



**ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN
GALERAS – COLOMBIA**

MEMORIA

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

San Juan de Pasto, diciembre de 2015





Dirección de
Geoamenazas

**ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN
GALERAS – COLOMBIA**

MEMORIA

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	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
1. GENERALIDADES	8
1.1 VÍAS DE ACCESO Y DRENAJES	9
1.2 TRABAJOS ANTERIORES	9
1.3 METODOLOGÍA	11
2. REGISTRO GEOLÓGICO E HISTÓRICO DEL VOLCÁN GALERAS	13
2.1 REGISTRO GEOLÓGICO DEL VOLCÁN GALERAS	14
2.2 REGISTRO HISTÓRICO DE ERUPCIONES DEL VOLCÁN GALERAS	16
2.3 REGISTRO ACTUAL DE ERUPCIONES DEL VOLCÁN GALERAS	19
3. AMENAZA VOLCÁNICA	22
3.1 AMENAZA POR CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA (FLUJOS PIROCLÁSTICOS Y OLEADAS PIROCLÁSTICAS)	22
3.2 AMENAZA POR CAIDA DE PIROCLASTOS	25
3.2.1 Amenaza por caída de piroclastos transportados eólicamente	26
3.2.2 Amenaza por caída de piroclastos de proyección balística	29
3.3 AMENAZA POR ONDAS DE CHOQUE	31
3.4 AMENAZA POR FLUJOS DE LAVA	32
3.5 AMENAZA POR FLUJOS DE LODO Y FLUJOS DE ESCOMBROS VOLCÁNICOS (LAHARES)	34
4. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA	37
4.1 ZONA DE AMENAZA ALTA	37
4.2 ZONA DE AMENAZA MEDIA	38
4.3 ZONA DE AMENAZA BAJA	38
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del volcán Galeras, principales drenajes y poblaciones en su área de influencia.....	8
Figura 2. Cono activo construido al interior de los remanentes de los edificios volcánicos del CVG que forman un anfiteatro abierto hacia el occidente (W)....	13
Figura 3. Unidades Eruptivas (UE) del volcán Galeras.....	15
Figura 4. Pictógrafo de “El Higuero”, corregimiento de Mapachico – Pasto... ..	16
Figura 5. Portada de la revista Ilustración Nariñense, donde se aprecia la columna eruptiva y el flujo piroclástico generados en la erupción del 27 de agosto de 1936.....	19
Figura 6. Actividad eruptiva del volcán Galeras desde 1988.....	20
Figura 7. Zona que podría ser afectada por CDP (flujos y oleadas piroclásticas) generadas en erupciones del volcán Galeras.. ..	24
Figura 8. Insumos para la zonificación de la amenaza por caída de ceniza y lapilli en el volcán Galeras.....	27
Figura 9. Zonificación de la amenaza por piroclastos de caída transportados eólicamente.	28
Figura 10. Zonificación de la amenaza por proyectiles balísticos.. ..	30
Figura 11. Zonificación para ondas de choque producidas por explosiones en el volcán Galeras, tomado de Córdoba y Del Risco (1998).. ..	32
Figura 12. Zonas de amenaza alta por flujos de lava en el volcán Galeras.....	34
Figura 13. Zonificación (amenaza alta) por lahares, que muestra las áreas que podrían ser afectadas por este fenómeno asociado a actividad del volcán Galeras.....	36

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. Las áreas que podrían ser afectadas por estos fenómenos se representan como zonas de amenaza alta, media y baja, en la presente actualización del mapa. La zona de amenaza alta sería potencialmente afectada por uno o varios de los fenómenos antes mencionados, dentro de esta zona se encuentran poblaciones como La Florida, Genoy y la ciudad de San Juan de Pasto, esta última podría ser afectada por *lahares*. En las zonas de amenaza media y baja se presentarían principalmente los fenómenos de caída de piroclastos, ondas de choque, emisión de gases y sismos volcánicos, cuyos efectos en cada zona dependerán del tamaño de la erupción y la distancia al foco eruptivo. Los límites entre las zonas de amenaza, trazados con líneas discontinuas, son transicionales y, por lo tanto, no representan límites tajantes o absolutos entre una y otra zona de amenaza.

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. The areas that could be affected by these phenomena are represented as high, medium and low-hazard zones, in this updated map. The high-hazard zone are the one that would potentially be affected by one or more of the above-mentioned phenomena; within this zone lie populated areas such as the towns of La Florida, Genoy and the city of Pasto, the latter may be affected by lahars. In areas of low and medium hazard zones the phenomena of pyroclastic falls, shock waves, gas emissions and volcanic earthquakes are the most likely occurrences; the effects in each area will depend on the size of the eruption and the distance from the eruption vent. The boundaries between hazard zones, drawn with broken lines, are transitional and therefore do not represent sharp or absolute boundaries between them.

INTRODUCCIÓN

Las actualizaciones de los mapas de amenaza volcánica se realizan cuando existe nueva información geológica sobre el volcán objeto de estudio, ocurrencia de cambios morfológicos significativos en el edificio volcánico, disponibilidad de nuevas herramientas computacionales para simulación o avances importantes en el campo de la vulcanología y en las metodologías para la evaluación de la amenaza volcánica.

En los últimos años el Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha implementado una metodología para la elaboración de mapas de amenaza volcánica, que se fortalece con el uso de herramientas computacionales especializadas, contando con la asesoría de grupos de investigación a nivel internacional, entre ellos, las universidades de Buffalo y South Florida, en los Estados Unidos, el grupo de investigación internacional en volcanes y mitigación del riesgo (VHUB) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), para llevar a cabo simulaciones de fenómenos volcánicos, incorporando su uso al procedimiento de evaluación de amenaza del SGC. Es así como se inició un proceso de actualización de mapas de amenaza (Cumbal, Chiles, Cerro Negro, Puracé y Nevado del Ruiz), considerando como requisito principal la revisión de los estudios geológicos existentes, complementándolos con estudios geológicos-estratigráficos detallados que permiten definir los parámetros más adecuados para las simulaciones en cada volcán.

La Corte Constitucional de Colombia, mediante la Sentencia T-269 de 2015, ordenó al SGC presentar un mapa actualizado de amenaza volcánica del volcán Galeras. A la fecha de la sentencia y en la actualidad, el volcán no cuenta con estudios geológico-estratigráficos adicionales o más detallados que los utilizados para la elaboración de la tercera versión del mapa de amenaza volcánica (INGEOMINAS, 1997); esto debido, entre otros, a que la actividad del volcán no ha permitido adelantar, en algunas áreas, trabajos geológicos de campo en condiciones adecuadas de seguridad.

1. GENERALIDADES

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).

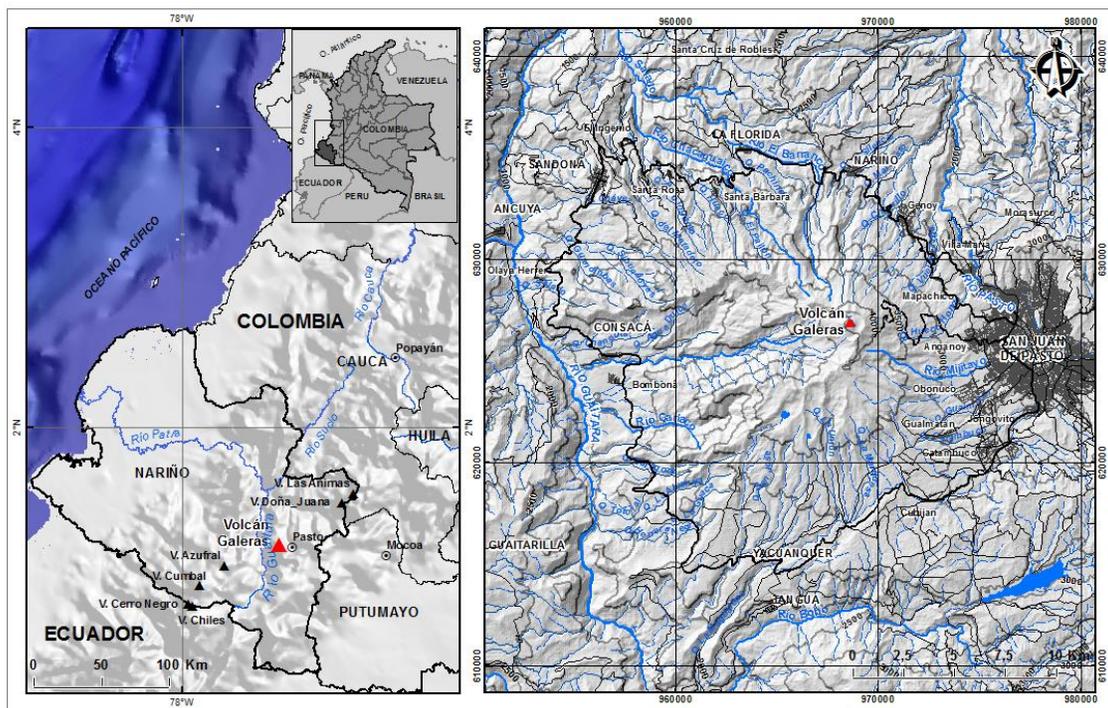


Figura 1. Localización del volcán Galeras, principales drenajes y poblaciones en su área de influencia.

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 9600 habitantes (cabecera municipal a 10 km al noroeste del cráter), Sandón 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).

1.1 VÍAS DE ACCESO Y DRENAJES

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).

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 TRABAJOS ANTERIORES

La reactivación del volcán Galeras en 1988, teniendo en mente la experiencia trágica de la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985, dio lugar, a una respuesta de apoyo internacional que incluyó un trabajo realizado en tiempo récord, por parte de un grupo de geólogos de varios países, con el fin de tener una idea de la actividad eruptiva del Galeras (Banks, 1989), ya que los trabajos geológicos del área volcánica eran de carácter regional. Es así como INGEOMINAS (1989a) presenta el primer mapa de

amenaza volcánica para el volcán Galeras, en el que se consideraba básicamente las fases eruptivas, de acuerdo al registro histórico, en las décadas de los años 30 y 40, donde se destaca la ocurrencia de un posible flujo piroclástico en 1936. En la zonificación de la amenaza se definieron cinco zonas, dispuestas circularmente alrededor del cráter, designadas como muy alta, alta, media alta, media y baja, con radios desde el cráter principal de 5, 8, 11, 15 y 23 km, respectivamente. Este mapa se llevó a cabo en poco tiempo debido a la necesidad del Comité Regional de Emergencias de conocer las zonas de amenaza y así tener una base para la elaboración de los planes de emergencia (Pulgarín, 1993).

INGEOMINAS (1989b) presenta la segunda versión del mapa de amenaza para el volcán Galeras, teniendo en cuenta los estudios geológicos previos (Murcia, 1982; Murcia & Cepeda, 1984 y 1991; Cepeda, 1985 y 1986), la realización de trabajos geológicos de campo complementarios y el análisis de la actividad histórica. En este mapa se definieron tres zonas de amenaza designadas como alta, media y baja, considerando los eventos volcánicos de edad menor a 10.000 años.

INGEOMINAS (1997) y Hurtado & Cortés (1997) presentan la tercera versión del mapa de amenaza volcánica de Galeras. Para esta actualización se contaba con una mayor información geológica-estratigráfica, consignada principalmente en Calvache (1990 y 1995) y trabajos posteriores publicados, además de los resultados de otras investigaciones sobre Galeras, en el Volumen Especial del *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (Banks *et al.*, 1997; Calvache & Williams, 1997a y 1997b; Calvache *et al.*, 1997, Stix *et al.*, 1997). Los nuevos trabajos geológicos, cómo se consigna en Banks *et al.* (1997), se llevaron a cabo debido a la necesidad urgente de mejorar la información sobre las amenazas y se realizaron en medio de limitaciones de tiempo y logísticas de seguridad, debido a la actividad del volcán. La información geológica permitió establecer la cronología y características de los eventos asociados a esta actividad y su evolución. Trabajos geológicos adicionales (excavación y apiques) fueron llevados a cabo para corroborar la edad de 4500 años de un depósito de flujo piroclástico, encontrado cerca a la población de La Florida, para precisar el conocimiento, distribución y avance de los depósitos asociados al volcán (INGEOMINAS, 1996). Adicionalmente, para la elaboración de esta tercera versión se contó con la información sobre monitoreo y actividad eruptiva desde su reactivación (Cortés & Calvache, 1993; Cortés & Raigosa, 1994; Cortés & Raigosa, 1997; Gómez & Torres, 1997; Gil & Chouet, 1997; Narváez *et al.*, 1997). En la elaboración de esta tercera versión del mapa se aplicó la metodología de zonificación probabilística (Parra & Cepeda, 1990) de los fenómenos asociados a las erupciones ocurridas durante los últimos 5000 años, definiendo tres zonas de amenaza (alta, media y baja) y los fenómenos que afectarían las áreas delimitadas en estas zonas.

