

**MEMORIA EXPLICATIVA DEL MAPA DE AMENAZA  
VOLCÁNICA DEL VOLCÁN AZUFRAL**

**Manizales y Pasto, diciembre de 2021**

**SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO ©**

Oscar Paredes Zapata  
**Director General**

Marta Lucía Calvache  
**Directora Técnica de Geoamenazas**

**AUTORES**

Gloria Patricia Cortés Jiménez  
Carlos Andrés Laverde Castaño  
Carlos José Muñoz Montoya

**Citación:** Cortés, G. P., Laverde, C. A. y Muñoz, C. J. (2021). *Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral*. Manizales y Pasto: Servicio Geológico Colombiano.

## CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	9
1. GENERALIDADES	10
1.1 Población en zona de influencia volcánica	11
1.2 Vías de acceso	12
1.3 Hidrología	13
1.4 Trabajos anteriores	13
1.5 Monitoreo volcánico y estado de actividad	19
1.6 Metodología	25
2. REGISTRO GEOLÓGICO E HISTÓRICO DEL VOLCÁN AZUFRAL	28
2.1 Unidad eruptiva La Calera – ULC (4000 años A.P.)	32
2.2 Unidad eruptiva La Cortadera – ULCo (3900 años A.P.)	32
2.3 Unidad eruptiva El Espino – UEE (3600 años A.P.)	32
2.4 Unidad eruptiva El Carrizo - UEC (3470 ± 60 años A.P.)	33
2.5 Unidad eruptiva Laguna Verde - ULV (280 años A.P.)	34
2.6 Complejo de domos	35
2.7 Registro histórico actividad del volcán Azufral	36
3. AMENAZA VOLCÁNICA	50
3.1 Amenaza por corrientes de densidad piroclástica (flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas)	50
3.2 Amenaza por caídas piroclásticas	53
3.2.1 Amenaza por caída de piroclastos transportados eólicamente	54
3.2.2 Amenaza por caída de piroclastos por proyección balística	57
3.3 Amenaza por <i>lahares</i>	59
3.4 Amenaza por avalancha de escombros	62
3.5 Amenaza por onda de choque	64
4. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA	66
4.1 Zonificación de amenaza volcánica integrada (mapa principal)	66
4.2 Zonificación de la amenaza por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos	69
4.3 Zonificación de la amenaza por <i>lahares</i>	72
4.4 Mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral	74

5.	POBLACIÓN EN EL ÁREA DE INFLUENCIA VOLCÁNICA	76
5.1	Análisis poblacional para la zonificación integrada de la amenaza volcánica (Contemplando la zonificación de caídas piroclásticas para las tendencias principales de los vientos)	76
5.2	Análisis poblacional para la zonificación de caídas piroclásticas (Contemplando todas las direcciones posibles de viento)	88
	CONCLUSIONES	96
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

## RESUMEN

El volcán Azufral, está localizado en el extremo suroccidental del país en las coordenadas 1°05'24" N y 77°43'19" W, tiene una altitud de 4070 m s.n.m. Es un volcán activo, considerado, de acuerdo con su registro geológico, como uno de los más explosivos de Colombia. Las erupciones explosivas se han alternado con el emplazamiento y destrucción de domos de lava. Se cuenta con registro de referencia al volcán desde el siglo XVI, registro de actividad superficial desde el siglo XVIII y reporte de actividad eruptiva menor hacia 1801. En el año 1996 Ingeominas, actualmente Servicio Geológico Colombiano (SGC) inició el monitoreo de su actividad y los estudios geológico-estratigráficos, cuyos resultados constituyen insumos importantes para las simulaciones computacionales de los diferentes fenómenos volcánicos con posibilidad de ocurrir en el futuro y por ende para la evaluación de su amenaza potencial y mapa de amenaza que ahora se presentan.

El edificio volcánico actual del Azufral tiene una laguna cratérica de 1,02 km de longitud máxima, 0,45 km de ancho máximo y 0,2 km de ancho medio, para un área de 0,21 km<sup>2</sup>, denominada Laguna Verde, ocupada al sureste por un complejo de domos. La actividad más contundente desde inicios del monitoreo corresponde a pequeñas erupciones hidrotermales en los años 2009, 2010, 2016 y 2017 originadas en el sector de "La Playita" al noroeste de la Laguna Verde al interior del cráter del volcán y en el domo Mallama. El foco principal de origen para futuras erupciones considerado en la evaluación de amenaza es la zona menos confinada, comprendida entre el fondo de la Laguna Verde y los domos más recientes.

De acuerdo al conocimiento del comportamiento eruptivo del volcán, las erupciones que podrían presentarse serían principalmente de carácter explosivo, durante las cuales podrían generarse Corrientes de Densidad Piroclástica concentradas y diluidas (flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas), caídas de piroclastos transportados por el viento (de ceniza y *lapilli*) y proyectiles balísticos (bloques y bombas volcánicas), *lahares*, emplazamiento de domos de lava, avalancha de escombros, gases volcánicos, ondas de choque, y sismos asociados a actividad volcánica. El emplazamiento de domos de lava ha ocurrido antes o después de la actividad explosiva, como lo evidencia el registro geológico y la conformación actual del edificio volcánico.

Las áreas que podrían ser afectadas por los fenómenos referidos se representan como zonas de amenaza alta, media y baja. Esta zonificación es el producto de la integración de las zonas de amenaza definidas para cada uno de los fenómenos contemplados en la evaluación de la amenaza.

La zona de amenaza alta sería potencialmente afectada por uno o varios de los fenómenos antes mencionados, dentro de esta zona se encuentran poblaciones como Piedrancha, El Carmelo, Balalaika, Santander, El Espino, Quetambud, Colimba, Samaniego y Ricaurte, estas dos últimas por *lahares*. En las zonas de amenaza media y baja ocurriría caída de piroclastos.

En las zonas de amenaza media y baja ocurriría principalmente caída de piroclastos de transporte eólico.

A pesar de no contar con depósitos de caídas, de no identificar hasta el momento depósitos importantes de *lahares*, estos dos fenómenos, así como las ondas de choque, que se presentan en erupciones explosivas, se tuvieron en cuenta en las simulaciones computacionales que junto con la información geológica y geomorfológica disponible fueron la base para la evaluación de la amenaza volcánica y elaboración del correspondiente mapa de amenaza del volcán Azufra.

Es importante enfatizar que los límites entre las zonas de amenaza, representados en trazados con líneas discontinuas son transicionales y no representan límites tajantes o absolutos entre las zonas de amenaza.

## ABSTRACT

The Azufral volcano is located in the southwestern corner of the country at coordinates 1°05'24" N and 77°43'19" W, with an altitude of 4,070 m a.s.l. It is an active volcano, considered, according to its geological record, as one of the most explosive in Colombia. Explosive eruptions have alternated with the emplacement and destruction of lava domes. There is a record of reference to the volcano since the 16th century, a record of surface activity since the 18th century and a report of minor eruptive activity around 1801. In 1996 Ingeominas, currently the Colombian Geological Service (SGC) began monitoring its activity and geological-stratigraphic studies, whose results constitute important inputs for computer simulations of the different volcanic phenomena with the possibility of occurring in the future and therefore for the evaluation of their potential hazard and hazard map that are now presented.

