

**MEMORIA DEL MAPA DE AMENAZA VOLCÁNICA
DEL VOLCÁN SOTARÁ**

Popayán, Pasto y Bogotá, diciembre de 2019

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO ©

Oscar Paredes Zapata
Director General

Marta Lucía Calvache
Director Técnico de Geoamenazas

Mario Andrés Cuéllar
Director Técnico de Geociencias Básicas

Bernardo Alonso Pulgarín Alzate
Coordinador Grupo Geología de Volcanes

AUTORES

Bernardo Alonso Pulgarín Alzate
Indira Zuluaga Mazo
John Jainer Galarza Zambrano
Carlos José Muñoz Montoya
Carlos Andrés Laverde Castaño

Citación: Pulgarín, B., Zuluaga, I., Galarza, J. Muñoz, C. y Laverde, C. (2019). *Memoria del mapa de amenaza volcánica del volcán Sotará*. Popayán, Pasto y Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
1 GENERALIDADES Y ANTECEDENTES DEL VOLCÁN SOTARÁ	9
1.1 Estudios anteriores	12
2 GEOLOGÍA E HISTORIA DEL VOLCÁN SOTARÁ	16
2.1 Etapa I de desarrollo del volcán Sotará: actividad efusiva, emplazamiento-destrucción de domos	22
2.2 Etapa II de desarrollo del volcán Sotará: construcción y colapso gravitacional de un nuevo cono	26
2.3 Etapa III de desarrollo del volcán Sotará: emplazamiento –destrucción– emplazamiento de otros domos	27
2.3.1 Actividad eruptiva más reciente del volcán	31
2.4 Etapa de removilización de materiales en el volcán y caída de piroclastos	32
3 MONITOREO Y VIGILANCIA: ESTADO ACTUAL DEL VOLCÁN SOTARÁ	33
4 METODOLOGÍA	41
5 AMENAZA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN SOTARÁ	43
5.1 Amenaza por corrientes de densidad piroclástica (CDP) diluidas y concentradas (flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas)	44
5.2 Amenaza por <i>lahares</i>	47
5.3 Amenaza por flujos de lava y domos de lava	51
5.4 Amenaza por caídas piroclásticas	54
5.4.1 Amenaza por caídas piroclásticas transportadas por el viento	54
5.4.2 Amenaza por caídas piroclásticas debido a proyección balística	59
5.5 Amenaza por ondas de choque	62
5.6 Amenaza por avalanchas de escombros	65
5.7 Otras amenazas	67
6 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA	68
6.1 Zonificación de la amenaza volcánica. Mapa general	68
6.1.1 Zona de amenaza volcánica alta	69
6.1.2 Zona de amenaza volcánica media	70
6.1.3 Zona de amenaza volcánica baja	71

6.2	Zonificación de la amenaza volcánica por caídas de piroclastos transportados por el viento.	71
6.2.1	Zona de amenaza alta por caída de piroclastos transportados por el viento	72
6.2.2	Zona de amenaza media por caída de piroclastos transportados por el viento	72
6.2.3	Zona de amenaza baja por caída de piroclastos transportados por el viento	73
6.3	Zonificación de la amenaza volcánica por proyectiles balísticos	74
6.3.1	Zona de amenaza alta por proyectiles balísticos	74
6.3.2	Zona de amenaza media por proyectiles balísticos	74
6.4	Zonificación de la amenaza volcánica por ondas de choque	75
6.4.1	Zona de amenaza alta por ondas de choque	75
6.4.2	Zona de amenaza media por ondas de choque	75
6.4.3	Zona de amenaza baja por ondas de choque	75
	CONCLUSIONES	77
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

RESUMEN

El primer mapa de amenaza volcánica del volcán Sotará incluye las zonificaciones de acuerdo a la afectación por los eventos volcánicos identificados, señalando mediante polígonos el área donde han ocurrido estos fenómenos y dónde eventualmente pueden ocurrir. Para la delimitación de estas zonas se consideró la información del registro geológico de los productos volcánicos de la actividad más reciente del volcán, con apoyo en los resultados de simulaciones para cada fenómeno evaluado. Las simulaciones por sí solas, no representan un mapa de amenazas, pues sus resultados deben ser evaluados y ajustados a la luz de los registros geológicos junto con el estado actual del volcán, así como la formulación de escenarios eruptivos potenciales. Los límites entre estas zonas son indicativos y por tanto la escala de representación de estos mapas está condicionada a su carácter general orientada a los planificadores y tomadores de decisiones.

Las principales amenazas volcánicas asociadas al volcán Sotará incluyen emplazamiento y destrucción de domos (actividad vulcaniana), y los fenómenos que le acompañan como generación de corrientes de densidad piroclástica (concentradas y diluidas), formación de *lahares* primarios o post-eruptivos, flujos de lava, caídas piroclásticas, eventual colapso de flanco del edificio volcánico (avalanchas de escombros), gases y ondas de choque. Estudios de campo actualizados y nuevas dataciones de depósitos asociados a la actividad más reciente del volcán, permitieron establecer nuevas correlaciones estratigráficas y reunificar varias de las unidades eruptivas del registro volcánico. A partir de esta información se obtuvo los parámetros de entrada para procesos computacionales de simulación con varios programas y códigos disponibles para cada uno de estos fenómenos volcánicos. En el caso de las caídas piroclásticas, tanto las transportadas por el viento como los proyectiles balísticos, de las cuales el volcán Sotará no tiene un registro geológico claro, se tomó como referencia la información del volcán Nevado del Huila (Colombia) de su proceso erupción de 2007-2010. De forma similar se tomó como referencia el volcán Galeras para el fenómeno de onda de choque. El estado actual del volcán Sotará presenta manifestaciones de actividad superficial evidenciadas por la presencia de un campo fumarólico y un campo de aguas termales; con actividad sísmica baja a moderada y deformación leve dentro del edificio volcánico. La zonificación de amenaza volcánica del volcán Sotará mostrada en el mapa, presenta una categorización en áreas de amenaza alta, media y baja, cubriendo zonas que serían potencialmente afectadas por distintos fenómenos volcánicos ante una eventual erupción, considerando que el comportamiento futuro del volcán sería similar a su actividad pasada evidenciada en los últimos 10 000 años, y el centro de emisión sea la parte somital del cono actual, donde se encuentran emplazados actualmente los domos. Se siguen, además, los lineamientos de la metodología definida por el SGC.

ABSTRACT

The first Sotará volcanic hazard map includes hazard zoning according to affection by identified volcanic events, indicating by polygons the area where these phenomena have occurred and where they may eventually occur. Geological record information of the volcanic activity was considerate for delimitation of these areas, as long supported with simulation results of each phenomenon evaluated. Simulations by themselves do not represent a volcanic hazard map, as their results must be evaluated and adjusted considering the geological record along with volcano current activity state and formulation of potential eruptive scenarios. The boundaries between these areas are indicatives but not absolutes, therefore the representation scale of these maps is conditioned to their general character oriented to planners and decision maker authorities. The main volcanic hazards associated to Sotará volcano are related with domes construction and destruction processes (vulcanian activity), and their accompanying phenomena such as PDC (concentrated and diluted), primary or post-eruptive *lahars*, lava flows, pyroclastic falls, eventual volcano collapses flank (debris avalanches) and shock waves. Updated field camp work and new dating information of deposits associated with the most recent volcano activity, allowed to establish new stratigraphic correlations and reunify several eruptive units from volcano record. With this information, simulations parameters were obtained as input for programs and codes available for those volcanic phenomena. For pyroclastic falls, both those wind transported and ballistics, of which Sotará volcano does not have a clear geological record, the information from Nevado del Huila (Colombia) from its 2007-2010 eruption was taken as a reference. As well as from Galeras volcano (Colombia) information was a reference for shock wave phenomenon. The current volcanic activity of the Sotará is manifested by moderate seismic activity, deformation, a fumarolic field and hot springs outcrops.

The Sotará volcanic hazard shown on map, presents polygons of high, medium and low hazard, covering areas potentially affected by different volcanic phenomena in an eventual eruption, considering the volcano future behavior would be similar to its past activity, and considering the actual cone somital area as emission center where the domes are emplaced. The methodology guidelines regarding the volcanic hazard assessment and zoning process, defined by SGC in previous internal meetings (volcanic issues, monitoring and volcanic hazards working groups) was followed.

INTRODUCCIÓN

Las amenazas naturales son factores muy importantes dentro una compleja realidad en el manejo y planificación de las sociedades actuales, donde los asentamientos humanos cada vez son más exigentes y los territorios se ven amenazados por diferentes fenómenos inherentes al planeta, con los cuales se debe convivir y adaptar acorde con las necesidades y la salvaguarda de la vida de las personas.

Los volcanes son sin lugar a dudas, uno de los elementos más llamativos de la naturaleza, tanto por la imponente actividad como por las bondades de sus tierras, que los hacen atractivos para asentamientos agrícolas y turísticos, sin dejar de mencionar su significado en las costumbres ancestrales mitológicas. Han llamado la atención por milenios, pero de igual manera representan grandes amenazas a la humanidad.

Colombia es un país de una inmensa diversidad geológica y por tanto también es diversa en amenazas de tipo natural que ponen al país en una situación de permanente alerta y continua preparación para el manejo de las eventuales crisis, en especial las volcánicas que nos atañen en este informe de la memoria del mapa de amenaza volcánica del volcán Sotará.

La definición de amenaza natural según UNDRP (1990) es “La probabilidad de ocurrencia, en un periodo de tiempo específico en un área determinada, de un fenómeno natural potencialmente devastador”.

En la legislación colombiana, la amenaza se refiere al:

“Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, 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”. (Ley 1523/2012).

Las amenazas volcánicas, en particular, son eventos naturales potencialmente devastadores que pueden afectar de manera transitoria o definitiva las actividades humanas y el entorno de influencia del volcán. A partir de estos antecedentes, se elaboran los mapas de amenazas volcánicas para los volcanes activos de nuestro territorio. Los mapas de amenaza volcánica son una herramienta del conocimiento y un componente dentro del gran espectro de los procesos de la gestión del riesgo.

Esta memoria del mapa de amenaza volcánica del volcán Sotará, es el resultado de la valoración de los fenómenos volcánicos desde el punto de vista del comportamiento

eruptivo del volcán, principalmente de su actividad en los últimos 10 000 años y su registro geológico estratigráfico, así como de su actividad actual.

La amenaza volcánica se representa en el mapa en áreas de amenaza alta, media y baja, que podrían ser potencialmente afectadas por distintos fenómenos volcánicos en una eventual erupción, considerando que el comportamiento futuro del volcán sería similar a su actividad pasada y el centro de emisión sea la parte somital del cono actual, donde se encuentran emplazados los domos.

1 GENERALIDADES Y ANTECEDENTES DEL VOLCÁN SOTARÁ

El volcán Sotará está ubicado en la cordillera Central de Colombia, en los límites entre los departamentos del Cauca y Huila; en las coordenadas 2°06'N y 76°35'W, con una altura de 4420 m s. n. m., a 37 km al sureste de la ciudad de Popayán (capital del Departamento del Cauca), a 170 km al suroeste de la ciudad de Neiva (capital del Departamento del Huila) y a 400 km al suroeste de la ciudad de Bogotá, la capital colombiana (figura 1). Es uno de los volcanes activos de Colombia monitoreado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) a través del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSPop), desde 1993.

Su red hidrográfica está conformada por las cuencas de los ríos Quilcacé al nornoreste, Guachicono al oeste suroeste y Majuas al sureste. El río Quilcacé nace en el volcán Sotará, desemboca en el río Patía y en este tramo recoge la quebrada Flautas cerca de la población de Chapa (Sotará) que a su vez nace en el flanco nornoroeste del volcán. El río Guachicono nace entre los volcanes Sotará y Sucubún, desemboca igualmente en el río Patía y recibe las aguas de los ríos Blanco y Negro, que nacen en el flanco oeste del Sotará. El río Majuas nace en el flanco sureste y desemboca en el río Magdalena. La red de drenaje se densifica a lo largo de los recorridos de estos ríos con el aporte de varias corrientes de diferentes tamaños, que nacen en y fuera del entorno al edificio volcánico (figura 1). El flanco este del edificio volcánico se encuentra dentro de los dominios del Parque Nacional Natural Puracé (PNNP).

El volcán Sotará actual es un edificio cónico, que representa la etapa final de al menos tres generaciones de estructuras construidas y destruidas concéntricamente a través del tiempo (Pulgarín *et al.*, 2010) (figura 2). Su comportamiento se ha caracterizado principalmente por la construcción y destrucción de domos que han originado corrientes de densidad piroclástica (CDPs) concentradas y diluidas (flujos piroclásticos y oleadas) y la generación de algunos pequeños flujos de lava, así como algunos lahares asociados. Según la clasificación de niveles de actividad volcánica establecidos por el SGC, el volcán Sotará actualmente se encuentra en Nivel Amarillo III ("*Cambios en el comportamiento de la actividad volcánica*").

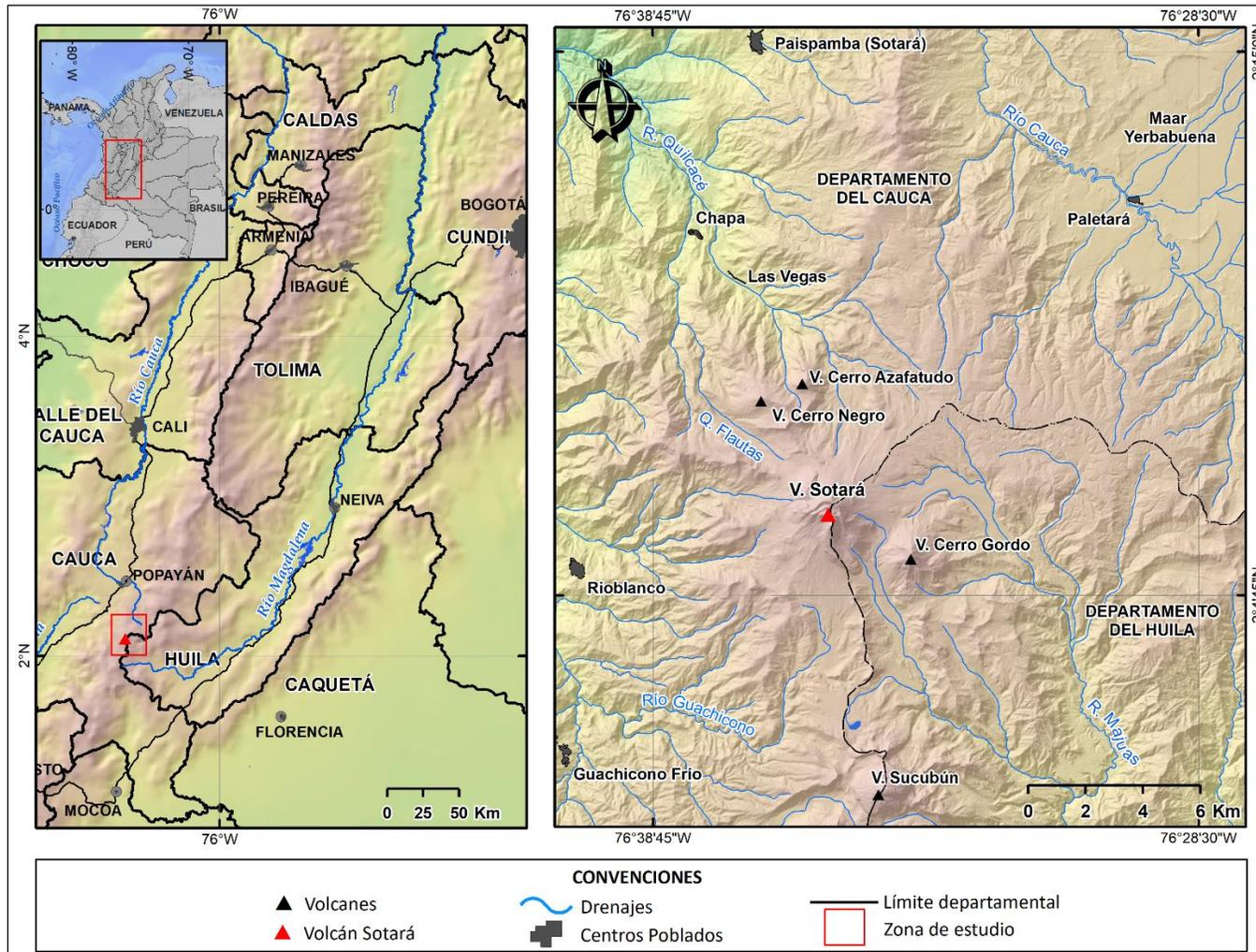


Figura 1. Mapa de localización del volcán Sotará y otras estructuras volcánicas aledañas

Fuente: DEM AlosPalsar-JAXA (12,5 m), con modificaciones de los autores

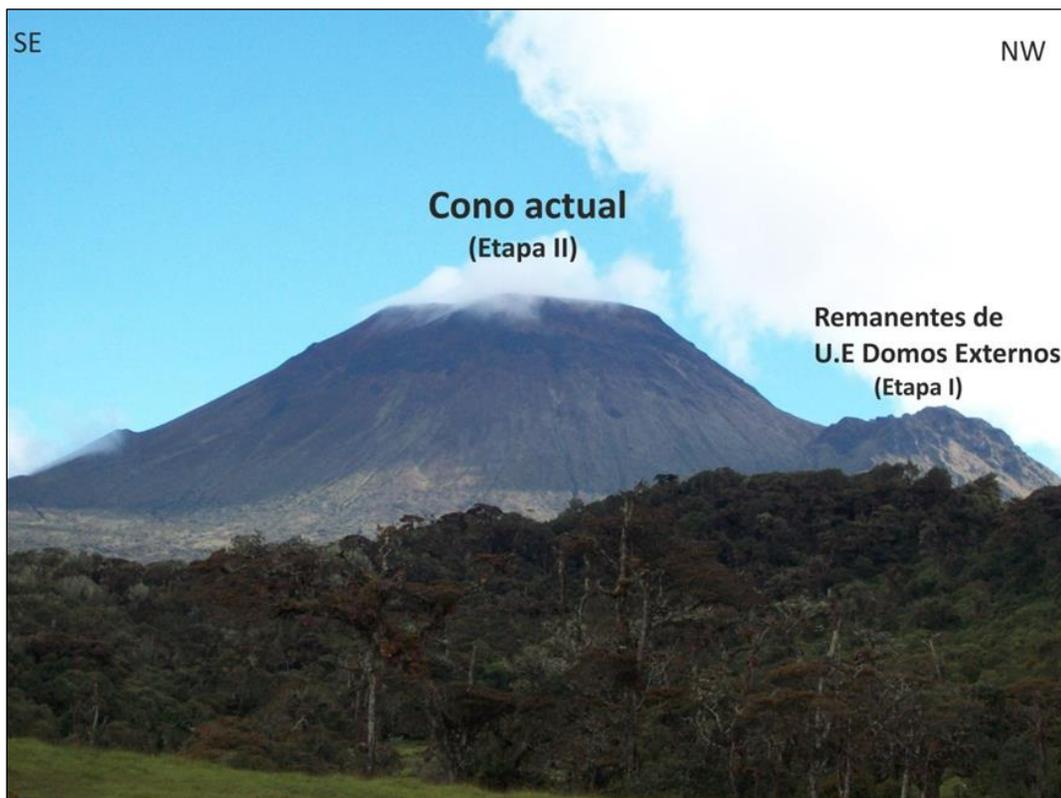


Figura 2. Volcán Sotará

Vista del cono volcánico actual y de algunos remanentes del edificio formado en la Etapa I
Fuente: autores

En las áreas de influencia proximal y media del volcán Sotará, se encuentran localizados diferentes centros poblados y asentamientos que incluyen sitios como: Paispamba (Sotará), Rioblanco, Las Vegas, Coconuco, Paletará, Puracé, Poblazón y Valencia, que albergan en su mayoría personas de etnias indígenas y población campesina.

Dentro del área de influencia del volcán se encuentran, además, ciudades de tamaño intermedio, localizadas a distancias considerables respecto al volcán, como Popayán (Cauca) y centros poblados como San Agustín (Huila), Puracé (Cauca) entre otros. Según estadísticas del censo de población y vivienda (DANE, 2018), la población asentada en esta zona de influencia se acerca a los 640 mil habitantes.

El volcán Sotará es sitio de interés turístico tanto para locales como foráneos, por sus hermosos paisajes, ríos, cascadas, aguas termales y la presencia de comunidades indígenas que aún conservan sus tradiciones ancestrales y artesanales.

1.1 Estudios anteriores

La base para la evaluación de la amenaza volcánica ha sido el trabajo “Geología e historia eruptiva del Complejo Volcánico Sotará, Colombia”, de Pulgarín *et al.* (2010). Sin embargo, a lo largo de los años, diferentes autores han llevado a cabo estudios geológicos en el volcán que han sido considerados igualmente tanto en la ampliación del conocimiento del volcán como en la evaluación de su amenaza.

Este es el primer mapa de amenaza volcánica para el volcán Sotará elaborado por el SGC, donde se incluye la zonificación categorizada en amenaza alta, media y baja, teniendo en cuenta la superposición de las amenazas por cada uno de los fenómenos volcánicos que podrían ser generados por erupciones futuras del volcán, con centro de emisión en la parte somital del cono actual, de acuerdo con su historia eruptiva reciente, su comportamiento, estilo eruptivo más característico y su estado actual. Además, el mapa presenta las características principales de los fenómenos que potencialmente afectarían cada zona categorizada.

Las primeras descripciones conocidas del volcán Sotará, corresponden a las anotaciones hechas por el naturalista Alexander Von Humboldt en 1801, quien lo describió como un volcán de cono truncado, cubierto por poca nieve, en el que hubo un colapso de una parte del edificio:

Sotará en el sureste de Popayán aparece como cono truncado, cuya cumbre está cubierta de poca nieve. Su negrura y curiosa forma de ruina le atribuyen algo tremendamente grande. En su pie hay piedra pómez nacida de pórfido quemado de sienita y lavas de distintos tipos. También existe la leyenda que, poco antes de la conquista, había vomitado fuego, desbastando el terreno alrededor, botando su cumbre cónica en la erupción. (Academia Colombiana de Ciencias Físicas y Naturales, 1982).

Jean-Baptiste Boussingault (1831), por su parte, lo describió como: “no es ni siquiera un volcán apagado” (Biblioteca Luis Ángel Arango, 2009).

En 1893 el geógrafo francés Jacques Élisée Reclus, se refirió al volcán Sotará como:

La arista que separa las aguas superiores del Patía y el Cauca soporta en su extremidad septentrional al volcán de Sotará (4,417 metros), de grandioso aspecto debido a su aislamiento y al sombrío color de sus rocas, que contrastan admirablemente con las demás montañas cubiertas de bosques. Este volcán está en reposo; sin embargo, los indígenas sostienen que cambió de formas a fines del último siglo: en vez de un pico muestra un cono de extremidad roma y hendida. (Biblioteca Luis Ángel Arango, 2019).

Alphons Stübel (1906) describe en su obra “*Die Vulkanberge von Colombia*” (Las montañas volcánicas de Colombia), que el volcán está compuesto de andesitas

porfíricas, diabasas porfíricas y andesitas anfibólicas. Diferenció un edificio antiguo destruido y el volcán actual. Realizó un dibujo del flanco oeste del volcán, donde se aprecia con gran precisión la morfología del edificio del Sotará, sus alrededores y la distribución de algunos de los productos que tapizan sus laderas (figura 3).

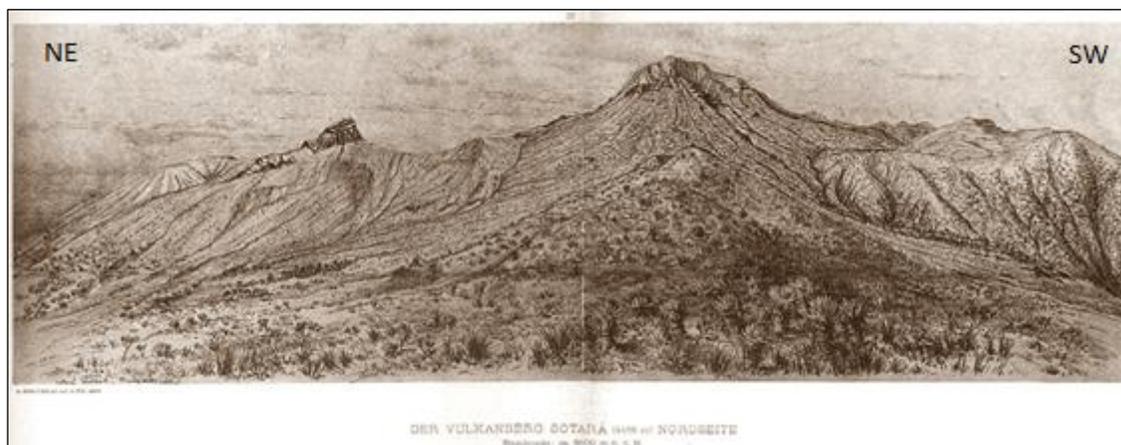


Figura 3. Dibujo de Alphons Stübel del volcán Sotará (1869) de la época en que hizo el recorrido por el volcán

Dibujado desde el NW, una altura de 3600 m s.n.m. De acuerdo con lo que se conoce en la actualidad, la morfología hacia el W y E, corresponde a remanentes del edificio ancestral del Sotará (Pre-Sotará)

Fuente: Stübel (1906)

Phanor James Eder (1913), en su libro “Colombia” se refirió a las tierras, la gente y algunos aspectos comerciales del país, y algunos apartes sobre los volcanes del Cauca, entre ellos el Sotará: “Cerca de Popayán están los pintorescos volcanes de Puracé y Sotará – emitiendo perpetuamente nubes humeantes desde sus cimas nevadas...De los volcanes cercanos, el Sotará (4,850 metros) parece estar extinto”. (Eder, 1913).

Minakami *et al.* (1969), como parte de una misión del gobierno japonés solicitada por el gobierno colombiano, realizaron estudios sismométricos, muestreos sísmicos y de aguas termales en el volcán Sotará; establecieron estaciones de muestreo sismométrico en Popayán y Paispamba; tomaron mediciones de aguas y aire entre Paispamba y la cima del volcán. Definieron que el volcán estaba en un estado normal y recomendaron establecer una red de monitoreo permanente.

Acevedo y Cepeda (1982), identificaron varios estadios o etapas de su desarrollo y describen dos calderas y un cráter como características morfológicas relevantes del volcán.

Koller (1982), reportó un depósito de azufre asociado a la emanación de gases, cercano al cráter del volcán Sotará.

Méndez (1989), hizo alusión a los depósitos de avalanchas de escombros, flujos de lava, flujos piroclásticos y *lahares* del volcán Sotará.