1.3 METODOLOGÍA

La evaluación de la amenaza volcánica para la actualización de los mapas de amenaza, en el SGC, se basa en nueva información geológica del volcán objeto de estudio, cambios morfológicos significativos en el edificio volcánico, disponibilidad de nuevas herramientas para simulación y/o avances importantes en vulcanología y en metodologías para la evaluación de la amenaza volcánica, teniendo como documento guía el “*Procedimiento de la evaluación de la amenaza volcánica*” de la dirección de Geoamenazas del SGC, donde se compilan los lineamientos sobre la evaluación y la elaboración de mapas de amenaza volcánica en el país (SGC, 2013).

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, 2012a y 2012b; 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; Torres *et al.*, 2015; e Informes Técnicos del OVSPasto), derivados del monitoreo continuo desde 1989, a cargo del Observatorio Vulcanológico y Sismológico del SGC en Pasto (<https://www.sgc.gov.co/Publicaciones/Paginas/informes-tecnicos.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 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 (Bonadonna *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

Servicio Geológico Colombiano

(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).

Mediante la superposición de las áreas delimitadas por los resultados de las simulaciones de los diferentes fenómenos volcánicos y teniendo en cuenta el grado de afectación al que se verían expuestas dichas áreas, se llevó a cabo la zonificación en amenaza alta, media y baja, que define la actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras.

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, 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 Jhon 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.

2. REGISTRO GEOLÓGICO E HISTÓRICO DEL VOLCÁN GALERAS

El volcán Galeras (Figura 2) representa el “*estadio*” o etapa más reciente de la actividad eruptiva que, desde hace aproximadamente un millón de años, ha dado lugar a edificios volcánicos sucesivos que constituyen el CVG (Calvache, 1995; Calvache *et al.*, 1997). La actividad del volcán, a través del cono actual, se inicia hace unos 5000 años (Calvache, 1990).

Desde 1988 este volcán se reactivó, después de un período de reposo de 38 años. Desde esta fecha la actividad del volcán ha generado numerosas erupciones de tipo “vulcaniano”.

Las erupciones vulcanianas se caracterizan por ser explosiones intermitentes de pequeñas a moderadas, que suceden en tiempos cortos y que pueden registrarse a lo largo de meses o años; algunos períodos de actividad están combinados con la extrusión de pequeños domos intra-cratéricos que son, a su vez, destruidos por nuevas explosiones y la generación de ondas de choque. Los productos generados en este tipo de actividad son principalmente ceniza y *lapilli*, bombas corteza de pan y bloques, flujos piroclásticos de bloques y ceniza y oleadas, donde el material generalmente es de composición andesítica (Bachtell-Clarke *et al.*, 2015; Siebert *et al.*, 2015).



Figura 2. Cono activo construido al interior de los remanentes de los edificios volcánicos del CVG que forman un anfiteatro abierto hacia el occidente (W). Obsérvese las lavas emitidas desde el cráter principal en la erupción de 1866. Vista aérea desde el occidente (W).

Los remanentes de los edificios volcánicos, que son denominados CVG (4276 m.s.n.m.), son la evidencia de la actividad volcánica en la región. Estos edificios han colapsado sucesivamente hacia el sector occidental (W), formando una morfología de anfiteatro (en forma herradura), abierto en esa dirección. El volcán Galeras (4150 m.s.n.m.) es el edificio más reciente del complejo. Corresponde a un cono activo de 300 m de altura máxima, que se encuentra ubicado al interior del anfiteatro de 1,3 km de diámetro; presenta pendientes casi verticales al occidente (W) y al nororiente (NE) y tiene un cráter de 320 m de diámetro, cuya morfología y profundidad ha variado, de acuerdo a la actividad eruptiva, desde su reactivación (Ordoñez & Cepeda, 1997; <https://www.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras>). Este cono presenta varios cráteres secundarios y campos fumarólicos, por los cuales, en la actualidad, se presenta emisión de gases volcánicos y vapor de agua. Desde el borde del anfiteatro al cráter del volcán hay una distancia promedio de 700 m y una diferencia de altura de aproximadamente 120 m. Solamente las poblaciones ubicadas al occidente (W) del CVG tienen visibilidad directa al cono activo del Galeras, mientras que las demás poblaciones alrededor, entre las que encuentra la ciudad de San Juan de Pasto, observan los flancos externos del anfiteatro correspondiente a los edificios antiguos.

2.1 REGISTRO GEOLÓGICO DEL VOLCAN GALERAS

Calvache (1990), mediante dataciones y correlación estratigráfica, define para el estadio Galeras seis “miembros” que corresponden a “unidades eruptivas” (UE, denominación que se emplea en esta actualización). En las UE, los depósitos más comunes son los de Corrientes de Densidad Piroclástica (CDP), tanto concentrados como diluidos, que corresponden a flujos: de bloques y ceniza (por destrucción de domos), de escoria, de ceniza (asociados a depósitos hidrotermalizados) y oleadas piroclásticas; igualmente se encuentran depósitos de caídas piroclásticas (de ceniza y *lapilli*) y proyectiles balísticos (Calvache & Williams, 1992; Calvache & Williams, 1997b; Banks *et al.*, 1997), evidenciando el carácter explosivo de la actividad del volcán a lo largo de su historia geológica, la cual ha sido definida por los diferentes autores, principalmente, como de tipo vulcaniana.

Algunas de estas UE incluyen flujos de lava de composición andesítica y andesítica-basáltica, las cuales fueron emitidas a través del cráter principal, como se observa en la Figura 2, o a través de fisuras en el flanco nor-nororiental (NNE) del CVG. Igualmente, se encuentran depósitos de *lahares*, posiblemente generados por transformación de las CDP, al incorporar agua o por removilización de material volcánico durante y después de fases eruptivas. Las UE del estadio Galeras se designan como 4500, 4000,

2900, 2300, 1100 (de acuerdo a su edad aproximada, en años antes del presente) y 1866 (año en la era común). La Figura 3 muestra las UE y un ejemplo de los depósitos generados por la actividad del volcán. En los 5000 años de la evolución del volcán Galeras, se estima que ha depositado un volumen de 0,7 km³ de material (volumen pequeño comparado al emitido en los otros estadios del CVG). La “capa biotítica” entre las UE 4500 y 4000 corresponde a depósitos de caída de ceniza generados por actividad eruptiva de otros volcanes al sur del CVG.

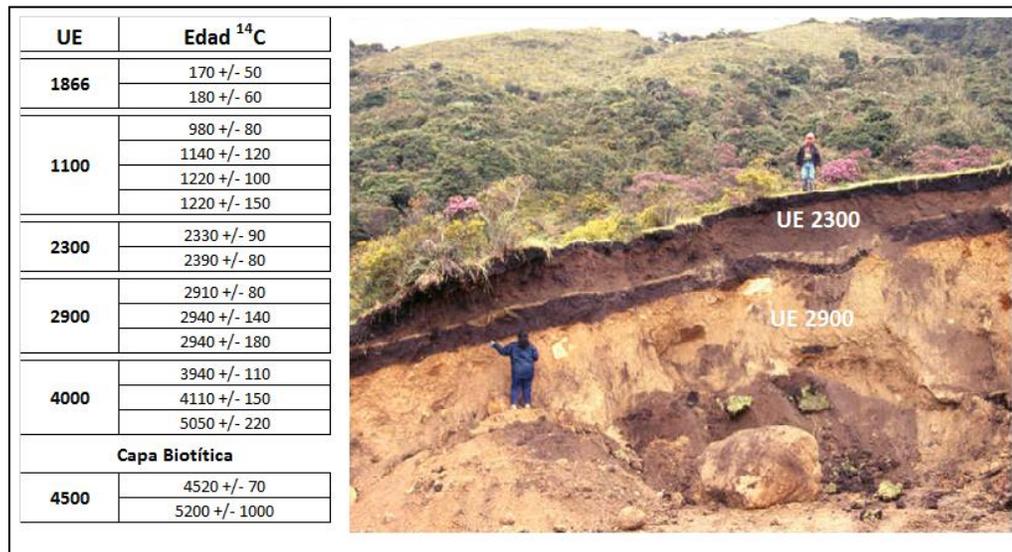


Figura 3. Unidades Eruptivas (UE) del volcán Galeras.

A. UE del estadio Galeras y sus edades basadas en análisis de ¹⁴C (expresadas en años antes del presente). Modificado de Calvache (1990). **B.** Afloramiento de CDP sobre la vía hacia la cima volcánica, cerca a la cabaña de control del SFFG. El depósito inferior corresponde a la UE 2900 y el depósito gris superior corresponde a la UE 2300.

Los depósitos que componen las UE reconocidas en el volcán Galeras son similares entre sí. La fase inicial de cada una de ellas está generalmente representada por depósitos de líticos hidrotermalizados (indicando la limpieza del conducto) y por depósitos de flujos de ceniza asociados que, al igual que las oleadas, presentan la mayor distribución en el área, debido a que, al corresponder a CDP más diluidas, tienden a cubrir la morfología existente, rebasando barreras topográficas. Los depósitos de las CDP más concentrados, como los de flujos de escoria y los de bloques y ceniza, tienen una distribución más restringida hacia las partes altas de los flancos del CVG y los valles de los ríos y quebradas. La ubicación del cono actual dentro del anfiteatro permite que la distribución preferencial de las CDP sea hacia la cuenca del río Azufral; sin embargo, la actividad del volcán no ha permitido realizar estudios más detallados en la cuenca de este río.

2.2 REGISTRO HISTÓRICO DE ERUPCIONES DEL VOLCÁN GALERAS

El volcán Galeras es considerado como el volcán más activo de Colombia, presentando el mayor registro de actividad eruptiva ocurrida en tiempos históricos, la cual es reportada o recopilada por diversos naturalistas, cronistas e historiadores. Esta información es recopilada y complementada más recientemente en los trabajos de Cepeda (1995), Espinosa (1988, 2001, 2012a y 2012b) y Torres & Gómez (en preparación), quienes adicionalmente hacen interpretaciones, a partir de los datos consignados sobre la actividad eruptiva del volcán.

La primera mención sobre el volcán Galeras es consignada por el cronista Cieza de León (1922 -primera edición en 1553-), quien al pasar por Pasto hacia el sur, en 1547, hace referencia, además de actividad fumarólica, a actividad eruptiva en épocas prehispánicas: “...Más adelante está una sierra alta; en su cumbre hay un volcán, del cual algunas veces sale cantidad de humo, y en los tiempos pasados (según dicen los naturales) reventó una vez y echó de sí gran cantidad de piedras...”. Hallazgos arqueológicos realizados en cercanías al volcán, como el denominado pictógrafo de “El Higuieron”, en el cual se representa al volcán Galeras en épocas prehispánicas (Cabrera, 1966; Granda, 1983; Quijano, 2004; Santacruz, 2009), evidencian actividad volcánica en épocas prehispánicas (Figura 4).