The current volcanic edifice of Azufral has a crater lagoon with a maximum length of 1.02 km, a maximum width of 0.45 km and an average width of 0.2 km, for an area of 0.21 km<sup>2</sup>, called Laguna Verde, occupied to the southeast by a complex of domes. The most forceful activity since the beginning of the monitoring corresponds to small hydrothermal eruptions in the years 2009, 2010, 2016 and 2017 originating in the sector of "La Playita" northwest of Laguna Verde inside the crater of the volcano and in the Mallama dome. The main source of origin for future eruptions considered in the hazard assessment is the less confined zone, between the bottom of the Laguna Verde and the most recent domes.

According to the knowledge of the eruptive behavior of the volcano, the eruptions that could occur would be mainly of an explosive nature, during which concentrated and diluted Pyroclastic Density Currents (pyroclastic flows and pyroclastic surges) could be generated, pyroclastic falls transported by the wind (of ash and *lapilli*) and ballistic projectiles (volcanic blocks and bombs), *lahars*, emplacement of lava domes, debris avalanches, volcanic gases, shock waves, and earthquakes associated with volcanic activity. The emplacement of lava domes has occurred before or after the explosive activity, as evidenced by the geological record and the current conformation of the volcanic edifice.

The areas that could be affected by the referred phenomena are represented as zones of high, medium and low hazard. This zoning is the product of integrating the hazard zones defined for each of the phenomena considered in the hazard assessment.

The high hazard zone would be potentially affected by one or more of the aforementioned phenomena, within this zone there are towns such as Piedrancha, El

Carmelo, Balalaika, Santander, El Espino, Quetambud, Colimba, Samaniego and Ricaurte, the latter two due to *lahars*. In the medium and low hazard zones, pyroclastic falls would occur.

In the medium and low hazard zones, the fall of wind-transport pyroclasts would mainly occur.

Despite not having fall deposits, and not having identified important *lahar deposits so far*, these two phenomena, as well as the shock waves that occur in explosive eruptions, were taken into account in the computational simulations that, together with The available geological and geomorphological information was the basis for the evaluation of the volcanic hazard and the elaboration of the corresponding hazard map of the Azufral volcano.

It is important to emphasize that the boundaries between the hazard zones, represented by dashed lines, are transitional and do not represent sharp or absolute boundaries between the hazard zones.



## INTRODUCCIÓN

La evaluación de la amenaza volcánica de volcanes activos es una de las actividades más importantes que desarrolla el Servicio Geológico Colombiano en gestión del riesgo volcánico. En los últimos años el Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha fortalecido su metodología para la elaboración de mapas de amenaza volcánica al incluir el uso de herramientas computacionales especializadas para la simulación de fenómenos volcánicos en su procedimiento de evaluación de amenaza volcánica gracias a la cooperación internacional e interinstitucional de grupos de investigación entre los que se destacan los pertenecientes a las universidades de Buffalo y South Florida, VHUB (grupo de investigación internacional en volcanes y mitigación del riesgo) y al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

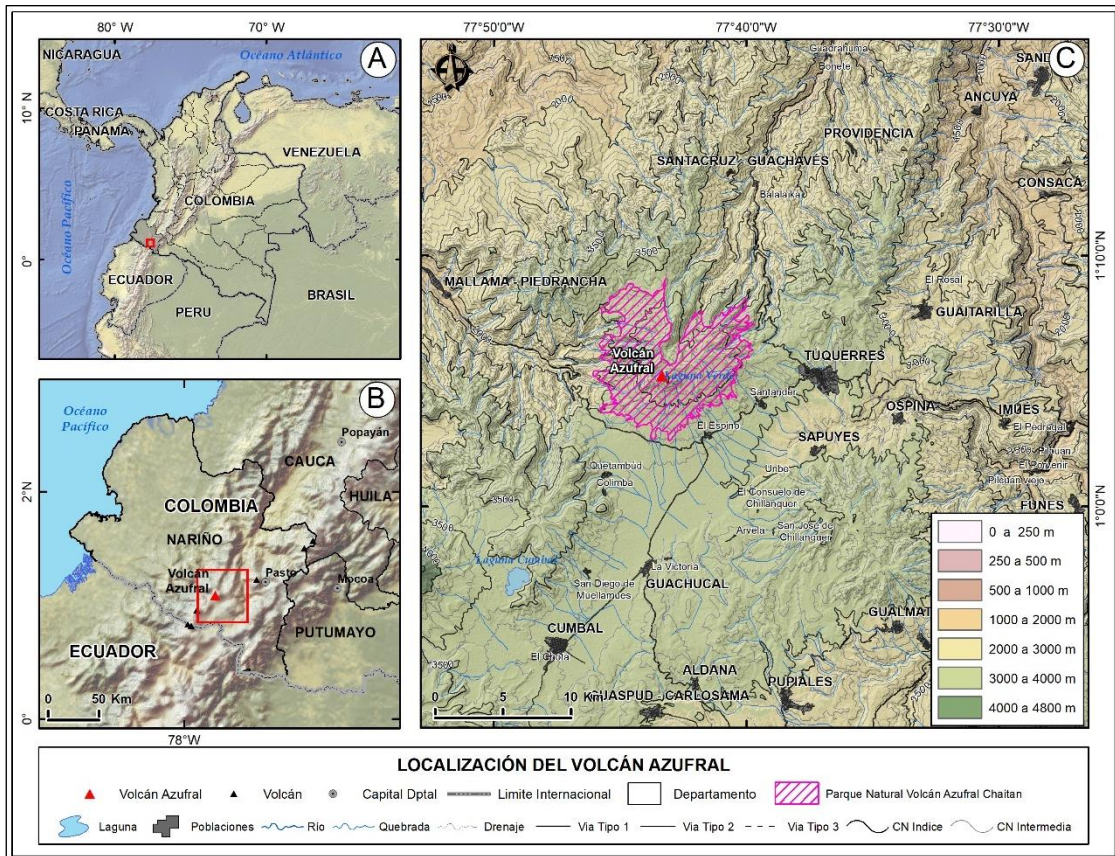
La existencia de información geológica y estratigráfica del volcán Azufra y el fortalecimiento metodológico para la evaluación de amenaza volcánica en Colombia motivaron la elaboración de la primera versión del Mapa de Amenaza del Volcán Azufra, que incluyó la revisión de la historia eruptiva del volcán y el modelamiento numérico de los fenómenos que se pueden presentar en erupciones futuras, independientemente de la no observación hasta el momento del registro geológico de algunos fenómenos como caídas piroclásticas y *lahares*.

De acuerdo con la política nacional de gestión del riesgo de desastres, amenaza se define como “Peligro latente de que un evento físico de origen natural 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, art. 4).