Olade y Geotérmica Italiana (1995), realizaron una interpretación sobre un volcán Sotará antiguo que se hundió por un colapso caldérico, al centro del cual está el Sotará actual. Además, hacen referencia a las buenas probabilidades de un sistema geotérmico de alta entalpía.

Garzón (1997), caracterizó las fuentes termales Aguas Calientes y Las Amarillas en el flanco oeste del volcán Sotará, con alta influencia magmática, de composición sulfato-cloruradas, con temperaturas de 33°C y 36°C, respectivamente.

Torres *et al.* (1997), sugirieron que el volcán Sotará es producto del vulcanismo resurgente externo, asociado a la Caldera de Paletará.

Marín-Cerón (2004), catalogó el volcán Sotará como de la serie calcoalcalina, en su trabajo sobre rocas del Cenozoico Tardío de volcanes del suroccidente colombiano.

Toro *et al.* (2007), en su estudio sobre vulcanismo Neógeno y Cuaternario en el suroccidente colombiano asociaron los depósitos de flujos de lava y de corrientes de densidad piroclástica del flanco oeste del volcán Sotará con la evolución del volcán y la variación en su comportamiento eruptivo.

Téllez *et al.* (2008), propuso para el complejo volcánico Sotará una fuente de magmas derivados del manto relacionados a la subducción y su relación con procesos de asimilación y cristalización fraccionada.

Pulgarín *et al.* (2010), describieron las características geológicas y estratigráficas del volcán Sotará e incluyeron otras estructuras volcánicas asociadas a éste, como son los volcanes Cerro Negro, Cerro Azafatudo, Cerro Gordo y, además, el volcán Sucubún. El trabajo mencionado ha sido la base para realizar la evaluación de la amenaza volcánica y éste a su vez, ha sido tenido en cuenta para elaborar la presente memoria. Pulgarín *et al.* (2011), detallaron geomorfológicamente las diferentes estructuras volcánicas asociadas en el complejo volcánico Sotará y sus particularidades.

En la actualidad, en la página *web* de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), desde el visor ambiental en la sección de gestión del riesgo, es posible consultar un mapa de amenaza volcánica para el volcán Sotará, dispuesto como un servicio WMS (*Web Map Service*). En este mapa, no oficial, presenta una zonificación de amenaza volcánica en tres categorías (alto, moderado y bajo), producto de la información obtenida del Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de Sotará (2002) y del Plan

Memoria del mapa de amenaza volcánica del volcán Sotará

Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD, 2013) y no especifica la metodología implementada para la elaboración de la cartografía de amenaza volcánica asociada a dicho mapa.

2 GEOLOGÍA E HISTORIA DEL VOLCÁN SOTARÁ

El volcán Sotará (*sensu stricto-ss*), está construido en medio de la caldera del Pre-Sotará (edificio antecesor) representando un vulcanismo resurgente posterior, y hace parte del denominado Complejo Volcánico Sotará (Pulgarín *et al.*, 2010). Se ha desarrollado en al menos tres etapas evolutivas (Etapas I, II, III) durante el Holoceno, posterior a la Última Glaciación, deducido tanto de su morfología preservada de la erosión glaciaria (Pulgarín *et al.*, 2010), como de las edades de sus depósitos recientes y las relaciones estratigráficas entre ellos (tablas 1, 2 y 3).

El comportamiento del volcán se ha caracterizado principalmente por el emplazamiento de conjuntos de domos en el tiempo y su subsecuente destrucción por explosiones que produjeron columnas eruptivas y sus colapsos, generando CDPs concentradas y diluidas. Evidenciando, en conjunto, una dinámica de tipo vulcaniano (Morrissey y Mastin, 2002; Clarke *et al.*, 2015; Siebert *et al.*, 2015).

Los productos de esta actividad han afectado el edificio volcánico y sus alrededores, incluyendo sus partes altas, medias y distales, en donde se intercalan depósitos de flujos de lava, avalanchas de escombros (por colapsos de flanco de pequeño a mediano volumen) y *lahares* (por remoción o transformación directa de materiales disponibles de las CDPs y de las mismas avalanchas de escombros). Es importante señalar que depósitos de caídas piroclásticas en el registro geológico de la actividad reciente del volcán Sotará, no son claros o son inexistentes; sin embargo, este fenómeno de caídas debió estar presente durante estas fases eruptivas, dada la dinámica volcánica que lo ha caracterizado.

Toda esta actividad explosiva registrada en el Holoceno, y principalmente en la Etapa III de su desarrollo, evidencia la potencialidad de la amenaza asociada al volcán Sotará (*ss*), sumado a la presencia en la actualidad del conjunto de domos emplazados en su cima, representados por las Unidades Eruptivas Domos Somitales, Domo Central y Domo Colada, que pudieron haber sido emplazados previa o coetáneamente, con las fases eruptivas iniciales de esta etapa (tabla 3).

Con la nueva información geocronológica disponible proveniente de dataciones de ^{14}C y Ar-Ar en depósitos asociados al volcán (tablas 1 y 2) y jornadas complementarias de campo, pudo ser reinterpretada y ajustada la estratigrafía inicial, propuesta en Pulgarín *et al.* (2010), principalmente en lo referente al Holoceno (Pulgarín y Zuluaga, 2019).

Tabla 1. Dataciones ¹⁴C de paleosuelos y material carbonizado

Lab.	Muestra	Edad en años A.P. (Antes del Presente)	Material datado	Unidad Eruptiva y Observaciones
***	GVVS-005-E-3	617 ± 25 POM (materia orgánica joven)	Paleosuelo	Paleosuelo de La Unidad Eruptiva La Cima. (E-III).
***	GVVS-005-E-3	1053 ± 27 H ₂ O ₂ (materia orgánica antigua)		
**	LTVS-043-B-3	1100 ± 30	Carbón	CDPs de la Unidad Eruptiva La Cima (parte superior). (E-III).
**	HMVS-021-A-3	1510 ± 30	Carbón	CDPs de la Unidad Eruptiva La Cima (parte inferior).(Correlacionable con la unidad Las Amarillas, de Pulgarín <i>et al.</i> , 2010).(E-III).
***	GVVS-005-C-3	1946 ± 27 POM (materia orgánica joven)	Paleosuelo	Paleosuelo techo de la Unidad Eruptiva La Piedra-Llano de Sotará. (E-III).
*	HMVS-017-3-A	1975±25	Paleosuelo	
**	HMVS-17-3-A	2040 ± 30	Paleosuelo	
**	SNVS-199-B-3	2650 ± 30	Paleosuelo	
***	GVVS-005-C-3	2770 ± 27 H ₂ O ₂ (materia orgánica antigua)	Paleosuelo	
***	BPVS-117-A-3	2820 ± 30	Carbón	
**	HMVS-27-3	2870 ± 30	Carbón	CDPs de la parte superior de la Unidad Eruptiva La Piedra - Llano de Sotará, que se correlaciona también con la Unidad Las Vegas (de Pulgarín <i>et al.</i> , 2010), por el río Quilcacé, al norte del volcán. (E-III).
**	MLVS-160-A-3	2910 ± 30	Carbón	
**	LTVS-053-3	2940 ± 30	Carbón	
*	HMVS-027-3	2970 ± 20	Carbón	
***	BPVS-116-A-3	2970 ± 30	Carbón	
***	GVVS-013-D-3	2989 ± 27	Carbón	
***	BPSW-25-A	2990 ± 15	Carbón	
**	BPVS-060-B-3	3000 ± 30	Carbón	
**	BPSO-1	3020 ± 30	Carbón	
*	BPVS-036-3	3070 ± 15	Carbón	
***	BPVS-118-A-3	3130 ± 30	Carbón	
***	GVVS-017-3	3460 ± 27	Carbón	
*	BPVS-115-C-3-1	4890 ± 15	Leño en Paleosuelo	Paleosuelo espeso (o secuencia de ellos) debajo de CDPs. Se interpretan como asociados a depósitos de CDPs de las explosiones de los domos (Domos Externos) de la Etapa I (E-I), algunos de ellos encontrados también sobre CDPs ignimbríticas de la Unidad Eruptiva Los Alisales-Yerba Buena, asociadas al Pre-Sotará. Este suelo (o suelos) permanecieron formándose desde ~ 6193 años A.P. a ~ 5362 años A.P. (durante ~831
***	GVVS-023-A-3	5362 ± 30 POM (materia orgánica joven)	Paleosuelo	
**	HMVS-052-3	5410 ± 30	Paleosuelo	
***	GVVS-019-G-3	5755 ± 36 H ₂ O ₂ (materia orgánica antigua)	Paleosuelo	
***	GVVS-012-B-3	6027 ± 31 H ₂ O ₂ (materia orgánica antigua)	Paleosuelo	

Memoria del mapa de amenaza volcánica del volcán Sotará

Lab.	Muestra	Edad en años A.P. (Antes del Presente)	Material datado	Unidad Eruptiva y Observaciones
***	GVVS-012-B-3	6193 ± 31 H ₂ O ₂ (materia orgánica antigua)	Paleosuelo	años, quizás más). La edad de 4890 años A.P. de un leño (472 años después), posiblemente sea de un árbol -o de su raíz- desarrollado sobre otros depósitos que suprayacieron a este paleosuelo y que ya han sido erosionados, quedando trozos de las raíces dentro del paleosuelo. De lo contrario, es posible que el desarrollo de éste se deba extender hasta la edad del leño, es decir, un rango de ~ 1303 años.
**	SNVS-10-A-3	> 43 500	Carbón	CDPs ignimbríticas de la Unidad Eruptiva Los Alisales-Yerba Buena, asociadas a Pre-Sotará. Podría indicar la edad de destrucción del Pre-Sotará. Nota: La datación reportada para SNVS-10-A-3: > 43 500 años A.P. (con gran incertidumbre, por estar en el límite del método, según el laboratorio), es la más joven conocida hasta ahora para el Pre-Sotará; fue realizada en un carbón extraído de los depósitos de CDPs diluidas de la Unidad Eruptiva Los Alisales, de Pulgarín <i>et al.</i> (2010), pero en el actual trabajo se unificó esta unidad con la Unidad Eruptiva Yerba Buena, quedando con el nombre de Unidad Eruptiva Los Alisales-Yerba Buena, pues luego de esta correlación, se considera a la Unidad Los Alisales como la parte superior y más fina de la Unidad Yerba Buena.

Unidades eruptivas más recientes del volcán Sotará y su respectiva reinterpretación a partir de Pulgarín *et al.* (2010)

Fuente: autores

* Laboratoire de Radiochronologie, Université Laval Quebec (Canadá)

** Beta Analytic (Estados Unidos)

*** Radiocarbon Laboratory - Universität Zürich (Suiza)

E-I, E-II, E-III: Etapas I, II, III del desarrollo del volcán Sotará (*ss*), respectivamente.

CDPs: corrientes de densidad piroclástica

Tabla 2. Dataciones con Ar-Ar de muestras de lavas y domos del volcán Sotará

Lab.	Muestra	Edad Ar-Ar	Tipo de material datado	Unidad Eruptiva	Edad Reinterpretada (Por Morfología)
*	SNVS-033	41,2 ± 5,3 ka	Lava (biotita)	La Corona, parte inferior (borde sur del anfiteatro)	Holoceno (3) - E-II
*	SNVS-035	76,7 ± 8,1 ka	Domo Colada (biotita)	Domo Colada	Holoceno (5) – E-III
*	SNVS-029	84,3 ± 6,7 ka	Lava (biotita)	La Línea	Holoceno (4) - E-II
*	HMVS-009	92,5 ± 5,5 ka	Lava (biotita)	El Triángulo	(1) – E-I
*	HMVS-014	92,8 ± 6,1 ka	Domo (biotita)	Domos Externos	Holoceno (2) – E-I
*	BPVS-050-AA-2	244,3 ± 3,4 ka	Domo (biotita)	Cerro Azafatudo (del Pre-Sotará)	244,3 ± 3,4 ka (Pre-Sotará)

Las edades obtenidas no concuerdan con el estado de conservación de la unidad eruptiva, por lo tanto, fueron reinterpretadas a partir del análisis morfológico

Fuente: tomado y modificado de Pulgarín *et al.* (2010) a partir de las dataciones Ar-Ar

* Argon Geochronology Lab, Oregon State University (Estados Unidos)

(1), (2), (3), (4), (5): Orden cronológico interpretado de acuerdo a la conservación de la morfología y correlaciones estratigráficas (1 más antiguo; 5: más reciente, en el Holoceno).

E-I, E-II, E-III: Etapas I, II, III del desarrollo del volcán Sotará (ss), respectivamente.

ka: miles de años

Tabla 3. Reorganización crono-estratigráfica de las Unidades Eruptivas del Volcán Sotará (ss)

Edades Obtenidas	Edad Interpretada por morfología	Acronimo	Reorganización de Unidad Eruptiva o depósitos (nombre dado)	Tipo de depósito	Etapas del desarrollo del Volcán Sotará
	Holoceno	Cr	Caídas de rocas		Removilización de materiales durante el desarrollo del Sotará
		DL-PS	Depósito de <i>lahar</i> Piedrasentada	<i>Lahar</i>	
		DL-SA	Depósito de <i>lahar</i> Salinas	<i>Lahar</i>	
		DL-CA	Depósito de <i>lahar</i> La Cruz Azul	<i>Lahar</i>	
		DL-LO	Depósito de <i>lahar</i> La Orquídea	<i>Lahar</i>	
		DL-ET	Depósito de <i>lahar</i> El Tablón	<i>Lahar</i>	
		DL-RN	Depósito de <i>lahar</i> Río Negro	<i>Lahar</i>	
76,7±8,1 ka ¹	Holoceno ~ 2000-1500 años A.P. (?)	UE-DC	Unidad Eruptiva Domo Central y Domo Colada	Domo Colada	Sotará, Etapa III (Dominantemente extrusiva-explosiva)
		UE-LD	Unidad Eruptiva Lavas de los Domos Somitales	Domos	
		UE-DS	Unidad Eruptiva Domos Somitales	Domos	
[617±25; 1053±27] años A.P. ²			Paleosuelo de La Cima (parte superior)	Paleosuelo	
1100±30 años A.P. ²		UE-LC	Unidad Eruptiva La Cima (parte superior)	CDP diluida	
			No se encontró un paleosuelo evidente (posiblemente se erosionó). Es posible que la unidad eruptiva La Cima (partes superior e inferior) se haya generado coetáneamente o cercanamente a alguna de las unidades Domos Somitales, Lavas de los Domos Somitales o Domo Central y Domo Colada, todas ellas emplazadas entre el cráter y el inicio del anfiteatro formados en la Etapa II		
1510±30 años A.P. ²			Unidad Eruptiva La Cima (parte inferior) (correlacionable con la Unidad Eruptiva Las Amarillas, de Pulgarín <i>et al.</i> , 2010)	CDP diluida	
[1946±17; 1975±25; 2040±30; 2650±30; 2770± 27] años A.P. ²			Paleosuelos de la Unidad Eruptiva La Piedra-Llano de Sotará (de la parte superior), generados sobre CDPs concentradas y diluidas	Paleosuelos	
[2820±30; 2870±30; 2910±30; 2940±30 2970±20; 2970±30 2989±27; 2990±15 3000±30; 3020±30 3070±15; 3130±30] años A.P. ²		UE-PDLS	Unidad Eruptiva La Piedra-Llano de Sotará (parte superior), unificada de las unidades La Piedra, Llano de Sotará y Las Vegas, de Pulgarín <i>et al.</i> (2010)	CDPs concentradas y diluidas y <i>lahares</i> asociados	
3460±27 años A.P. ²			Unidad Eruptiva La Piedra – Llano de Sotará (parte inferior), unificada de las unidades	CDPs concentradas y diluidas y	

Memoria del mapa de amenaza volcánica del volcán Sotará

Edades Obtenidas	Edad Interpretada por morfología	Acrónimo	Reorganización de Unidad Eruptiva o depósitos (nombre dado)	Tipo de depósito	Etapas del desarrollo del Volcán Sotará
			Pujuyacu, Quilcacé, La Paila y La Cueva, de Pulgarín <i>et al.</i> (2010)	lahares asociados	
	Holoceno (~4000 -3500 años A.P.)	DA-RN	Depósito de avalancha de Escombros y Lahar Río Negro	Avalancha de escombros y lahar	Sotará, Etapa II (Efusiva)
	Holoceno	UE-CO	Unidad Eruptiva La Corona (lavas superiores del cono)	Lavas en bloques	
84,3±6,7 ka ¹	Holoceno	UE-LL	Unidad Eruptiva La Línea (emplazada en una delgada franja al noreste del cono)	Lavas en bloques	
41,2±5,3 ka ¹	Holoceno	UE-CO	Unidad Eruptiva Lavas del cono (parte media e inferior del cono) o partes media e inferior de La Corona	Lavas masivas	
	Holoceno	DA-PA	Depósito de avalancha de escombros Los Pajonales	Avalancha de escombros	Sotará, Etapa I (Extrusiva-explosiva)
[4890±15; 5362±30 5410±15; 5755±36 6027±31; 6193±31] años A.P. ²			Paleosuelos de posibles depósitos de CDPs asociadas a explosiones de los Domos Externos, que yacen sobre depósitos de ignimbritas asociadas a Pre-Sotará (uno de cuyos carbones obtuvo una edad ¹⁴ C > 43 500 años A.P.) Podrían ser paleosuelos unidos de Pre-Sotará y Sotará Etapa I (?). La edad de 4890 años A.P. se tomó de un leño presente en un paleosuelo en el sector noreste (cabeceras del río Negro del noreste), el cual se correlaciona con los de 6193 a 5362 años A.P.	Paleosuelos y leño	
92,8± 6,1 ka ¹	Holoceno	UE-DE	Unidad Eruptiva Domos Externos	Domos	
92,5± 5,5 ka ¹	Holoceno	UE-ET	Unidad Eruptiva El Triángulo (lavas en bloques que están sobre el piso norte de la caldera del Pre-Sotará)	Lavas en bloques	
> 43 500 años A.P. ² 1981,8 ± 5,0 244,3 ± 3,4 2305,7 ± 30,2 2343,1 ± 15,6 } ka ¹	(PRE-SOTARÁ: con edad Gelasiano a Pleistoceno Superior) Los depósitos posiblemente asociados a la destrucción última del Pre-Sotará, se considera que son las ignimbritas de la unidad Los Alisales – Yerba Buena, unificada luego de Pulgarín <i>et al.</i> (2010). El único carbón que se tiene hasta ahora datado por ¹⁴ C, en una de estas CDPs, arrojó una edad > 43 500 años A.P. Las demás edades son de lavas de este volcán ancestral del Sotará, incluyendo algunas de los volcanes menores del Complejo Volcánico Sotará.				

A partir de la reinterpretación con base con el soporte de las dataciones de ¹⁴C y Ar-Ar, la preservación de la morfología y la similitud de componentes en los depósitos. La flecha indica la incertidumbre en las edades de los depósitos de donde ésta se origina.

Laboratorios donde se ejecutaron las dataciones: como en las tablas 1 y 2

Fuente: modificado y complementado de Pulgarín *et al.* (2010)

¹: Datación Ar-Ar

²: Datación ¹⁴C

A. P.: Antes del Presente

ka: miles de años

CDPs: corrientes de densidad piroclástica

2.1 Etapa I de desarrollo del volcán Sotará: actividad efusiva, emplazamiento-destrucción de domos

Esta etapa de la construcción del volcán Sotará (ss) inicia con la actividad efusiva que dio origen a los flujos de lava en bloques de la Unidad Eruptiva El Triángulo (UE-ET) (figura 4).



Figura 4. Remanentes de depósitos de la Unidad Eruptiva El Triángulo (flujos de lava)
Localizados en el sector nor-noroeste del volcán
Fuente: Pulgarín *et al.* (2010)

Muy cercanos en el tiempo, se produce la extrusión de uno o varios domos pertenecientes a la Unidad Eruptiva Domos Externos (UE-DE) (figuras 2 y 5). La destrucción de alguno (s) de ellos dio origen a depósitos de CDP, distribuidos al nor-noroeste principalmente, los cuales al parecer fueron edafizados y erosionados o pudieron ser cubiertos en algunos sectores por depósitos generados en actividades eruptivas posteriores (colapsos gravitacionales) al final de esta misma Etapa y en la Etapa III (CDPs) (figuras 6 y 7).

Sin embargo, las edades reportadas para estos cuerpos lávicos (tabla 2) no corresponden con su buen grado de conservación (sin evidencias de erosión glaciár, aun estando a

altitudes cercanas a los 4000 m s. n. m.), por lo tanto, dichas edades se reinterpretaron a partir del análisis geomorfológico y se concluyó que el emplazamiento de estas lavas ocurrió durante el Holoceno (tabla 3).



Figura 5. Panorámica de los Domos Externos (UE-DE)
Son producto de la actividad efusiva del volcán Sotará (Etapa I)
Fuente: autores

Posteriormente, un sector norte del edificio volcánico, o sus remanentes, colapsó y generó una avalancha de escombros (posiblemente no magmática), que corresponde al Depósito de Avalancha de escombros Los Pajonales (DA-PA) (Pulgarín *et al.*, 2010), emplazada por las cabeceras del río Quilcacé; en la actualidad este depósito está cubierto por depósitos de CDPs generados en una etapa posterior de desarrollo -Etapa III, (figuras 6 y 7). Del cono volcánico desarrollado en esta etapa, sólo se conservan algunos remanentes localizados al noroeste y sureste alrededor del centro eruptivo actual (figuras 2 y 5).

Memoria del mapa de amenaza volcánica del volcán Sotará

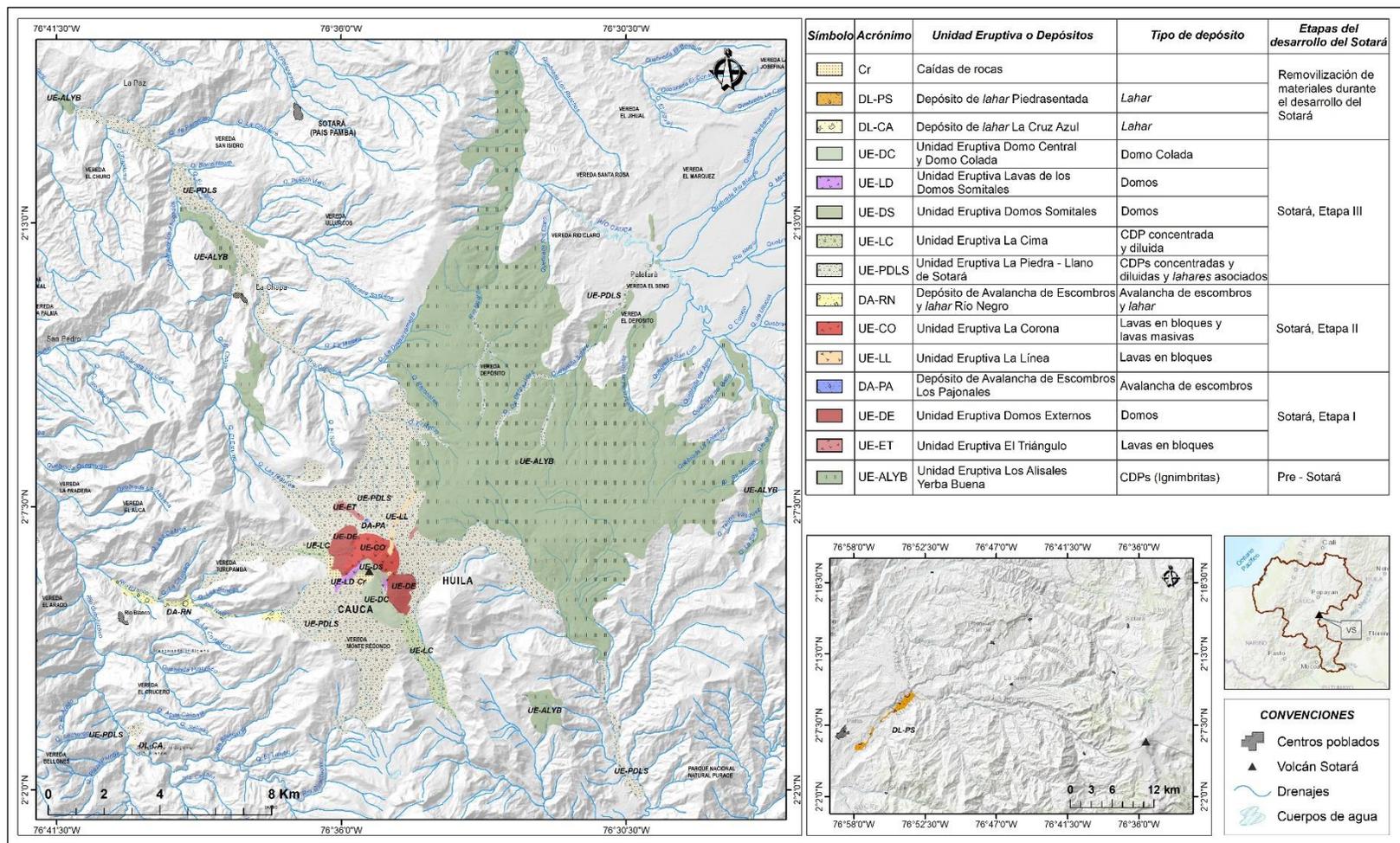


Figura 6. Mapa geológico del volcán Sotará

Distribución areal de las Unidades Eruptivas relacionadas en la evaluación de la amenaza volcánica
El recuadro inferior derecho muestra la zona distal donde aparece localizado el depósito de *lahar* Piedrasentada

Fuente: tomado y modificado de Pulgarín *et al.* (2010)

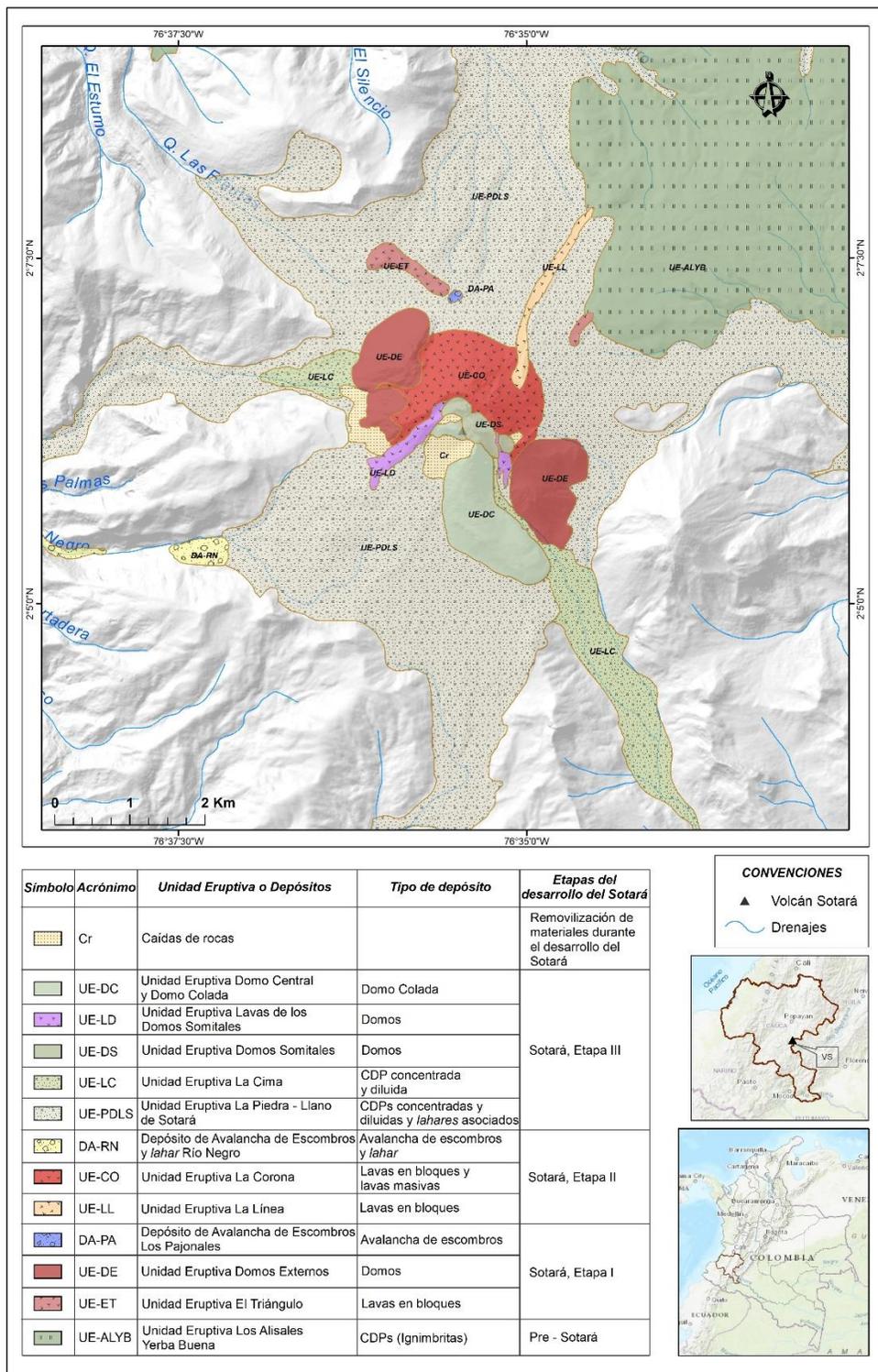


Figura 7. Mapa geológico de la zona proximal del volcán Sotará
 Unidades eruptivas en detalle consideradas en la evaluación de la amenaza volcánica
 Fuente: modificado de Pulgarín *et al.* (2010)

2.2 Etapa II de desarrollo del volcán Sotará: construcción y colapso gravitacional de un nuevo cono

Luego de la destrucción del edificio construido en la Etapa I, se inicia la construcción de un nuevo edificio volcánico, que corresponde al cono actual del volcán Sotará (figura 2). Este nuevo cono se construye a partir del emplazamiento de flujos de lava masivos (en sus partes basal y media) en el centro de los remanentes de los domos de la etapa anterior (Etapa I) y formaron así la Unidad Eruptiva La Corona (UE-CO) (figuras 6 y 7).