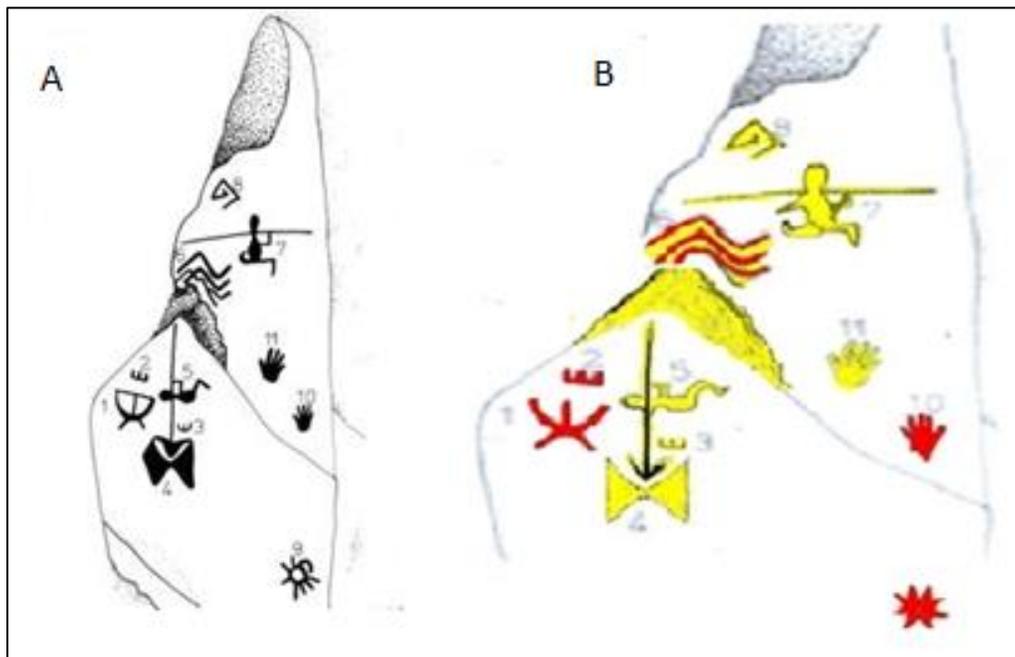


Figura 4. Pictógrafo de “El Higuieron”, corregimiento de Mapachico – Pasto.
A. Dibujo según Quijano (2004). B. Dibujo según Santacruz (2009).

Probablemente refiriéndose a la descripción hecha por Cieza de León, tanto Humboldt (1864), en 1801, como Stübel (1906, citando a Alcedo, 1786), indican posible actividad del volcán en épocas cercanas a la fundación de Pasto, interpretación que también hace Forero Duran (1933, en Espinosa 2001, 2012a y 2012b).

De acuerdo con los reportes históricos, hasta la fecha, se han presentado numerosos eventos eruptivos, incluyendo pequeñas emisiones de cenizas, que corresponde a actividad casi continua que persiste durante un tiempo prolongado, interrumpida por “períodos de reposo” cortos (los más largos entre 35 y 40 años, otros alrededor de 10 a 20 años, y los menores, entre meses y algunos pocos años). Esta actividad ha sido principalmente de carácter explosivo, aunque ha presentado fases con emisiones de lava. La persistencia en la actividad, durante tiempo prolongado, es bien documentada por varios autores, entre éstos Alcedo (1786), que refiriéndose a la ciudad de San Juan de Pasto anota: ***“...simada á la falda de un cerro, en cuya cumbre tiene un volcán que desde antes de la conquista vomitaba fuego y cenizas continuamente hasta el año de 1727, que desde entonces no se ha vuelto á ver señal alguna ...”***.

Por su parte, Humboldt (1864) en su visita a Pasto en 1801, además de referirse a la actividad persistente, describe el volcán y hace alusión a los efectos de una de sus erupciones sobre Pasto: ***“...Las bocas del volcán de Pasto están en un pequeño cono situado sobre la pendiente occidental de la gran montaña. En este cono muy bajo hay dos bocas que arrojan diariamente humo, y la mayoría de las noches llamas, verdaderas llamas y no un resplandor fosfórico. El volcán de Pasto es por consiguiente el volcán más activo de América...”***. Y agrega más adelante ***“...En Pasto se las vio [las llamas] por última vez, una noche, hacia 1760. La explosión del volcán fue tan fuerte que las piedras incandescentes eran lanzadas hasta la propia ciudad, donde comenzaron a quemarse los techos de paja. La distancia es mayor que 2 leguas de camino [aproximadamente 9 km]. Se recurrió a las procesiones. Cada 3 o 4 años son comunes las explosiones, con chorros de piedras y ceniza, visibles sólo del lado de Guáitara...”***.

Por la descripción de la erupción se deduce que ésta correspondió a una violenta explosión de tipo vulcaniano producto de la explosión de un domo en crecimiento (incandescencia descrita como “llamas”), dando lugar a, posiblemente ondas de choque (“*la explosión fue tan fuerte*”), bombas y bloques emitidos como proyectiles balísticos (“*piedras incandescentes*” y “*chorros de piedra y ceniza*”).

En otras descripciones se hace alusión más directa a efectos del fenómeno acompañante de onda de choque, asociada muy comúnmente a las explosiones de tipo vulcaniano, como lo indica el Hermano Anacleto (1925), para la erupción de noviembre

21 de 1925: ***“Una violenta conmoción que quiebra muchas vidrieras, abre puertas, rompe aldabas y candados; la velocidad de la tromba aérea desencadenada por la explosión debió ser muy grande...”*** y añade ***“...Las piedras arrojadas por el volcán fueron numerosas...Estas piedras, al caer, han producido enormes hoyos, algunos tienen 12 a 15 m de perímetro...”***. Es de anotar que 1925 ha sido, históricamente, el año donde se ha reportado el mayor número de eventos; en uno de ellos, se describe caída de ceniza gruesa y los efectos de ésta en la ciudad de Pasto, como es reportado por Ramírez (1975), refiriéndose a la erupción ocurrida el 31 de diciembre de 1925: ***“...Hace dos horas que cae sobre la ciudad una lluvia de arenilla candente que llena todas las casas y causa enormes molestias a toda la población...”***.

Las cenizas emitidas por el volcán Galeras en algunas de sus erupciones han tenido un alcance hasta de 170 km y han sido distribuidas en varias direcciones, como es indicado por Muñoz (1869): ***“...Por lo general, los males que han causado estas explosiones en la agricultura con sus cenizas, que muchas veces se extiende hasta Ibarra, Tumaco y Popayán...”***. Distancias similares y distribución en todas las direcciones también han ocurrido en las fases eruptivas más recientes (<https://www.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras>).

Otros tipos de fenómenos ocurridos en épocas históricas, muy importantes desde el punto de vista de las amenazas que ellos representan, han sido descritos y plasmados en dibujos y fotografías; Espinosa (2001) se refiere a un relato de Friedlaender ***“... Las últimas erupciones, año de 1866, fueron como su antecedentes, terribles invasiones de lavas pedregosas, consistentes principalmente en basaltos vidriosos... enorme torrente de lava hacia Consacá.”***. Adicionalmente, Torres & Gómez (en preparación) citan a Reiss, que en 1869 afirma: ***“...A comienzos de 1869, nuevas erupciones de cierta magnitud dejaron en claro el aumento de la actividad volcánica. Ya se pensaba en trasladar la población de Pasto para alejar el peligro...”***.

Evidencia de la generación de flujos piroclásticos en el volcán Galeras es tomada de la portada del No. 72 de la revista *Ilustración Nariñense* (1940), donde se observa el desplazamiento de una “nube” sobre la ladera norte (N) del CVG que es interpretada como un flujo piroclástico (Figura 5). De acuerdo con Espinosa (2001), en Genoy ***“se recordaba que se vieron caer grandes bloques de piedra envueltos en una nube de ceniza, rodar por las laderas y “perderse en la huecadas” ...”***.

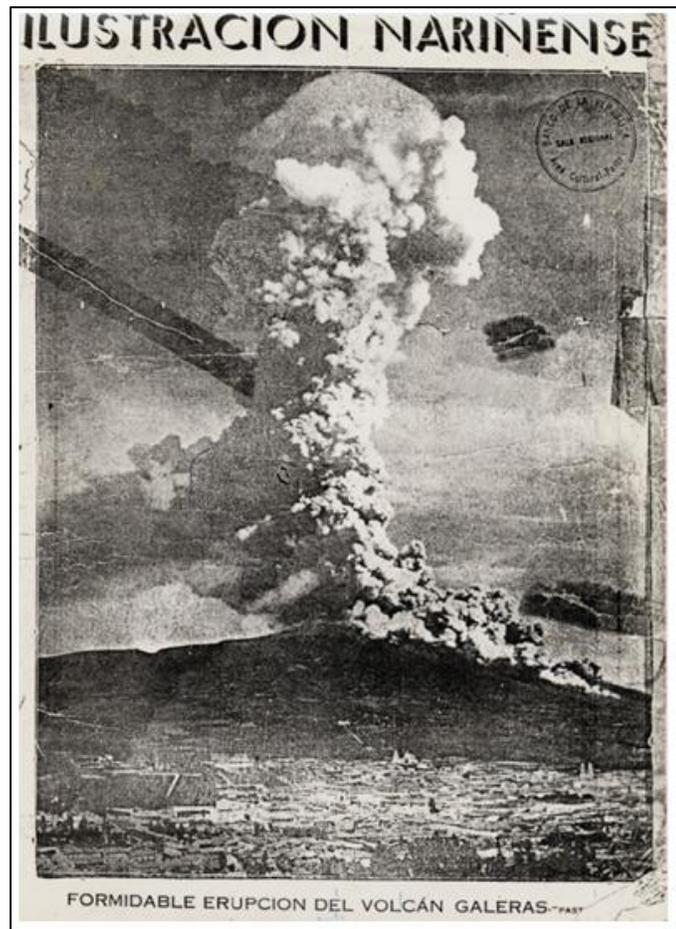


Figura 5. Portada de la revista Ilustración Nariñense, donde se aprecia la columna eruptiva y el flujo piroclástico generados en la erupción del 27 de agosto de 1936.

2.3 REGISTRO ACTUAL DE ERUPCIONES DEL VOLCÁN GALERAS

Desde principios de 1988, el volcán Galeras presentó signos de reactivación, como aumento en la actividad fumarólica (Monsalve & Mosquera, 1988), incremento paulatino en la sismicidad, emisiones menores de ceniza, incandescencia en el cráter principal (Cepeda *et al.*, 1989), que fue evolucionando hasta el comportamiento que ha dado paso a un “período eruptivo” que se mantiene hasta el presente, donde se han registrado 28 erupciones o fases eruptivas principales, numerosas emisiones menores de cenizas y emisiones continuas de gases, que generalmente pasan desapercibidas por la población, pero son registradas mediante la vigilancia continua del SGC. La Figura 6 muestra un resumen de las principales erupciones del volcán Galeras desde su reactivación y la incandescencia observada, en 1989, en el cráter secundario El Pinta.

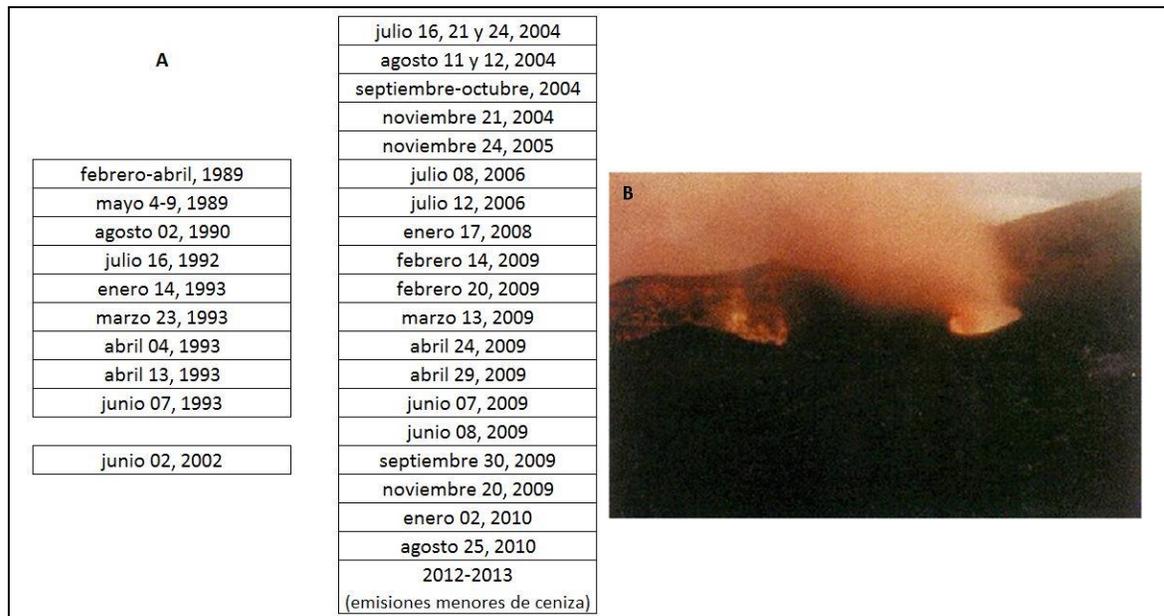


Figura 6. Actividad eruptiva del volcán Galeras desde 1988.

