evidencian que los *lahares* generados por la cuenca del río Azufral y la quebrada Churupamba avanzan cerca de 15 km hasta desembocar en el río Guáitará, continuando por este río en un trayecto aproximado de 20 km. Hacia el flanco noroccidental del volcán, los flujos descienden por los valles de los ríos Chacaguaico y Barranco alcanzando una distancia de hasta 17 km desembocando en el río Salado y avanzando aguas abajo cerca de 15 km incluyendo al río Guáitará. Hacia el norte y nororiente del volcán los flujos de lodo volcánico descienden cerca de 5 km por las cuencas de las quebradas Maragato y Chorrillo hasta alcanzar al río Pasto, a partir del cual recorren una distancia de aproximadamente 20km aguas abajo en dirección Norte. Hacia el flanco oriental y sur oriental del volcán, los flujos descienden hasta arribar al casco urbano de la ciudad de Pasto. Dado el desarrollo urbanístico, se ha modificado sustancialmente el curso del río Mijitayo en el trayecto que antes recorrería este drenaje donde actualmente se establece parte de la ciudad, por lo cual es necesario realizar estudios más detallados sobre cuál sería el comportamiento de los *lahares* en la parte urbana y su posible grado de afectación mediante otras metodologías más detalladas que requieren un buen tiempo de investigación que contemplen parámetros físicos que muestren mejor la dinámica del fenómeno.

8. ONDAS DE CHOQUE

Las explosiones generadas en las erupciones volcánicas son producidas por la descompresión del sistema, ocasionando efectos de ondas de choque que viajan a velocidades mayores a la del sonido y pueden ser sentidas a varios kilómetros de distancia, produciendo vibraciones, rompimiento de vidrios, fisuras en paredes y conmoción de las personas afectadas por este fenómeno, entre otros.

8.1 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Para esta actualización del mapa de amenaza de Galeras, se tomó la zonificación que por este fenómeno llevaron a cabo Córdoba & Del Risco (1998), a partir de simulaciones computacionales, empleando programa para el modelamiento de ondas de choque. Dicho programa tiene en cuenta los efectos de las barreras topográficas durante la propagación de ondas de velocidad supersónica y que describe la relación entre la onda de choque y la deformación que ésta ocasiona en un cuerpo sólido. Este trabajo actualizó la zonificación obtenida por los mismos autores para la elaboración de la tercera versión del mapa de amenaza para este fenómeno (Córdoba & Del Risco, 1997).

8.2 GEOLOGÍA

En el volcán Galeras, tanto en los reportes de la actividad histórica como en la actividad registrada entre 1992 y 2010, se tienen evidencias de la ocurrencia de este fenómeno. Interpretación y análisis de la información de actividad histórica (principalmente actividad eruptiva de 1925).

8.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El resultado de estas simulaciones delimita las tres zonas de amenaza que se muestran en la Figura 32. La amenaza alta se define con un área aproximadamente circular, alrededor del cono activo, con un radio cercano a los 580 m, quedando de esta manera confinada al interior del anfiteatro; en esta zona, en caso de una explosión de Galeras, se podrían generar ondas de choque con sobrepresiones mayores a 15.000 pascales.