El mapa de amenaza volcánica del volcán Azufra, su memoria explicativa y la información complementaria que se entrega, visibiliza la posibilidad de ocurrencia de erupciones futuras en el volcán Azufra y los diferentes fenómenos volcánicos que pueden causar daños y pérdidas en su área de influencia.

## 1. GENERALIDADES

El volcán Azufral (VA) es considerado como uno de los volcanes más explosivos de Colombia que está localizado en el departamento de Nariño, aproximadamente a 45 km al suroccidente de la ciudad de Pasto, 30 km al Norte de la frontera Colombo-Ecuatoriana y 10 km al Occidente del municipio de Túquerres, en latitud  $1^{\circ}05'24''$  N y longitud  $77^{\circ}43'19''$  W, con una altitud de 4070 m s.n.m. en la cima (figura 1).



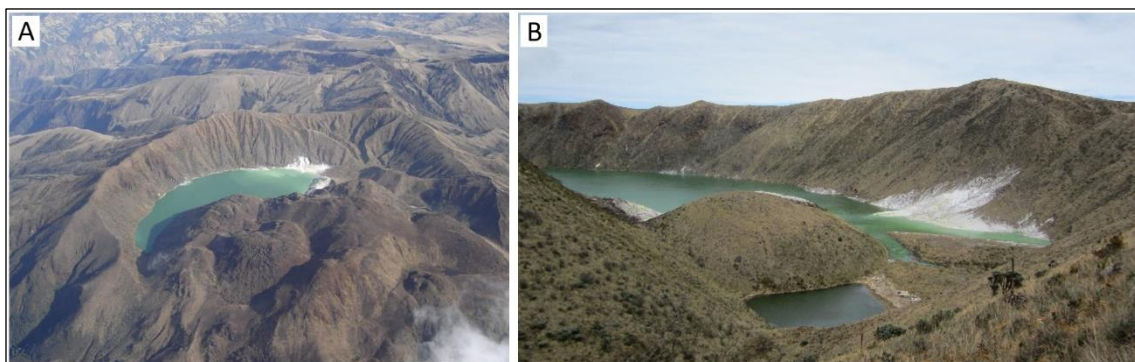
**Figura 1.** Localización del volcán Azufral

A) Localización del volcán Azufral a nivel nacional (extremo superior izquierdo), B. localización regional en el departamento de Nariño, cerca de la frontera con el Ecuador. C) Localización a nivel local del volcán Azufral y el PNN Chaitán, distribución de drenajes y poblaciones en su área de influencia

Fuente: autores

El volcán Azufral es uno de los cuatro centros volcánicos colombianos que se localizan en el dominio geográfico de la Cordillera Occidental, las partes más bajas del edificio coinciden con la denominada Sabana o altiplano de Túquerres la cual, al Sur, es la expresión morfológica de la depresión Cauca – Patía (Calvache *et al.*, 2003). La

Corporación Regional Autónoma de Nariño tiene a cargo el “Parque Natural Regional Volcán Azufral Chaitán (Corponariño, 2018). En la panorámica del volcán Azufral (figura 2), se observa a la derecha el cráter actual, la laguna cratérica y el complejo de domos y a la izquierda vista desde domos y la laguna cratérica.



**Figura 2.** Panorámicas del volcán Azufral

Se observa en A el cráter actual, la laguna cratérica y el complejo de domos y en B vista desde domos y la laguna cratérica

Fuente: SGC (2015)

### 1.1 Población en zona de influencia volcánica

En las zonas de influencia de amenaza volcánica por CDPs (flujos y oleadas piroclásticas), *lahares*, avalancha de escombros, ondas de choque y caída de ceniza y *lapilli* transportada en la dirección preferencial de los vientos son: Alban, Aldana, Ancuya, Arboleda, Barbacoas, Buesaco, Cuaspud, Chachagüí, Consacá, Contadero, Córdoba, Cumbal, Cumbitara, El Charco, El Peñol, El Rosario, El Tablón de Gómez, El Tambo, Funes, Guachucal, Guaitarilla, Gualmatán, Íles, Imués, Ipiales, La Florida, La Llanada, La Unión, Linares, Los Andes-Sotomayor, Magüi, Mallama, Nariño, Ospina, Pasto, Policarpa, Potosí, Providencia, Puerres, Pupiales, Ricaurte, Roberto Payán, Santacruz, Samaniego, San Bernardo, San Lorenzo, San Pedro de Cartago, Sandoná, Sapuyes, Taminango, Tangua, Tumaco, Túquerres y Yacuanquer del Departamento de Nariño y Colón y Santiago del Departamento del Putumayo, con una población estimada en 1 089 573 habitantes, según el Censo de Población y Vivienda del DANE, proyectada para el año 2020. En el Ecuador los cantones en zona de influencia volcánica son: Tulcán, Bolívar, Espejo, Mira, Montufar y San Pedro de Huaca en la provincia del Carchi, los cantones de Eloy Alfaro, San Lorenzo y Rioverde en la Provincia de Esmeraldas, los cantones de Ibarra, Cotacachi, San Miguel de Ucuquí en la Provincia de Imbabura y el cantón de Sucumbíos en la Provincia que lleva su nombre con una población aproximada de 360 000 habitantes.

Los municipios en la zona de influencia por amenaza volcánica por caída de piroclastos transportados omnidireccionalmente por los vientos (ceniza y *lapilli*) son: San José del Fragua en el Departamento del Caquetá), Almaguer, Argelia, Balboa, Bolívar, El Tambo, Florencia, guapi, La Sierra, La Vega, Mercaderes, Patía, Piamonte, Puracé, Rosas, San Sebastián, Santa Rosa, Sotará-Paíspamba, Sucre, Timbío, Timbiquí en el Departamento del Cauca, Pitalito y San Agustín en el Departamento del Huila, Alban, Aldana, Ancuya, Arboleda, Barbacoas, Belén, Buesaco, Chachagüí, Colón, Consacá, Contadero, Córdoba, Cuaspud, Cumbal, Cumbitara, El Charco, El Peñol, El Rosario, El Tablón de Gómez, El Tambo, Francisco Pizarro, Funes, Guachucal, Guaitarilla, Gualmatán, Íles, Imués, Ipiales, La Cruz, La Florida, La Llanada, La tola, La Unión, Leiva, Linares, Los Andes, Magüi, Mallama, Mosquera, Nariño, Olaya Herrera, Ospina, Pasto, Policarpa, Potosí, Providencia, Puerres, Pupiales, Ricaurte, Roberto Payan, Samaniego, San Bernardo, San Lorenzo, San Pablo, San Pedro de Cartago, Sandoná, Santa Bárbara, Santacruz, Sapuyes, Taminango, Tumaco, Tangua, Túquerres, Yacuanquer del Departamento de Nariño y Colón, Mocoa, Orito, Puerto Asís, Puerto Caicedo, Puerto Guzmán, San Francisco, San Miguel, Santiago, Sibundoy, Valle del Guamuez, Villagarzón del Departamento de Putumayo, con una población estimada en 2 249 371 habitantes, según el Censo de Población y Vivienda del DANE, proyectada para el año 2020. Del lado Ecuatoriano se encuentran en zona de influencia volcánica, los cantones de Tulcán, Bolívar, Espejo, Mira, Montufar y San Pedro de Huaca de la Provincia del Carchi, los cantones de Eloy Alfaro, Quinindé, San Lorenzo y Rioverde en la Provincia de Esmeraldas, los cantones de Ibarra, Antonio Ante, Cotacachi, Otavalo, Pimampiro y San Miguel de Ucuquí en la Provincia de Imbabura, los cantones de Archidona, El Chaco y Quijos de la Provincia de Napo, los cantones de Cayambe, Pedro Moncayo, Rumiñahui, San Miguel de los Bancos y Pedro Vicente Maldonado y la ciudad capital de Quito en la Provincia de Pichincha, los cantones de Lago Agrio, Gonzalo Pizarro, Putumayo, Shushufindi, Sucumbíos y Cascales en la provincia de Sucumbíos, los cantones de Orellana, La Joya de los Sachas y Loreto en la Provincia de Orellana, con una población aproximada de 3 350 000 habitantes.