A. Resumen de la actividad eruptiva desde su reactivación en 1988. **B.** Muestras de incandescencia en el cráter secundario El Pinta, en 1989, como uno de los primeros indicios de la reactivación.

Esta actividad eruptiva, al igual que para la histórica en siglos pasados, se ha caracterizado por ser de tipo vulcaniana, presentando emplazamiento y explosión de domos de lava andesítica, que han generado columnas eruptivas con alturas desde cientos de metros hasta un máximo de 12 km (Cortés & Calvache, 1993; Cortés & Raigosa, 1994; Cortés & Raigosa, 1997 e informes técnicos del OVSPasto, en <https://www.sgc.gov.co/Publicaciones/Paginas/informes-tecnicos.aspx>); el material emitido de ceniza y *lapilli* contenido en ellas se ha dispersado de acuerdo a la dirección del viento en el momento de la erupción; se tienen reportes de material piroclástico distribuido hasta una distancia de aproximadamente 200 km, afectando a diferentes poblaciones del departamento de Nariño. Algunas erupciones han emitido bombas y bloques (proyectiles balísticos), con diámetros de orden métrico a centimétrico, que han ocasionado incendios en la cobertura vegetal existente en las laderas del CVG. Generalmente, las explosiones han estado acompañadas por fenómeno de ondas de choque, las cuales son percibidas en varias poblaciones de la zona de influencia del volcán. La investigación sobre la información arrojada por la vigilancia permanente del OVSP ha permitido caracterizar el proceso que da lugar a las erupciones de tipo vulcaniano en el volcán Galeras (Torres, *et al.*, en preparación).

Depósitos de estas erupciones, se conservan solamente en la parte alta, ya que la mayoría del material, especialmente ceniza, ha sido afectado por erosión y su registro no se preserva. Adicionalmente, asociado a la actividad eruptiva, se han presentado pequeños flujos de lodo o *lahares*, como el ocurrido en octubre de 2004, el cual fue atribuido a la removilización posterior del material depositado en la parte alta de la cuenca, que inundó el cauce del río Azufral y alcanzó distancias mayores a 9 km, (Pulgarín, 2005).

En los casi 30 años de actividad del volcán, desde su reactivación en 1988, el periodo comprendido entre 1994 y 2002 (ocho años), constituye el lapso de tiempo más prolongado donde se ha presentado una disminución en la actividad superficial (emisiones de ceniza o gases). Sin embargo, la vigilancia continuó registrando actividad volcánica, reflejada en episodios sísmicos como, por ejemplo, el de marzo-abril de 1995, con la ocurrencia de eventos sentidos en la zona de influencia de Galeras, asociados a fracturamiento de material cortical al interior del sistema volcánico.

3. AMENAZA VOLCÁNICA

El concepto de amenaza, de acuerdo a la ley 1523 de 2012, es: *“El peligro latente de que un evento físico de origen natural [en este caso, volcánico] [...] se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.”* (Congreso de Colombia, 2012).

El Galeras es un volcán con comportamiento predominantemente explosivo, caracterizado por presentar actividad eruptiva intermitente durante un tiempo prolongado (meses a años).

La evaluación de la amenaza por actividad del volcán asume que erupciones futuras serían similares a las del registro geológico de los últimos 5000 años, correspondiente al estadio Galeras, y considera que el centro o foco de emisión principal es el cráter del cono activo (incluyendo cráteres secundarios), además de zonas de debilidad donde podrían ocurrir erupciones de lavas de flanco, tal como se ha presentado en la historia eruptiva. Para llegar a la actualización del mapa se evaluaron las amenazas por cada uno de los fenómenos volcánicos que pueden generarse por actividad eruptiva del volcán Galeras y se llevaron a cabo las simulaciones de los principales fenómenos eruptivos (SGC, en preparación).

3.1 AMENAZA POR CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA (FLUJOS PIROCLÁSTICOS Y OLEADAS PIROCLÁSTICAS)

Las CDP (concentradas a diluidas) 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. Las CDP con mayor densidad y concentración de partículas y fragmentos sólidos (flujos piroclásticos) tienden a encausarse por los valles de los ríos; se originan principalmente a partir del colapso gravitacional de columnas eruptivas y por colapso o explosión de domos. Las oleadas piroclásticas (CDP diluidas) son más turbulentas, poseen una menor densidad (mayor contenido de gases) y presentan una mayor distribución, desplazándose en los valles y sobrepasando incluso altos topográficos (Dufek, *et al.*, 2015; Cole *et al.*, 2015; Brown & Andrews, 2015). Los flujos piroclásticos pueden ser de varios tipos y a ellos generalmente se encuentran asociadas oleadas piroclásticas, las cuales también pueden ser generadas independientemente.

Históricamente, las CDP (así como los *lahares*) son la amenaza volcánica que ha causado mayor número de pérdidas de vida en el mundo (Blong 1984; Tilling & Punongbayan, 1993; Baxter, 1990; Self, 2006). Las oleadas y flujos piroclásticos son muy destructivos debido a su alta temperatura, velocidad y gran movilidad. Algunos de sus efectos incluyen asfixia, quemaduras, enterramiento e incineración, así como la destrucción parcial o total de edificaciones a causa de su velocidad de emplazamiento, e incendios en zonas agrícolas y boscosas (Baxter, 1990; Baxter *et al.*, 1998).

Las CDP son los productos predominantes de la actividad del volcán Galeras, sus depósitos se encuentran en las UE que constituyen el registro geológico del volcán. 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 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.

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 la presente actualización, adicionalmente, se realizaron simulaciones para flujos de escoria (CDP concentradas) usando la herramienta computacional TITAN2D y se tuvo en cuenta los resultados de simulaciones para flujos de bloques y ceniza realizados por García (2010).

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 7, presenta la zonificación para CDP en esta actualización.

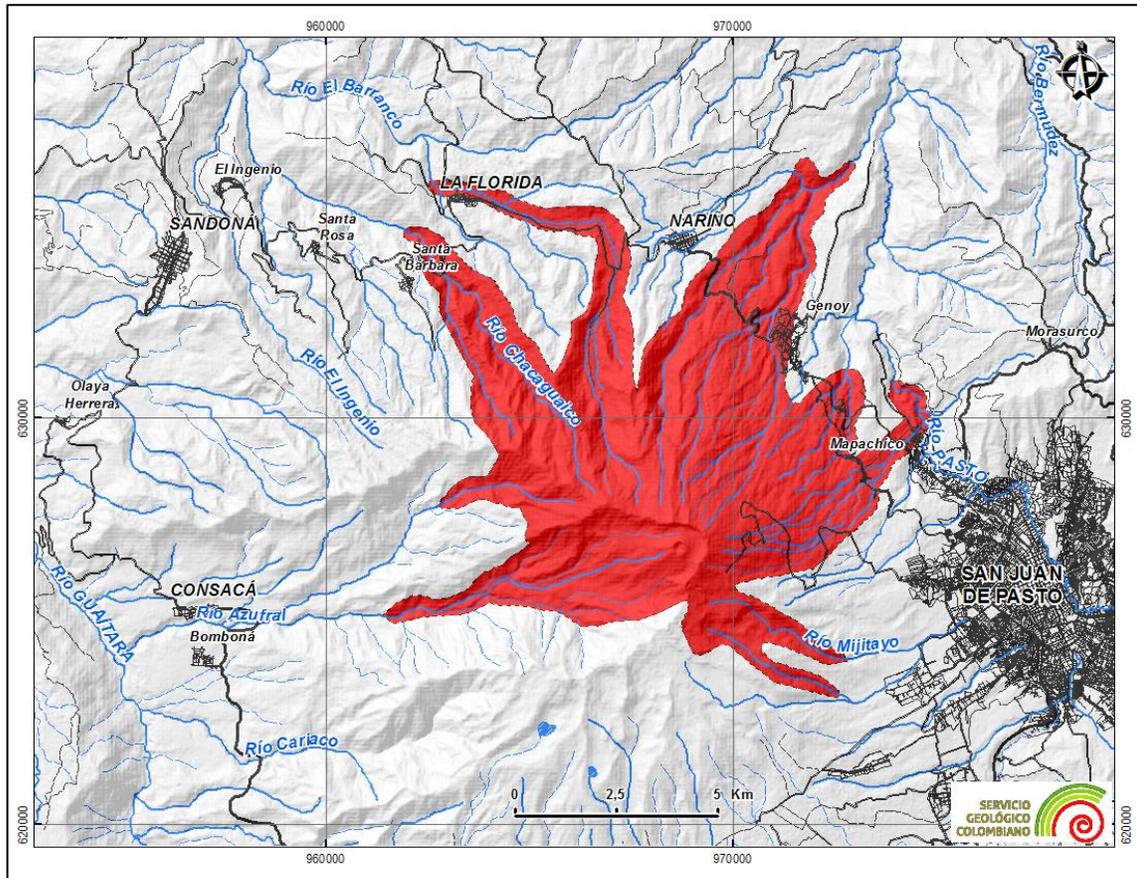


Figura 7. Zona que podría ser afectada por CDP (flujos y oleadas piroclásticas) generadas en erupciones del volcán Galeras.

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 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.

Para los flujos de escoria (CDP concentradas) se consideró en la evaluación de la amenaza las simulaciones computacionales efectuadas con el código TITAN2D (Patra *et al.*, 2005), empleando como parámetros de entrada una altura de colapso de columna eruptiva de 200 metros, un ángulo de fricción basal de 13 grados y volúmenes entre 10 y 24 millones de m³, distribuidos en cuatro pilas localizadas alrededor del cono activo.

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.

García (2010) muestra los resultados de simulaciones para flujos de bloques y ceniza (CDP concentrados) generados por colapso de columna vulcaniana, por explosión de domos desde el cono activo. Considerando que los volúmenes máximos de material emitido por la explosión de domos, durante la última fase de reactivación (de 2 a 3,5 millones de m³), no han generado flujos piroclásticos, se tuvo en cuenta, para la evaluación de la amenaza por este tipo de fenómeno, los volúmenes de 500.000 m³ y 2 millones de m³ propuestos por García (2010) y García *et al.* (2011), que podrían presentarse en caso de que el volumen de los domos a generarse en un futuro sea mayor y, por lo tanto, el del material emitido. Los resultados de las simulaciones muestran que la distribución se restringe principalmente al interior del anfiteatro; 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.

3.2 AMENAZA POR 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 hasta 64 mm (ceniza y *lapilli*); los mayores a este tamaño 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. 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 UE, se encuentran localmente depósitos de caída piroclástica, sin embargo, 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.

3.2.1 Amenaza 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 cubriendo áreas 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.

Las caídas de piroclastos pueden causar: oscurecimiento del ambiente, afectación a la salud humana y animal: afecciones respiratorias, irritación de los ojos, 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 (<http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>; Self, 2006; USGS, 2015a).

Las caídas de ceniza y *lapilli* representan la amenaza más común en el volcán Galeras, pudiendo ocurrir como único fenómeno eruptivo o acompañando otro tipo de fenómenos.

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 8A). Complementariamente, se llevaron a cabo simulaciones computacionales con la herramienta *Tephra2* (Bonadonna *et al.*, 2005), que emplea como parámetros de entrada principales: información de velocidad y dirección del viento en la zona (para este caso, se tomaron datos de modelos regionales, entre 1975 y 2014); masa de la erupción (equivalente a un volumen de 6 millones de m³), altura de la columna eruptiva (hasta de 12 km sobre el cráter), 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; y <https://www.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras>). Los resultados de las simulaciones muestran una dirección preferencial WSW (Figura 8B).