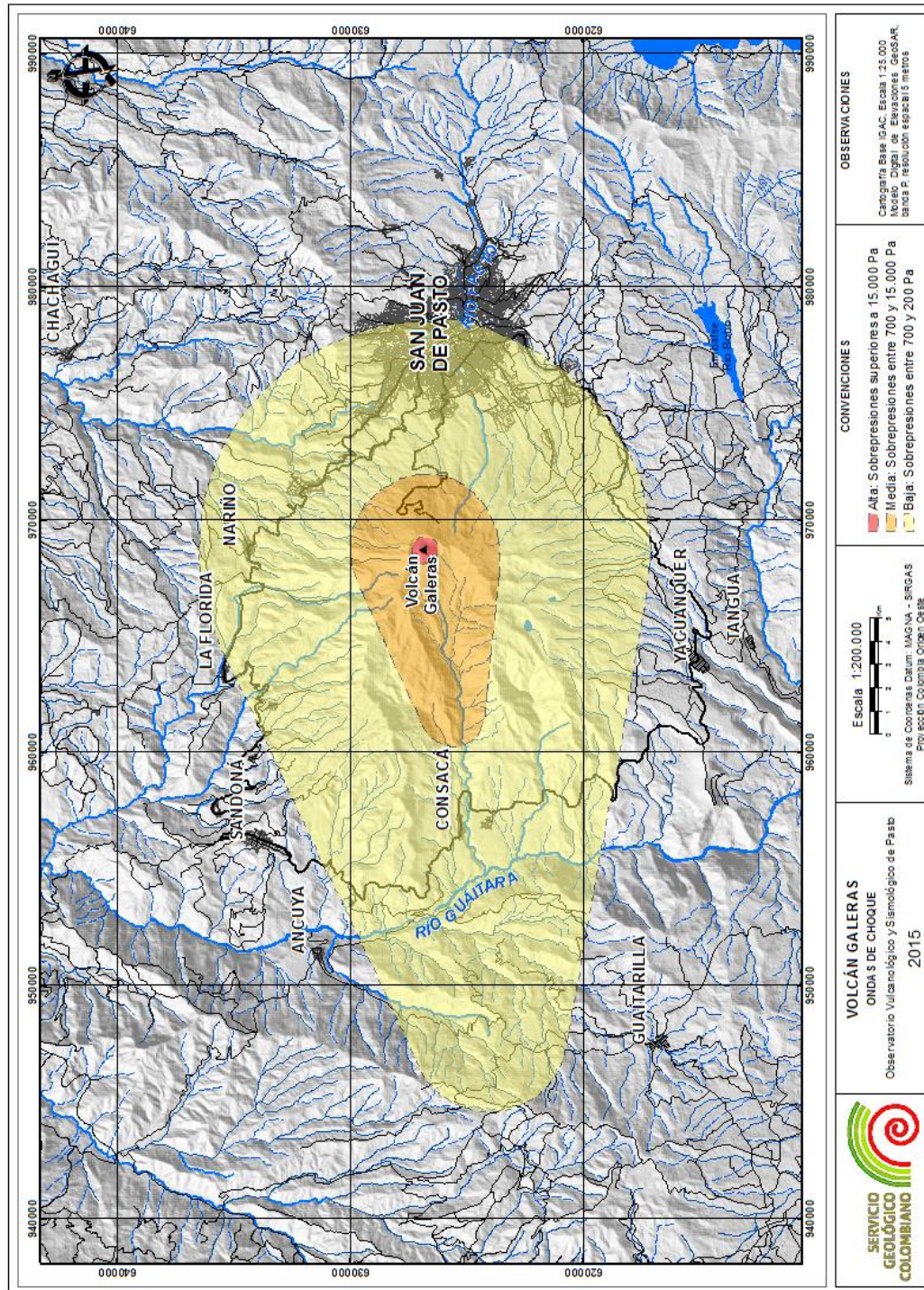


Figura 32. Zonificación para ondas de choque producidas por explosiones en el volcán Galeras, tomado de Córdoba y Del Risco (1998).

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

Servicio Geológico Colombiano

La amenaza media (sobrepresiones entre 15.000 y 700 pascales) abarca un área semi-circular al costado oriental del volcán, con un radio de 3,2 km respecto al cráter; y hacia el costado occidental, un área parabólica, elongada hacia el oeste-suroeste (W-SW), siguiendo el cañón del río Azufral, hasta un máximo de 8,5 km, zonas donde, en general, no hay población permanente.