## **1.2 Vías de acceso**

Una red de vías, carretables y caminos permiten el acceso tanto a las áreas proximales como a las distantes del VA. La principal vía de acceso hasta la parte más alta del volcán Azufra actual es un carretable en regular estado, que se desprende de la carretera Túquerres – Guachavés. La vía más importante, desde el punto de vista económico y turístico, es la carretera al mar que une la cabecera del municipio de Túquerres con Tumaco y de la cual se desprenden otras carreteras secundarias y caminos que conectan las cabeceras municipales, centros poblados y veredas de la región.

### 1.3 Hidrología

Desde el punto de vista de su hidrológico, el departamento de Nariño cuenta con ríos y quebradas que llevan sus aguas a la cuenca del Pacífico. Los ríos y quebradas que drenan el volcán Azufral pertenecen a esta cuenca, es así como el río Pacual, localizado al norte del volcán y el río Sapuyes, ubicado al suroriente, drenan sus aguas a la cuenca del Pacífico; y el río Güiza y sus afluentes, localizados al occidente, desembocan a la cuenca del Pacífico. Los ríos y quebradas más importantes de la cuenca del Pacual son: El Salado (Campanario y Chapuesquer), Quindescas, Guasí (Cualchá y El Arrayán), Tenguetán (El Salado – Tenguetán), Loma Larga y el Río Azufral (Río Azufral y quebrada Chinganán). La cuenca del río Sapuyes la conforman las quebradas: San Juan, Tutachá, El Manzano, Chaitán, San Vicente, Chungel, San Guillermo, El Común, Los Molinos, La Pedrera, Ventanillas, El Carrizo, Dos Quebradas (El Carmelo y San Antonio), Panamal, Boquerón (Ladrones, Boquerón, Seca, Blanca), que corresponden a la gran cuenca del río Patía. La cuenca del Río Guisa está integrada por las quebradas: Trinidad (Congupi y Gemelas), Honda (Trinidad, El Tigre, Blanca, El Chilpe, La Mesa), El Molino (Molino, La Palma, El Escritorio), El Verde, El Baño, Puerán, Loma Chiquita, La Palma, El Salado, Puente Piedra, El Guamuco, La Planada y La Ciénaga, que conforman la gran cuenca del río Mira.

### 1.4 Trabajos anteriores

Siendo el presente trabajo la primera versión del mapa de amenaza volcánica de Azufral, no se cuenta con estudios previos de evaluación y/o zonificación de amenaza volcánica. Sin embargo, el volcán Azufral ha sido objeto de diferentes estudios geológicos y estratigráficos, insumo para la evaluación de la amenaza volcánica, que han evidenciado su gran potencial explosivo y, por ende, su amenaza para una importante región del departamento de Nariño. Dichos estudios permitieron establecer la cronología y características de eventos asociados a la actividad eruptiva de carácter explosivo y son el insumo para la elaboración de la primera versión del mapa de amenaza del volcán Azufral.

- Bechon y Monsalve (1991) presentaron los resultados sobre el estudio de la actividad reciente del volcán Azufral, estos autores afirmaron que el Azufral se construyó a partir de la superposición de flujos de lava andesítica y *lahares*, posterior a lo cual tuvo lugar la formación de dos calderas y el emplazamiento de domos dacíticos asociados a un periodo de actividad predominantemente explosiva.

- Fontaine (1991) y Fontaine y Stix (1993) presentan la evolución petrológica y geoquímica del complejo de cuatro generaciones de domos riódacíticos emplazados alrededor de la Laguna Verde del Volcán Azufral.

- Betancur y Correa (1992) realizaron un estudio Geológico (cartografía y estratigrafía) de los depósitos proximales del volcán Azufral a escala 1:25000.

- Fontaine (1994) presenta los resultados del estudio sobre la evolución vulcanológica y geoquímica del Azufral. Según este autor las primeras erupciones de este volcán fueron de carácter andesítico, cuyos depósitos se dividen en 5 unidades (3 de lavas, 1 flujo piroclástico y un *lahar*), posteriormente el volcán evolucionó hacia una composición más félsica (riodacítica) para producir los depósitos piroclásticos asociados al emplazamiento de un complejo de domos de la misma composición, el cual se divide en cuatro generaciones. Los depósitos riodacíticos se dividen en 11 unidades (6 flujos piroclásticos, 3 caídas piroclásticas, 1 *lahar* y 1 depósito secundario), las edades de los depósitos y las relaciones estratigráficas indican que el volcán ha sufrido al menos cuatro eventos explosivos riodacíticos hace aproximadamente 4050, 3650, 3470 y 2880 años antes del presente.

-Cortés *et al.* (2001), en el marco de los estudios geológicos y estratigráficos adelantados en el volcán Azufral por el entonces Ingeominas (hoy Servicio Geológico Colombiano), reinterpretaron los depósitos de caídas piroclásticas descritos por Betancur y Correa (1992) como depósitos de oleadas piroclásticas.

-Torres *et al.* (2001), presentan en el Congreso Colombiano de Geología en su VIII versión, el “Avances en la geología y estratigrafía del volcán Azufral”, obtenidos en proyecto del entonces Ingeominas (hoy Servicio Geológico Colombiano) y que fueron la base para el trabajo de Calvache *et al.*, (2003), donde se redefinieron los nombres de algunas unidades eruptivas.