Para la zonificación final (Figura 9) se hizo una integración basada en el análisis de las áreas cubiertas por las isópacas (para espesores mayores a 0,5 mm) y las áreas, producto de las simulaciones, asociadas a los umbrales de espesores de depositación definidos por el SGC, para la zonificación de la amenaza. Esta integración permitió la zonificación de la amenaza en: **alta**, donde la acumulación de material por encima a 10 cm causaría efectos mayores; **media**, con acumulaciones entre 10 cm y 1 cm; y **baja**, con acumulaciones entre 1 cm y 0,5 mm. Adicionalmente, se trazan tres círculos con origen en el cráter del volcán, delimitando las zonas de amenaza alta, media y baja, que incluyen las áreas que no se encuentran en la dirección preferencial de los vientos, pero que pueden verse afectadas, por caída de piroclastos, en caso de ocurrir la erupción en otra época del año o en un día u hora específica donde la dirección del viento sea diferente a la preferencial. Igualmente, columnas eruptivas que alcancen alturas diferentes a la tomada como referencia pueden dispersarse en otras direcciones.

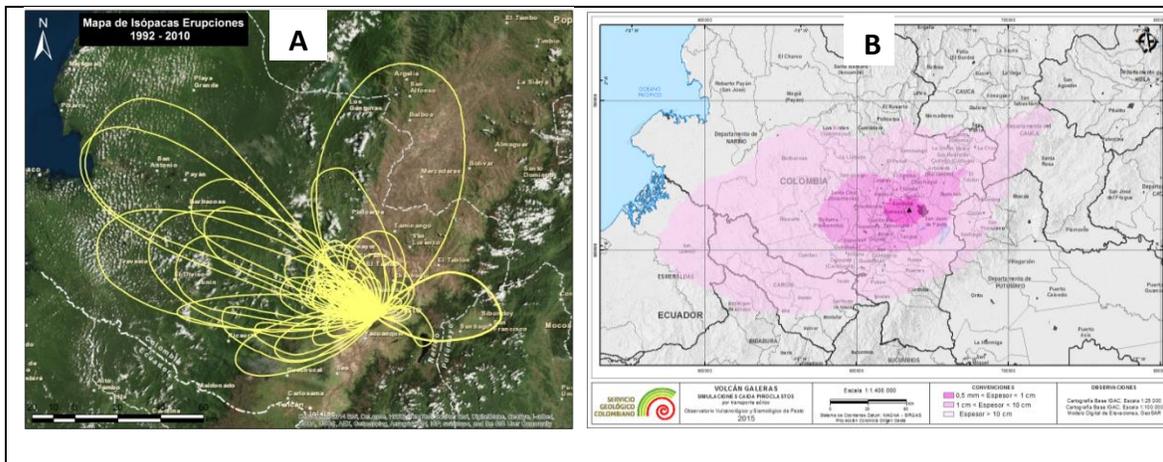


Figura 8. Insumos para la zonificación de la amenaza por caída de ceniza y *lapilli* en el volcán Galeras. **A.** Integración de los mapas de isópacas (1992 a 2010), reflejando la distribución de los piroclastos de caída en diferentes direcciones, debido principalmente a la variación en altura de columnas eruptivas y en la dirección del viento. **B.** Resultado de las simulaciones computacionales.

En la zona de amenaza alta, en la dirección preferencial de los vientos, se encuentran las partes altas del volcán y las veredas Churupamba y San José en el municipio de

Consacá. En la zona de amenaza media se ubican, además de las zonas rurales, centros poblados como Genoy, Nariño, La Florida, Santa Bárbara, Sandoná, Ancuya, Linares, Providencia, Consacá, Bomboná, Yacuanquer y el corregimiento de Mapachico, entre otros. En la zona designada como amenaza baja, en el departamento de Nariño, se encuentran los centros poblados y zonas rurales de Pasto, Buesaco, Chachagüí, El Tambo, El Peñol, Cumbitara, Los Andes, La Llanada, Samaniego, Barbacoas, Guachavez, Ricaurte, Mallama, Cumbal, Guachucal, Aldana, Sapuyes, Ospina, Túquerres, Imués, Tangua y Funes; y en el departamento del Putumayo, las áreas rurales y centros poblados de Sibundoy, Santiago, Colón y San Francisco, entre otros.

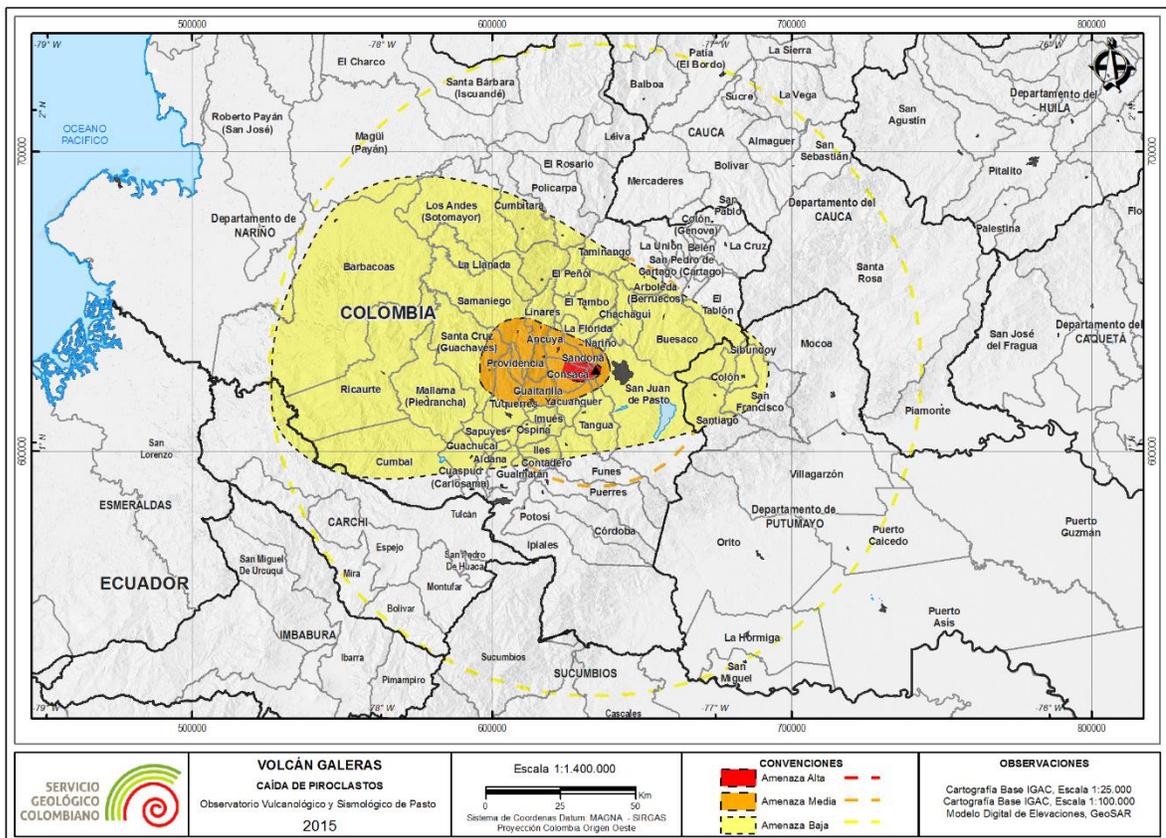


Figura 9. Zonificación de la amenaza por piroclastos de caída transportados eólicamente.

Para la dirección predominante de los vientos se emplean colores sólidos, mientras que con círculos en línea punteada se delimitan las zonas de amenaza que contemplan, adicionalmente, áreas que no se encuentran en la dirección preferencial de los vientos.

En las direcciones de vientos diferentes a la predominante, la zona de amenaza alta incluye zonas rurales y áreas pobladas como San Juan de Pasto, Obonuco, Mapachico, Genoy, Nariño, La Florida y Santa Bárbara; en amenaza media estarían Buesaco,

Chachagüí, La Florida, El Tambo, El Peñol, Linares, Túquerres, Imues, Ospina, Iles, Funes y Tangua. Mientras que en amenaza baja comprende centros poblados como Orito, La Hormiga y Mocoa (Putumayo); El Tablón, La Cruz, San Pablo, Policarpa, Iscuandé, Ipiales, Puerres (Nariño); Mercaderes, Bolívar, Almaguer, San Sebastián, El Bordo (Cauca); y zonas rurales y centros poblados del norte de la República del Ecuador, principalmente de las provincias de El Carchi y Sucumbíos, entre otros.

En el caso de presentarse un incremento en la actividad del volcán, la herramienta de simulación *Ash3D* (Schwaiger *et al.*, 2012) permite hacer simulaciones en tiempo real, con resultados de direcciones de dispersión y áreas y espesores de depositación. Esta herramienta estará próximamente disponible en la página web del Servicio Geológico Colombiano (<http://www.sgc.gov.co>).

3.2.2 Amenaza 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.

Los efectos causados por los piroclastos emitidos balísticamente varían de acuerdo a su tamaño y a la fuerza del impacto; pueden provocar muerte a personas o animales, causar daños a infraestructuras e incendios; así mismo, las explosiones generadas por este tipo de fenómeno, producidas por la descompresión del sistema, ocasionan adicionalmente efectos de ondas de choque.

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, el cual se confunde entremezcla con material de este tipo emitido en las erupciones históricas.

La zonificación de la amenaza por proyección balística de bloques y bombas volcánicas para Galeras fue realizada con la herramienta computacional *Eject!*, versión 1.4 (Mastin, 2001). 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 <https://www.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras>); adicionalmente, se emplearon datos de velocidades de bloques medidos experimentalmente en otros volcanes, para erupciones vulcanianas (SGC, en preparación).

La Figura 10 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.

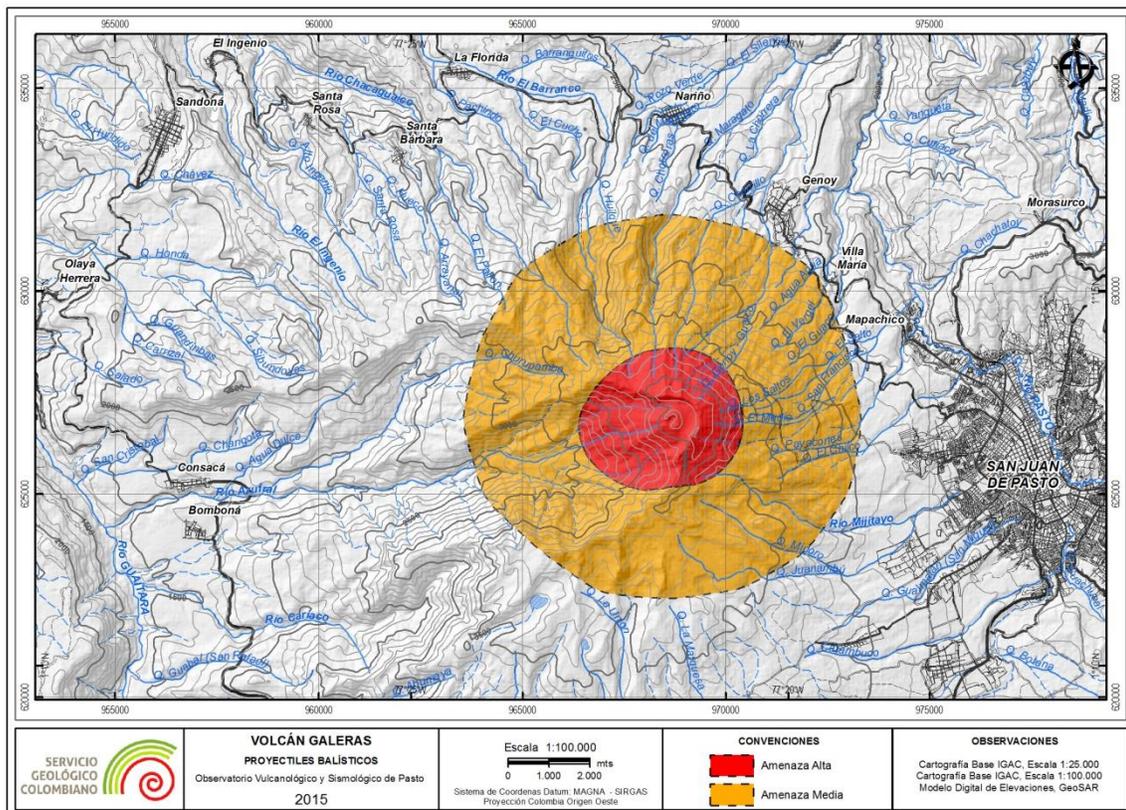


Figura 10. Zonificación de la amenaza por proyectiles balísticos.