La amenaza baja (700 a 200 pascales) está definida por un área semi-circular al costado oriental del volcán, con un radio de 10 km respecto al cráter, pudiendo afectar áreas rurales, en la ciudad de San Juan de Pasto y en algunas poblaciones como Genoy, Nariño, Santa Bárbara y La Florida; y hacia el costado occidental, está definida por un área parabólica, elongada hacia el oeste-suroeste (W-SW), hasta un máximo de 25 km (superando el cañón del río Guáitara), afectando, entre otras, áreas rurales y las poblaciones de Consacá, Bomboná y Olaya Herrera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANKS, N.G., 1989. *Preliminary technical report and recommendations on the unrest at Galeras Volcano*, February-April 1989. Report to USGS, USAID/OFDA and Colombian officials and agencies, 19 p.
- BANKS, N.G., CALVACHE V. M.L., WILLIAMS, S.N., 1997. *¹⁴C ages and activity for the past 50 ka at Volcán Galeras, Colombia*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 77. P 39-55.
- BONADONNA, C., CONNOR, C. B., *et al.* 2005. *Probabilistic modeling of tephra dispersion: hazard assessment of a multi-phase eruption at Tarawera, New Zealand*. Journal of Geophysical Research, 110, 65 p.
- CALVACHE, M. L. 1990. Geology and volcanology of the recent evolution of Galeras volcano. Colombia. Tesis de Maestría. Louisiana State University
- CONNOR, L., CONNOR, C., MELIKSETIAN. K., & SAVOV, I., 2012. Probabilistic approach to modeling lava flow inundation: a lava flow hazard assessment for a nuclear facility in Armenia. Journal of Applied Volcanology, 1:3, 1-19.
- CONNOR, L. J., 2012, Lava PL. En: <https://vhub.org/resources/3597>.
- CÓRDOBA, G. & DEL RISCO, E., 1997. *Shock wave hazard map of Galeras volcano, Colombia*. Memorias de la Asamblea General del IAVCEI, 1997. Puerto Vallarta, México. 54 p.
- CÓRDOBA, G. & DEL RISCO, E. 1998. *An approach to the volcanic risk assessment due to shock wave hazard at Galeras volcano influenced area*. Presentación para "Cities on Volcanoes I", Roma y Nápoles. 1998. 25 p.
- COURTLAND, L. 2011. Tephra2 Tutorial Scripts. Tephra2 Tutorial 1: An Introduction, <https://vhub.org/resources/tephra2>
- COURTLAND, L., 2015. Get_Wind. Herramienta de extracción de datos de viento de NCEP-DOE Reanalysis 2, asociada a la herramienta en línea VHUB Tephra2 (<https://vhub.org/resources/tephra2>).
- CHARBONNIER, S., 2013. The LavaPL simulation tool: overview and applications. VHUB working meeting. Manizales, Colombia. 1-14
- GARCÍA, A.M., 2010. Simulación de flujos piroclásticos en el volcán Galeras con el código TITAN2D. Tesis para obtener el título de geóloga. Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Programa de Geología. Manizales, Caldas. 104 p.
- GARCÍA, A.M., MURCIA H.F., CORTÉS G.P. & LAVERDE C.A., 2011. Simulación de flujos piroclásticos en el volcán Galeras con el Código Titan2D. Geología Colombiana, Vol. 36 No. 1 - Edición Especial - ISSN 0072-0992.
- INGEOMINAS, 1997. Mapa de Amenaza Volcánica del Galeras (Tercera versión), Publicación Especial de INGEOMINAS, 38 p.

Servicio Geológico Colombiano

- 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.
- MALIN, M. C. & Sheridan, M. F., 1982. Computer assisted mapping of pyroclastic Surges. Science 217.
- MASTIN, L. G., 2001, A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-45, 16p.
- PATRA, A., BAUER A., NICHITA, C., PITMAN, E.B., *et al.* 2005. *Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139:1-21.
- SHERIDAN, M. F. & KOVER, T. 1996. FLOW3D: *A computer code for simulating rapid, open-channel volcanic flows*, in Proc. UJST workshop on the Technology of Disaster Prevention against Local Severe Storms, Norman OK, P 155–163.
- SHERIDAN M.F. & MACÍAS J.L., 1992. *PC software for 2-dimensional gravity driven flows: Application to Colima and El Chichón Volcanoes, México*: Second International Meeting on Volcanology, Colima, México, 5 p.
- SCHILLING, S.P., 1998. Laharz: *Gis programs for automated mapping of lahar inundations hazard zones*- US Geological Survey Open-File Report, P 98-638.
- SCHILLING, S.P., 2014, *Laharz_py—GIS tools for automated mapping of lahar inundation hazard zones: U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1073*, 78 p.
- STUBEL, A. 1906. Die Vulkanberge von Colombia. Dresden
- STIX, J., TORRES C. R., NARVÁEZ M. L., *et al.*, 1997. *A model of vulcanian eruptions at Galeras volcano, Colombia. Journal of Volcanology and Geothermal Research* 77. P 285-303.

Páginas visitadas:

<http://www.sgc.gov.co/Pasto.aspx>
www.vhub.org
<http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>
<http://volcanoes.usgs.gov/ash/health/>
<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/lava/index.php>