-Torres *et al.* (2003), presentan en el Congreso Colombiano de Geología en su versión IX, la “Propuesta estratigráfica para la definición formal de la formación Azufral, Colombia”. La Formación Azufral, se localiza al sur de Colombia en el departamento de Nariño, en el ámbito de la plancha 428 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), tiene un espesor aproximado de 80 metros y cubre un área aproximada de 420 Km<sup>2</sup>. Las rocas y depósitos que constituyen esta formación son el producto de la actividad volcánica explosiva del volcán Azufral, registrada en depósitos desde 17.790±190 años hasta 3370±70 años AP, con base en información obtenida de 28 dataciones realizadas para dicho trabajo, y 13 ya existentes, todas por el método <sup>14</sup>C. Las columnas tipo de la Formación Azufral, se localizan en la sábana de Túquerres y en las cuencas de los ríos Azufral, Pacual, Sapuyes, Verde y Guisa, pertenecientes a la cuenca del Pacífico. Con base en las descripciones detalladas de las columnas estratigráficas, relaciones de campo y dataciones <sup>14</sup>C, la Formación Azufral se ha dividido, de base a techo, en los siguientes

miembros: Miembro Túquerres, Miembro La Calera, Miembro La Cortadera, Miembro El Espino, Miembro El Carrizo y Miembro Laguna Verde. Los depósitos de la Formación Azufral, suprayacen en contacto discordante lavas pleistocénicas, depósitos de ignimbritas y lavas neógenas, las que a su vez cubren, también discordantemente, las rocas del Complejo Estructural Jagua y de la Provincia litosférica Oceánica Cretácica Occidental (PLOCO).

- Calvache *et al.* (2003), definieron seis unidades eruptivas conformadas por depósitos de composición riodacítica emitidos durante los últimos  $17.970 \pm 190$  años A.P. asociados a la formación de dos calderas y al colapso de flanco de uno de los edificios anteriores al Azufral actual. Las unidades eruptivas definidas (Túquerres, La Calera, La Cortadera, El Espino, El Carrizo y Laguna Verde) corresponden a secuencias de depósitos de corrientes de densidad piroclástica (CDP) concentradas (flujos piroclásticos de ceniza y bloques, de ceniza y pómez) y diluidas (oleadas piroclásticas), estas últimas, con amplia distribución en el área e importantes espesores, lo que permite reafirmar que la actividad reciente del volcán Azufral fue altamente explosiva. Las secuencias antiguas están constituidas por depósitos de ignimbritas y por lavas andesíticas, datadas en  $0.58 \pm 0.03$  Ma por el método K/Ar (Bechon y Monsalve, 1991). En este trabajo se conservaron las unidades estratigráficas presentadas por Torres *et al.* (2003). Los resultados del proyecto adelantado para este trabajo se compartieron antes de su finalización con el proyecto de geología y geomorfología de la plancha 428 Túquerres de la misma institución (Ingeominas hoy Servicio Geológico Colombiano), mediante comunicación escrita de Calvache (2002). Dichos resultados fueron reportados en la memoria de la plancha 428 por González, *et al.* (2002), y han sido referenciados erróneamente en varias investigaciones y publicaciones como de su autoría.

Cortés *et al.* (2009), presentaron escenarios de simulaciones computacionales de flujos piroclásticos, empleando el software Titan2D y basando su parametrización en el registro geológico, esto como insumo para un futuro mapa de amenaza, pero sin desarrollar una zonificación de amenaza volcánica propiamente dicha.

- El SGC (2014) realizó un trabajo preliminar de evaluación y zonificación de la amenaza del volcán Azufral que no fue publicado pero que sirvió de base para el presente trabajo, en el que se redefine la evaluación de la amenaza y la parametrización de las simulaciones para caídas piroclásticas por transporte eólico y *lahares*; se incluyeron adicionalmente otros fenómenos como ondas de choque y avalanchas de escombros.

- Torres y Burbano (2014), complementado por Burbano (2015), para la elaboración de su modelo conceptual de la Laguna Verde, realizaron mediciones batimétricas, identificando una depresión al fondo de la laguna, en el sector NW, que podría asociarse,

según la autora, a la presencia de un cráter secundario, correlacionable con la clara desgasificación, evidenciada por constante burbujeo y emisiones de CO<sub>2</sub> en este sector.

-Burbano (2015), para la elaboración de su modelo conceptual de la Laguna Verde, realizó mediciones batimétricas, identificando una depresión al fondo de la laguna, en el sector NW de esta, que podría asociarse, según la autora, a la presencia de un cráter secundario, correlacionable con la clara desgasificación, evidenciada por constante burbujeo y emisiones de CO<sub>2</sub> en este sector.

- Williams (2015) y Williams *et al.* (2017), exploraron y analizaron la historia eruptiva y la morfología del Volcán Azufral, Colombia, para proporcionar una imagen más completa de las erupciones pasadas, también para inferir qué estilos eruptivos pueden ocurrir en el futuro. A través del uso del análisis de componentes principales en óxidos de Fe-Ti, haciendo una correlación de los domos con los depósitos piroclásticos, permitiendo la identificación de una secuencia eruptiva completa. Sus hallazgos sugieren que la actividad eruptiva en el Volcán Azufral es muy explosiva, experimentando largos períodos de inactividad, interrumpidos por períodos cortos de actividad piroclástica y avalanchas de escombros volcánicas. La geomorfología del complejo de domos fue reinterpretada para comprender mejor la secuencia de crecimiento de los domos. Esta reinterpretación, junto con el análisis geoquímico y la comparación a través de Análisis de Componentes principales (PCA por sus siglas en inglés), permitió la reclasificación del depósito asociado a la Unidad El Carrizo (Calvache *et al.*, 2003), originalmente pensado como un flujo juvenil de bloques y ceniza, posteriormente como una avalancha volcánica de escombros.

Castilla *et al.* (2017), presentan nuevos análisis de litofacies y datos de petrografía y química mineral de la sucesión de depósitos piroclásticos proximales más espesos y jóvenes expuestos sobre el borde interno y externo del cráter actual pertenecientes a la Unidad La Cortadera propuesta por Calvache *et al.* (2003). Las unidades de erupción estudiadas corresponden a tobas vítrico-cristalinas a lítico-cristalinas con estratificación paralela a cruzada de bajo ángulo. Los autores refieren como la ausencia de paleosuelos o depósitos epiclásticos, como una actividad eruptiva continua a lo largo de la sucesión estudiada depositada a partir de CDP diluidas. Estos autores proveen información relacionada con algunas condiciones pre-eruptivas que pudieron haber permitido la generación de vulcanismo explosivo proximal en el pasado reciente.

Sarmiento (2017) estudió en detalle una de las unidades explosivas más recientes del volcán Azufral, caracterizando sus mecanismos de transporte y acumulación, interpretándola como una unidad de depósitos de oleadas basales, de acuerdo con características físicas como: tamaño de grano, estilo en la estratificación de cada capa,



selección de granos en cada capa, soporte de las partículas, el predominio de líticos y cristales y la poca presencia de componente vítreo. Adicionalmente a partir de la identificación de cinco (5) horizontes de fragmentos balísticos en la unidad, infiere 5 fases eruptivas durante todo el episodio volcánico en respuesta a taponamientos del conducto volcánico.