3.3 AMENAZA POR 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.

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.

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).

El resultado de estas simulaciones delimita las tres zonas de amenaza que se muestran en la Figura 11. 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.

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

(sobrepasando el cañón del río Guaitara), afectando, entre otras, áreas rurales y las poblaciones de Consacá, Bomboná y Olaya Herrera.

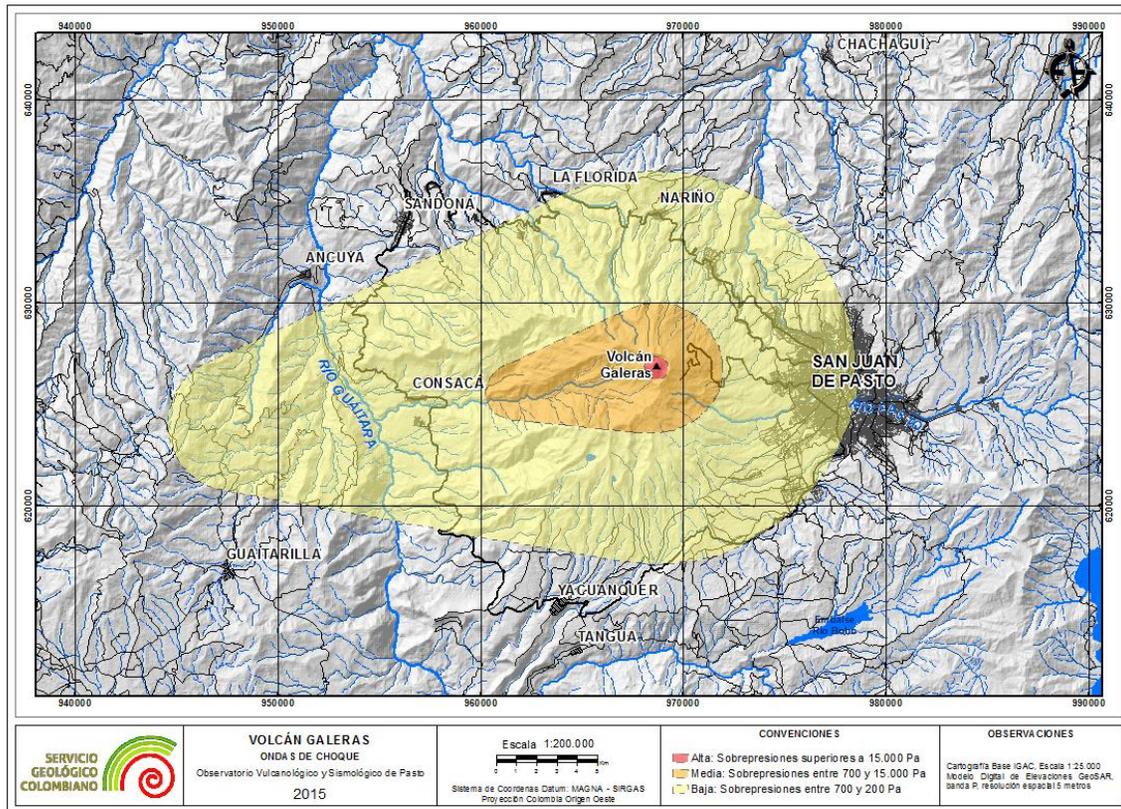


Figura 11. Zonificación para ondas de choque producidas por explosiones en el volcán Galeras, tomado de Córdoba y Del Risco (1998).

3.4 AMENAZA POR FLUJOS DE LAVA

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida que se transportan a lo largo de los valles de ríos y quebradas que nacen en los volcanes, destruyendo todo a su paso, dando lugar a enterramiento y quemaduras, entre otros efectos. Cuando presentan una alta viscosidad, alcanzan cortas distancias desde su fuente y se mueven lentamente, permitiendo que las personas se alejen de su paso (USGS, 2015b).

En Galeras, el registro geológico de los depósitos de flujos de lava indica actividad eruptiva desde el cráter central, distribuyéndose hacia el occidente (W) del cono actual, en la parte alta del río Azufral; actividad de tipo fisural se localiza, adicionalmente, en el

flanco nororiental (NE) del edificio antiguo (CVG), por la quebrada El Guaico y entre las quebradas San Francisco y El Chilco. Por su composición, todas las lavas asociadas al Galeras se caracterizan por ser de viscosidad media-baja a media (Calvache, 1990).

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. Para la selección de los parámetros de entrada para las simulaciones, se reinterpretaron las áreas cubiertas por aquellas emitidas en la actividad de 1866 y las lavas de flanco, mediante imagen de radar, mientras que el espesor e información de composición se tomaron de los datos consignados en Calvache (1990). Con estos datos se determinó un volumen de 50 millones de m³, para lavas emitidas desde el cráter central, simuladas a partir de posibles puntos de emisión, en y alrededor del cono volcánico. Adicionalmente, se estimó un volumen de 3 millones de m³ para las lavas de flanco, que fueron simuladas en un área definida a partir de posibles puntos de emisión en el sector noreste del volcán, donde debido a sus características geológico-estructurales, podría llegar a presentarse este tipo de fenómeno. Los volúmenes simulados se distribuyeron a partir de pulsos de 25.000 m³. La Figura 12, muestra las zonas que pueden ser afectadas por flujos de lava, como resultado de las simulaciones efectuadas. Debido a alta peligrosidad de este tipo de flujos, sólo se considera amenaza alta por este fenómeno.

El área que podría ser afectada por flujos de lava incluye las partes altas del volcán en la cuenca del río Azufral, hasta una distancia de aproximadamente 7,5 km, para flujos de lava emitidos desde el cráter central, sin afectar zonas pobladas. Hacia el sector nororiental (NE) del CVG, los flujos de lava de flanco, emitidos desde los puntos escogidos para la simulación, podrían descender por la hondonada de la quebrada Genoy–Guaico, llegando cerca a la vía Circunvalar, a una distancia aproximada de 4 km; otros flujos podrían descender por las laderas y valles de las quebradas El Vergel, Los Saltos y San Francisco, avanzando, en promedio, 2,5 km.

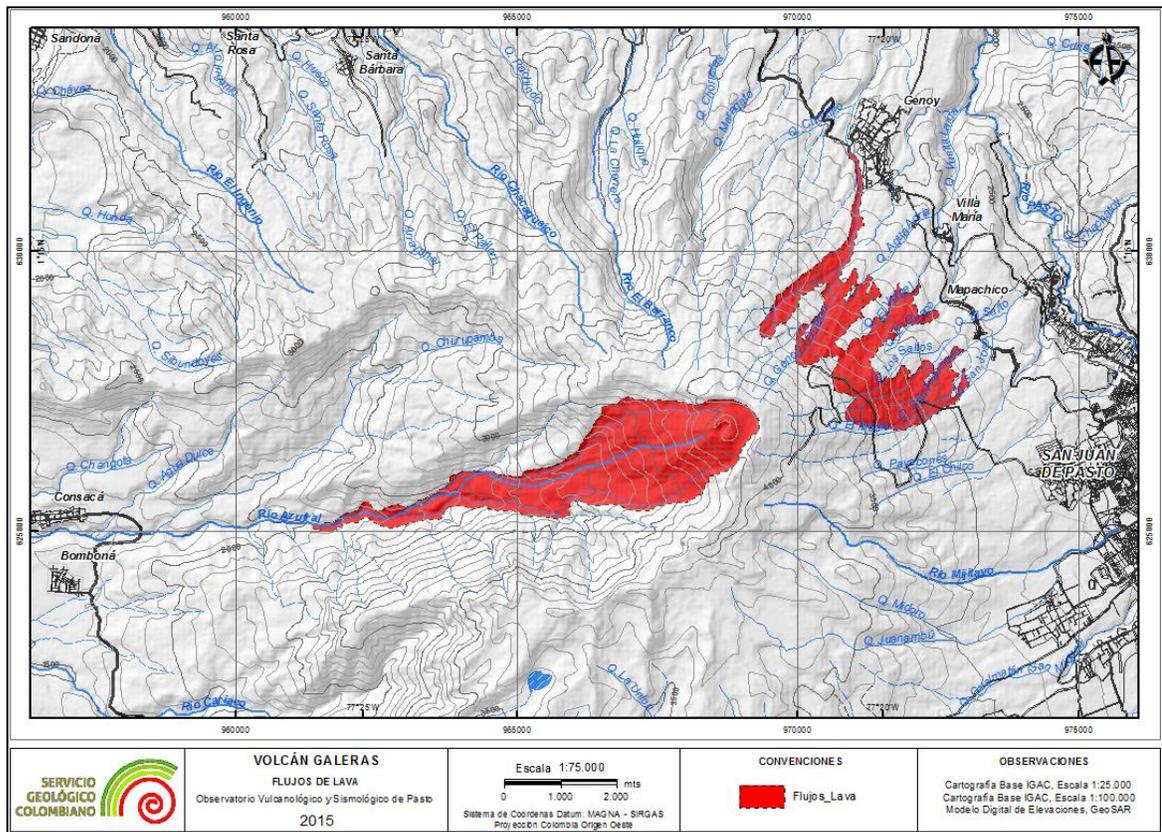


Figura 12. Zonas de amenaza alta por flujos de lava en el volcán Galeras.

3.5 AMENAZA POR FLUJOS DE LODO Y FLUJOS DE ESCOMBROS VOLCÁNICOS (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.

Los *lahares* constituyen la amenaza más común asociada a la actividad eruptiva de los volcanes (Blong, 1984) y pueden causar: arrasamiento y destrucción de vegetación, de cultivos y de las estructuras existentes a lo largo de su trayectoria; relleno de cauces naturales y artificiales; inundación, enterramiento y aislamiento de grandes extensiones de terreno. Hacia las partes distales, dan lugar a crecientes e inundaciones. Debido a la alta peligrosidad de este tipo de flujos, sólo se considera amenaza alta por este fenómeno.

El volcán Galeras presenta depósitos de *lahares* en las UE 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 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.

La Figura 13 presenta la zonificación (amenaza alta), resultado de las simulaciones para un volumen hasta de 3 millones de m³, estimado a partir del registro geológico. En general, los *lahares* pueden recorrer distancias de más de 35 km, en el caso de que éstos alcancen los ríos Guáitara y Pasto. Hacia el sector occidental (W), se encausarían por los valles del río Azufra y de la quebrada Churupamba, afectando zonas rurales del municipio de Consacá y siguiendo por el río Guáitara. *Lahares* generados en los ríos y quebradas que nacen en el flanco norte (N) y nororiental (NE) del edificio del CVG, afectarían parcialmente las poblaciones de Genoy, La Florida y la vía Circunvalar hacia Sandoná.

Hacia el sector oriental (E) y suroriental (SE), los *lahares* descenderían por el río Mijitayo y la quebrada Midoro, alcanzando el casco urbano de la ciudad de San Juan Pasto, donde se conservaron áreas que, basadas en trabajos de campo, fueron delimitadas en la tercera versión del mapa de amenaza (INGEOMINAS, 1997), principalmente en aquellas zonas donde el río Mijitayo se encuentra canalizado.

4. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA

La zonificación de la amenaza es el resultado de la integración de las áreas que pueden ser afectadas por diferentes fenómenos volcánicos, las cuales fueron delimitadas, principalmente, a partir de la simulación computacional de los fenómenos volcánicos ocurridos en la historia eruptiva del volcán Galeras, considerando que las erupciones futuras sean similares a las del registro geológico de los últimos 5000 años y que el centro o foco de emisión principal de la actividad sea el cráter actual; adicionalmente, zonas de debilidad del sector noreste del CVG podrían ser focos de emisión de lavas de flanco.

El mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras presenta tres zonas designadas como amenaza alta, media y baja. Los límites entre estas zonas son transicionales, se representan con líneas punteadas y de ningún modo implican límites absolutos. Esta zonificación está basada en la potencialidad de los daños que causan los diferentes fenómenos volcánicos, considerando la posibilidad de que un área determinada pueda ser afectada por uno o varios de estos fenómenos simultáneamente.