La edad reportada para estos domos (tabla 2), al igual que en el caso de la etapa anterior, no concuerdan con su morfología bien conservada (sin rastro de abrasión glaciar, aun estando localizados cerca a los 4000 m s. n. m.) por lo que fueron catalogados como de edad holocénica, emplazados en los últimos 10 000 años (tabla 3).

Las lavas continuaron formando la cima del cono, pero ya emplazándose como flujos de lava en bloques, asociados también con la Unidad Eruptiva La Línea (UE-LL) de Pulgarín *et al.* (2010), localizada en la parte alta noreste del volcán (figuras 6 y 7).

De manera análoga al análisis geomorfológico de las anteriores unidades eruptivas, los emplazamientos de estas lavas en bloques fueron considerados del Holoceno (tablas 2 y 3), puesto que sus edades Ar-Ar resultaron ser más antiguas de las que muestra la evidencia morfológica. Esta circunstancia de incompatibilidad entre las dataciones y la conservación morfológica puede deberse seguramente a la presencia de pequeños xenolitos (corroborados en los análisis petrográficos) de rocas más antiguas contenidas en estas lavas. El nuevo cono, así construido, es el edificio actual del volcán Sotará (figura 2).

Una vez construido este cono, de nuevo ocurre una destrucción por colapso parcial (no magmático) de flanco, que dejó un anfiteatro abierto hacia el suroeste. Este colapso dio origen a una nueva avalancha de escombros, a partir de la cual se formó un *lahar* que fue encausado por el río Negro al oeste del volcán, hasta el río Guachicón, formando la Unidad Depósito de Avalancha de Escombros y *Lahar* de Río Negro (DA-RN) (Pulgarín *et al.*, 2010) (figuras 6, 7 y 8).

Los remanentes del depósito de esta avalancha de escombros se encuentran cubiertos por material de CDPs generadas en una etapa posterior del desarrollo del volcán (Etapa III). Estos últimos depósitos piroclásticos fueron agrupados y redefinidos en una misma Unidad Eruptiva (Pulgarín y Zuluaga, 2019) denominada La Piedra-Llano de Sotará (UE-PDLS), a partir de la reinterpretación según las edades de ^{14}C (tabla 3), las correlaciones y su posición estratigráfica.



Figura 8. Panorámica de la morfología de la avalancha de escombros de Río Negro (DA-RN)
Fuente: Pulgarín *et al.* (2010)

De otra parte, se estableció que el colapso de este nuevo edificio pudo ocurrir hace aproximadamente 4000 años A.P., si se tiene en cuenta que la edad más antigua reportada para las CDPs de la U.E. La Piedra-Llano de Sotará (UE-PDLS) (Etapa III) es de 3460 años A.P. y los domos que las generaron ya estaban emplazados sobre el anfiteatro y el cráter del cono formado en esta Etapa II (tabla 1). Este análisis está respaldado además por las edades entre los 6200 años A.P. y 5360 años A.P. de suelos generados a partir de depósitos de CDPs producidos en la Etapa I de desarrollo del volcán, y la de un leño de 4890 años A.P. encontrado en ellos (tabla 3).

2.3 Etapa III de desarrollo del volcán Sotará: emplazamiento –destrucción– emplazamiento de otros domos

Después del colapso de flanco del segundo edificio (cono actual), el volcán inició nuevamente una actividad extrusiva-explosiva repetitiva, con el emplazamiento y destrucción de domos, mostrando un comportamiento principalmente vulcaniano en numerosas fases eruptivas sostenidas en el tiempo.

Esta actividad en la cima del cono (entre el cráter y el inicio del anfiteatro) produjo grandes explosiones de tipo freático a freatomagmático con importantes columnas eruptivas que al colapsar dieron origen a la secuencia de CDPs concentradas y diluidas de la U. E. La Piedra-Llano de Sotará (UE-PDLS) (Pulgarín y Zuluaga, 2019).

Esta nueva Unidad Eruptiva (UE-PDLS) fue agrupada y definida (tabla 3) a partir de la reinterpretación y correlación de las Unidades Eruptivas La Piedra, Llano de Sotará y Las Vegas, ubicadas estratigráficamente al techo de la secuencia piroclástica; y de las Unidades Eruptivas Pujuyacu, Quilcacé, La Paila y La Cueva, estratigráficamente asociadas a la base de la secuencia (Pulgarín y Zuluaga, 2019), (figuras 6, 7 y 9).

Para la secuencia de CDPs así reagrupada, fueron obtenidas edades por el método ^{14}C que muestran claramente dos hitos en el tiempo de su desarrollo (tablas 1 y 3). Uno de ellos corresponde a la edad de 3460 años A.P., asignada a la parte basal de UE-PDLS

(tabla 3). Y un segundo intervalo de tiempo que reúne los datos de edades entre 3130 y 2820 años A.P. siendo considerado como el lapso de formación de la parte superior de esta nueva Unidad Eruptiva PDLS (Pulgarín y Zuluaga, 2019).

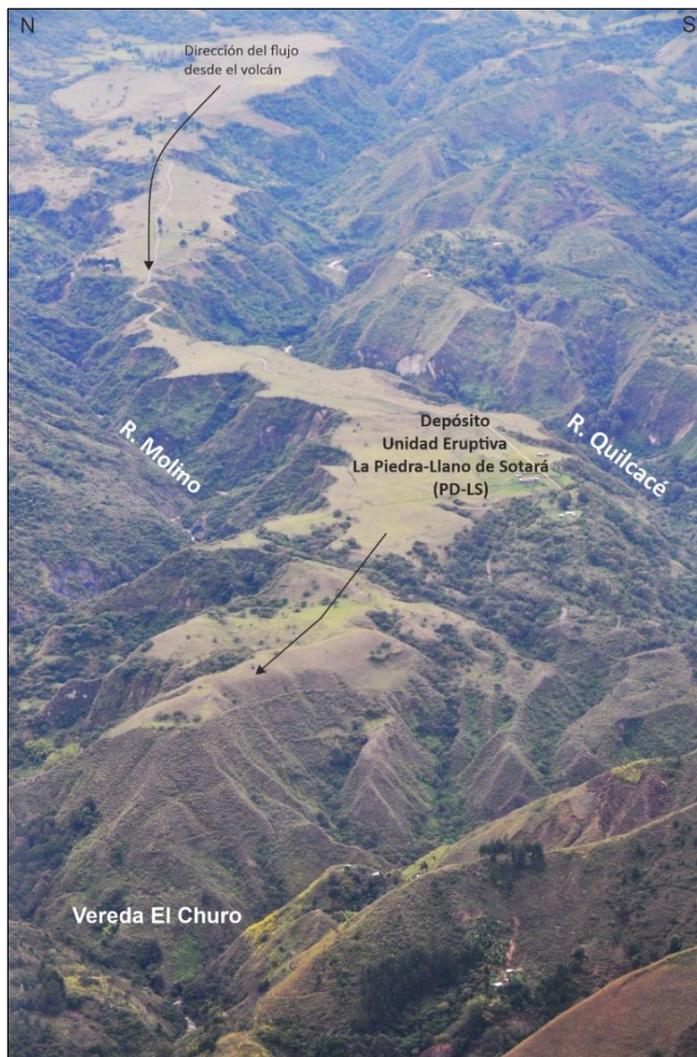


Figura 9. Expresión geomorfológica de la Unidad Eruptiva La Piedra-Llano de Sotará
En el sector Plan del Llano de Sotará al NW del volcán
Fuente: SGC-OVS Popayán

Luego de la formación de la unidad La Piedra-Llano de Sotará, un nuevo conjunto de domos se emplazó en el cráter del cono volcánico actual y en el borde de su anfiteatro. Estos domos conforman las Unidades Eruptivas Domos Somitales (UE-DS), Domo Central y Domo Colada (UE-DC), que se observan sobresaliendo del borde del cráter (figura 10).

El Domo Colada en particular, tiene asociado un flujo de lava en bloques con estructura en ojivas (colinas de presión en la superficie; figura 10A), datada en 76 ka, sin embargo, esta edad fue reinterpretada, según criterio geomorfológico y se consideró como del Holoceno (entre 2000 - 1500 años A.P; tablas 2 y 3) debido a la excelente conservación de las estructuras en su superficie (sin labrado glaciario, aun estando a alturas mayores de 4000 m s. n. m.) (Pulgarín y Zuluaga, 2019). De manera similar, los Domos Somitales (Figura 10B) tienen asociados flujos de lava en bloques, de menor extensión y volumen, para los cuales su edad también es considerada del Holoceno por las mismas razones antes expuestas para el Domo Colada (tabla 3).

A la base y alrededores de estos domos se encuentran depósitos de acumulación de caída de rocas, con diámetros individuales hasta de 5 m, generados durante y después de sus emplazamientos; sus espesores pueden alcanzar los 10 m.

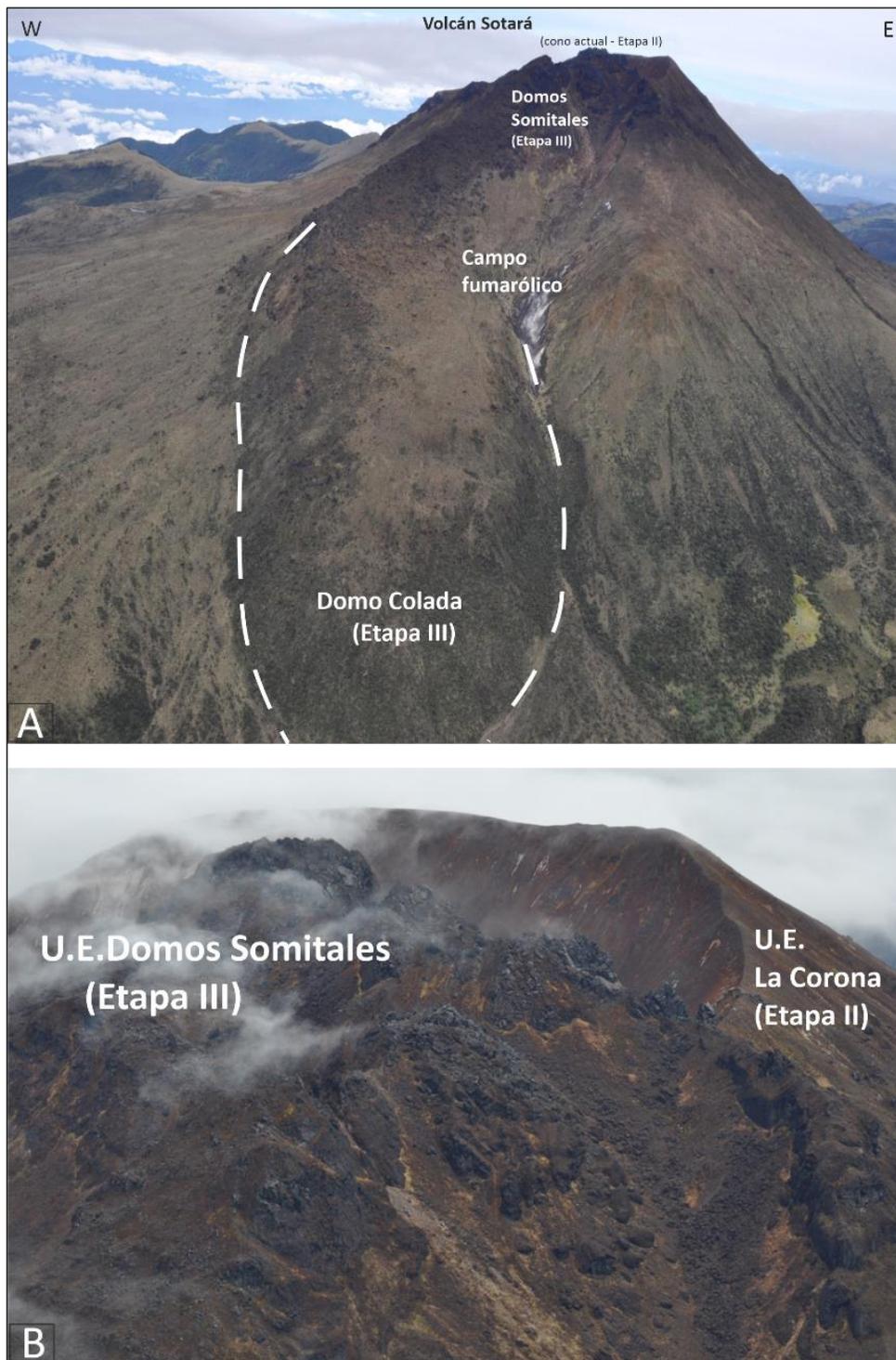


Figura 10. Vistas aéreas del Domo Colada y de los Domo Somitales
A. Extensión del Domo Colada (UE-DC) y la preservación de su morfología sin tallado glaciar.
B. Domo Somitales (UE-DS) emplazados en la parte somital del volcán Sotará
Fuente: SGC, OVS-Popayán (modificadas)

2.3.1 Actividad eruptiva más reciente del volcán

A partir de las interpretaciones geocronológicas con dataciones ^{14}C , el registro geológico en campo y la reagrupación de algunas unidades eruptivas asociadas con la Etapa III del desarrollo del volcán (tablas 1 y 3), se encontró que, luego de unos 1310 años después de terminar el emplazamiento de los depósitos de la Unidad Eruptiva La Piedra-Llano de Sotará (2820 años A. P., en su datación más reciente), ocurrió otra actividad eruptiva en el volcán Sotará, representada en al menos dos fases eruptivas más (Pulgarín y Zuluaga, 2019). Una de ellas datada en 1510 años A.P. y otra en 1100 años A. P. (tablas 1 y 3), ambas con estilo eruptivo y composición similar a la de los depósitos generados en la UE-PDLS, pero con menor volumen y alcance.

Los depósitos de estas fases más recientes están distribuidos principalmente en la parte alta y proximal del volcán. Corresponden a CDPs concentradas y diluidas de menor magnitud y dispersión, que conforman la Unidad Eruptiva La Cima (UE-LC) (Pulgarín et al., 2010). De acuerdo con Pulgarín y Zuluaga (2019), esta Unidad se subdividió en Parte Inferior (1510 ± 30 años A.P.), que correspondería a la Unidad Eruptiva Las Amarillas (tablas 1 y 3) caracterizada por Pulgarín *et al.* (2010); y en Parte Superior (1100 ± 30 años A. P.) que representaría la Unidad Eruptiva La Cima (de Pulgarín *et al.*, 2010) (figura 11, tabla 3). Esta UE-LC representa la actividad explosiva más reciente datada hasta la fecha en el volcán Sotará.

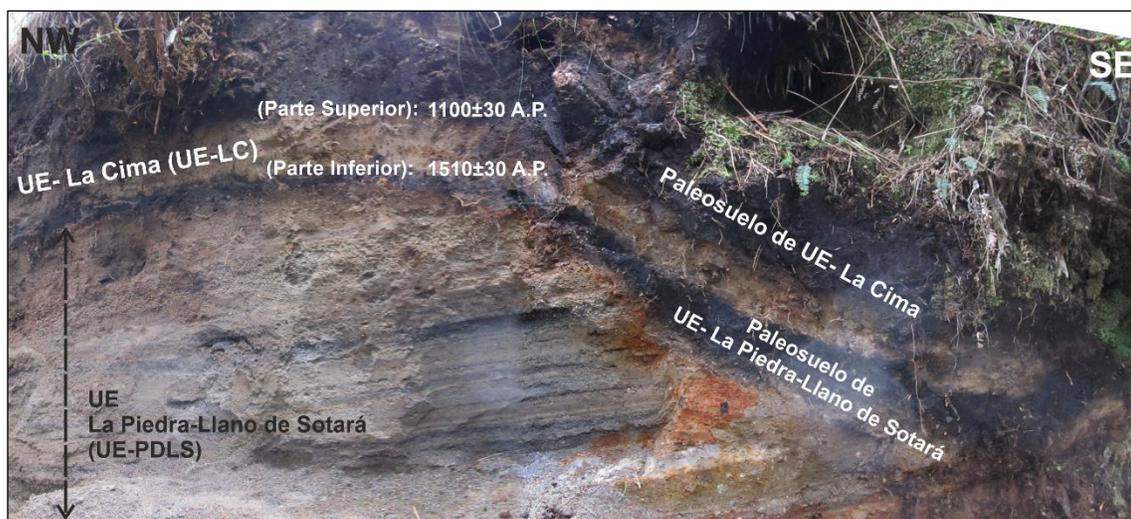


Figura 11. Unidad Eruptiva La Cima (UE-LC), partes superior e inferior
Suprayaciendo el paleosuelo de la Unidad Eruptiva La Piedra-Llano de Sotará (UE-PDLS)
Afloramiento en el camino a los termales
Fuente: autores

El depósito de esta unidad sugiere mecanismos eruptivos relacionados con actividad freática a freatomagmática, asociadas con explosiones parciales de domos generadas posiblemente de manera coetánea con los actuales. Parte de los depósitos de esta unidad eruptiva cubre las paredes internas del cráter del cono actual, y se encuentran, además, formando un abanico piroclástico sobre la zona de los termales en la parte alta noroeste y en los nacimientos del río Majuas.

2.4 Etapa de removilización de materiales en el volcán y caída de piroclastos

La removilización y transformación de los materiales de las CDPs generadas a lo largo de la historia eruptiva del volcán, han originado importantes flujos de escombros (*lahares*), encausados a través de los valles de ríos y quebradas que nacen en los flancos del volcán. Su carga ha sido transportada hasta zonas más bajas y lejanas como en el caso de los *lahares* Piedra Sentada, La Orquídea y El Tablón (los dos últimos no visibles en la cartografía), asociados a la Unidad Eruptiva La Piedra-Llano de Sotará (tabla 3, figura 9) que alcanzaron espesores locales hasta de 30 m, emplazados a través del río Quilcacé. De manera similar, se han generado *lahares* a partir de materiales de avalanchas de escombros, como los del depósito de la avalancha de escombros y *lahar* Río Negro (DA-RN) (figura 8), cuyo espesor alcanzó unos 90 m en sectores muy estrechos en la parte alta del valle del río Negro, al suroeste del volcán.

De otro lado, en el registro geológico del volcán, los depósitos de caídas piroclásticas, tanto de piroclastos transportados por el viento (ceniza y *lapilli*) como de proyectiles balísticos (bloques y bombas), no son claros, debido probablemente a que están cubiertos o fueron erosionados. No se descarta su generación durante las etapas de desarrollo puesto que es un fenómeno frecuente en la actividad de tipo vulcaniana, la cual ha sido dominante en el volcán Sotará.

El fenómeno de caídas piroclásticas se ha registrado en Colombia en casos durante los cuales han ocurrido emplazamientos de domos, como en el volcán Galeras (Cortés y Calvache, 1993; Pulgarín, 2005), el volcán Nevado del Huila (Monsalve *et al.*, 2011; Pulgarín y Laverde, 2014) y recientemente en el volcán Nevado del Ruiz (SGC, 2015), donde se han presentado emisiones de ceniza, acompañando este proceso, pero cuyo registro es borrado por los agentes hidrometeorológicos en poco tiempo dejando sin depósito la actividad asociada.

3 MONITOREO Y VIGILANCIA: ESTADO ACTUAL DEL VOLCÁN SOTARÁ

Este capítulo fue elaborado con la participación del grupo de evaluación y monitoreo de la actividad volcánica del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVS-Pop) de la dirección de Geoamenazas del SGC.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) (antes Ingeominas), inició las labores de monitoreo en noviembre de 1993 con la instalación de una estación sismológica telemétrica (Sotará) localizada en el sector nororiental del volcán.

En el año 2007 esta red de vigilancia se fortaleció con la instalación de un nuevo sensor sísmico de corto período (Oso). Desde este año en adelante, la red de monitoreo sísmico se ha rediseñado y ampliado constantemente. En el año 2012 se tenían instaladas cuatro nuevas estaciones de banda ancha Oso, Cerro Gordo, Triángulo y Agua Bonita, estas últimas instaladas como parte de la respuesta operativa del SGC ante el incremento en la actividad sísmica de fractura registrado entre junio y octubre del 2012.

Entre 2012 y 2018 se instalaron cuatro sensores sísmicos más (Pirámide, Peñón Bajo, Cerro Sombrero y Aguas Rojas) y se implementaron nuevas técnicas de monitoreo volcánico en el volcán Sotará, con la instalación de sensores para medir la deformación del suelo (GNSS, inclinómetros electrónicos y bases para mediciones EDM) y cámaras web para registrar variaciones en la actividad superficial. Para el monitoreo geoquímico en este volcán, los análisis geoquímicos en las fuentes termales Las Amarillas y Aguas Calientes se realizan desde el año 1996, mientras que el monitoreo del campo fumarólico Jelima se inició en 1999, siendo monitoreado periódicamente hasta la fecha.

En la actualidad la red de vigilancia del volcán Sotará está compuesta por 33 estaciones (figura 12), de las cuales 19 son telemétricas, y las 14 restantes corresponden a puntos de muestro (datos adquiridos directamente en campo, no telemétricas).

La sismicidad registrada del volcán está asociada principalmente a procesos de fracturamiento de roca de tipo volcano-tectónico (VT) y durante el tiempo de monitoreo se ha caracterizado por presentar aportes energéticos bajos. Desde el inicio del monitoreo, los niveles de sismicidad presentaban valores muy bajos, tanto en el número de eventos como en la energía asociada a los mismos, se registraban en promedio 6 eventos por mes, de baja magnitud.

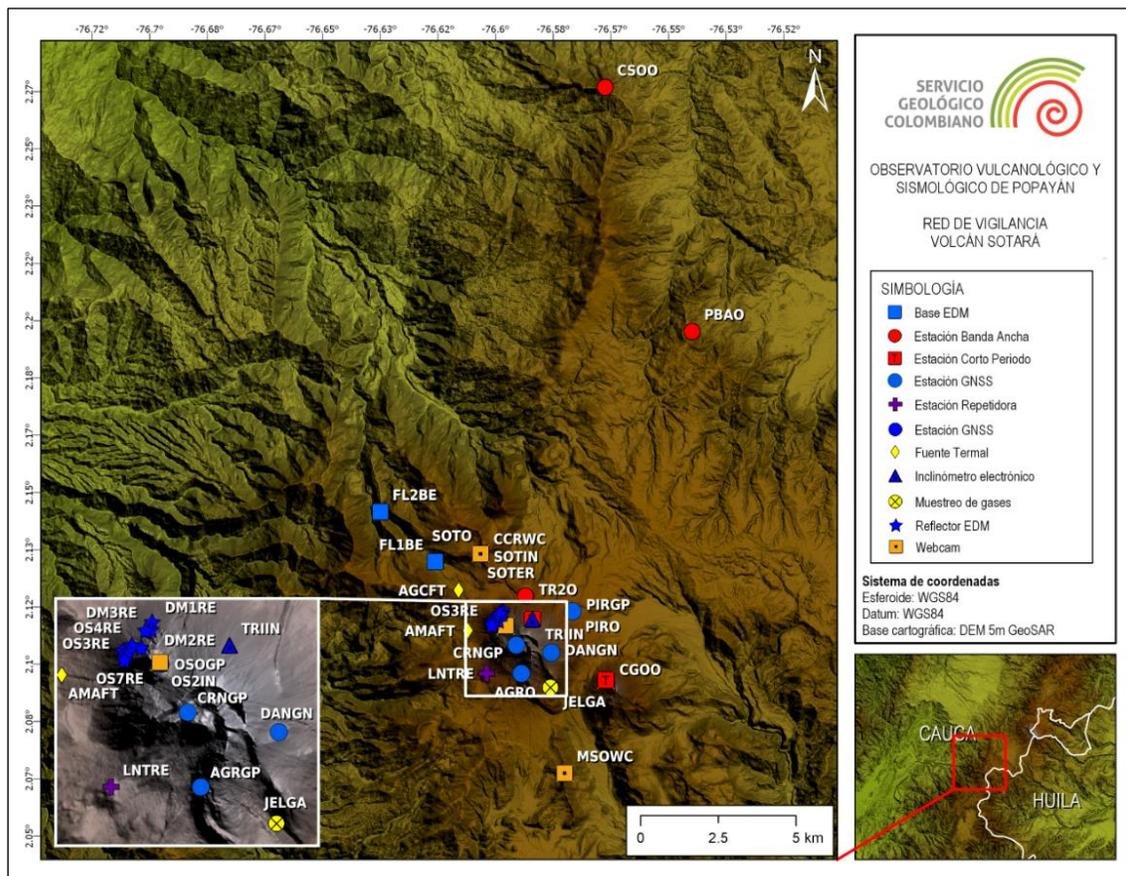


Figura 12. Red de vigilancia del volcán Sotará
 Localización de las diferentes estaciones y simbología
 Fuente: Grupo Monitoreo volcánico SGC-OVS-Popayán

A partir del año 2010 se dio un incremento en estos niveles con la ocurrencia de varios sismos VT localizados aproximadamente a 13 km al noroeste del volcán, dos sismos de MI (Magnitud local) 4,3 y 2,7; dos sismos de MI 4,5 y 2,7; un sismo de MI 3,5, y un sismo de MI 2,5 (figura 13).