Moreno (2018) realizó la caracterización geológica de un depósito de avalancha de escombros localizado al nororiente del volcán Azufra. Moreno *et al.* (2021), presentan las evidencias de este depósito al que denominaron depósito de avalancha de escombros de San Roque que aflora a lo largo de 13 km en la carretera Túquerres - Samaniego. Los autores realizaron análisis sedimentológicos, granulométricos, microtexturales y mineralógicos. El depósito es macizo, multicolor, mal seleccionado, con predominio de clastos tamaño grava y arena; contiene megaclastos angulares, algunos de ellos con grietas en rompecabezas, y exhibe estructuras como inyecciones, fallas, *horsts - graben*. Las microtexturas superficiales en algunos clastos evidencian colisiones e interacciones de cizallamiento entre ellos, mientras que la mineralogía evidencia el material colapsado involucrado en la avalancha. Basado en las relaciones estratigráficas, el colapso ocurrió entre 0.58 Ma y ~ 18 Ka. El depósito de avalancha de escombros de San Roque cubre un área de 56 km<sup>2</sup>, tiene un volumen estimado de 0,51 km<sup>3</sup>, un avance aproximado de 11 km, y un coeficiente de fricción aparente H/L de 0,109; parámetros que indican un flujo grande y muy móvil. La desintegración dinámica de los clastos más grandes y una interacción posterior por contacto o colisión (modelo de flujo inercial-granular), son el principal mecanismo de transporte, aunque algunas zonas se movieron en forma amortiguada permaneciendo coherente sobre largas distancias (modelo de corte múltiple). Los autores refieren que la zona colapsada parece ser fuertemente afectada por el más reciente avance glacial del pleistoceno y por eventos eruptivos posteriores del volcán Azufra, lo que puede explicar porque este depósito no había sido identificado en estudios previos y refieren que su identificación se vio favorecida por trabajos recientes en la carretera que le atraviesa.

Villamil (2018) realizó análisis estratigráfico, granulométrico, composicional y morfológico de los depósitos de la Cortadera del volcán Azufra identificando dos paquetes de capas piroclásticas (A y B). Los paquetes se diferenciaron por la presencia de una discontinuidad (contacto erosivo), un cambio brusco en la coloración de las capas del paquete A, que son de color marrón rojizo a capas de color gris amarillento predominantes en el paquete B; la granulometría más fina y el mejor desarrollo de estratificación y laminación inclinada en el paquete B. Las capas del paquete A presentan un mecanismo de fragmentación magmático, resultado de una rápida descompresión del magma, mientras que el paquete B presenta un mecanismo de fragmentación freatomagmática seguido por la aparición de un fuerte componente magmático. Los

cambios de estilos eruptivos y de fragmentación indican que dentro del paquete de capas A y B existe un tiempo de reposo largo, que no generó discontinuidades o paleosuelos pero que fue necesario para taponar el conducto y crear las condiciones que permitieran generar un mecanismo de fragmentación freatomagmático como es el caso de un lago intracratérico.

Gutiérrez (2019) continúa los estudios de detalle en depósitos de la unidad La Cortadera, realizando un análisis de componentes y morfologías vítreas con el objetivo de generar información para el entendimiento de su mecanismo de fragmentación y comprender cambios con el tamaño de grano, el tiempo y la distancia, con relación a la posible barrera topográfica que haya podido constituir el borde del cráter. Los resultados sugieren una primera fase de fragmentación con mayor aporte magmático, que genera depósitos con predominancia de fragmentos vítreos irregulares de vesicularidad alta y fragmentos porfíricos frescos juveniles. Seguida por una fase donde dominaría la fragmentación freatomagmática, impulsada por la combinación de agua externa y esfuerzos generados por la fragmentación magmática que ocurre simultáneamente. Así pues, se generan depósitos ricos en fragmentos líticos accesorios y cristales libres provenientes de la fragmentación preferente del conducto, sistema hidrotermal y cráter y, fragmentos vítreos equidimensionales o irregulares, densos a pobremente vesiculados, con texturas superficiales como grietas de desecación y texturas en musgo. Adicionalmente, se confirmó que la pared del cráter representó una barrera topográfica para los flujos piroclásticos, bloqueando las partículas más densas y enriqueciendo la parte exterior en fragmentos de menor densidad.

Monsalve (2020) en su investigación sobre el frente volcánico activo en Colombia, compila las principales características del vulcanismo reciente en Colombia en su contexto tectónico y presenta una síntesis de la actividad reciente (últimos 34 años) e histórica. En su referencia al segmento volcánico sur que corresponde a una extensión del vulcanismo ecuatoriano, localizado en la Cordillera Occidental y en la Depresión Interandina Cauca – Patía, incluye al volcán Azufra haciendo una síntesis de estudios desde inicios de los 80 y puntualizando sobre algunas reinterpretaciones y aportes en el estado del conocimiento científico.

Pardo *et al.* (2020) estudiaron los mecanismos de erupción que permitieron la fragmentación fina de tapones del Azufra y la generación de peligrosas Corrientes de Densidad Piroclástica (CDPs) diluidas. Dichos autores hicieron caracterización morfoquímica 2D, caracterización morfométrica 2D a 3D y microtextural de partículas de ceniza muestreadas en los depósitos proximales más jóvenes conocidos de CDP en el volcán siguiendo el marco estratigráfico y sedimentológico previamente establecido por Castilla *et al.* (2018). Su objetivo es comprender mejor los procesos de erupción y la

cronología potencial de eventos durante erupciones explosivas peligrosas que involucran interacciones con un lago cratérico. Para esto estudiaron los mecanismos de fragmentación de magmas de alta viscosidad basándose en una caracterización estadísticamente representativa de fracciones de tamaño de ceniza fina a muy fina (2–3 a 3–4  $\phi$ : 250–63  $\mu\text{m}$ ) y ceniza extremadamente fina (5  $\phi$ : 63–32  $\mu\text{m}$ ).

Jones-Ivey *et al.* (s.f.) desarrolla trabajos de simulación computacional flujos piroclásticos empleando una metodología probabilística, integrando resultados de simulaciones con el software Titan2D (Patra *et al.*, 2005; Simakov, *et al.*, 2019 y Patra *et al.*, 2020), tomando como base la información recopilada por Williams (2015) y Williams *et al.* (2017). Estos autores presentan resultados para tres escenarios, con volúmenes entre  $1 \times 10^4$  y  $1 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$ , para ángulos de fricción basal entre 4 y 35 grados. Su escenario de parametrización intermedio presenta una zonificación similar a la lograda por el SGC en el proceso de elaboración de este mapa de amenaza, para flujos piroclásticos de ceniza y pómez. Mientras que su escenario de parametrización máxima presenta áreas de afectación aún mayores a la extensión de los depósitos (y consecuente zonificación) para oleadas piroclásticas identificadas en las diferentes unidades eruptivas del volcán Azufral.