4.1 ZONA DE AMENAZA ALTA

La zona de amenaza alta, representada en color rojo, corresponde a:

 Zona que sería potencialmente afectada por uno o varios de los siguientes fenómenos: flujos piroclásticos, flujos y domos de lava, caída de piroclastos y *lahares*, así como por ondas de choque, emisiones de gases y sismos volcánicos. Las áreas que podrían ser afectadas corresponden a las partes altas del volcán y los cauces de los ríos que nacen en él o en las laderas del CVG, como son los valles de los ríos Azufral, Chacaguaico, Barranco y Mijitayo; y las quebradas Pailón, La Chorrera, Huilque, Maragato, Chorrillo, Genoy–Guaico, Agua Agria, El Vergel, Los Saltos, San Francisco y Midoro; mientras que la caída de piroclastos emitidos balísticamente (bloques y bombas), podrían afectar la parte alta del volcán en un radio aproximado de 2 km respecto al cráter, con tamaños hasta del orden métrico.

 Zona que sería afectada principalmente por *lahares*, en las cuencas de los ríos antes mencionados; estos flujos en caso de alcanzar los ríos Guáitara y Pasto, podrían recorrer distancias de alrededor de 35 km; mientras que hacia el flanco suroriental (SE), descenderían por el río Mijitayo y la quebrada Midoro, atravesando la zona urbana del municipio de Pasto.

 Zona que sería afectada principalmente por caída de piroclastos transportados eólicamente (ceniza y *lapilli*), que podrían alcanzar hasta 11 km en la dirección predominante de los vientos, al oeste-noroeste (WNW) del volcán, con acumulaciones mayores a 10 cm, afectando algunas zonas rurales de los municipios de Pasto, Nariño, La Florida, Sandoná, Consacá y Tangua. Esta zona también podría ser afectada por ondas de choque, emisión de gases y sismos volcánicos.

4.2 ZONA DE AMENAZA MEDIA

 Corresponde a la zona afectada principalmente por caída de piroclastos, con espesores de depósito entre 10 cm y 1 cm de ceniza y *lapilli*, según la tendencia predominante de los vientos en el área (para una columna hasta de 12 km de altura). Adicionalmente, se podría presentar caída de proyectiles balísticos de tamaño centimétrico, que afectarían un radio aproximado de 5 km alrededor del cráter, ondas de choque, emisión de gases y sismos volcánicos.

4.3 ZONA DE AMENAZA BAJA

 Corresponde a la zona de caída de piroclastos transportados eólicamente, con espesores de depósito entre 1 cm y 0,5 mm, según la tendencia predominante de los vientos en el área (para una columna hasta de 12 km de altura). Adicionalmente, esta zona también podría ser afectada por ondas de choque, emisión de gases y sismos volcánicos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente actualización del mapa de amenaza volcánica de Galeras fue elaborada en cumplimiento a la Sentencia T-269 del 2015 de la Corte Constitucional.

El volcán Galeras es un volcán activo que cuenta con un monitoreo permanente desde 1989, como respuesta a su reactivación en 1988. La evaluación de la amenaza para este volcán, conducente a la elaboración de sus mapas de amenaza, tanto las versiones anteriores como la presente actualización, se basan en el conocimiento de su geología y de la actividad histórica y reciente.

De acuerdo con el conocimiento actual de su comportamiento eruptivo, la actividad del volcán podría extenderse por varios años, presentándose fases eruptivas de corta a mediana duración, seguidas por intervalos de reposo de algunos meses a años (tal como lo demuestra el registro histórico y reciente). El tipo de erupciones que podrían presentarse serían principalmente de carácter explosivo (incluyendo la formación y destrucción de domos), durante las cuales podrían generarse flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, caídas de ceniza, proyectiles balísticos, *lahares* secundarios y fenómeno de ondas de choque.

Las erupciones magmáticas efusivas, con generación de flujos de lava, pueden intercalarse con la actividad explosiva, tal como ha ocurrido en su historia eruptiva.

Se considera el cráter actual como principal foco eruptivo. Adicionalmente, áreas de debilidad, dadas por zonas de falla que atraviesan el volcán, podrían constituirse en puntos de emisión de lava, tal como ha ocurrido en su registro geológico.

Las áreas que pueden ser afectadas por la mayoría de los fenómenos volcánicos fueron delimitadas, principalmente, mediante simulaciones computacionales, tomando como parámetros de entrada las características de los depósitos asociados a la actividad del volcán Galeras, descritos en trabajos geológicos existentes, y el análisis de la información sobre la actividad histórica y eruptiva reciente. Así mismo, los resultados de las simulaciones computacionales son analizados y validados de acuerdo al conocimiento geológico y geomorfológico de la zona de estudio.

Las zonas de amenaza alta, media y baja, mostradas en el mapa, son el resultado de la superposición de las áreas que pueden ser afectadas por los diferentes fenómenos volcánicos, teniendo en cuenta su daño potencial. Los límites entre las zonas de amenaza, designados con líneas discontinuas, son transicionales y, por lo tanto, no representan límites tajantes o absolutos entre una y otra zona de amenaza.

De acuerdo al procedimiento vigente del SGC para la evaluación de la amenaza, en la presente actualización, la zona de amenaza alta corresponde a aquellas áreas que, al ocurrir una erupción, pueden ser afectadas por uno o varios fenómenos y está delimitada, hacia los flancos del CVG, por el mayor alcance de las CDP diluidas. Este límite corresponde al previamente definido en la tercera versión del mapa de amenaza volcánica de Galeras. Adicionalmente, en la presente actualización se considera que, debido a la alta peligrosidad de fenómenos como CDP, flujos de lava y *lahares*, estos corresponden a amenaza “alta”; por lo cual, los valles de ríos y quebradas que pueden ser afectados por alguno de estos fenómenos se consideran dentro de amenaza alta, como ocurre en el caso de los *lahares* que pueden afectar las cuencas de los ríos Guátara y Pasto.

A diferencia de la tercera versión del mapa de amenaza volcánica de Galeras, en la presente actualización no se zonificó amenaza media por fenómenos de mayor magnitud a los que se encuentran en el registro geológico en los últimos 5000 años. El mapa de amenaza representa las erupciones que pueden ocurrir en un futuro, teniendo en cuenta la historia eruptiva del volcán. Si erupciones de mayor magnitud ocurrieran, el mapa de amenaza debe actualizarse.

Las zonas de amenaza media y baja se delimitan, principalmente, mediante el uso de herramientas computacionales, a partir del análisis de la información sobre actividad histórica y la obtenida después de su última reactivación, correspondiendo a áreas que podrían ser afectadas, principalmente, por piroclastos de caída.

Los piroclastos de caída (ceniza y *lapilli*) constituyen la amenaza más frecuente para las poblaciones alrededor del CVG. Erupciones futuras del volcán, en que se generen piroclastos de caída, cuando el régimen de vientos no sigue la tendencia predominante (oeste-noroeste), o en que las columnas eruptivas alcancen otras alturas, podrían afectar las áreas indicadas en el mapa de amenaza con círculos concéntricos al foco de emisión (representados con líneas discontinuas), cuyo radio depende del radio máximo de las zonas definidas por las tendencias principales del viento, que designan las zonas de amenaza alta, media y baja por este fenómeno.

Debido al desarrollo urbanístico de la ciudad de San Juan de Pasto, se recomienda realizar estudios más detallados sobre el comportamiento y el grado de afectación de los *lahares* que podrían alcanzar a la ciudad, utilizando herramientas de simulación computacional que contemplen parámetros físicos que describan mejor la dinámica de éste fenómeno en zonas urbanas.

Servicio Geológico Colombiano

De acuerdo a lo establecido en la Ley 1523 de 2012, la información contenida en esta actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras, se constituye en una herramienta aportada desde el área del conocimiento, para contribuir a la *gestión del riesgo de desastres*, entendida como el proceso social que integra un trabajo interinstitucional, con la participación de las comunidades, y se orienta a formular, ejecutar, hacer seguimiento y evaluar todo el tema estratégico, programático y de ejecución que permita un adecuado ordenamiento del territorio para la reducción del riesgo de desastres de sus comunidades, lo cual incluye temas de prevención, mitigación y respuesta.

Si bien los mapas de amenaza volcánica se constituyen en herramientas e insumos muy importantes en la gestión integral del riesgo, la planificación y el ordenamiento territorial, en zonas de influencia volcánica, deben obedecer al análisis y determinación de las condiciones de vulnerabilidad y riesgo volcánicos.

El presente mapa de amenaza volcánica debe ser modificado si se adquiere un mayor conocimiento acerca del volcán, sus procesos magmáticos y eruptivos; si hay cambios considerables en su morfología y topografía; si se detectan variaciones en su estilo eruptivo o su centro de emisión; o si se cuenta con modelos más adecuados para simular su comportamiento.

Se recomienda a autoridades y comunidades mantenerse continuamente informados acerca de la actividad del volcán, mediante la consulta a la información publicada por el SGC en la página web del Servicio Geológico Colombiano:

<http://www.sgc.gov.co>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcedo, A., 1786. Diccionario Geográfico-Histórico de Las Indias Occidentales ó América, Volumen 4. Madrid. 628 p.
- Anacleto, Hno., 1925. El Galeras en Actividad. Ilustración Nariñense, Serie 1, No 10. Diciembre de 1925. Pasto. P. 5-7.
- Bachtell-Clarke, A., Esposti-Ongaro, T. & Belousov A., 2015. *Vulcanian Eruptions*. Encyclopedia of volcanoes, second edition. Elsevier. P. 505-518.
- 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., Houghton, B. F., Connor, L., Byrne, M., Laing, A. & Hincks, T. 2005. *Probabilistic modeling of tephra dispersion: hazard assessment of a multi-phase eruption at Tarawera, New Zealand*. Journal of Geophysical Research, 110. 65 p.
- Blong, R. J., 1984. *Volcanic Hazards. A sourcebook on the Effect of Eruptions*. Academic Press Australia. North Ryde. P. 242.
- Baxter, P. J., 1990. *Medical effects of volcanic eruptions: 1. Main causes of death and injury*. Bulletin of Volcanology, 52: 532-544.
- Baxter, P. J., Neri, A. & Todesco, M., 1998. *Physical modelling and human survival in pyroclastic flows*. Natural Hazards, 17: 163-176.
- Brown, R. J. & Andrews, G. D. M., 2015. *Deposits of Pyroclastic Density Currents*. The Encyclopedia of Volcanoes, Second Edition. Elsevier Inc. USA. P. 631-648.
- Cabrera, W., 1966. Pictógrafos y petroglifos de Nariño. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vol. 12, No. 48 (jul. 1966). Bogotá. P. 391-399.
- Calvache, M. L., 1990. *Geology and Volcanology of the Recent Evolution of Galeras Volcano, Colombia*. M.S. Thesis, Louisiana State Univ., Baton Rouge, LA. 171 p.
- Calvache, M. L., 1995. *The geological evolution of Galeras volcanic complex*. PhD Thesis. Arizona State University. Tempe. 180 p.
- Calvache, M. L. & Williams, S. N., 1992. *Lithic-dominated pyroclastic flows at Galeras volcano, Colombia - An unrecognized volcanic hazard*. Geology, 20: 539-542.
- Calvache, M. L. & Williams S. N., 1997a. *Geochemistry and petrology of the Galeras Volcanic Complex, Colombia*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 77: 21-38.
- Calvache, M. L. & Williams S. N. 1997b. *Emplacement and petrological evolution of the andesitic dome of Galeras volcano, 1990- 1992*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 77: 57-69.
- Calvache, M. L., Cortés, G. P. & Williams, S. N., 1997. *Stratigraphy and chronology of the Galeras volcanic complex, Colombia*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 77: 5-19.
- Cepeda, H., 1985. *Anotaciones acerca de la geología del Volcán Galeras*. Memorias Congreso Latinoamericano de Geología, 6. Bogotá. P. 291-335.