Posteriormente, entre junio y octubre de 2012, se registró un enjambre de sismos VT contabilizándose un total de 9600 eventos, localizado entre 1,3 y 4,5 km al noreste de la cima del volcán, a profundidades que variaron entre 2 y 8 km (figura 14), la mayoría de los sismos fueron de baja magnitud; del total de estos eventos registrados solo fue posible localizar 770, de los cuales 166 tuvieron magnitud MI mayor o igual a 1, y 7 eventos con magnitud mayor o igual a 2, siendo la máxima MI registrada de 2,2. Para finales de octubre de ese año, la actividad sísmica regresó a niveles comparables a los valores previos al enjambre.

Desde del año 2012 la actividad del volcán se ha caracterizado por períodos de baja actividad seguidos por incrementos en el número de eventos, todos ellos de baja magnitud y una clara concentración de la actividad debajo del edificio del volcán, a profundidades entre 1 y 6 km. Se destacan en este período la actividad registrada entre noviembre de 2017 y enero de 2018 con la ocurrencia de 745 sismos ubicados debajo y alrededor del edificio volcánico, la mayoría de ellos a profundidades entre 2 y 6 km, con una magnitud máxima de 1,8; la actividad ocurrida septiembre y diciembre de 2018, en la que se registraron 709 sismos, la mayoría de ellos ubicados debajo del edificio volcánico a profundidades entre 1,5 y 4 km.

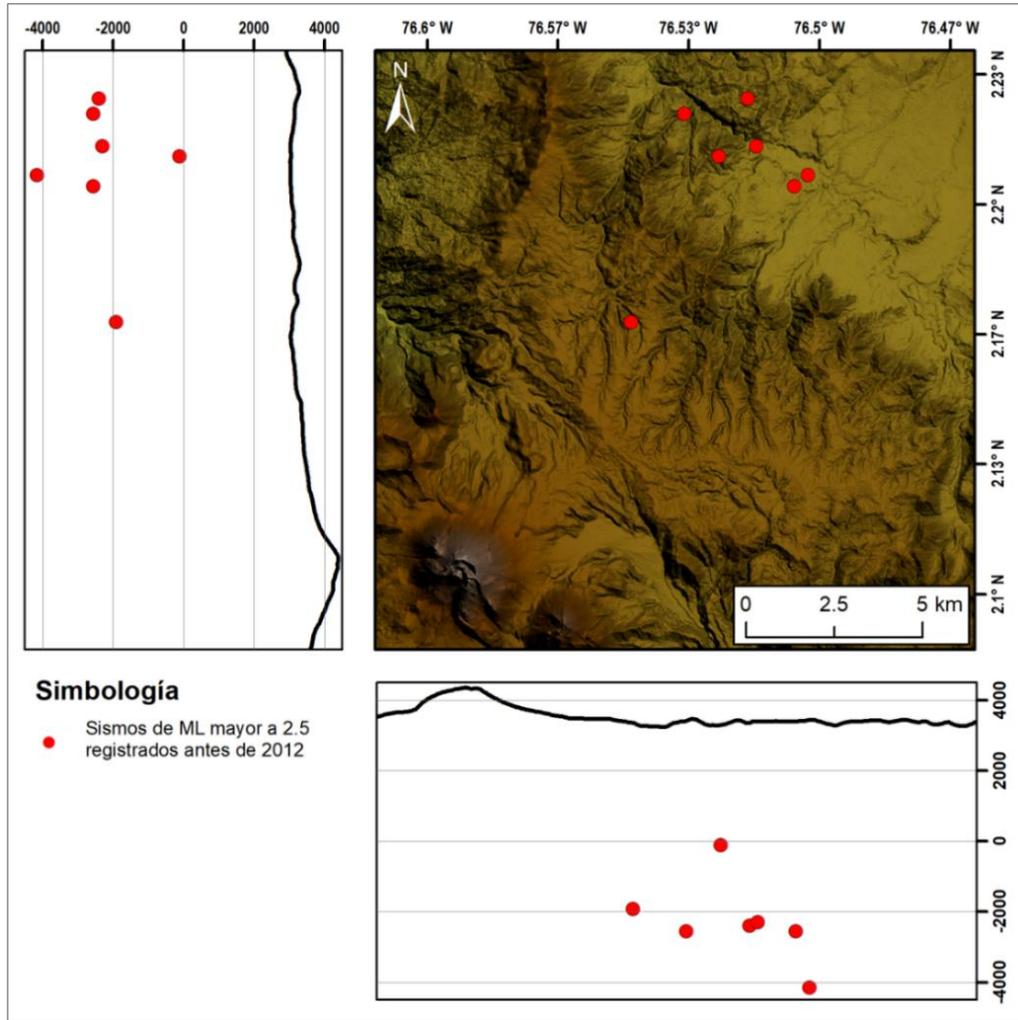


Figura 13. Mapa de localización de eventos volcano-tectónicos (VT) del Volcán Sotará ocurridos entre junio de 2010 y octubre de 2011

Los números indican la magnitud local (ML) de los sismos. Los cortes a la izquierda (corte transversal N-S) y abajo (corte transversal W-E) muestran las profundidades (m) de ocurrencia de los sismos

Fuente: Grupo Monitoreo y Vigilancia Volcánica SGC-OVS-Popayán

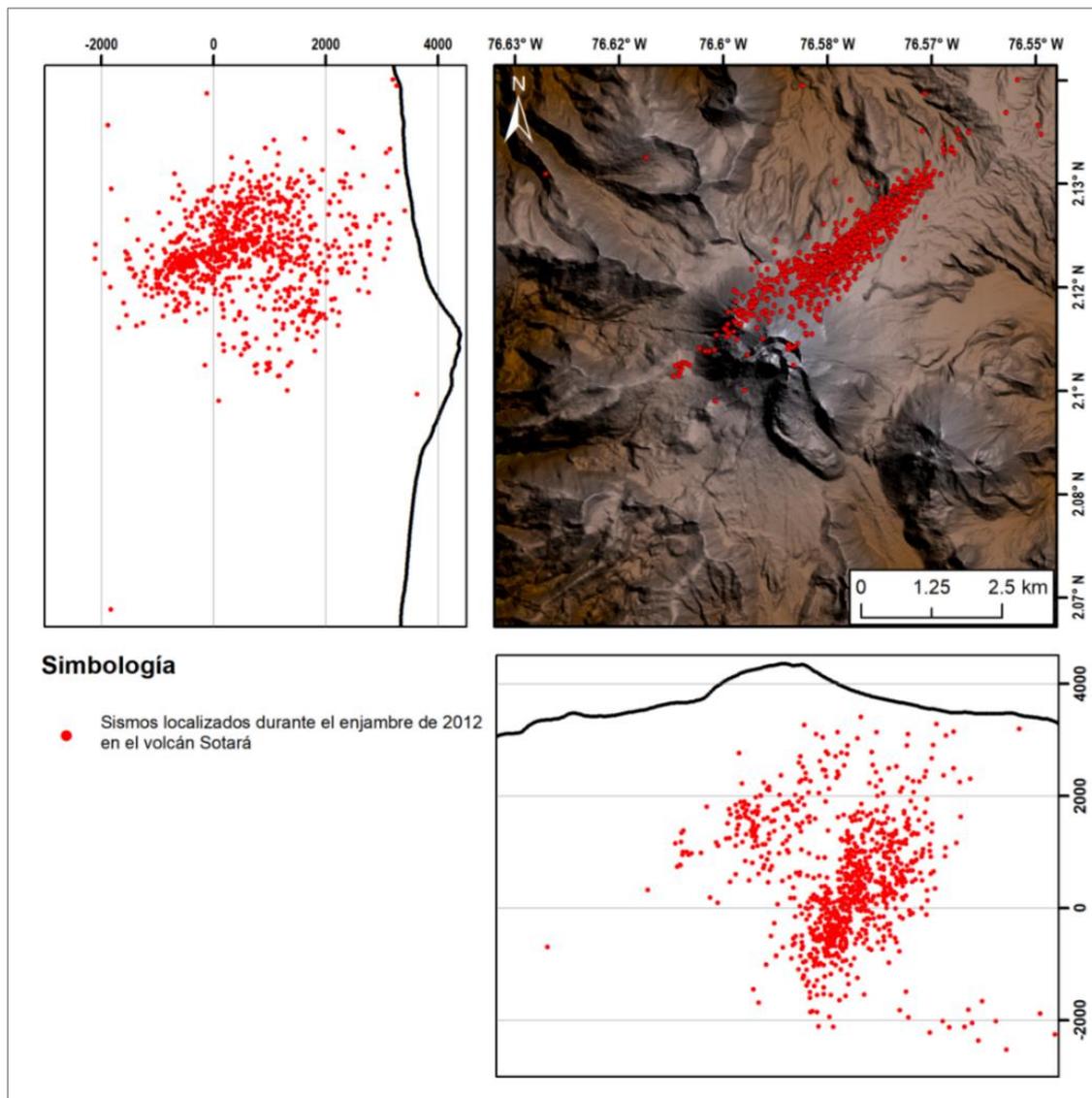


Figura 14. Mapa de localización del enjambre de sismos volcano-tectónicos (VT) Ocurridos entre junio y octubre de 2012 en el volcán Sotará. Las secciones transversales a la izquierda (corte transversal N-S) y abajo (corte transversal W-E) muestran las profundidades (m) de ocurrencia de los sismos

Fuente: Grupo Monitoreo y Vigilancia Volcánica SGC-OVS-Popayán

Desde septiembre 28 de 2019 se presentó un nuevo incremento de sismos VT, y hasta noviembre de 2019 se registraron 13 227 sismos, la gran mayoría de baja magnitud, siendo la máxima MI registrada de 2,1, localizados debajo del edificio volcánico a profundidades entre 2 y 6 km (figura 15). En este período también se registraron 145 eventos asociados con dinámica de fluidos, de bajo aporte energético, entre sismos de largo período (LP), tornillos (TO) y pulsos de tremor (TR).

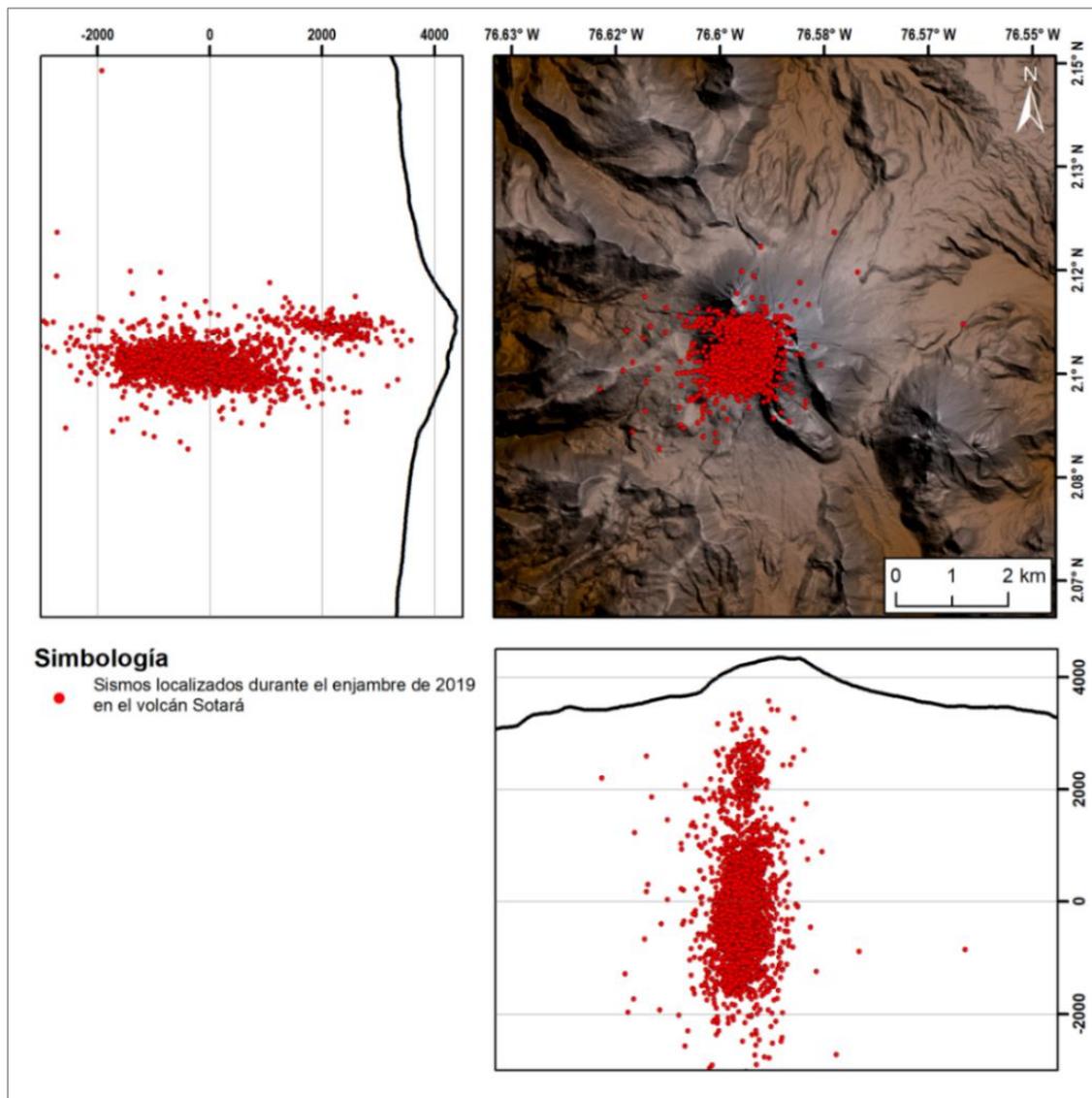


Figura 15. Mapa de localización del enjambre de sismos

Los puntos rojos representan los epicentros (mapa en planta) e hipocentros (cortes transversales) estimados para las localizaciones a eventos volcano-tectónicos (VT) del volcán Sotará, ocurridos entre septiembre y noviembre de 2019. Las secciones transversales a la izquierda (corte transversal N-S) y abajo (corte transversal W-E) muestran las profundidades (m) de ocurrencia de los sismos

Fuente: Grupo Monitoreo y Vigilancia Volcánica SGC-OVS-Popayán

En cuanto a la deformación, el proceso más relevante mostrado en el volcán fue el registrado durante 2011 y 2012 por la red de inclinometría, que estuvo acompañado de un incremento en el registro diario de sismos tipo VT y un aumento en la liberación de energía de los mismos. Durante este episodio el inclinómetro ubicado en la cima del volcán, registró un valor acumulado de $141 \pm 7 \mu\text{rad}$, que corresponde al mayor cambio de inclinación registrado desde 2011 hasta 2019.

El modelamiento de la deformación a partir de los cambios en la inclinometría, sugiere una fuente superficial que se mueve de manera similar a los epicentros del enjambre sísmico de 2012, cuya tendencia es lineal sobre el flanco noreste del volcán, lo que es interpretado como una pequeña intrusión magmática en forma de dique, cuyo volumen calculado es del orden de $15 \times 10^5 \text{ m}^3$, localizada superficialmente bajo la cima del volcán (Alpala *et al.*, 2017).

Para el enjambre registrado en el volcán Sotará durante los meses de septiembre a noviembre de 2019, la red de deformación no registró cambios asociados a dicha actividad. Cabe resaltar que en la actualidad se cuenta con una cobertura de la red en deformación mucho más densa que en 2012.

En el monitoreo de los procesos geoquímicos, en los puntos de control en la base del cono volcánico, sobre los nacimientos del río Blanco, sector occidental del volcán, se encuentran varias fuentes de aguas termales de composición sulfato-cloruradas, con alta influencia magmática y temperaturas que varían entre 33°C y 36°C (fuentes termales Las Amarillas) (Garzón, 1997). Esta actividad termal genera un alto grado de alteración de las rocas y depositación de geles de color amarillo-ocre que tapizan el fondo y los alrededores de estas fuentes (figura 16A).

De otro lado, en la parte media a baja del flanco sur del cono, se localiza el campo fumarólico Jelima (figura 16B), de forma alargada ($\sim 300 \text{ m}$) con unos 20 puntos de emanación activos, y una temperatura promedio de 87°C . En este sector las rocas están muy alteradas y adquieren una coloración gris blanquecina, con numerosos desprendimientos puntuales de rocas y precipitación de azufre. Los parámetros fisicoquímicos de fuentes termales y campos fumarólicos han permanecido estables en relación con la actividad sísmica y los procesos deformativos observados en el volcán para el episodio de 2012 y 2019.



Figura 16. Fuentes termales y campo fumarólico del volcán Sotará

A. Fuentes termales, nacimientos del río Blanco, muy cerca al cono volcánico. Nótese la depositación de geles amarillentos y la emanación de vapores. Salto de unos 20 m. B. Campo fumarólico localizado sobre el flanco sur del cono

Fuente: autores

La evolución de la actividad del volcán Sotará, desde que se tiene registro instrumental, se ve marcada hasta el momento por dos episodios principales, el primero de ellos corresponde al incremento sísmico de 2012, acompañado de un proceso deformativo, el cual sugiere una intrusión en forma de dique, de bajo aporte volumétrico. Así mismo, dada la escasa sismicidad de fluidos observada en el proceso y la estabilidad de los parámetros fisicoquímicos, incluso éstos últimos comparados con los medidos por Koller (1982) es posible que esta intrusión haya presentado poca interacción con el sistema hidrotermal.

El segundo episodio, corresponde al incremento sísmico que inició el 28 de septiembre de 2019 (Santacoloma *et al.*, 2019a, 2019b, 2019c) y se ha mantenido hasta mediados de diciembre de 2019, localizado bajo el edificio volcánico, y que se ha caracterizado por presentar bajo aporte energético; por otra parte, no se han registrado procesos deformativos y los parámetros fisicoquímicos monitoreados han permanecido estables para este período.

Sin embargo, durante diciembre de 2019, la red GNSS para monitoreo en deformación registraba un proceso inflacionario leve asociado a la actividad sísmica del último trimestre de 2019; este suceso hasta el momento no ha comprometido la estabilidad del sistema volcánico (Alpala y Alpala, 2020, en preparación).

Aunque la sismicidad disminuyó y la deformación retornó a sus niveles base, estos dos episodios demuestran que el Sotará es un volcán activo, que ha mostrado evidencias de nueva intrusión de magma, aunque pequeña, pero alcanzó niveles relativamente

superficiales (< 6 km) y que puede evolucionar rápidamente, debido a la naturaleza amenazante de las explosiones vulcanianas, que con frecuencia ocurren en un marco de relativa quietud sísmica y de desgasificación (Stix *et al.*, 1993).

Así mismo, debe tomarse en consideración que el volcán ha tenido intrusiones y explosiones de domos en los últimos ~4000 años, que evidencian este tipo de actividad e incluso, en la actualidad hay un conjunto de domos emplazado en su cima, obstruyendo el conducto volcánico.

De otro lado, considerando el incremento de la actividad sísmica del 24 de junio de 2012 y la evaluación interdisciplinar con otras áreas de monitoreo, el 8 de agosto del mismo año, el Servicio Geológico Colombiano evaluó y cambió el Nivel de Actividad del volcán Sotará de NIVEL VERDE (IV): VOLCÁN ACTIVO CON COMPORTAMIENTO ESTABLE a NIVEL AMARILLO (III): CAMBIOS EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA, que de acuerdo al análisis de la información obtenida a través de las diferentes técnicas que conforman la red de vigilancia para el Volcán Sotará, se ha mantenido durante los últimos años.

4 METODOLOGÍA

La zonificación presentada para la primera versión del mapa de amenaza volcánica del volcán Sotará, es el producto de la evaluación de la amenaza volcánica donde se consideran los fenómenos volcánicos asociados a la actividad más reciente de su historia y comportamiento eruptivo (Pulgarín y Zuluaga, 2019), complementada con la construcción de escenarios eruptivos pasado y de referencia, de acuerdo con Cepeda (2009) y con la simulación computacional de cada fenómeno volcánico analizado (Galarza *et al.*, 2019).

Como base inicial, se consideran los estudios de la geología, la estratigrafía e historia eruptiva del volcán (Pulgarín *et al.*, 2010), a los cuales se ha integrado nueva información geocronológica proveniente de las dataciones (^{14}C y Ar-Ar) hechas en diferentes laboratorios de radiocronología, como son: *Laboratoire de Radiochronologie, Université Laval Québec* (Canadá); *Beta Analytic Inc.*, (Estados Unidos); *Radiocarbon Laboratory of the Universität Zürich* (Suiza); *OSU Argon Geochronology Laboratory, Oregon State University* (Estados Unidos) (tablas 1 y 2).

Esta información y datos recolectados en trabajos de campo posteriores, han permitido la reinterpretación y reunificación de algunas de las unidades eruptivas previamente definidas (tabla 3) y que fueron la base para la evaluación de la amenaza volcánica.

En el proceso de simulación de los fenómenos volcánicos considerados se empleó el código *Titan2D* (Patra *et al.*, 2005) para los flujos piroclásticos (CDPs concentradas); para el caso particular de las oleadas (CDPs diluidas) se utilizó el módulo *Hazard Zone Proximal* de *Laharz_py* (Schilling, 2014); con los flujos de lava, se usó el programa *Lava C* (Richardson y Connor, 2014); para los flujos de lodo (*lahares*) se utilizó el software *FLO-2D* (O'Brien, 1995); las avalanchas de escombros se simularon con el módulo *Hazard Distal Zone* de *Laharz_py* (Schilling, 2014); y con el fenómeno de ondas de choque fue empleado el software *Hydesim* (Meyer, 2018).

Por último, para las simulaciones de caídas piroclásticas de proyección balística se empleó el código *Eject!* (Mastin, 2001), y para las caídas transportadas por los vientos se utilizaron *Tephra2* (Bonadonna *et al.*, 2005) y *TephraProb* (Biass *et al.*, 2016).

En el caso particular de las caídas piroclásticas transportadas por los vientos, para las cuales el volcán Sotará no tiene un registro geológico claro, se consideró como referencia la información proveniente del volcán Nevado del Huila (Colombia) de su fase eruptiva de 2007-2010 (Pulgarín y Laverde, 2014) por las características del fenómeno mostrado en ella durante la extrusión del domo más reciente; actividad similar al comportamiento mostrado por el propio volcán Sotará a través de su historia eruptiva.

De manera análoga, para las ondas de choque se tomó como referencia el volcán Galeras (SGC, 2015a; SGC, 2015b) pues en su historia eruptiva ha mostrado este tipo de fenómeno y se asume un comportamiento similar en eventuales erupciones del volcán Sotará dado su estilo vulcaniano.

Los análisis, el proceso y la depuración de la parametrización para el empleo de las herramientas computacionales están consignados y documentados en el informe sobre la simulación de fenómenos volcánicos en el volcán Sotará (Galarza *et al.*, 2019).

Es muy importante anotar que las simulaciones por sí solas, no representan un mapa de amenazas. Sus resultados deben ser evaluados y ajustados a la luz de los registros geológicos de los fenómenos volcánicos analizados, así como la formulación de escenarios eruptivos vinculados al estado actual del volcán.

El mapa de amenaza volcánica presenta una zonificación categorizada, en donde se identifican tres zonas: zona de amenaza Alta, zona de amenaza Media y zona de amenaza Baja, caracterizadas de acuerdo al grado de afectación ocasionada por los diversos fenómenos volcánicos considerados en la evaluación de la amenaza.

Se consideró, además, la información del monitoreo y la vigilancia volcánica que realiza el SGC-OVS de Popayán, que establece el nivel de actividad actual del volcán, y se convierte en un apoyo fundamental en el proceso de construcción del mapa de amenaza volcánica.

La zonificación presentada para el mapa de amenaza del volcán Sotará, se ciñe a los lineamientos establecidos en la metodología definida por el SGC (Dirección Técnica de Geoamenazas), en reuniones internas de los grupos de trabajo respecto al proceso de evaluación y zonificación de la amenaza volcánica.

El proyecto de la elaboración del mapa de amenaza volcánica del volcán Sotará incluye cuatro elementos que son el informe de la evaluación de la amenaza volcánica (Pulgarín y Zuluaga, 2019), el informe de simulaciones de eventos volcánicos (Galarza *et al.*, 2019), el mapa de amenaza volcánica (SGC, 2019) y la memoria del mapa de amenaza, que está representada en el presente informe.

5 AMENAZA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN SOTARÁ

El volcán Sotará hace parte de los volcanes activos colombianos monitoreados por el SGC a través de su Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVS-Pop), con una historia eruptiva explosiva caracterizada por la recurrente formación y destrucción de domos somitales.

Una eventual reactivación de la actividad eruptiva afectaría zonas de influencia con asentamientos poblacionales importantes tanto a nivel urbano como rural en varios departamentos (Cauca y Huila principalmente) que se verían alterados por efecto de los productos volcánicos generados en dicha reactivación; en ella se incluirían fenómenos como corrientes de densidad piroclástica (diluidas y concentradas), *lahares*, flujos de lava, caídas piroclásticas, ondas de choque, avalanchas de escombros, gases y sismos.