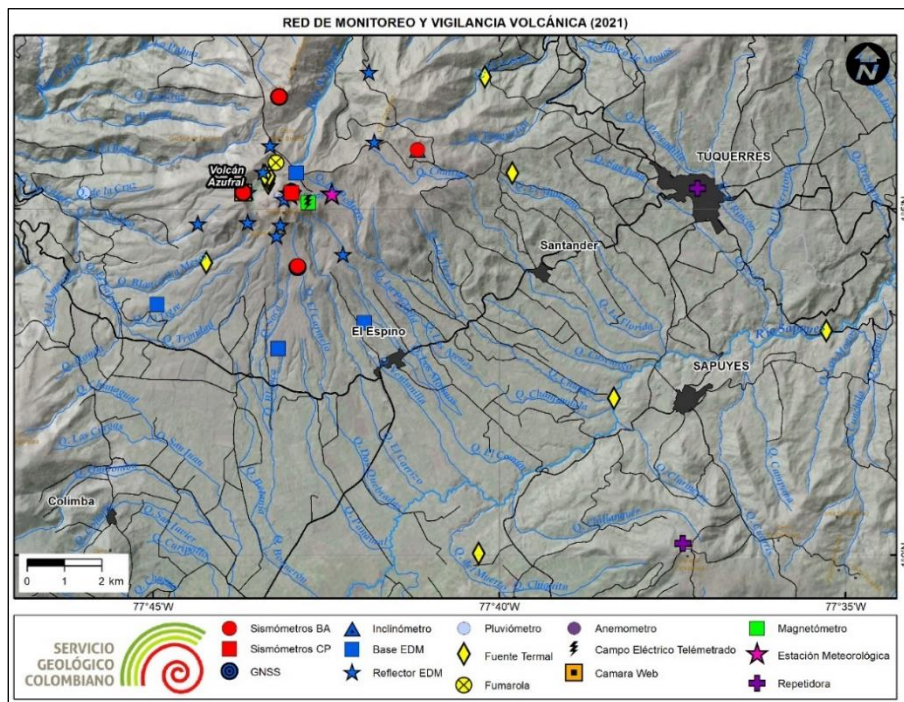
En el siguiente capítulo se consignan las primeras referencias y descripciones que se conocen de actividad principalmente superficial del volcán Azufral.

## **1.5 Monitoreo volcánico y estado de actividad**

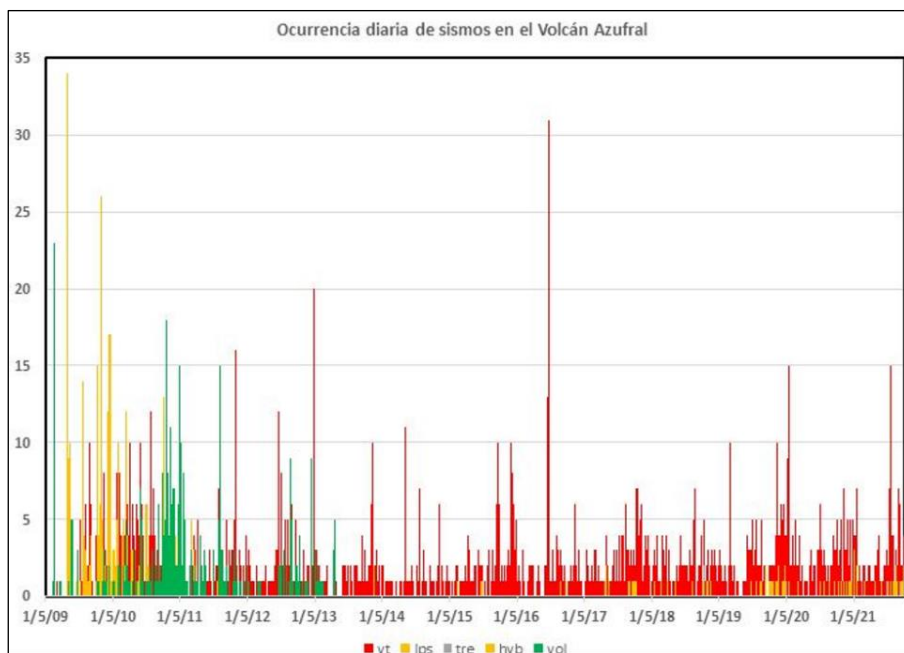
El Servicio Geológico Colombiano (SGC) a través del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (SGC-OVSP) inició en diciembre de 2008 el monitoreo formal y permanente del volcán Azufral. La primera estación multiparamétrica, denominada Chaitén, instalada el 15 de diciembre de 2008, en funcionamiento hasta la fecha, consta de un sismómetro y de un inclinómetro electrónico. Se localiza a 4,3 km al ENE del cráter de Azufral en inmediaciones de la cabaña de CORPONARIÑO. Desde noviembre de 2009 la red telemétrica se ha ampliado, distribuyéndose a diferentes distancias del centro de la Laguna Verde (entre 0,5 y 10,5 km y alturas entre 3569 y 4025 m s.n.m.). Hasta el momento se cuenta con 6 estaciones multiparamétricas que incluyen 15 tipos de sensores diferentes entre los que se encuentran: sismómetros, inclinómetros, instrumentos GNSS (Global Navigation Satellite System), termocupla, cámara tipo Web, estación climatológica y estaciones de campo eléctrico y magnético. Esta red incluye transmisión telemétrica y digital de los datos. El monitoreo telemétrico se complementa con trabajos en campo relacionados con muestreo de 7 fuentes termales en la zona de influencia del volcán (iniciados por diferentes investigadores en 1981) y la ocupación de una red de Medición Electrónica de Distancias (EDM, por sus siglas en inglés), compuesta

por 4 bases y 12 prismas reflectores (SGC, 2021). La figura 3 ilustra la configuración de la red de monitoreo del Volcán Azufra.