Servicio Geológico Colombiano

- Cepeda, H., 1986. Investigaciones petrológicas en el ámbito de las planchas 429-Pasto y 410-La Unión, con especial énfasis en el Complejo Volcánico del Galeras. Informe interno. INGEOMINAS, Medellín. 105 p.
- Cepeda, H., 1989. Investigaciones petrológicas en el ámbito de las planchas 429 Pasto y 410 La Unión, con especial énfasis en el Complejo Volcánico del Galeras. Boletín Geológico INGEOMINAS, 30(I). Bogotá. P. 43-113.
- Cepeda, H., 1995. Interpretación de los relatos de erupciones históricas del Galeras. Informe interno. INGEOMINAS. 50 p.
- Cepeda, H., Acevedo, A. P., Gil, F., Pulgarín, B., Espinosa, A., Muñoz, F., Carvajal, C. A., Romero, J., 1989. La reactivación del volcán Galeras, Colombia, 1989. INGEOMINAS. Popayán. 27 p.
- Cieza de León, P., 1922 [primera edición: 1553]. La Crónica del Perú. Calpe. Madrid. 367 p.
- Congreso de Colombia, 2012. Ley 1523 del 24 de abril de 2012. República de Colombia – Gobierno Nacional. 29 p.
- Connor, L., Connor, C., Meliksetian, K. & I., Savov, 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. P. 1-19.
- 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>.
- Cole, P. D., Neri, A. & Baxter, P. J., 2015. *Hazards from pyroclastic density currents. The Encyclopedia of Volcanoes*, Second Edition. Elsevier Inc. USA. P: 943-956.
- Córdoba, G. & Del Risco, E., 1997. *Shock wave hazard map of Galeras volcano, Colombia*. Memorias de la Asamblea General del IAVCEI, 1997. Puerto Vallarta. P. 54.
- 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. 25 p.
- Cortés, G. P. & Calvache, M. L., 1993. Erupciones explosivas del Volcán Galeras-Colombia en el período julio 16 de 1992 - junio de 1993. Reporte interno. INGEOMINAS. Pasto. 55 p.
- Cortés, G. P. & Calvache M. L., 2002. Catálogo de las Unidades Litoestratigráficas de Colombia. Neógeno. Formación Los Pastos. INGEOMINAS, Bogotá, 41 p.
- Cortés, G. P., Raigosa, J., 1994. Aspectos relevantes de la actividad del volcán Galeras, Nariño - Colombia, febrero 1989, mayo de 1994. INGEOMINAS. Pasto. 12 p.
- Cortés, G. P. & Raigosa J., 1997. *A synthesis of the recent activity of Galeras volcano, Colombia: Seven years of continuous surveillance, 1989- 1995. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77: 101-114.
- Cortés, G. P., Monsalve, M. L., Calvache, M. L.; Laverde, C. A. & García, A. M., 2010. *Sequence of Vulcanian Eruptions of Galeras Volcano, Colombia: 2004 – 2010*. Póster presentado en Cities on Volcanoes 6th. Tenerife.
- Delgado G., H., 2002. *Lahares*. Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, UNAM. México, D.F. 3 p.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2011. Estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal total por área 1985-2020. Bogotá.

http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/Municipal_a_rea_1985-2020.xls

- Dufek, J., Esposti O., T. & Roche, O., 2015. *Pyroclastic Density Currents: Processes and Models. The Encyclopedia of Volcanoes*, Second Edition. Elsevier Inc. USA. P. 617-629.
- Espinosa, A., 1988. Actividad del Volcán Galeras en épocas históricas. INGEOMINAS. Popayán. 80 p.
- Espinosa, A., 2001. Erupciones históricas de los volcanes colombianos (1500 - 1995). Colección Jorge Álvarez Lleras, No 16. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Santa Fe de Bogotá. 291 p.
- Espinosa, A., 2012a. Erupciones históricas de los volcanes colombianos 1500 – 1995. Segunda Edición. Enciclopedia de Desastres Naturales Históricos de Colombia, Volumen 6. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad del Quindío. Bogotá. 453 p.
- Espinosa, A., 2012b. Documentos para la historia de los volcanes colombianos. Enciclopedia de Desastres Naturales Históricos de Colombia, Volumen 7. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad del Quindío. Bogotá. 165 p.
- García, 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. 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. Bogotá. P. 135-161.
- Gil, F., & Chouet, B., 1997. *Long-period events, the most characteristic seismicity accompanying the emplacement and extrusion of a lava dome in Galeras Volcano, Colombia, in 1991. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77:121-158.
- Gómez, D. M. & Torres, R. A., 1997. *Unusual low-frequency volcanic seismic events with slowly decaying coda waves observed at Galeras and other volcanoes. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77: 173 -193.
- Granda, P. O., 1983. Arte rupestre Quillacinga y Pasto. Ediciones Sindamanoy. Pasto. 35 p.
- Humboldt, A. V., 1864. *Cosmos: A sketch of a Physical Description of the Universe*. Vol I. London. 474 p.
- Hurtado, A. D. & Cortés, G. P., 1997. *Third version of the hazard map of Galeras Volcano, Colombia. Journal of Volcanology and Geothermal Research* 77: 89-100.
- INGEOMINAS, 1989a, Mapa preliminar Amenaza Volcánica Potencial del Galeras Primera Versión.
- INGEOMINAS, 1989b, Mapa preliminar Amenaza Volcánica Potencial del Galeras Segunda Versión. Pasto.
- INGEOMINAS, 1996. Investigación sobre la evolución y composición de los volcanes de Colombia: Galeras y volcanes del sur. Informe Ejecutivo. Pasto. 20 p.
- INGEOMINAS, 1997. Mapa de Amenaza Volcánica del Galeras (Tercera versión), Publicación Especial de INGEOMINAS. Bogotá. 38 p.

Servicio Geológico Colombiano

- Kover, T. P., 1995. *Application of a digital terrain model for the modeling of volcanic flows: a tool for volcanic hazard determination*. MSc Thesis, State University of New York at Buffalo. 62 p.
- 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(4560):637-640.
- Mastin, L. G., 2001. *A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions*. Open-File Report 01-45. U. S. Geological Survey. Vancouver, WA. 16 p.
- Monsalve, M. L. & Mosquera M., 1988. Observaciones sobre el estado actual de los volcanes Cumbal y Galeras (Nariño). Informe de comisión. INGEOMINAS. Popayán. 7 p.
- Muñoz, H., 1869. Carta a La Primavera. Ilustración Nariñense, No. 5. Pasto. 8 p.
- Murcia, A., 1982. El Vulcanismo Plio-Cuaternario de Colombia; depósitos piroclásticos asociados y mediciones isotópicas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, y ^{18}O en lava de los volcanes Galeras, Puracé y Nevado del Ruiz. Publ. Geol. Esp. INGEOMINAS, 10: 17 p.
- Murcia, A. & Cepeda, H., 1984. Memoria de la Plancha 429 - Pasto. INGEOMINAS. Popayán. 193 p.
- Murcia, A. & Cepeda, H., 1991. Mapa Geológico de Colombia, Plancha 419 – Pasto, Escala 1:100.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS. Bogotá. 18 p.
- Narváez, M. L., 2012. Modelo de fuentes de anomalías geomagnéticas de campo total asociadas al estado de la cámara magmática del Volcán Galeras. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 115 p.
- Narváez, L., Torres, R., Gómez, D., Cortés, P., Cepeda, H. & Stix, J. 1997. "Tornillo"- type seismic signals at Galeras volcano, Colombia, 1992-1993. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77: 159-171.
- Ordóñez M. & Cepeda H., 1997. *Morphological changes of the active cone of Galeras volcano, Colombia, during the last century*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77:71-87.
- Ortega, A., 2012. Modelo de fuentes de anomalías gravimétricas regional y locales del volcán Galeras, asociadas a su estado de actividad entre junio 2008 – abril de 2009. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 92 p.
- Park, M. M., Biggs J., Mather T. A., Pyle D. M., Amelung, F., Monsalve, M. L. & Narváez M., L., 2011. *Co-eruptive subsidence at Galeras identified during an InSAR survey of Colombian volcanoes (2006–2009)*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 202: 228-240.
- Patra, A., Bauer, A., Nichita, C., Pitman, E. B., Sheridan, M. F., Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Namikawa, L. & Renschler, C., 2005. *Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139:1-21.
- Parra, E. & Cepeda, H., 1990. *Volcanic hazard maps of the Nevado del Ruiz Volcano*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42. Amsterdam. P 117-127.
- Parques Nacionales Naturales (PPN), 2005. Plan de Manejo Santuario de Flora y Fauna Galeras. PNN. Pasto. 228 p.

Servicio Geológico Colombiano

- Pulgarín, B., 1993. Mapas preliminares de amenaza volcánica del volcán Galeras, Departamento de Nariño, Colombia. Memorias Taller Volcán Galeras. Pasto. 7 p.
- Pulgarín, B., 2005. Informe del apoyo en las labores de reconocimiento geológico del volcán Galeras en el período del 14 de octubre al 3 de noviembre de 2004. Informe interno. INGEOMINAS. Popayán. 39 p.
- Quijano V., A. J., 2004. El pictógrafo de “El Higuerón”: patrimonio cultural del municipio de Pasto (Colombia) en peligro de destrucción. Grupo de investigación Inti Rumi Institución Universitaria CESMAG. <http://www.rupestreweb.info/higueron.html>.
- Ramírez, J. E., 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda Edición, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. 250 p.
- Revista Ilustración Nariñense, 1940. Formidable Erupción del Volcán Galeras - Pasto. No. 72. Pasto. Foto de portada.
- Richardson, J. & Connor, L. J., 2014. Lava C Version 0.1. <https://vhub.org/resources/3597>.
- Santacruz, M. H., 2009. Como se poblaron los territorios Pasto. Madrid. 107 p.
- Self, S., 2006. *The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions*. Philosophical Transactions of the Royal Society, A364: 2073-2097.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC), en preparación. Informe de simulaciones computacionales de fenómenos volcánicos, insumo para la actualización del mapa de amenaza volcánica de Galeras - En cumplimiento a la Sentencia de la Corte Constitucional T-269 de 2015. Dirección de Geoamenazas, SGC.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2013. Procedimiento Evaluación Amenaza Volcánica. Versión 4. Bogotá. 7 p.
- 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. P. 5.
- Schilling, S. P., 1998. Laharz: *Gis programs for automated mapping of lahar inundations hazard zones*. Open-File Report 98-638. US Geological Survey. Vancouver, WA. 80 p.
- 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. Reston, VA. 78 p.
- Schwaiger, H. F., Denlinger, R. P. & Mastin L. G., 2012. *Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 117(B4). Washington, D.C. 20 p.
- Siebert, L., Cottrell, E., Venzke, E. & Andrews, B., 2015. *Earth's Volcanoes and Their Eruptions: An Overview*. Encyclopedia of volcanoes, second edition. Elsevier. P. 239-255.
- Stix, J., Torres C., R., Narváez M., L., Cortés, G. P., Raigosa, J., Gómez, D. M. & Castonguay, R., 1997. *A model of vulcanian eruptions at Galeras volcano, Colombia*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 77. P. 285-303.
- Stübel, A. 1906. *Die Vulkanberge von Colombia*. Editorial de Wilhelm Baensch. Dresden. 154 p.
- Tilling, R., & Punongbayan, R., 1993. Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos. Traducción Bernardo Beate. WOV. Menlo Park, CA. 125 p.

Servicio Geológico Colombiano

- Torres C., R., 2012. Modelo 3-D del volcán Galeras utilizando Tomografía Sísmica. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 135 p.
- Torres, R. A. & Gómez, D. M., en preparación. El Volcán Galeras. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto. SGC.
- Torres, C. R., Gómez M. D., Cadena O., 2015. Posibles señales sismo-volcánicas premonitorias de erupciones en el volcán Galeras. Informe interno. Servicio Geológico Colombiano. Pasto. 16 p.
- United States Geological Survey (USGS), 2015a. *Volcanic Ash Impacts & Mitigation*. https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/.
- United States Geological Survey (USGS), 2015b. *Lava flows destroy everything in their path*. http://volcanoes.usgs.gov/vhp/lava_flows.html.
- Vallance, J. W. & Iverson R. M., 2015. *Lahars and their deposits*. *The Encyclopedia of Volcanoes*, Second Edition. Elsevier Inc. USA. P. 649-664.

Páginas web referenciadas:

<http://www.sgc.gov.co>

www.vhub.org

<http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>