En la descripción de las zonas potencialmente afectadas por los diferentes fenómenos y de las zonificaciones de la amenaza volcánica, sólo se mencionan las poblaciones principales, debido a que llegar a nivel de corregimientos y veredas, especialmente para la zona de amenaza baja por caídas piroclásticas, implicaría la mención a cientos de centros poblados e incluso puedan quedar excluidos nombres de sitios que no aparezcan en la cartografía base.

Para la ubicación específica de los entes territoriales más pequeños, se recomienda su búsqueda e identificación en los mapas anexos, con escalas de impresión con un nivel de detalle hasta 1:100.000.

Para escalas más detalladas se recomienda la búsqueda e identificación en la versión digital de este mapa de amenaza volcánica, disponible en el geoportal institucional del SGC, con este enlace: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/Paginas/geoportal.aspx> ; y en el Motor de Integración de Información Geocientífica (MIIG), a través del siguiente enlace: <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/advanced.aspx>.

La información de los parques nacionales naturales, fue consultada en: www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/servicio-al-ciudadano/datos-abiertos/ ; y la cobertura de información de los resguardos indígenas fue consultada en: www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Comunidades-Indigenas/u6w6-884j. Estas coberturas de información fueron adicionadas en la estructura cartográfica (geodatabase) del mapa.

5.1 Amenaza por corrientes de densidad piroclástica (CDP) diluidas y concentradas (flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas)

Las corrientes de densidad piroclástica (CDP), se definen como la mezcla turbulenta de gas caliente y piroclastos que fluyen a lo largo de la superficie, controladas por el contraste de densidades (más pesadas) con la atmósfera (el medio circundante).

Pueden ser generadas por varios procesos eruptivos: colapso de columnas eruptivas, explosiones laterales, colapso gravitacional o explosión de domos de lava y de frentes de flujos de lava. Descienden por los valles y bajos topográficos del volcán a grandes velocidades que típicamente están entre decenas a varios centenares de km/h, y altas temperaturas (100°- 800°C), pueden viajar distancias hasta de varias decenas de km y cubrir áreas hasta de miles de kilómetros cuadrados, sobrepasando barreras topográficas como montañas, colinas y altos topográficos (Cioni *et al.*, 2015; Dufek *et al.*, 2015; Brown y Andrews, 2015; Cole *et al.*, 2015), expandiéndose en todas las direcciones alrededor del volcán.

Las CDP pueden ser concentradas o diluidas, lo cual depende de su mecanismo de emplazamiento y de la concentración de partículas sólidas y gases contenidos. Las CDP concentradas (flujos piroclásticos) son aquellas con un alto porcentaje de partículas y tienen dos partes, un flujo basal de fragmentos gruesos que se mueve a lo largo de la superficie del suelo y una nube turbulenta de ceniza (nube acompañante) que se eleva por encima del flujo basal y posteriormente se deposita; tienden a depositarse en los valles y bajos topográficos. Las CDP diluidas (oleadas piroclásticas) presentan un mayor contenido de gases, se caracterizan por ser más turbulentas, con mayor distribución areal; estas pueden producirse a partir de las CDP concentradas o generarse directamente a partir del colapso de columnas eruptivas u originarse directamente desde el cráter; su depositación suele estar menos confinada por la topografía (Dufek *et al.*, 2015) con la capacidad de superar barreras topográficas. Sus depósitos comúnmente muestran estructuras onduladas, aunque también se presentan masivos.

Representan una de las amenazas volcánicas más importantes por su naturaleza devastadora, debida a la condición que tienen estas corrientes piroclásticas de separarse en una nube (oleada) acompañante que viaja por encima de los drenajes, tomar direcciones inesperadas y por el flujo mismo que desciende por el canal de los ríos a altas temperaturas (Calder *et al.*, 2015).

Las CDP impactan, queman y entierra todo a su paso, ocasionan la muerte por asfixia e inhalación de ceniza caliente y quemaduras por altas temperaturas; enterramiento y/o destrucción de edificaciones e infraestructura, incendios, devastación y arrasamiento de áreas productivas, bosques y cultivos (Baxter, 1990). La supervivencia a una CDP es

mínima, tanto por el flujo de calor (altas temperaturas) que ellas llevan, como por las partículas que las componen al ser inhaladas.

Frecuentemente, de manera consecutiva, o simultáneamente, se pueden generar directamente *lahares* a partir del material de estas CDP, mezclado con aguas lluvias, cuerpos de agua, represamientos etc.; añadiendo una amenaza más a estos fenómenos volcánicos, se constituyen en una de las principales causas de los mayores desastres volcánicos en la historia, con graves consecuencias sobre la vida humana, convirtiéndose en un gran reto en la tarea de evaluación de la amenaza y la reducción del riesgo principalmente en zonas densamente pobladas.

En particular para el volcán Sotará, la amenaza por CDP se cataloga como alta, por ser uno de los eventos más significativos y de mayor distribución en el último intervalo de la historia del volcán; representadas en los depósitos de la Unidad Eruptiva La Piedra-Llano de Sotará.

La zonificación de la amenaza por este fenómeno (figura 17) se hace con base en los registros geológicos, principalmente de los depósitos asociados a la Unidad Eruptiva La Piedra-Llano de Sotará, apoyada en los resultados de las simulaciones realizadas con el programa *TITAN 2D*, y el módulo *Hazard Zone Proximal* del programa *Laharz_py*.

Los códigos de simulación utilizan en general, parámetros de volúmenes y espesores encontrados en los depósitos dejados por el flujo. Para el caso del volcán Sotará, el volumen simulado de $8 \times 10^7 \text{ m}^3$ fue obtenido a partir de la extensión de los depósitos cartografiados y los espesores encontrados de la unidad eruptiva mencionada, del registro geológico del volcán.

La zona de afectación por CDPs se encuentra categorizada en amenaza alta e incluye las áreas proximales del volcán, los valles de los ríos Quilcacé y quebrada Flautas al noroeste del mismo, cubriendo áreas en donde se encuentran ubicadas comunidades como Las Vegas, Chapa, San Roque, El Churo, entre otras zonas rurales aledañas; también las cuencas de los ríos Blanco y Negro, al oeste suroeste, afectando poblaciones como Rioblanco entre otros. En el sector este y noreste del edificio volcánico, se verían afectadas áreas correspondientes a los valles de la quebrada Sotará y del río Negro en inmediaciones del sector del Resguardo indígena de Paletará (municipio de Puracé). Hacia el departamento del Huila, se podrían ver afectados sectores de la cabecera del río Majuas al sureste del volcán y que pertenecen al municipio de San Agustín.

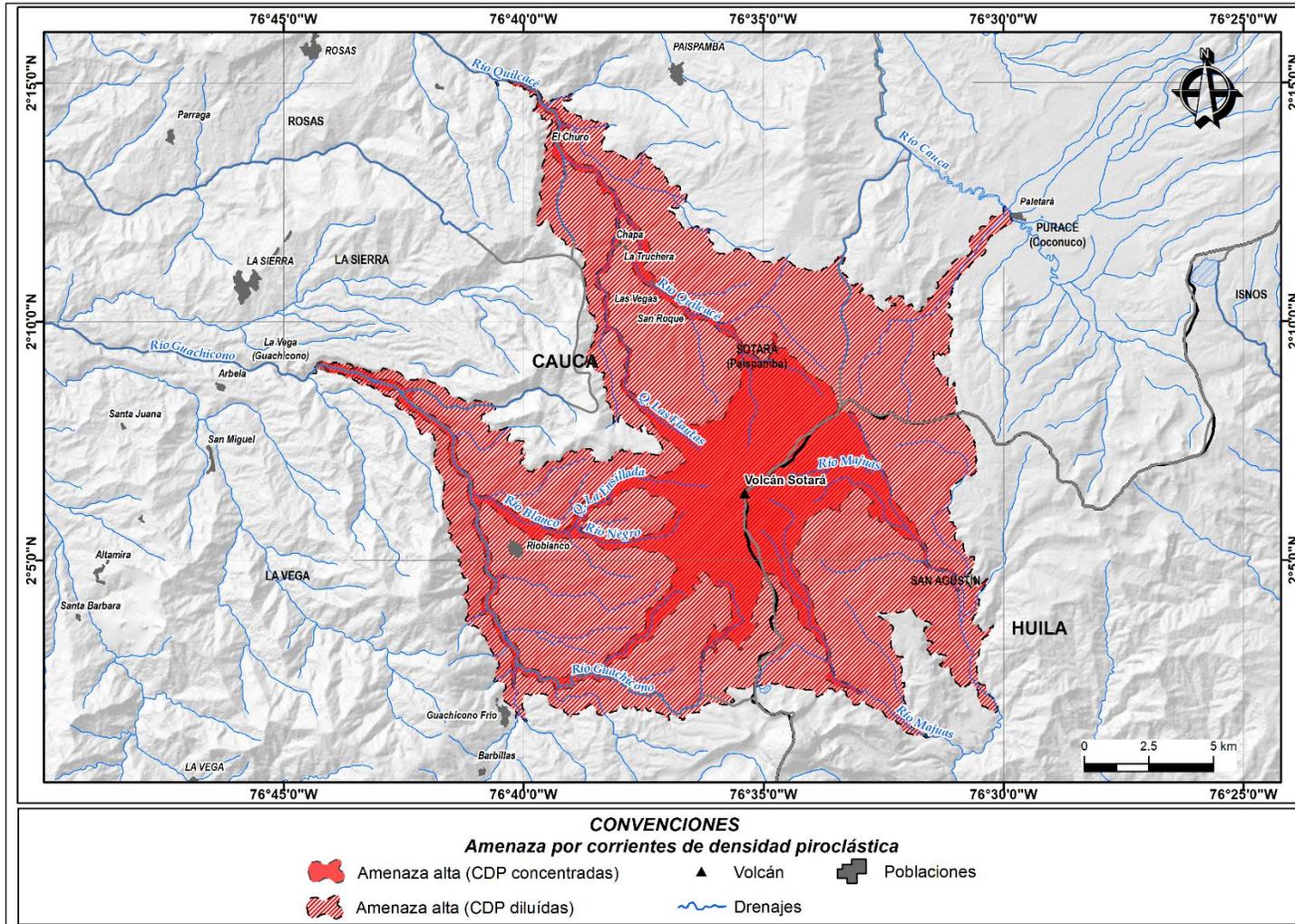


Figura 17. Zonificación integrada de la amenaza alta por corrientes de densidad piroclástica (CDPs) concentradas (flujos piroclásticos) y diluidas (oleadas piroclásticas)

Fuente: autores

5.2 Amenaza por *lahares*

Los *lahares*, también llamados flujos de escombros, pueden generarse durante las erupciones volcánicas o por procesos secundarios posteriores a ellas, cuando se da paso a la removilización de materiales no consolidados en las laderas del volcán.

Se originan cuando grandes cantidades de agua (proveniente de ríos, quebradas, represamientos de cauces, lluvias torrenciales, lagos intracratéricos, descongelamiento de glaciares o de la erupción misma) se mezclan con sedimentos o materiales volcánicos previamente depositados sobre la cima y los flancos del volcán (fragmentos de rocas que varían desde arcilla hasta bloques de decenas de metros de diámetro), además con suelo, escombros y biomasa representada en troncos de árboles y otros tipos de vegetación, etc.). También se pueden generar a partir de material expulsado directamente del volcán al momento de una erupción que se mezcla con cuerpos de aguas disponibles, para luego encausarse desplazándose a grandes velocidades por los valles de los drenajes que nacen en el volcán, en donde pueden incorporar y depositar materiales a su paso.

El volumen y comportamiento de los *lahares* dependen de la cantidad de material incorporado y la cantidad de agua presente. En el caso de *lahares* voluminosos, pueden aumentar hasta diez veces su volumen inicial a medida que se mueven pendiente abajo. En áreas de fuertes pendientes pueden exceder los 200 km/h, pero a medida que se alejan del volcán, y desaceleran en áreas topográficamente más bajas, eventualmente comienzan a depositar parte de la carga de sedimentos y pueden decrecer en tamaño (USGS, 2019). Estos flujos entonces pueden generarse durante las erupciones volcánicas (primarios o sineruptivos) o después de ellas (secundarios o posteruptivos). Los fragmentos de roca que cargan los *lahares*, los hacen altamente destructivos y la gran cantidad de agua que contienen les permite viajar incluso por pendientes muy suaves de la topografía e inundar áreas bastante distantes a su fuente.

Los *lahares* se clasifican en un amplio rango según la concentración de sólidos contenidos, pero en general pueden denominarse como flujos de escombros cuando son flujos muy viscosos o espesos, que se asemejan a concreto mojado; o flujos hiperconcentrados si son flujos más fluidos que se consideran transicionales entre flujo de escombros y flujo de corriente (Vallance y Iverson, 2015)

Ocasionalmente los *lahares* también son llamados “flujos de lodo”, pero realmente este término es utilizado para denotar *lahares* que tienen más de la mitad del contenido de partículas de tamaño arena o menor a 2 mm. Estos tipos de flujos frecuentemente ocurren durante el mismo evento, siendo la parte frontal del *lahar* altamente concentrada pasando transicionalmente a ser más diluido en su zona posterior. En el

recorrido de los *lahares* y debido a la incorporación o depositación de materiales o de cuerpos de agua, pueden darse transiciones entre los diferentes tipos de ellos.

Estos flujos son fenómenos devastadores cuya naturaleza destructiva está relacionada con su velocidad, alcance y composición, pudiendo alcanzar velocidades y distancias considerables dependiendo de la morfología de los sitios por los cuales avanza. Los *lahares* pueden destruir casi cualquier estructura y arrasar todo a su paso, debido al impacto de los enormes bloques (de incluso toneladas de peso) y escombros que viajan suspendidos en el flujo y la vigorosa erosión lateral y basal que producen (Pierson *et al.*, 2014). Provocan el enterramiento de grandes extensiones de terreno, cultivos, poblaciones, e infraestructura (vías, construcciones, puentes, edificaciones etc.) y aislamiento de las áreas que quedan sepultadas bajo toneladas de sedimentos. Por su velocidad y energía, la probabilidad de sobrevivir a su impacto directo es mínima.

Las áreas zonificadas por afectación de este tipo de fenómeno se categorizan en amenaza alta (figura 18) y se delimitaron considerando los depósitos asociados con el *lahar* de Río Negro (generado a partir de los depósitos de una avalancha de escombros producida en un colapso de flanco sufrido por el edificio volcánico), y apoyados en los resultados de simulaciones (utilizando un volumen $5 \times 10^7 \text{m}^3$) con el código *FLO-2D*, que incluye características granulométricas del depósito, topografía e hidrografía de la zona entre otros más.

Las principales áreas afectadas por el descenso de *lahares* incluyen hacia el sector noroeste los cañones de los ríos Quilcacé y su afluente la quebrada Flautas; estos flujos descenderían por el río Quilcacé alcanzando distancias de hasta 40 km en su recorrido, desde su nacimiento en el flanco del volcán. Afectando los poblados de San Roque donde los flujos llegarían a alcanzar 7 m de altura de inundación, Las Vegas donde alcanzarían una altura aproximada de inundación de 21 m, en La Truchera podrían llegar hasta 29 m de altura de inundación y la zona baja aldeaña a la quebrada en el sector de Chapa podrían alcanzar 11 m de altura de inundación, además de la vereda El Churo donde llegarían a alcanzar alturas de hasta 34 m de altura de inundación y otros asentamientos aguas abajo.

Por el flanco oeste del volcán, descenderían a través de los valles de los ríos Blanco y Negro, que unidos desembocan al río Guachicono, y se extenderían por casi 60 km, afectando áreas rurales como Guachicono Frío localizado en límites entre los municipios de Sotará y La Vega; además de las poblaciones de La Vega-Guachicono con una altura de inundación que llegaría a 37 m y de Aguas Muertas con alturas de inundación que alcanzarían hasta 3 m, hasta alcanzar la zona rural de Piedrasentada (Patía), entre otros sitios ubicados a lo largo de estos drenajes.

Por las laderas sureste del edificio volcánico descendería los lahares desde los nacimientos del río Majuas hasta su desembocadura en el río Magdalena, alcanzado distancias hasta de 30 km aproximadamente, afectando zonas rurales de Puerto Quinchana (municipio de San Agustín, Huila) donde alcanzarían alturas de inundación de hasta 5 m, entre otros sectores ubicados en el área de influencia del río Majuas.

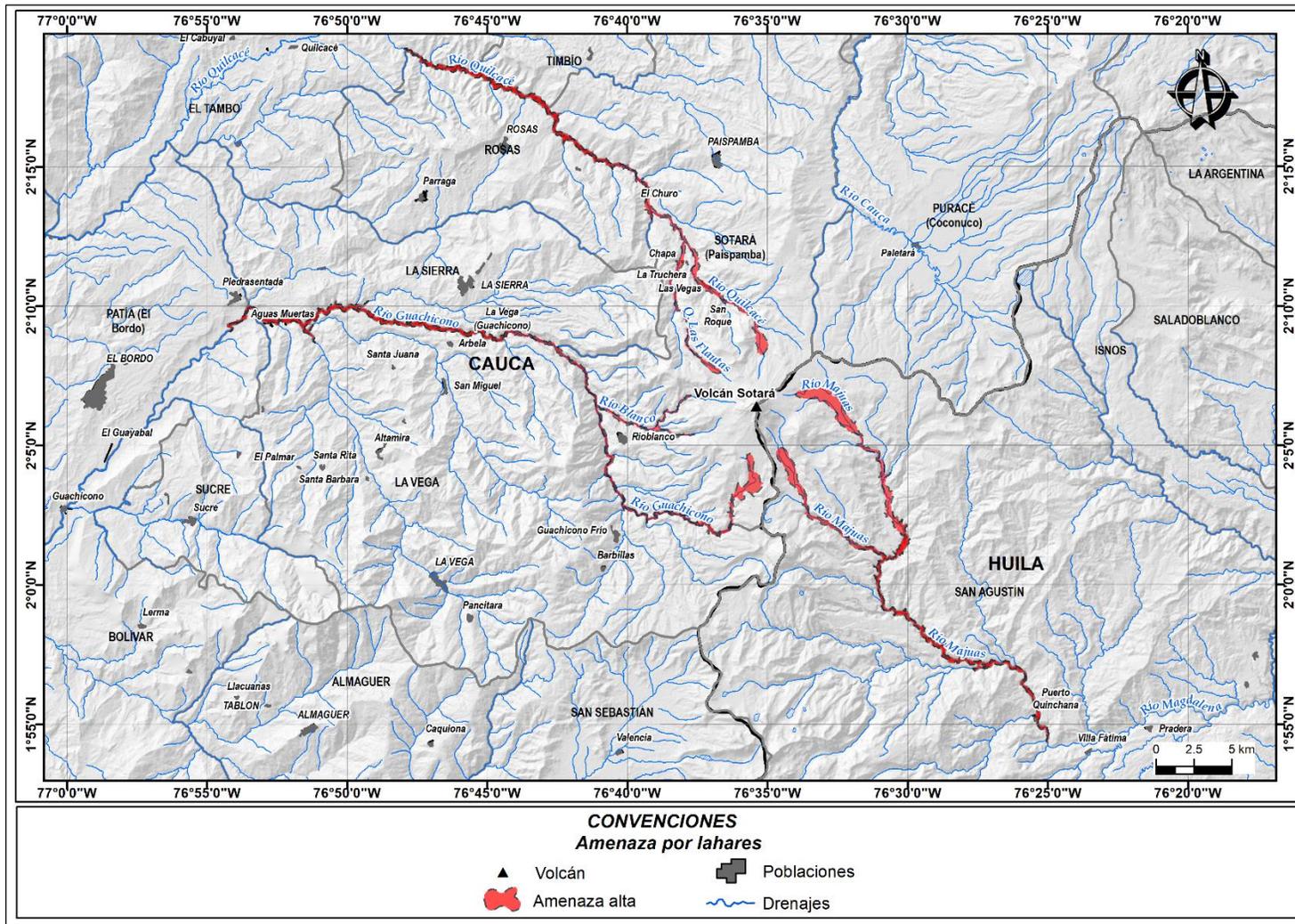


Figura 18. Zonificación de la amenaza por lahares en el área de influencia del volcán Sotará (amenaza alta)
Fuente: autores

5.3 Amenaza por flujos de lava y domos de lava

Los flujos de lava se consideran corrientes de roca fundida, relativamente fluidas, emitidas a través del cráter o grietas en los flancos del cono activo de un volcán; al salir a superficie estas forman lóbulos que tienden a canalizarse a lo largo de los valles. La velocidad, temperatura y alcance de estos flujos depende principalmente de su composición química, de las características morfológicas, la pendiente de la superficie de emplazamiento y las barreras topográficas que estos encuentren a su paso. Las lavas pueden alcanzar temperaturas en un rango de 800° a 1200°C (Kilburn, 2015).

Los flujos de lava pueden arrasar lo que encuentren en su camino, causando incendios, destrucción y sepultamiento de edificaciones, afectando considerablemente los asentamientos humanos e infraestructura e inutilizando los suelos y terrenos por largo períodos de tiempo; en ocasiones generan explosiones cuando los flujos encuentran cuerpos de agua, zonas húmedas, pantanosas o cuando cubren áreas con abundante vegetación.

Existen lavas fluidas y viscosas, las fluidas pueden extenderse hasta decenas de kilómetros desde el foco de emisión. Lavas menos fluidas (como las del volcán Sotará) se mueven solamente a unos pocos kilómetros por hora y rara vez se extienden a más de 8 km desde el punto de emisión.

Cuando las lavas son muy viscosas o se emplazan más cristalizadas (más frías) suelen acumularse en el centro de emisión formando montículos escarpados o en forma de cúpula, conocidos como domos de lava, que al enfriarse llegan a taponar los conductos volcánicos. Estos domos pueden quedarse allí emplazados y enfriarse, otras veces pueden explotar o colapsar aun estando calientes, generando corrientes de densidad piroclástica (flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas). Cuando los flujos de lava o domos se emplazan sobre o debajo de grandes masas de hielo, pueden desencadenar *lahares*, por fusión del agua congelada.

Los flujos de lava tienen bajas tasas de movimiento, por lo tanto, las personas y animales que estén a su paso pueden evacuar y alejarse de ellos. Sin embargo, todo en su camino será derribado, sepultado y quemado debido a sus altas temperaturas y a la gran presión lateral y de fondo que éstos generan. Las lavas pueden causar: destrucción de infraestructura, enterramiento, quema de cultivos e incendios forestales; muertes atribuidas a los flujos de lava son a menudo debido a causas indirectas, tales como las explosiones cuando la lava interactúa con el agua, o asfixia debido a los gases tóxicos acompañantes. En caso de que exista una erupción que genere flujos de lava, se debe prestar particular atención al avance de los mismos hacia centros poblados o infraestructuras.

Para la zonificación de la amenaza por flujos de lava (categorizada en amenaza alta) (figura 19) se tomó como referencia el depósito del flujo asociado a la Unidad Eruptiva Domo Colada, localizado en el flanco sureste en la parte alta del edificio volcánico, usando un volumen de $1,09 \times 10^8 \text{ m}^3$ y el apoyo en los resultados de las simulaciones realizadas con los códigos *Lava C* (Richardson y Connor, 2014) que incluye parámetros relacionados con la composición, viscosidades, longitudes y volúmenes del flujo.

Las áreas en amenaza alta afectadas por eventuales flujos de lava incluyen las partes altas del volcán, descendiendo por los valles del río Quilcacé al norte, hasta aproximadamente 2,7 km desde su nacimiento. Además, se encauzarían por los valles de los ríos Blanco y Negro al oeste extendiéndose unos 8,4 km, y por el río Majuas al sureste, hasta unos 5,2 km de distancia desde el cráter, afectando sectores rurales de los municipios de Sotará (Cauca) y San Agustín (Huila) incluyendo áreas del PNNP.

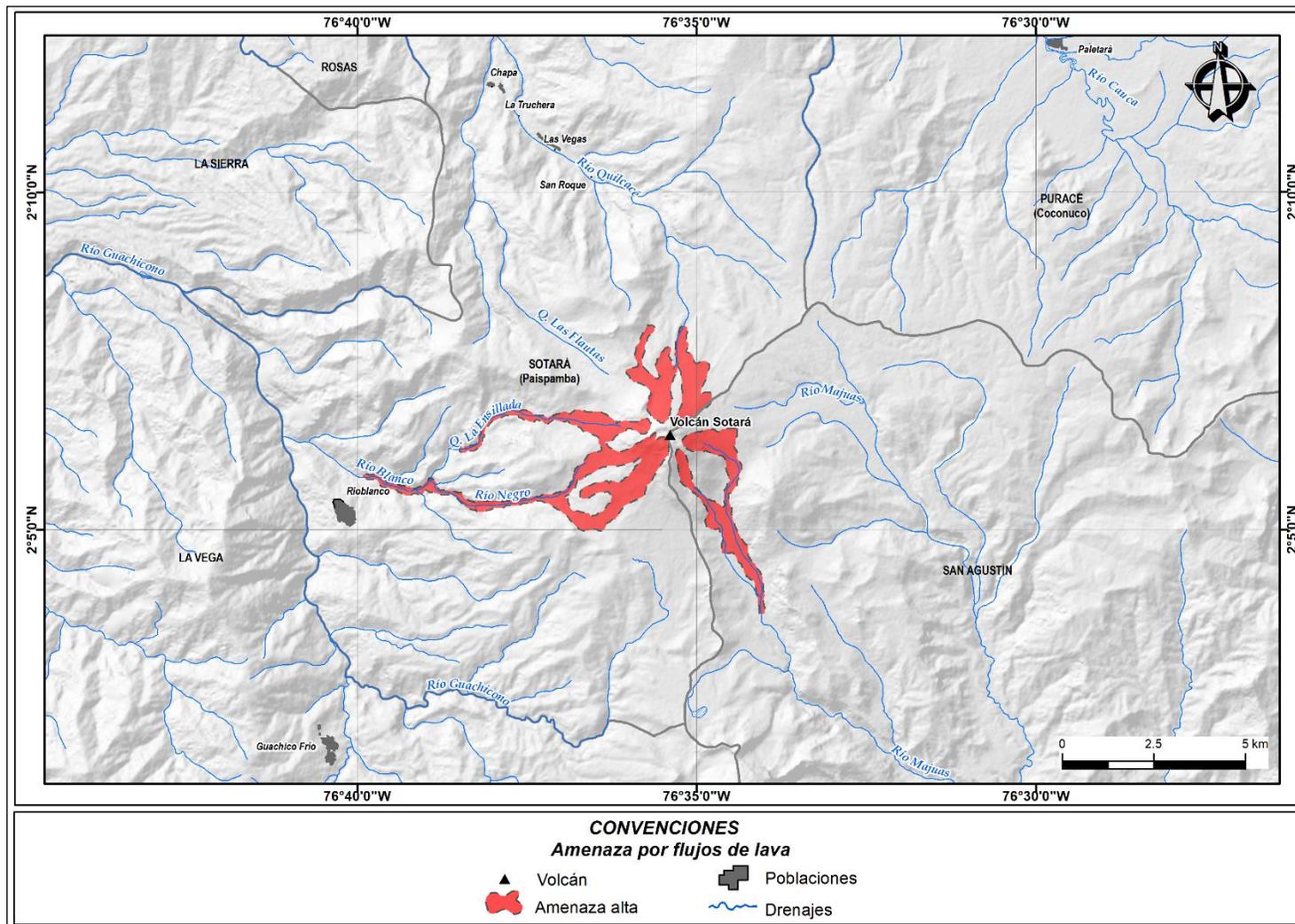


Figura 19. Zonificación de la amenaza por flujos de lava en el volcán Sotará (amenaza alta)

Fuente: autores

5.4 Amenaza por caídas piroclásticas

Las partículas expulsadas en las erupciones volcánicas, en forma de fragmentos de roca sólida y que caen al terreno de nuevo por gravedad son comúnmente denominadas caídas piroclásticas; éstas pueden ser transportadas por el viento a grandes distancias (algunas veces de cientos o incluso a miles de kilómetros, si son de tamaños extremadamente finos), o expulsadas balísticamente teniendo un radio de acción bastante restringido.

En el caso de los piroclastos de caída transportados por acción eólica, normalmente sus espesores disminuyen con la distancia al volcán y su distribución está condicionada a las direcciones e intensidades de los vientos. Los fragmentos de tamaños menores a 2 mm se denominan ceniza, aquellos entre 2 y 64 mm son llamados *lapilli* y los fragmentos mayores a 64 mm, que son expulsados como proyectiles balísticos, son conocidos como bombas (del magma que está saliendo) y bloques (rocas del conducto volcánico o del cráter; de magmas anteriores).

5.4.1 Amenaza por caídas piroclásticas transportadas por el viento

La amenaza asociada a este fenómeno, tiene importancia debido a los efectos nocivos que genera en las áreas hacia donde las cenizas se dispersan, afectando las condiciones respiratorias de los seres humanos y animales. Las partículas más finas asociadas a las caídas piroclásticas suspendidas en el aire reducen la calidad del mismo, la visibilidad y son muy molestas al inhalarse, pudiendo generar irritación de los pulmones y causar síntomas de asfixia (Baxter *et al.*, 1990). En estudios recientes se ha encontrado que exposiciones muy prolongadas a cenizas muy finas ricas en sílice, pueden producir enfermedades pulmonares severas por silicosis (Baxter *et al.*, 2014).

Infraestructura como edificaciones localizadas en las áreas afectadas se ve sometida a sobrecarga, por la acumulación de cenizas en techos y estructuras, pudiendo ocasionar su enterramiento o desplome; las caídas generan además contaminación de fuentes hídricas y daños a la agricultura, el cubrimiento o enterramiento de terrenos y cultivos entre otros efectos.

Otro aspecto tiene que ver con la afectación provocada en la navegación aérea, que se ve comprometida con la posibilidad de que las partículas más finas en suspensión ingresen en las turbinas de los aviones ocasionando daños e interrumpiendo el tráfico aéreo; además la restricción en las condiciones de visibilidad en los entornos en donde las caídas de piroclastos alcancen a dispersarse.

En el volcán Sotará el registro histórico de caídas piroclásticas no es claro, y probablemente fue erosionado; sin embargo, teniendo en cuenta las características de su comportamiento eruptivo de destrucción de domos, es seguro que éstas se generarán en una eventual reactivación.

Las zonas de amenaza delimitadas para este fenómeno (figura 20), fueron trazadas a partir de los resultados de las simulaciones realizadas usando los códigos *TephraProb* y *Tephra2*, en donde se integraron los datos de perfiles de vientos, altura de columna, densidad del material, tamaño de grano, entre otros parámetros que son indispensables para la simulación de este fenómeno. Cabe aclarar que para este trabajo se tomó como referencia las fases eruptivas presentadas entre los años 2007-2010 por el volcán Nevado del Huila (Pulgarín y Laverde, 2014) en ausencia de registros propios del volcán Sotará que permitieran parametrizarlos. De esta forma, se consideró una altura de columna eruptiva de 10 km a partir del cráter del volcán.

En este caso la delimitación de la amenaza, está categorizada en tres zonas (amenaza alta, media y baja), la cual se definió con base en la acumulación (espesor) del material piroclástico depositado según la tendencia principal de los vientos, y que se tipifica de la siguiente manera: zona de amenaza alta, con acumulaciones mayores a 10 cm; zona de amenaza media, con espesores entre 1 cm y 10 cm; y zona de amenaza baja, con acumulaciones entre 0,5 mm y 1 cm.

Como parte de la metodología para la zonificación por caídas piroclásticas dispersadas por el viento, adicionalmente, se consideró el trazado de tres círculos concéntricos con líneas discontinuas, cuyos radios son los ejes máximos en cada una de las zonas de amenaza por este tipo de evento volcánico. Cada uno de estos círculos definen las áreas de amenazas que pueden ser afectadas por las caídas piroclásticas, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluso aquellas contempladas por las tendencias principales de los vientos). Estas zonas también se categorizan, respectivamente, en amenaza alta, media y baja y sus trazos llevan los colores correspondientes a ellas (figura 20).

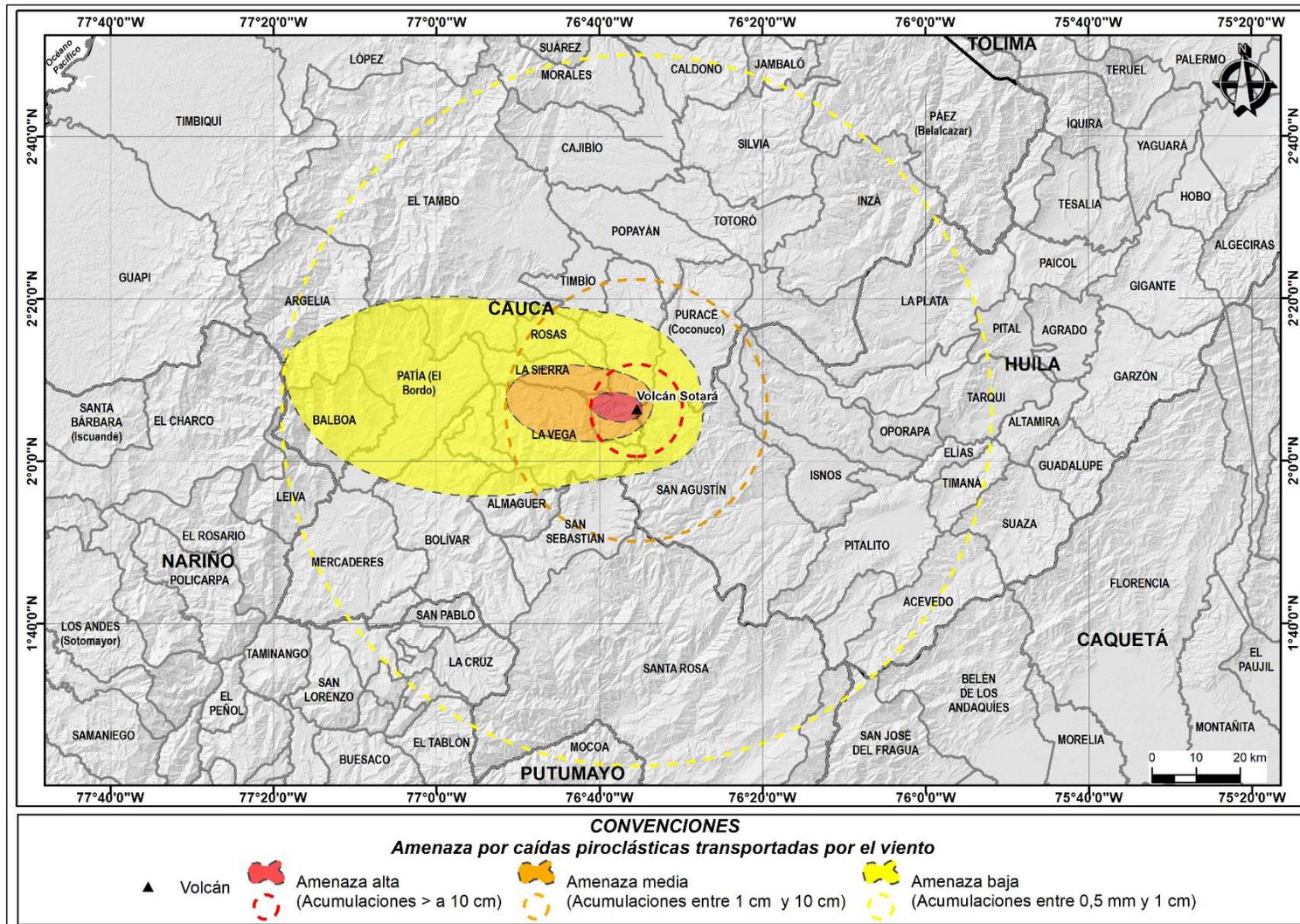


Figura 20. Zonificación por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos en el volcán Sotará

Fuente: autores

Considerando la tendencia principal de los vientos, las áreas afectadas por caídas piroclásticas se encontrarían hacia el sector oeste principalmente, lo que indicaría una dispersión de las caídas transportadas por el viento hacia lugares localizados en dicha dirección.

La zona de amenaza alta por caídas piroclásticas transportadas por el viento cubriría un área aproximada de 61 km² comprendida entre la cima del volcán y un radio máximo de 10,6 km hacia el oeste noroeste (acorde a las simulaciones) en la dirección predominante del viento, con espesores de acumulación esperados mayores a 10 cm, afectando sectores rurales y centros poblados de los municipios de: Sotará y La Sierra en el departamento del Cauca; San Agustín en el departamento del Huila), incluyendo áreas del PNNP (figura 20).

Para esta misma zona de amenaza alta, considerando el área que incluye todas las direcciones del viento, cubriría una superficie aproximada de 353 km² en un radio de 10,6 km, afectando sectores rurales y centros poblados de los municipios de Puracé, La Vega, La Sierra y Sotará (Las Vegas, Rioblanco) en el departamento del Cauca; y San Agustín en el departamento del Huila; incluyendo áreas del PNNP (figura 20).

La zona de amenaza media por caídas piroclásticas transportadas por el viento cubriría un área aproximada de 396 km² con un alcance máximo de 30 km desde la fuente hacia el oeste noroeste (acorde con las simulaciones) en la dirección predominante del viento, abarcando desde el límite de la zona de amenaza alta hasta el inicio de la zona de amenaza baja, con espesores de acumulación esperados entre 1 y 10 cm. Se verían afectadas las cabeceras municipales, poblados y sectores rurales de los municipios de La Sierra (incluyendo los territorios del Resguardo indígena El Moral), Sotará (poblados de Rioblanco, Las Vegas y San Roque) en el departamento del Cauca y en los poblados y sectores rurales del municipio de La Vega (Arbela, San Miguel, Altamira, Santa Juana y el Resguardo indígena de Guachicono) y Rosas en el departamento del Cauca y de San Agustín en el departamento del Huila; incluyendo áreas del PNNP (figura 20).

Para esta misma zona de amenaza media, considerando el área que incluye todas las direcciones del viento alrededor del volcán (círculos en color naranja a trazos en el mapa), cubriría una superficie aproximada de 2474 km² comprendida entre el límite de la zona de amenaza alta (círculos a trazos en color rojo en el mapa) y el inicio de la zona de amenaza baja, con un alcance máximo de 30 km desde la fuente y espesores de acumulación esperados entre 1 y 10 cm. En esta zona se verían afectadas las cabeceras municipales, poblados y sectores rurales de los municipios de La Sierra (La Cuchilla y la Cuchilla Alta y los territorios del Resguardo indígena El Moral), La Vega (Albania, Altamira, Arbela, Barbillas, Guachicono, Pancitará, San Miguel, Santa Bárbara, Santa Juana y Santa Rita junto con el Resguardo indígena de Guachicono), Puracé (Coconuco,

Paletará y territorios de los Resguardos indígenas Kokonuco y Paletará), Rosas (Céfiro, Párraga y Sauce), Sotará (Paispamba, Chapa y territorios de los Resguardos indígenas Kokonuco y Poblazón) y Timbío (Cruces, Las Huacas y territorios del Resguardo Indígena de Kitek Kiwe) en el departamento del Cauca, y en los poblados y sectores rurales de los municipios de Popayán, Almaguer, Santa Rosa y San Sebastián (Valencia) en el Cauca; y San Agustín (Puerto Quinchana), Saladoblanco e Isnos en el departamento del Huila; incluyendo áreas del PNNP (figura 20).

La zona de amenaza baja por caídas piroclásticas transportadas por el viento cubriría un área aproximada de 2982 km²; esta zona está comprendida entre el límite de la amenaza media y el alcance máximo de las caídas a 81 km desde la fuente hacia el oeste (acorde a las simulaciones) en la dirección predominante del viento, con espesores de acumulación esperados entre 0,5 mm y 1 cm. Se verían afectadas las cabeceras municipales, poblados y sectores rurales de los municipios de Argelia, Balboa (La Planada, San Alfonso, Olaya, Guadualito), La Vega (Pancitará, Santa Bárbara, Santa Rita, El Palmar, Los Uvos, Aguas Muertas, Guachicono frío, Barbillas), Patía (El Bordo, Piedrasentada, La Fonda, Santa Cruz, La Mesa, Brisas, El Estrecho, Pan de Azúcar), Sotará (Chapa, La Truchera, El Churo y territorios del Resguardo indígena Kokonuco), Rosas (Párraga), Sucre (Paraíso), en el Departamento del Cauca y en los poblados y sectores rurales de los municipios de Puracé (Paletará y territorios de los Resguardos indígenas de Kokonuco y Paletará), El Tambo (Quilcacé, Cabuyal), Timbío, Bolívar (Lerma, Guachicono caliente), Almaguer (Llacuanas), La Sierra (La Depresión), San Sebastián del departamento del Cauca y San Agustín en el departamento del Huila; incluyendo áreas del PNNP (figura 20).

Para esta misma zona de amenaza baja, considerando el área que incluye todas las direcciones del viento alrededor del volcán (círculos en color amarillo a trazos en el mapa), cubriría una superficie aproximada de 17 784 km² comprendida entre el límite de la zona de amenaza media (círculos a trazos en color naranja en el mapa) y el alcance máximo de las caídas piroclásticas (81 km desde la fuente); con espesores de acumulación esperados entre 0,5 mm y 1 cm. Se verían afectadas las cabeceras municipales, poblados y sectores rurales de los municipios de Almaguer, Argelia, Balboa, Bolívar, Cajibío (incluyendo territorios del Resguardo indígena Cxayu'ce Fiw), Caldon (incluyendo territorios de los Resguardos indígenas La Laguna-Siberia, Tumburao y Las Mercedes), El Tambo (incluyendo territorios del Resguardo indígena Guarapamba), Florencia, Inzá (incluyendo territorios de los Resguardos indígenas La Gaitana, Tumbichucue), Jambaló, Mercaderes, Morales (incluyendo territorios de los Resguardos indígenas Chimborazo, Agua Negra, La Bonanza y Muse Ukwe), Patía, Piendamó-Tunía (incluyendo territorios de los Resguardos indígenas La María, La Laguna-Siberia y La Bonanza), Popayán (incluyendo territorios de los Resguardos indígenas Poblazón y Quintana), Puracé (incluyendo territorios de los Resguardos indígenas Puracé y

Kokonuco), San Sebastián, Santa Rosa (incluyendo territorios de los Resguardos indígenas Yungillo, San José e Inga de Aponte), Silvia (incluyendo territorios de los Resguardos indígenas Guambía, Ambaló, Quizgo, Tumburao y Quichaya), Sucre, Timbío (incluyendo territorios del Resguardo indígena Kitek Kiwe), Totoró (incluyendo territorios de los Resguardos indígenas Totoró, Polindara, Quintana, Novirao y Jebalá) en el Departamento del Cauca y Elías, Isnos, La Argentina (incluyendo territorios de los Resguardos indígenas Nam Misak, Nuevo Amanecer-La Meseta y Pickwe Ikh), Oporapa, Palestina, Pitalito (incluyendo territorios del Resguardo indígena Rumiyo), Saladoblanco, Timaná, San Agustín (incluyendo territorios del Resguardo indígena San Agustín), incluyendo áreas del PNNP; en el Departamento del Huila y Belén, Colón, La Cruz, La Unión y San Pablo en el departamento de Nariño y en los poblados y sectores rurales de los municipios de La Sierra, La Vega y Sotará (incluyendo territorios del Resguardo indígena Poblazón) el departamento del Cauca; Acevedo, La Plata (incluyendo territorios de los Resguardos indígenas Juan Tama, La Gaitana, La Reforma, La Estación Tálaga y Nam Misak), Pital y Tarqui en el departamento del Huila y de Leiva y San Bernardo en el departamento de Nariño; Mocoa (incluyendo territorios de los Resguardos indígenas San José, Yungillo y Kaméntsá Biya de Sibundoy) en el departamento del Putumayo; y San José del Fragua en el departamento del Caquetá.

5.4.2 Amenaza por caídas piroclásticas debido a proyección balística

Los proyectiles balísticos son expulsados con trayectorias parabólicas a grandes velocidades y su distribución está restringida a las áreas más cercanas al punto de emisión. Se conocen con el nombre de *bloques* volcánicos cuando provienen de magmas de erupciones anteriores (rocas solidificadas del conducto volcánico o que están en la superficie del cráter) y que se deforman por ruptura al impactar el suelo; y como *bombas* volcánicas que son fragmentos lanzados en una condición parcialmente fundida y se solidifican durante el vuelo o un tiempo después de caer, y por lo tanto son compuestas casi exclusivamente de material juvenil (Fisher y Schmincke, 1984).

Su afectación está determinada no sólo por la temperatura, velocidad y cercanía al centro de emisión, sino también por el impacto del fragmento balístico que puede causar heridas craneales letales, laceraciones y graves lesiones en el cuerpo. Los fragmentos incandescentes pueden ocasionar incendios, abolladuras, rompimiento de techos e incluso impactos a seres vivos que se encuentren a su paso.

De manera similar a los piroclastos transportados por el viento, en el volcán Sotará el registro geológico de balísticos probablemente fue erosionado, de tal forma que se utilizó como referencia las caídas piroclásticas de bloques y bombas volcánicas asociadas a la actividad de tipo vulcaniana del volcán Galeras entre 1989 y 2010 (SGC, 2015a; SGC, 2015b).

En el volcán Sotará en los registros históricos consultados no se hace alusión a la ocurrencia de proyectiles balísticos; sin embargo, teniendo en cuenta las características de su comportamiento eruptivo de destrucción de domos, no se descarta su generación en una eventual erupción y, por lo tanto, fueron considerados en la elaboración de este mapa.

Para las simulaciones de este fenómeno volcánico se utilizó la herramienta *EJECT!* (Mastin, 2001) que usa parámetros de velocidades, densidad del material y ángulos de expulsión, ajustados a las condiciones particulares del volcán Sotará.

La delimitación de las zonas de amenaza por este fenómeno considera únicamente zonas de amenaza alta y media, ya que zona de amenaza baja no se debe considerar debido a la severidad que podría tener el impacto directo de un fragmento pequeño en personas o animales.

El área de amenaza alta puede ser afectada por caídas de bloques y bombas de tamaño métrico, alcanzando distancias de hasta 2 km desde la fuente, con velocidades hasta de 160 km/h y tiempos de caída no mayores a 32 segundos después de su eyección; esta zona cubriría un área aproximada de 12 km², afectando sectores rurales de los municipios de Sotará (Cauca) y San Agustín (Huila), incluyendo áreas del PNNP (figura 21).

La zona de amenaza media estaría afectada por caídas de bloques, bombas o fragmentos de ellos, de tamaños submétrico, cubriendo un área de 73,9 km² comprendida desde el límite de la zona de amenaza alta (círculo en color rojo en el mapa), con un alcance máximo de 5,3 km desde la fuente (área de color naranja), con velocidades hasta de aproximadamente 200 km/h y tiempos de caída no mayores a 53 segundos después de su eyección, afectando igualmente sectores rurales de los municipios de Sotará (Cauca) y San Agustín (Huila), incluyendo áreas del PNNP (figura 21).

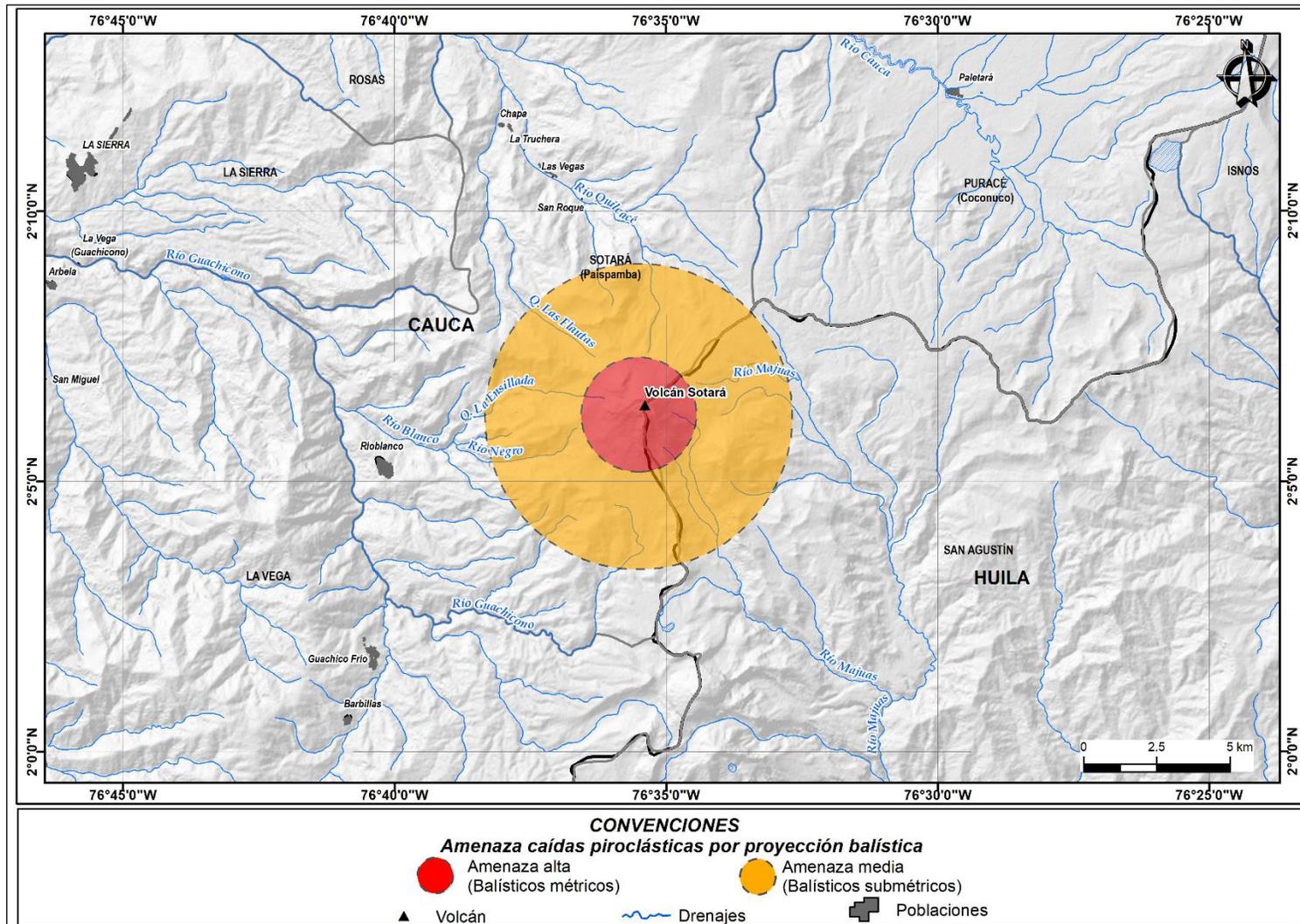


Figura 21. Zonificación por caída de proyectiles balísticos en el volcán Sotará (amenaza alta y media)

Fuente: autores

5.5 Amenaza por ondas de choque

Las ondas de choque resultan de la diferencia súbita (descompresión) entre un magma rico en gases sometido a altas presiones en el conducto y la presión atmosférica. Estas ondas representan una discontinuidad de temperatura, presión y densidad en el medio circundante, viajando a velocidades supersónicas, percibiéndose antes de que los productos piroclásticos sean expulsados. Este fenómeno puede ser visto en ocasiones debido a la condensación del vapor de agua atmosférico (Clarke *et al.*, 2015) y ser percibido incluso a varios kilómetros del foco eruptivo.

Su grado de afectación es inversamente proporcional a la distancia a la fuente, a menor distancia mayor afectación, pudiendo ocasionar en raros casos (por complicaciones posteriores) la muerte a personas o animales que se encuentren en áreas proximales del volcán, así como la destrucción de estructuras. En zonas intermedias a distales pueden ocasionar daños en ventanales, ruptura de vidrios, heridas a personas alcanzadas por fragmentos, lesiones auditivas e incluso las personas podrían ser derribadas si están de pie, por efecto de las ondas explosivas.

Del volcán Sotará no se conoce un registro asociado con este tipo de fenómeno volcánico, ya que no se han conocido casos de erupciones históricas, por lo tanto, para su zonificación se implementaron simulaciones con información proveniente de la literatura y los estudios realizados para el volcán Galeras (SGC, 2015a; SGC, 2015b), dada la disponibilidad de datos relacionados con las ondas de choque que se han registrado durante sus erupciones históricas.

La zonificación de la amenaza categorizada en alta, media y baja para este fenómeno (figura 22), se definió a partir del resultado de las simulaciones obtenidas con el *software Hydesim* (Meyer, 2018), tomando como referencia los umbrales de presión que básicamente evalúan los efectos de las explosiones en estructuras y en el cuerpo humano.

La zona de amenaza alta por ondas de choque involucra sectores cercanos a la zona proximal del cono volcánico con sobrepresiones mayores a 13,8 kPa, con un radio de cubrimiento cercano a 1,2 km alrededor del cráter, cubriendo un área de 4,3 km²; afectando sectores rurales de los municipios de Sotará (Cauca) y San Agustín (Huila), incluyendo áreas del PNNP (figura 22).

La zona de amenaza media estaría afectada por sobrepresiones $\geq 1,7$ kPa y $< 13,8$ kPa, cubriendo un área aproximada de 56,8 km², comprendida entre el límite de la zona de amenaza alta (círculo en color rojo en el mapa) y el inicio de la zona de amenaza baja (círculo amarillo), con un alcance máximo de 4,4 km desde la fuente (sector de color

naranja); afectando igualmente sectores rurales de los municipios de Sotará (Cauca) y San Agustín (Huila), incluyendo áreas del PNNP (figura 22).

La zona de amenaza baja se vería afectada por sobrepresiones entre 0,7 kPa y menores a 1,7 kPa, cubriendo un área aproximada de 195,6 km² contigua al límite de la zona de amenaza media (círculo en color naranja), con un alcance máximo de 9 km desde la fuente; afectaría los poblados de Rioblanco, Las Vegas, San Roque y áreas rurales del municipio de Sotará; además de zonas rurales de los municipios de La Vega, La Sierra y Puracé en el departamento del Cauca. Y sectores rurales del municipio de San Agustín, en el departamento del Huila dentro del área del PNNP (figura 22).

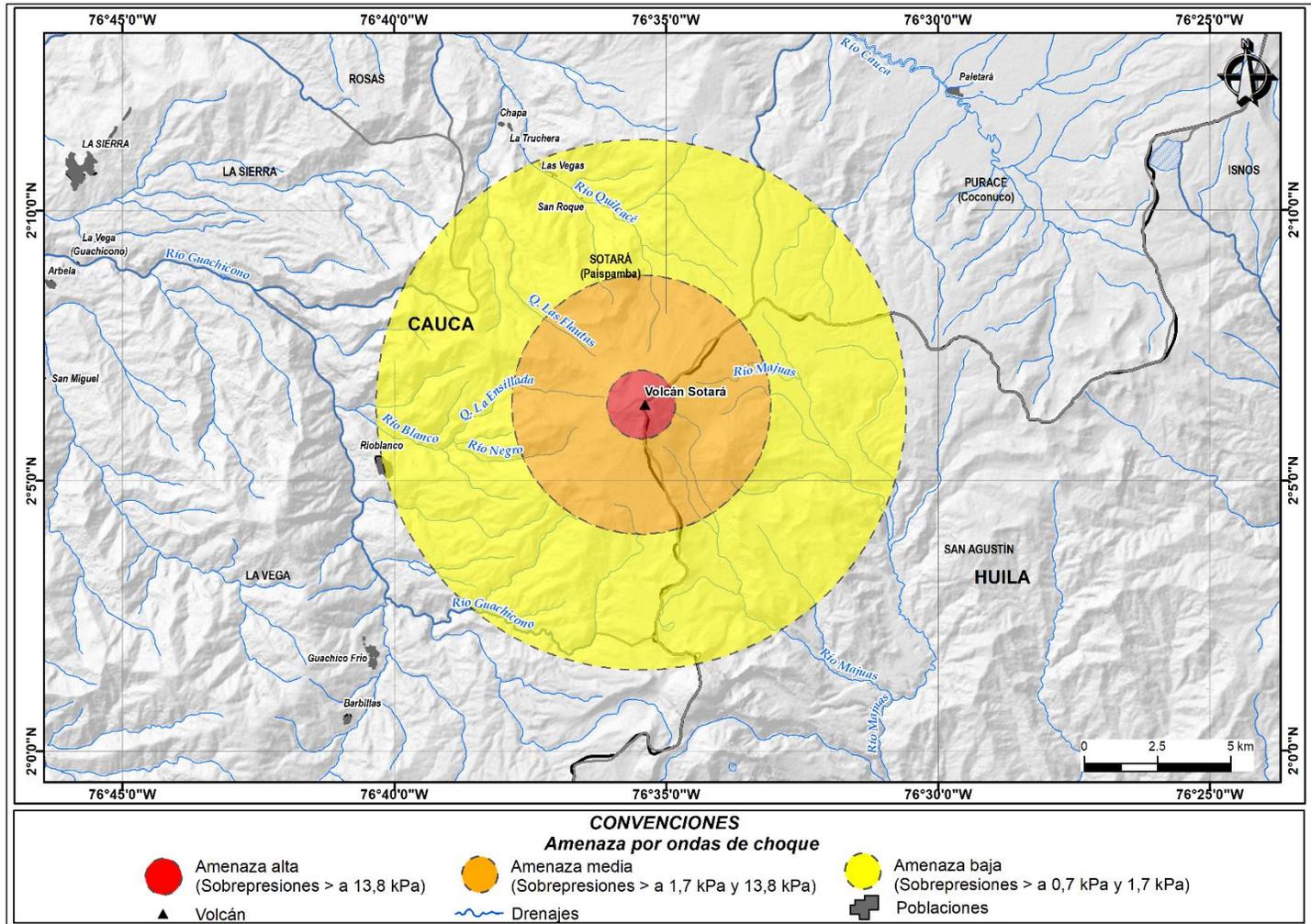


Figura 22. Zonificación por onda de choque para el volcán Sotará
Fuente: autores

5.6 Amenaza por avalanchas de escombros

Una amenaza importante en los volcanes explosivos, cuyo comportamiento involucra la formación de domos, son los colapsos de flanco del edificio volcánico que pueden generar avalanchas de escombros. Frecuentemente se originan por deformación del cono, intrusión de nuevo magma, una explosión freática o un sismo (van Wyk de Vries y Davies, 2015). Estos grandes desprendimientos de material viajan a altas velocidades sobre la superficie del terreno y generan morfologías características de este tipo de fenómeno como son los montículos conocidos como *hummocks*.

Pueden presentarse incluso en volcanes inactivos por eventos tectónicos, por intensa alteración hidrotermal e intemperismo, saturación de agua por eventos climáticos extremos (avalanchas de escombros no magmáticas) o producirse en fases de reactivación del volcán. La amenaza por este tipo de fenómenos incluye el impacto directo de una masa de roca que puede cubrir cientos de kilómetros cuadrados en pocos minutos. Su impacto puede ser aún mayor si se desencadena una erupción por descompresión del edificio volcánico o si sus depósitos se transforman en *lahares*.

Según el registro geológico del volcán Sotará, este fenómeno volcánico es poco frecuente, sin embargo, se encuentran depósitos asociados a este tipo de evento que corresponden a la avalancha de escombros Los Pajonales y la avalancha de escombros de Río Negro, descritas en el capítulo de geología e historia del volcán.

Tomando como referencia estos depósitos, sus características geológicas, y las observaciones de sectores con mayor debilidad del edificio volcánico, y el apoyo en las simulaciones empleando el concepto de cono proximal (módulo del programa *LaharZ*) se obtuvo una zonificación para la amenaza categorizada solo como alta (figura 23), de acuerdo a la metodología del SGC.

Las avalanchas de escombros podrían tener volúmenes cercanos a los $1,5 \times 10^7$ m³ y con una distribución controlada por la topografía, cubriendo superficies aproximadas de 1km² hacia noreste, con un alcance hasta de 2,7 km; y un área aproximada de 2,2 km² y alcance de hasta 3,7 km hacia el sureste desde sus sitios de despegue (sectores de inestabilidad de la estructura volcánica), tan solo incluyendo partes altas del volcán, que están dentro del PNNP (figura 23).

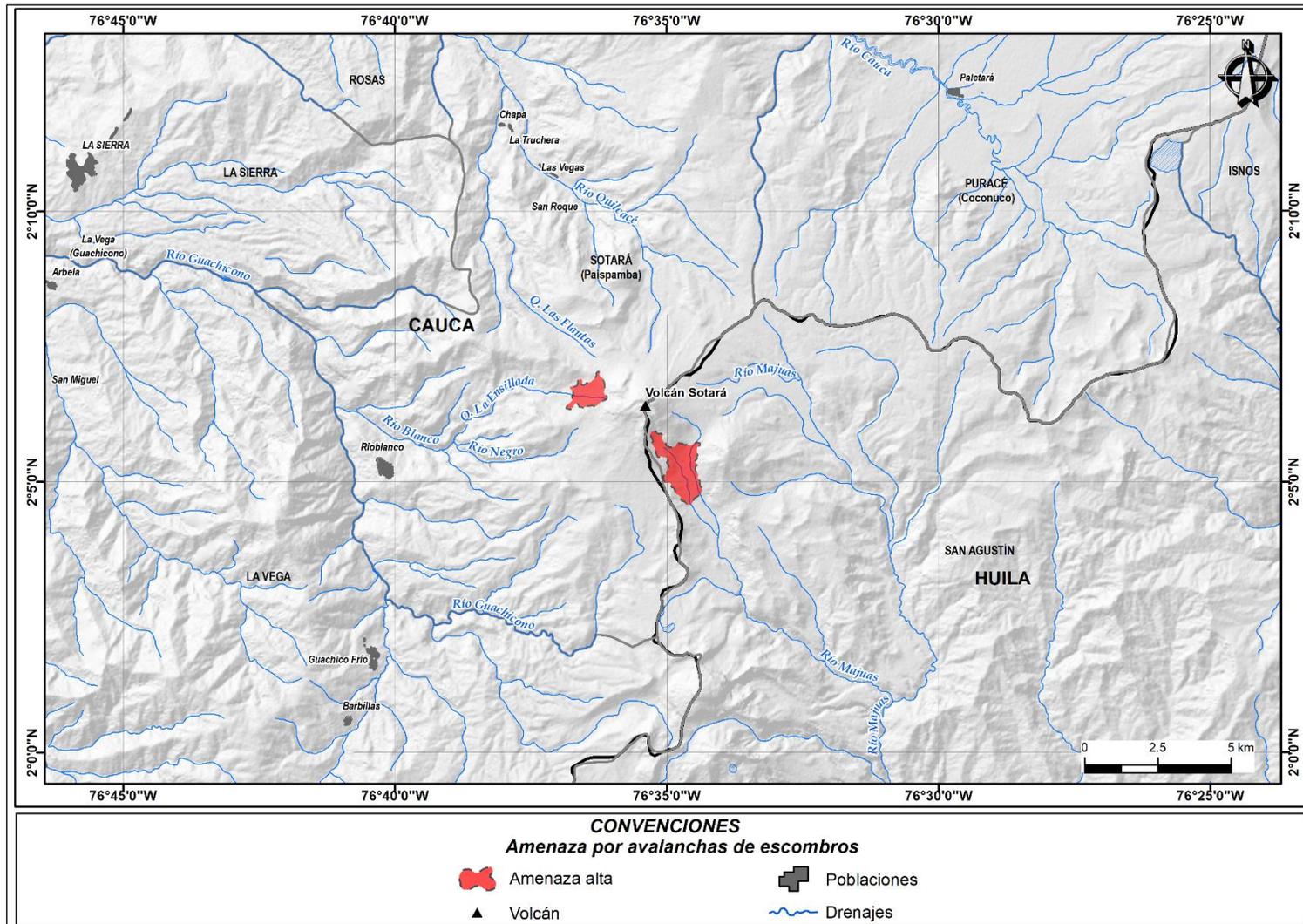


Figura 23. Zonificación por avalanchas de escombros en el volcán Sotará (amenaza alta)

Fuente: autores

5.7 Otras amenazas

En estas se incluyen las amenazas que no se plasman en el mapa de amenaza volcánica, como son las emisiones y acumulaciones de gases tóxicos y aerosoles, como dióxido de azufre (SO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), gases con flúor y cloro (HF y HCl), dióxido de carbono (CO₂) y monóxido de carbono (CO), éstos dos últimos inodoros e invisibles. Todos ellos generados al momento de las erupciones, quedando suspendidos en el aire y acumulándose en bajos topográficos.

Los efectos originados por estos gases y emisiones comprenden intoxicación, afectación en vías respiratorias e irritación de ojos en humanos y animales; problemas dentales y óseos por prolongada exposición al flúor en las aguas. En algunos casos severos estos gases llegan a producir la muerte por inhalación y asfixia en el caso de los gases tóxicos.

Estos gases al contacto con la atmósfera pueden generar reacciones químicas causando lluvias ácidas que corroen y afectan las infraestructuras y en algunos casos la pérdida de cultivos, vegetación y contaminación de fuentes hídricas.

La actividad sísmica asociada al volcán es otro de los fenómenos asociados en el caso de una reactivación volcánica, ya que sismos de variada magnitud pueden generarse antes durante o después de las erupciones y afectar áreas o poblaciones en inmediaciones de la zona de influencia del volcán.

Estos son sismos generados por la actividad interna del volcán, generalmente son de magnitudes pequeñas; sin embargo, se pueden registrar sismos mayores, incluso hasta magnitud mayor de 5, que pueden ser sentidos por las personas alrededor del volcán. La afectación producida por sismos volcánicos depende de la magnitud, la profundidad del foco sísmico y la distancia al epicentro. Pueden ocasionar daños menores en la infraestructura, viviendas y líneas vitales y también movimientos en masa.

6 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA

La delimitación de las áreas y la zonificación de la amenaza volcánica es la representación del análisis e integración de los resultados obtenidos tanto de la investigación de la actividad y registro geológico del volcán, como de las múltiples simulaciones realizadas con parámetros inferidos de dicho registro volcánico y en algunos casos, con apoyo en los resultados experimentales para otros volcanes de comportamiento similar. Sin embargo, los resultados obtenidos de dichas simulaciones, deben ser analizados de acuerdo con el conocimiento que los geólogos tienen sobre la historia eruptiva y el registro geológico de los depósitos asociados al volcán.

Se considera que eventuales erupciones del volcán Sotará sean semejantes en comportamiento a las que muestra su historia eruptiva de los últimos 10 000 años, y que el foco de emisión de dichas erupciones sea en la parte somital del cono actual, donde se encuentran emplazados los domos, sin descartar alguna posible actividad en el área del cono que está colapsada y debilitada hacia el suroeste.

El mapa anexo presenta una zonificación de amenaza volcánica categorizada en alta, media y baja. La información contenida en este mapa es de carácter referencial, para ser usado en la gestión del riesgo asociada con este volcán, cuyos límites dibujados en líneas a trazos son claramente transicionales y en ningún modo representan límites absolutos.

Este tipo de delimitación se basa en la potencialidad de los daños que pueden ocasionar los distintos fenómenos volcánicos y considera la posibilidad de afectación en áreas por uno o varios de estos fenómenos en simultáneo. Esta zonificación se elabora mediante la superposición de las áreas de amenaza representada por cada tipo de evento volcánico considerado en la evaluación de la amenaza, simulado y contrastado con la información de campo y el conocimiento del registro geológico.

El mapa comprende tres marcos de representación con la zonificación. Un marco principal a escala de impresión 1: 100 000 donde se representa la integración de las zonas de amenaza y tres marcos complementarios que representan las zonificaciones de la amenaza por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos (escala de impresión 1: 1 000 000), proyectiles balísticos (escala de impresión 1:150 000) y ondas de choque (escala de impresión 1:150 000) (véase el anexo)

6.1 Zonificación de la amenaza volcánica. Mapa general

Es el resultado de la integración de la zonificación de la amenaza para cada uno de los fenómenos tenidos en cuenta en la evaluación de la amenaza (de acuerdo a sus

características físicas), obteniendo como resultado un mapa en el que se categoriza la amenaza en tres zonas definidas como alta, media y baja.

En esta zonificación se visualizan las amenazas volcánicas por los diferentes fenómenos volcánicos considerados en la evaluación de la amenaza y con las simulaciones computacionales. Se representa a escala 1: 100 000 (véase el anexo).

6.1.1 Zona de amenaza volcánica alta



Corresponde a la zona que sería potencialmente afectada por:

- Caída de piroclastos transportados por el viento (ceniza y *lapilli*) con acumulaciones mayores a 10 cm, según la tendencia predominante de los vientos en el área, para una columna eruptiva de hasta 10 km de altura sobre la cima del cráter y con una longitud de dispersión máxima aproximada de 10,6 km en la dirección predominante del viento; el material acumulado puede ser removilizado generando *lahares*.
- proyectiles balísticos de tamaño métrico, que afectarían un área en un radio aproximado de 2 km, y submétrico, hasta 5,3 km alrededor del cráter.
- CDPs concentradas (flujos piroclásticos), principalmente líticas, que afectarían las partes altas del volcán y se canalizarían por los principales drenajes que nacen en él, como son: ríos Quilcacé, Blanco, Negro y Majuas, quebrada Flautas; llegarían a alcanzar distancias máximas de alrededor de 18 km a partir del foco de emisión.
- CDPs diluidas (oleadas piroclásticas) podrían afectar todas las laderas del volcán y sobrepasar altos topográficos; pueden originarse como fenómenos aislados o acompañando CDPs concentradas, alcanzando distancias iguales o mayores que las recorridas por éstas.
- Avalanchas de escombros por colapso gravitacional de flanco, con volúmenes relativamente pequeños ($< 1,5 \times 10^7 \text{ m}^3$), podrían afectar las partes altas del volcán, en zonas de inestabilidad debida a alteración hidrotermal, principalmente al oeste-noroeste y al sureste del edificio volcánico.
- *Lahares* que se canalizarían por la quebrada Flautas y el río Quilcacé hacia el noroeste con un recorrido de aproximadamente 40,5 km; por los ríos Blanco, Guachicono y afluentes hacia al suroeste con un avance de 40,9 km; y por los ríos Majuas y Magdalena al sureste con un recorrido de hasta 34 km desde su origen.
- Flujos de lava, principalmente en bloques, de composición andesítica a dacítica, que se desplazarían desde su foco de emisión por las laderas del volcán, canalizándose por los principales drenajes que nacen en él y con un alcance aproximado entre 2 y 9 km.
- Ondas de choque debidas a erupciones explosivas que alcanzarían sobrepresiones por encima de 0,7 kPa en un radio de 9 km (área aproximada de 254,5 km²); e incluso

mayores a 13,8 kPa en un radio de 1,2 km (área aproximada 4,3 km²) alrededor del foco eruptivo.

- Emisión y acumulación de gases volcánicos y olores, como CO₂, CO, SO₂, H₂S, HCl, HF, entre otros, emitidos antes, durante y después de las erupciones.
- Sismos de origen volcánico que podrían producir afectaciones de acuerdo a la distancia al foco sísmico, dependiendo de la profundidad y nivel energético del sismo.



Corresponde a la zona que podría ser afectada por *lahares* que se movilizarían por los principales cauces que nacen de la parte alta del volcán Sotará. Los flujos que podrían originarse por el costado noroeste del volcán descenderían por los cauces del río Quilcacé y la quebrada Flautas, avanzando un poco más de 40,5 km, afectando a su paso los sectores de San Roque, Las Vegas, La Truchera, Chapa y El Churo, llegando muy cerca del poblado de Quilcacé. Los *lahares* que podrían originarse por las laderas sur y suroeste descenderían por el río Guachicono y sus afluentes: ríos Negro y Blanco y quebrada La Ensilada; en su paso hacia el suroeste, el poblado de Rioblanco quedaría aislado por los flujos sin ser afectado directamente, pero en su avance llegaría a los sectores de La Vega-Guachicono (Municipio de La Vega) y Aguas Muertas (cerca de Piedrasentada), pudiendo avanzar, en total, alrededor de 41,8 km. Los flujos que podrían originarse por el costado sureste del volcán, descenderían por los brazos que forman el río Majuas, avanzando un poco más de 34 km y a su paso podrían afectar a Puerto Quinchana, llegando muy cerca de los sectores de Villa Fátima y Pradera, sobre el río Magdalena. Estos flujos pueden variar en su altura de inundación dependiendo de la morfología que recorren en sus trayectorias.



Zona expuesta a caída de piroclastos transportados por el viento con acumulaciones mayores a 10 cm, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluso aquellas contempladas por las tendencias principales de los vientos), con un radio igual al máximo alcance de la depositación (10,6 km), obtenido para esta zona de amenaza, lo cual podría afectar a los municipios de Puracé, Sotará, La Sierra, La Vega (Cauca) y San Agustín (Huila).

6.1.2 Zona de amenaza volcánica media



Corresponde a la zona que sería potencialmente afectada por:

- Caída de piroclastos transportados por el viento (*ceniza* y *lapilli*) con acumulaciones entre 1 cm y 10 cm, según la tendencia predominante de los vientos en el área (para una columna eruptiva de hasta 10 km de altura sobre la cima del cráter) y un alcance para el eje principal de depositación (siguiendo la dirección

predominante de los vientos) entre los 10,6 y 30 km respecto al foco de emisión, en la dirección predominante del viento.

– Gases volcánicos como CO₂, CO, SO₂, H₂S, HCl, HF, entre otros, emitidos antes, durante y después de las erupciones, pueden ser percibidos.

– Sismos de origen volcánico que podrían producir afectaciones de acuerdo a la distancia al foco sísmico, dependiendo de la profundidad y nivel energético del sismo.



Zona expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones entre 1 cm y 10 cm, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluso aquellas contempladas por las tendencias principales de los vientos), con un radio entre 10,6 y 30 km respecto al foco de emisión, afectando áreas de los municipios de Puracé, Popayán, Sotará, Timbío, El Tambo, Rosas, La Sierra, La Vega, Almaguer, San Sebastián, Santa Rosa (Cauca), San Agustín, Isnos y Saladoblanco (Huila).

6.1.3 Zona de amenaza volcánica baja



Corresponde a la zona que sería potencialmente afectada por:

– Caída de piroclastos de tamaño ceniza, transportados en la dirección predominante del viento (para una columna eruptiva de hasta 10 km de altura sobre la cima del cráter) con acumulaciones entre 0,5 mm y 1 cm, con un alcance para el eje principal de depositación (siguiendo la dirección predominante de los vientos) entre los 30 y 80 km respecto al foco de emisión, en la dirección de la tendencia principal de los vientos.

– Sismos de origen volcano-tectónico que podrían producir afectaciones de acuerdo a la distancia al foco sísmico, dependiendo de la profundidad y nivel energético del sismo.



Zona expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones entre 0,5 mm y 1 cm, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluso aquellas contempladas por las tendencias principales de los vientos) con un radio entre 30 y 80 km respecto al foco de emisión, afectando áreas de las cabeceras y/o zonas rurales de municipios en los departamentos del Cauca, Huila, Nariño y Putumayo.

6.2 Zonificación de la amenaza volcánica por caídas de piroclastos transportados por el viento.

Se visualiza la distribución de este tipo de caídas que pueden generarse teniendo en cuenta un escenario asociado a una erupción de tipo vulcaniana, para una columna eruptiva hasta de 10 km de altura sobre la cima del edificio volcánico, considerándose

tanto la tendencia predominante como las posibles variaciones en la dirección del viento para diferentes meses del año (véase el anexo).

6.2.1 Zona de amenaza alta por caída de piroclastos transportados por el viento



Esta zona representa un área donde podrían presentarse acumulaciones mayores a 10 cm de espesor, que generarían una carga sobrepuesta a partir de 92 kg/m² para ceniza y *lapilli* secos o mayor de 159 kg/m² para ceniza y *lapilli* si están saturados en agua; extendiéndose en un radio aproximado de 10,6 km en la dirección predominante de los vientos al oeste noroeste, afectando los municipios de Sotará y La Sierra (Cauca); y San Agustín (Huila).



Zona que puede estar expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones mayores a 10 cm, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluso aquellas contempladas por las tendencias principales de los vientos), con un radio igual al máximo alcance de la depositación, obtenido para esta zona de amenaza en la dirección predominante del viento, lo cual podría afectar a los municipios de Puracé, Sotará, La Sierra, La Vega (Cauca) y San Agustín (Huila).

En esta zona puede ocurrir: muerte de personas y animales por asfixia, intoxicación o enterramiento, afectación grave o enterramiento de vegetación y cultivos, contaminación de fuentes y reservorios de agua, daños graves a aeronaves. En esta zona podrían generarse *lahares* secundarios por la removilización de la ceniza y el *lapilli* acumulados.

6.2.2 Zona de amenaza media por caída de piroclastos transportados por el viento



Esta zona representa un área donde podrían presentarse acumulaciones entre 1 cm y 10 cm de espesor, que generarían una carga sobrepuesta entre 9,2 kg/m² y 92 kg/m², para ceniza y *lapilli* secos o entre 15,9 kg/m² y 159 kg/m² para ceniza y *lapilli* saturados en agua, extendiéndose en un radio aproximado de 30 km en la dirección predominante de los vientos al oeste noroeste, afectando los municipios de Sotará, Rosas, La Sierra y La Vega (Cauca); y San Agustín (Huila).



Zona que puede estar expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones entre 1 cm y 10 cm, comprendida entre el límite de la zona de amenaza alta (círculos a trazos en color rojo en el mapa) y el inicio de la zona de amenaza baja, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluso aquellas contempladas por las tendencias principales de los vientos),

con un radio igual al máximo alcance de la depositación (30 km), obtenido para esta zona de amenaza en la dirección predominante del viento, lo cual podría afectar a los municipios de Puracé, Popayán, Sotará, Timbío, El Tambo, Rosas, La Sierra, La Vega, Almaguer, San Sebastián y Santa Rosa (Cauca); San Agustín, Isnos y Saladoblanco (Huila).

En esta zona puede ocurrir: deformación o colapso de techos e incluso de estructuras de baja resistencia, contaminación de fuentes y reservorios de agua, afectación a obras de infraestructura y líneas vitales, daño grave a vegetación y cultivos, efectos nocivos a la salud humana y animal (infecciones respiratorias y nasogástricas, alergias, irritaciones, intoxicaciones), afectación al transporte aéreo y terrestre.

6.2.3 Zona de amenaza baja por caída de piroclastos transportados por el viento



Zona que puede estar expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones entre 0,5 mm y 1 cm de espesor, que generarían una carga sobrepuesta entre 0,46 kg/m² y 9,2 kg/m² para ceniza seca o entre 0,8 kg/m² y 15,9 kg/m² para ceniza saturada en agua, extendiéndose en un radio aproximado de 81 km en la dirección predominante de los vientos al oeste noroeste, afectando los municipios de Puracé, Sotará, Rosas, Timbío, El Tambo, La Sierra, Patía, Argelia, Balboa, Sucre, Bolívar, Almaguer, La Vega y San Sebastián (Cauca); y San Agustín (Huila).



Zona que puede estar expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones entre 0,5 mm y 1 cm, comprendida entre el límite de la zona de amenaza media (círculos a trazos en color naranja en el mapa) y el alcance máximo de las caídas piroclásticas, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluso aquellas contempladas por las tendencias principales de los vientos), con un radio igual al máximo alcance de la depositación (81 km); lo cual podría afectar a los municipios de Puracé, Totoró, Inzá, Páez, Jambaló, Silvia, Caldon, Piendamó, Morales, Suárez, Cajibío, Popayán, Timbío, Sotará, Rosas, El Tambo, Argelia, La Sierra, Patía, Balboa, La Vega, Sucre, Almaguer, San Sebastián, Bolívar, Mercaderes, Florencia, Santa Rosa y Piamonte (Cauca); San Agustín, Isnos, Saladoblanco, La Argentina, La Plata, Oporapa, Tarqui, Pital, Suaza, Timaná, Elías, Pitalito, Palestina y Acevedo (Huila); El Charco, Leiva, San Pablo, La Cruz, Colón, Belén, La Unión, San Pedro de Cartago, San Bernardo y El Tablón de Gómez (Nariño); Mocoa (Putumayo); y San José del Fragua (Caquetá).

En esta zona puede ocurrir: contaminación de fuentes y reservorios de agua, afectación a vegetación y cultivos, a la salud humana y animal (infecciones respiratorias y nasogástricas, alergias, irritaciones), restricciones para la navegación aérea.

6.3 Zonificación de la amenaza volcánica por proyectiles balísticos

En este mapa se visualiza la zonificación de la amenaza por caídas de proyectiles balísticos pueden generarse teniendo en cuenta un escenario asociado a una erupción de tipo vulcaniana para una columna eruptiva hasta de 10 km de altura sobre la cima del edificio volcánico (véase el anexo).

6.3.1 Zona de amenaza alta por proyectiles balísticos

 Zona que podría ser afectada por proyectiles balísticos (bloques y bombas volcánicas) de tamaño métrico, y alcanzarían un radio de dispersión hasta de 2 km respecto al foco eruptivo, con velocidades hasta de 160 km/h y tiempos de caída no mayores a 32 segundos después de su eyección. El área de afectación (12 km²) se encuentra limitada a la cima volcánica, dentro del territorio de los municipios de Sotará (Cauca) y San Agustín (Huila, área perteneciente al PNNP). El impacto directo de proyectiles balísticos en esta zona puede causar destrucción de viviendas, construcciones e infraestructura, muerte de seres vivos por impacto directo, además de incendios de viviendas y de la cobertura vegetal.

6.3.2 Zona de amenaza media por proyectiles balísticos

 Zona que podría ser afectada por proyectiles balísticos (bloques/bombas volcánicas) de tamaño submétrico, que alcanzarían un radio de dispersión hasta de 5,3 km respecto al foco eruptivo, con velocidades hasta de aproximadamente 200 km/h y tiempos de caída no mayores a 53 segundos después de su eyección. El área de afectación (73,9 km²) se ubica dentro del territorio de los municipios de Sotará (Cauca) y San Agustín (Huila, área perteneciente al PNNP). Los proyectiles balísticos podrían afectar la vereda Monte Redondo (3 km al sur de la cima volcánica), en el municipio de Sotará. Dependiendo de la cantidad de bloques/bombas submétricos que hagan impacto, estos pueden causar destrucción parcial o total de viviendas, construcciones e infraestructura; muerte o lesiones graves de seres vivos por impacto directo, además de incendios de viviendas y de la cobertura vegetal.

Nota: Debido a la peligrosidad del impacto directo de un proyectil balístico, no se considera amenaza baja por este fenómeno.

6.4 Zonificación de la amenaza volcánica por ondas de choque

En esta zonificación (Escala 1:150 000) se visualiza la distribución de la amenaza por este tipo de fenómeno que pueden generarse tomando en cuenta un escenario asociado a una erupción de tipo vulcaniana, para una columna eruptiva hasta de 10 km de altura sobre la cima del edificio volcánico (véase el anexo).

6.4.1 Zona de amenaza alta por ondas de choque

 Zona en la que se esperarían sobrepresiones mayores o iguales a los 13,8 kPa, alcanzando un radio de 1,2 km y afectando un área de 4,3 km² limitada a la cima volcánica dentro del territorio de los municipios de Sotará (Cauca) y San Agustín (Huila, área perteneciente al PNNP). En esta zona la onda explosiva puede ocasionar la muerte a personas y la destrucción de estructuras de concreto, incluso de concreto reforzado.

6.4.2 Zona de amenaza media por ondas de choque

 Zona en la que se esperarían sobrepresiones $\geq 1,7$ kPa y $< 13,8$ kPa, comprendida entre el límite de la zona de amenaza alta (círculo en color rojo en el mapa) y el inicio de la zona de amenaza baja (círculo amarillo), con un alcance máximo de 4,4 km desde la fuente y cubriendo un área de 56,8 km² dentro del territorio de los municipios de Sotará (Cauca) y San Agustín (Huila, área perteneciente al PNNP). En esta zona podría producirse ruptura de vidrios, que podrían ocasionar heridas a personas alcanzadas por fragmentos; daños en los marcos de ventanales y en puertas de madera. Personas podrían ser lanzadas al suelo por acción de las ondas explosivas.

6.4.3 Zona de amenaza baja por ondas de choque

 Zona en la que se esperarían sobrepresiones entre 0,7 kPa y menores a 1,7 kPa, cubriendo un área de 195,6 km², contigua al límite de la zona de amenaza media (círculo en color naranja), afectando un radio de 9 km desde la fuente de emisión, principalmente en territorios del municipio de Sotará, áreas pequeñas dentro del municipio de Puracé y La Sierra al norte del edificio volcánico, y La Vega, al sur; y San Agustín (Huila, área que pertenece al PNNP). Las ondas de choque podrían afectar las poblaciones de Las Vegas (8,6 km al norte noroeste de la cima volcánica) y Rioblanco (8,9 km al oeste suroeste), además de las veredas Mambiloma y Monte Redondo (oeste del edificio volcánico); Chaupiloma y La Floresta (suroeste del edificio volcánico), en el municipio de Sotará. En esta zona podría producirse ruptura de

vidrios, que podrían ocasionar pánico y heridas a personas alcanzadas por objetos impulsados por la onda expansiva.

CONCLUSIONES

El volcán Sotará es un volcán activo que hace parte del segmento central de volcanes activos de la Cordillera Central en Colombia. Esta memoria acompaña el primer mapa de amenaza volcánica para este volcán, producto de la integración de estudios de evaluación del comportamiento eruptivo, la actividad histórica, el estado actual y los resultados de simulaciones computacionales de los fenómenos volcánicos considerados en la amenaza volcánica.

Se considera que en eventuales erupciones del volcán Sotará, su comportamiento sea similar al que ha mostrado en su registro geológico de los últimos 10 000 años y como foco de emisión el área somital del cono actual, con alguna actividad hacia la zona suroeste debilitada por el colapsamiento del edificio volcánico.

La zonificación de la amenaza volcánica se basa en la potencialidad de los daños que pueden ocasionar los distintos fenómenos volcánicos y delimita tres zonas de amenaza: alta, media y baja, cuyos límites punteados son claramente transicionales y no absolutos. Además, considera la posibilidad de afectación en áreas por uno o varios de estos fenómenos al mismo tiempo.

Las principales amenazas volcánicas asociadas al volcán Sotará incluyen emplazamiento y destrucción de domos (actividad vulcaniana) y los fenómenos que le acompañan tales como generación de CDPs concentradas y diluidas, formación de *lahares* primarios o post-eruptivos, ondas de choque, caídas piroclásticas (transportadas por los vientos y proyectiles balísticos), eventual colapso de flanco del edificio volcánico que generen avalanchas de escombros y emanación de gases.

El estado actual de actividad del volcán Sotará está representado en las manifestaciones de actividad superficial, la presencia de un campo fumarólico y de un campo de afloramientos de fuentes termales. Además, de la actividad sísmica baja a moderada y cierta deformación registrada por los instrumentos instalados.

El monitoreo y vigilancia del volcán reflejan una evolución de la actividad del volcán Sotará, marcada por dos episodios principales, uno asociado al incremento sísmico de 2012, acompañado de un proceso deformativo, sugiriendo una intrusión en forma de dique, de bajo aporte volumétrico; y el otro corresponde al incremento sísmico de 2019 caracterizado por bajo aporte energético sin procesos deformativos y estabilidad en los parámetros fisicoquímicos monitoreados.

El mapa de amenaza volcánica para el volcán Sotará es una herramienta para la planificación y el manejo de crisis en una eventual reactivación del volcán, que incluiría aspectos relacionados con salud pública, ordenamiento territorial, sistemas de alertas tempranas dentro de los programas de monitoreo y vigilancia volcánica, planes de educación e información pública, tanto por los efectos como consecuencias producidos en las comunidades asentadas en las áreas de influencia del volcán, que conduzcan a niveles satisfactorios de resiliencia de las poblaciones afectadas.

Es fundamental que las comunidades y sus líderes accedan a la información sobre el estado de actividad del volcán Sotará a través de fuentes oficiales como el Servicio Geológico Colombiano con su Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, donde se lleva a cabo el monitoreo y vigilancia del volcán, y desde su página institucional puedan consultar sobre su estado en <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/geoamenazas/Paginas/OVS-Popayan.aspx>

Se sugiere continuar fortaleciendo las redes y equipos para el monitoreo y vigilancia volcánica, que redunde en el mejoramiento del conocimiento sobre el comportamiento del volcán.

AGRADECIMIENTOS

Al SGC por permitir el desarrollo de este proyecto, en marcado en el Plan Estratégico Decena 2014-2023.

A la Dirección de Geoamenazas del SGC, por facilitar y aprobar la realización del presente proyecto, así como de conformar el equipo para adelantarlo.

A la Dirección de Geociencias Básicas del SGC, por el apoyo con parte de sus profesionales y el suministro de información básica, necesarios para adelantar este trabajo.

A la Dirección de Laboratorios del SGC, por su apoyo en los diferentes tipos de análisis solicitados a ellos, para la caracterización de los depósitos y rocas.

En el observatorio vulcanológico y sismológico de Popayán al equipo de monitorio volcánico, que apoyaron con todo su empeño en la elaboración del capítulo “Estado Actual del Volcán Sotará”; a su coordinadora Adriana Agudelo, quien apoyó en jornadas de socialización de la información en poblaciones alrededor del volcán; a Andrés Narváez, por su gran colaboración y apoyo en la obtención de información referente a la cosmovisión de los pueblos indígenas, y aspectos turísticos de interés en los alrededores del volcán Sotará. A Gerónimo Valencia, por su participación al inicio del proyecto, en simulaciones computacionales y en chequeos de campo, para la verificación geológica de depósitos volcánicos y la organización de dicha información.

Al Grupo de Oficialización de Productos Geocientíficos de la Dirección de Gestión de Información del SGC, por su apoyo en la revisión de los estándares documentales y cartográficos.

A todos los acompañantes de las diferentes zonas trabajadas durante la realización de este trabajo, por su valioso apoyo en las jornadas de campo, por su hospitalidad e información sobre los accesos y caminos recorridos.

Así mismo se extienden los agradecimientos a las diferentes autoridades municipales y locales que permitieron el ingreso del personal profesional del SGC a las diferentes zonas y que colaboraron brindándoles información referente al territorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, A.P. y Cepeda, H. (1982). El volcán Sotará: geología y geoquímica de elementos mayores. *Publicación Geológica Especial* de Ingeominas. Bogotá.
- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. (1982). Biblioteca Digital Andina. Alexander Von Humboldt en Colombia. Extractos de sus diarios.
- Alpala, J., Alpala, R. y Battaglia, M. (2017). Monitoring remote volcanoes: The 2010-2012 unrest at Sotará volcano (Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 344, 224-231. Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2017.05.021
- Alpala, J. y Alpala, R. (2020). *Informe técnico de deformación volcanes segmento central de Colombia, enero 2020*. En preparación. Popayán: Servicio Geológico Colombiano.
- Baxter, P. (1990). Medical effects of volcanic eruptions: 1. Main causes of death and injury. *Bulletin of Volcanology*, 52(7), 532-544. Doi: 10.1007/BF00301534
- Baxter, P.J., Searl, A., Cowie, H.A., Jarvis, D. y Horwell, C.J. (2014). Evaluating the respiratory health risks of volcanic ash at the eruption of the Soufriere Hills Volcano, Montserrat, 1995-2010. En Wadge, G., Robertson, R., Voight, B. (Eds.). *The Eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat from 2000 to 2010. Geological Society, London, Memoirs*, 39(1), 407-425. Doi: 10.1144/M39.22
- Biblioteca Luis Ángel Arango. (2009). Las memorias de un naturalista y científico que cedió a la tentación de ser observador y crítico social. Viaje al Ecuador – Estudios sobre la región volcánica. Publicación digital. Tomo I.
- Biaass, S., Bonadonna, C., Connor, L. y Connor, C. (2016). TephraProb: A Matlab package for probabilistic hazard assessments of tephra fallout. *Journal of Applied Volcanology*, 5(1), 10. Doi: 10.1186/s13617-016-0050-5
- Bonadonna, C., Connor L. J., Connor, C. B. y Courtland, L. M. (2005). Tephra2. <https://vhub.org/resources/tephra2>
- Boussingault, J. B. (1831). *Memorias. Del Chocó al Ecuador. El Puracé, Quito, El Chimborazo, mi regreso*. Bogotá. Editorial Banco de la República 1985, colección bibliográfica, libro No 5, cap. XIII.
- Brown, R. y Andrews, G. (2015). Deposits of Pyroclastic Density Currents. En Haraldur Sigurdsson (Ed.). *Encyclopedia of volcanoes*, Second Edition. Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00036-5
- Calder, E. S., Lavallée, Y., Kendrick, J. y Bernstein, M. (2015). Lava dome eruptions. En Haraldur Sigurdsson (Ed.). *Encyclopedia of volcanoes*, Second Edition. Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00018-3
- Cioni, R., Pistolesi, M. y Rosi, M. (2015). Plinian and subplinian eruptions. En Haraldur Sigurdsson (Ed.). *Encyclopedia of volcanoes*, Second Edition. Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00029-8

- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2013; updated) The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199-204.
- Clarke, A. B., Esposti Ongaro, T. y Belousov, A. (2015). Vulcanian Eruptions. En Haraldur Sigurdsson (Ed.). *Encyclopedia of volcanoes*, Second Edition. Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00028-6
- Cole, P., Neri, A. y Baxter, P. (2015). Hazards from Pyroclastic Density Currents. En Haraldur Sigurdsson (Ed.). *Encyclopedia of volcanoes*, Second Edition. Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00054-7
- Connor, L., Connor, C., Meliksetian, K. y Savov, I. (2012). Probabilistic approach to modeling lava flow inundation: a lava flow hazard assessment for a nuclear facility in Armenia. *Journal of Applied Volcanology Society and Volcanoes*, 1(1), 3, 1-19. Doi: 10.1186/2191-5040-1-3
- Corporación Autónoma Regional del Cauca –CRC (2019). Disponible en <http://crc.gov.co/>
- Cortés, G. P. y Calvache, M. L. (1993). *Erupciones explosivas del Volcán Galeras-Colombia en el período julio 16 de 1992 - junio de 1993*. Pasto: Ingeominas.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2018). Censo de Población y Vivienda de Colombia de 2018.
- Dufek, J., Esposti, T. y Roche, O. (2015). Pyroclastic density currents: processes and models. En Haraldur Sigurdsson (Ed.). *Encyclopedia of volcanoes*, Second Edition. Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00035-3
- Eder, P. J. (1913). *Colombia*. London: T. F. Unwin Ltd., Adelphi Terrace, 5th impression (1921). Disponible en: University of California at Los Angeles Library. <http://www.archive.org/details/colombia00ederala>
- Fisher, R. y Schmincke, H-U. (1984). *Pyroclastic rocks*. Berlin: Springer, Heidelberg.
- Galarza, J. J., Montoya, C. J., Laverde, C., Pulgarín, B. A. y Zuluaga, I. (2019). *Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la elaboración del mapa de amenaza del volcán Sotará*. Popayán, Pasto y Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Garzón, G. (1997). *Catálogo de fuentes termales del suroccidente colombiano*. Cali: Ingeominas.
- Kilburn, C. R.J. (2015). Lava flow hazards and modeling. En Haraldur Sigurdsson (Ed.). *Encyclopedia of volcanoes*, Second Edition. Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00055-9
- Koller, B. (1982). Results obtained from geological reconnaissance work on sulphur deposition associated with the volcanoes Puracé, Sotará department Cauca; the volcanoes Galeras, Azufral, Cumbal, Chiles department Nariño, Colombia. Informe final, fase 1. Ingeominas, Ecominas, Naciones Unidas.
- Marín-Cerón, M. I. (2004). *Geochemical variation of late Cenozoic volcanic rocks in time and space, southwestern Colombia*. (MSc. Thesis). Graduate School of Science, Shimane University, Japan.

- Mastin, L. G. (2001). A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions, U.S. Geological Survey Open-File Report 01-45. U.S. Geological Survey.
- Méndez, R. A. (1989). Catálogo de los volcanes activos de Colombia. *Boletín Geológico*, 30(3), 1-75.
- Meyer, E. (2018). HYDESIm: The High-Yield Detonation Effects Simulator, an experiment in AJAX and Google Maps programming based on public data and showing the destructive zones of large explosions.
- Minakami, T., Hiraga, S., Miyazaki, T. y Utibori, S. (1969). Fundamental research for predicting volcanic eruptions. (Part 2). Seismometrical surveys of volcanoes in Japan and volcano Sotará in Colombia. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, (47), 893-949.
- Monsalve, M. L., Pulgarín, B. A., Mojica, J., Santacoloma, C. C. y Cardona, C. E. (2011). Interpretación de la actividad eruptiva del volcán Nevado del Huila (Colombia), 2007 – 2009: análisis de componentes de materiales emitidos. *Boletín de Geología*, 3(2).
- Morrissey, M., Mastin, L. (2002). Vulcanian Eruptions. En Haraldur Sigurdsson (Ed.). *Encyclopedia of volcanoes*, First Edition. Academic Press.
- O'Brien, J. y Julien, P. (1985). Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. En D. S. Bowles (Ed.). *Proc, ASCE HD Delineations of landslide, flashflood, and debris flow hazards*. Utah.
- Organización Latinoamericana de Energía y Geotérmica Italiana - Olade. (1995). Estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Colombia. Informe final. En Edinson Lozano (Ed.) *Compilación de los estudios geológicos oficiales en Colombia*. Tomo XXI. Ingeominas.
- Patra, A., Bauer A., Nichita, C., Pitman, E.B., Sheridan, M. F. Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Namikawa, L. y Renschler, C. (2005). Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 1-21. Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2004.06.014
- Pierson, T. C., Wood, N. J. y Driedger, C. L. (2014). Reducing risk from lahar hazards: concepts, case studies, and roles for scientists. *Journal of Applied Volcanology Society and Volcanoes*, 3 (16), 1-25. Doi: 10.1186/s13617-014-0016-4.
- 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*. Popayán: Ingeominas.
- Pulgarín, B.A., Navarro, S.R., Monsalve, M.L., Murcia, H.F., Téllez, L., Correa, A.M., Martínez, L. y Martínez, L. (2010). *Geología e historia eruptiva del Complejo Volcánico Sotará, Colombia*. Popayán y Manizales: Ingeominas.

- Pulgarín, B.A., Navarro, S.R., Murcia, H.F., Téllez, L. y Monsalve, M.L. (2011). *Geomorphological analysis of The Sotará - Sucubún Volcanic Region (SSVR), Colombia*. Manizales y Popayán: Servicio Geológico Colombiano.
- Pulgarín, B. y Laverde, C. (2014). *Actualización del mapa de amenaza volcánica por caída de piroclastos del volcán Nevado del Huila*. Popayán: Servicio Geológico Colombiano.
- Pulgarín, B. A. y Zuluaga, I. (2019). *Evaluación de la amenaza volcánica del volcán Sotará*. Popayán, Pasto y Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Reclus, E., (1893). Colombia. Biblioteca de Cultura Colombiana Schering Corporation U.S.A, Serie Viajes, No. 7, 252 p. Traducción y anotaciones de F. J. Vergara y Velasco (1893), publicada en 1965. Ediciones Sol y Luna, Bogotá. Digitalizado por Biblioteca Luis Ángel Arango, del Banco de la República. Disponible en <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/geografia/colomb/colom4.htm>
- Richardson, J. y Connor, L. (2012). *Lava C Ver. 0.1*. <https://vhub.org/resources/LavaC>.
- Santacoloma, C., Narváez, A., Ospina, C., Quintero, D., Raigosa, J., Sánchez, J., Barrantes, C., Alpala, J., Casas, A., Corchuelo, D., Oliveras, N., Meza, L., Gómez, J. y Manzo, O. (2019a). *Informe mensual de actividad de los volcanes Nevado del Huila, Puracé, Sotará y Sucubún. Septiembre de 2019*. Popayán: Servicio Geológico Colombiano.
- Santacoloma, C., Narváez, A., Ospina, C., Quintero, D., Raigosa, J., Sánchez, J., Barrantes, C., Alpala, J., Casas, A., Corchuelo, D., Oliveras, N., Meza, L., Gómez, J. y Manzo, O. (2019b). *Informe mensual de actividad de los volcanes Nevado del Huila, Puracé, Sotará y Sucubún. Octubre de 2019*. Popayán: Servicio Geológico Colombiano.
- Santacoloma, C., Narváez, A., Ospina, C., Quintero, D., Raigosa, J., Sánchez, J., Barrantes, C., Alpala, J., Casas, A., Corchuelo, D., Oliveras, N., Meza, L., Gómez, J. y Manzo, O. (2019c). *Informe mensual de actividad de los volcanes Nevado del Huila, Puracé, Sotará y Sucubún. Noviembre y diciembre de 2019*. En preparación. Popayán: Servicio Geológico Colombiano.
- Schilling, S. P. (2014). *LAHAR Z; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones*. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. *Open-File Report 98-638*. Vancouver, Washington.
- Servicio Geológico Colombiano – SGC. *Informes Técnicos Mensuales de Actividad Volcánica*. Disponible en <https://www.sgc.gov.co/Publicaciones/Informes%20tcnicos/Forms/AllItems.aspx>
- Servicio Geológico Colombiano – SGC. (2015a). *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.
- Servicio Geológico Colombiano – SGC. (2015b). *Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte en la actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras - Colombia*. En

- cumplimiento a la sentencia de la corte constitucional T-269 de 2015. Informe técnico de simulaciones.* San Juan de Pasto.
- Servicio Geológico Colombiano – SGC. (2015). *Mapa de amenaza volcánica del volcán Nevado del Ruiz.* Tercera versión. Manizales.
- Siebert, L., Cottrell, E., Venzke, E. y Andrews, B. (2015). *Earth's Volcanoes and Their Eruptions: An Overview.* En Haraldur Sigurdsson (Ed.). *Encyclopedia of volcanoes*, First Edition. Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00012-2
- Stix, J., Zapata, J. A., Calvache, M., Cortés, G, Fischer, T. P., Gómez, D. y Williams, S. (1993). A model of degassing at Galeras Volcano, Colombia, 1988-1993. *Geology*, 21(11), 963-967. Doi:10.1130/0091-7613(1993)021<0963:amodag>2.3.co;2
- Stübel, A. (1906). Die Vulkanberge von Colombia: mit einer Übersichtskarte von Mittel- und Süd-Colombia, einer topographischen Karte des Vulkans von Pasto und seiner Umgebung, einer solchen der Vulkane Cumbal und Chiles, und 37 Tafeln mit 53 Bildern in Lichtdruck. Baensch. Dresden. Verlag von Wilhelm Baensch.
- Téllez, L., Marín-Cerón, M. I., Toro, G. y Pulgarín, B. (2008). *Preliminary petrological, geochemical and stratigraphical characterization of the Sotará volcano, SW Colombia.* 7th. International Symposium on Andean Geodynamics. (ISAG), Nice.
- Toro, G. E., Pulgarín, B., Acosta, B. S., Albarracín, H. A., Cañola, E., Jerez, E.K., López, S., Torres, M.P. y Téllez, L. (2007). Vulcanismo Neógeno y Cuaternario en el SW Colombiano, sector Formación Popayán, sector poblaciones Puracé-Coconucos, río San Francisco y sector Cañón del río Guachicono - población Rioblanco. Popayán: Ingeominas – Universidad EAFIT.
- Torres, M. P. (1997). Aporte al conocimiento de la geología y la estratigrafía de la Formación Popayán. Departamento del Cauca. *Revista Novedades Colombianas*, 7(1), 4-27.
- USGS (2019). *Lahars move rapidly down valleys like rivers of concrete.* Disponible en <https://volcanoes.usgs.gov/vhp/lahars.html>
- Vallance, J. W. y Iverson, R. M. (2015). Lahars and their deposits. En Haraldur Sigurdsson (Ed.). *Encyclopedia of volcanoes*, Second Edition. Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00037-7
- Van Wyk de Vries, B. y Davies, T. (2015). Landslides, Debris Avalanches, and Volcanic Gravitational Deformation. En Haraldur Sigurdsson (Ed.). *Encyclopedia of volcanoes*, Second Edition. Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00038-9

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del volcán Sotará y otras estructuras volcánicas aledañas	10
Figura 2. Volcán Sotará	11
Figura 3. Dibujo de Alphons Stübel del volcán Sotará (1869)	13
Figura 4. Remanentes de depósitos de la Unidad Eruptiva El Triángulo (flujos de lava)	22
Figura 5. Panorámica de los Domos Externos (UE-DE)	23
Figura 6. Mapa geológico del volcán Sotará	24
Figura 7. Mapa geológico de la zona proximal del volcán Sotará	25
Figura 8. Panorámica de la morfología de la avalancha de escombros de Río Negro (DA-RN)	27
Figura 9. Expresión geomorfológica de la Unidad Eruptiva La Piedra-Llano de Sotará	28
Figura 10. Vistas aéreas del Domo Colada y de los Domos Somitales	30
Figura 11. Unidad Eruptiva La Cima (UE-LC), partes superior e inferior	31
Figura 12. Red de vigilancia del volcán Sotará	34
Figura 13. Mapa de localización de eventos volcano-tectónicos	35
Figura 14. Mapa de localización del enjambre de sismos volcano-tectónicos (VT)	36
Figura 15. Mapa de localización del enjambre de sismos	37
Figura 16. Fuentes termales y campo fumarólico del volcán Sotará	39
Figura 17. Zonificación integrada de la amenaza alta por corrientes de densidad piroclástica (CDPs)	46
Figura 18. Zonificación de la amenaza por lahares en el área de influencia del volcán Sotará (amenaza alta)	50
Figura 19. Zonificación de la amenaza por flujos de lava en el volcán Sotará (amenaza alta)	53
Figura 20. Zonificación por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos en el volcán Sotará	56
Figura 21. Zonificación por caída de proyectiles balísticos en el volcán Sotará (amenaza alta y media)	61
Figura 22. Zonificación por onda de choque para el volcán Sotará	64
Figura 23. Zonificación por avalanchas de escombros en el volcán Sotará (amenaza alta)	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dataciones ^{14}C de paleosuelos y material carbonizado	17
Tabla 2. Dataciones con Ar-Ar de muestras de lavas y domos del volcán Sotará	19
Tabla 3. Reorganización crono-estratigráfica de las Unidades Eruptivas del Volcán Sotará (ss)	20

Memoria del mapa de amenaza volcánica del volcán Sotará

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa de amenaza volcánica del volcán Sotará (en el bolsillo)