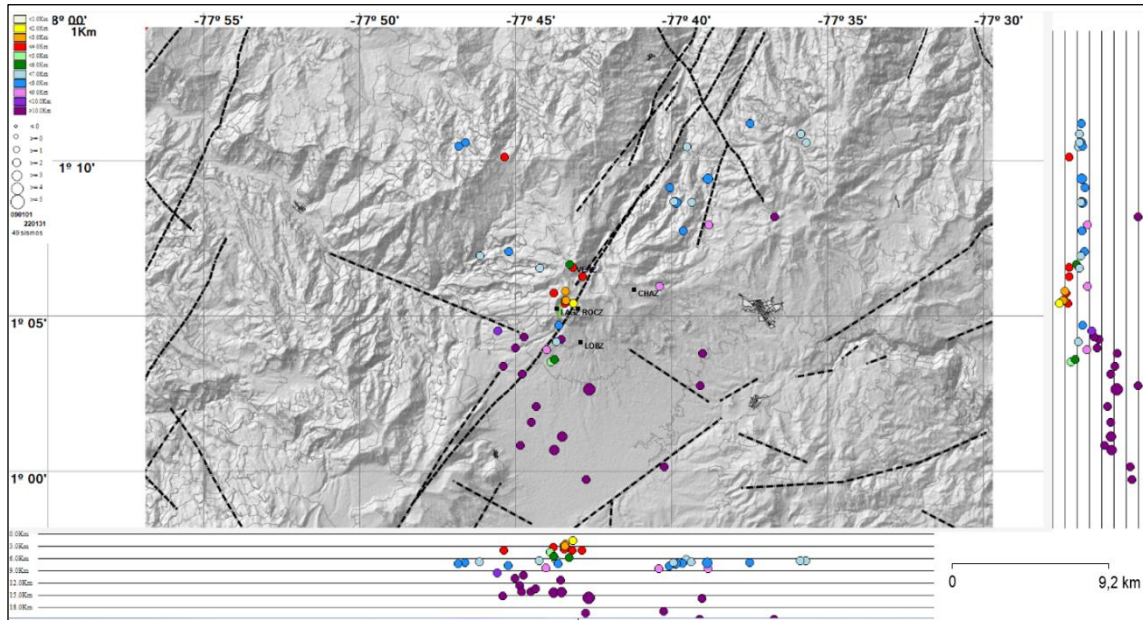
Con una línea base de monitoreo continuo por 13 años, el 69 % de la sismicidad corresponde al registro de eventos asociados con procesos de fractura de roca como consecuencia de propagación de esfuerzos en la estructura volcánica por una posible interacción con el sistema hidrotermal (sismos tipo Volcano-Tectónico - VT). Un 15 % se asocia a sismos relacionados con movimiento de fluidos al interior del sistema volcánico (sismos tipo Largo Periodo - LP y sismos tipo tremor - TRE); el 1 % corresponde al registro de eventos híbridos, asociados tanto a la fractura de material cortical como a movimiento de fluidos (sismos tipo Híbrido - HYB) y finalmente un 15% corresponde a sismos que ocurren en la región volcánica, pero que por sus características no es posible su clasificación o inclusión en alguno de los tipos anteriores (por lo que se los denomina como sismos tipo VOL). La figura 4, muestra en un histograma, el comportamiento de la ocurrencia de la sismicidad en la zona de influencia del Volcán Azufra entre 2009 y 2021. Respecto a la sismicidad tipo VT, ésta se ha localizado de manera dispersa (figura 5), en un radio menor a 20 km respecto al centro de la laguna cratéica, con profundidades hasta de 24 km respecto a la cima volcánica (nivel de referencia 4070 m s.n.m.) y con magnitud local máxima de 4,0. El sismo más energético fue registrado el 29 de marzo de 2021, reportado como sentido por habitantes de varias poblaciones en su zona de influencia; sin embargo, la mayor parte de eventos que se registran en este volcán, presentan niveles energéticos bajos (SGC, 2021).



**Figura 3.** Red de monitoreo y vigilancia volcánica  
Fuente: SGC (2021)



**Figura 4.** Histograma del número de eventos volcánicos por tipo entre mayo de 2009 y diciembre de 2021  
Fuente: SGC (2021)



**Figura 5.** Localización epicentral e hipocentral de sismos de fractura con magnitud local mayor a 2 Registrados en la zona de influencia del volcán Azufral entre mayo de 2009 y enero de 2022, con sus respectivos cortes N-S (derecha) y E-W (abajo), y con intervalos que representan 3.0 km de profundidad con respecto a la cima volcánica. Las líneas negras punteadas, referencian los principales trazos de fallas geológicas activas identificadas en la región  
Fuente: SGC (2022)

Las variaciones de ascenso y descenso en el comportamiento de las componentes N y E de algunos inclinómetros cercanos a la laguna cratérica, se han asociado posiblemente con cambios en el nivel del agua contenida en la laguna, asociados a las variaciones de clima (temporadas de lluvia y “secas”) y en otras ocasiones, con cambios de temperatura ambiente en la zona. En general, las estaciones GNSS y EDM muestran estabilidad en sus registros. De manera complementaria, el volcán Azufral cuenta en la actualidad con una red de monitoreo de 7 fuentes termales (FT), entre las que se encuentran: Laguna Verde N°1, Quebrada Blanca (Chimangual), San Ramón, Qualanquizán, Salado de Malaver, Arrayán Salado y Tutachag. A través del tiempo de monitoreo se han presentado variaciones de los parámetros fisicoquímicos (Ph, temperatura, alcalinidad y conductividad), sin cambios importantes asociados a actividad volcánica. De acuerdo con el registro histórico de los muestreos en estas FT desde el año de 1981, las temperaturas medidas están entre los 20°C y los 80°C. Desde mayo de 2014, el SGC-OVSP efectuó la instalación de una termocupla en el domo Mallama con transmisión digital de la información. En general, la temperatura que muestra el sector fumarólico muestreado en este domo presenta valores promedio cercanos a los 85 °C, temperatura similar a la medida por Boussingault en 1831 (86°C).

Lo más destacado de la actividad de Azufral, durante el tiempo de su monitoreo volcánico, corresponde a manifestaciones de pequeña magnitud de su actividad superficial, de tipo hidrotermal, en el área NW de la Laguna Verde, en el sector conocido como “La Playita”, una zona de alteración hidrotermal preexistente. Estas manifestaciones se presentaron en julio de 2009 (Gómez y Ponce, 2009), agosto de 2010 (Ingeominas, 2010), mayo de 2016 (SGC, 2016) y junio del 2017 (SGC, 2017a). En agosto de 2017 procesos similares tuvieron lugar en el sector del domo Mallama (SGC, 2017b). El proceso de 2009 fue el de mayor volumen y cobertura en comparación con los demás procesos. La figura 6 ilustra algunos aspectos de la actividad hidrotermal que se presentó en el año 2009.



**Figura 6.** Emisión de gases al noroeste de la Laguna Verde Azufral Sector “La Playita” en julio de 2009  
Fuente: SGC (2022)

El proceso eruptivo de origen hidrotermal, registrado entre el 13 y el 18 de julio de 2009, produjo agrietamientos y diversos colapsos, a través de los cuales fue emitido material fluido caliente. Durante la visita efectuada el 19 de agosto de 2009, el material emitido, que entró en contacto con las aguas de la Laguna Verde, presentó anomalías térmicas en sus zonas de contacto, con valores máximos entre 22 y 58°C. Las anomalías térmicas en la zona del colapso mostraron temperaturas entre 19 y 40 °C. Existieron adicionalmente otras manifestaciones de actividad superficial, como el aparente

incremento en la cantidad y zonas con burbujeo en la laguna, así como la fluctuación en el nivel del agua (Gómez y Ponce, 2009).

Entre finales de julio e inicios de agosto de 2010 se registró nuevamente salida de material caliente, similar al episodio de julio de 2009, esto acompañado de cambios en el nivel del agua e incremento en el burbujeo en varios sectores de la Laguna Verde; y cambios en la coloración de la Laguna La Barrosa, ubicada al NE de la Laguna Verde (Ingeominas, 2010).

Respecto a la salida de material registrada el 10 de mayo de 2016, por la cámara web situada en el volcán Azufral y particularmente a partir del reconocimiento e imágenes tomadas durante el trabajo de campo realizado el 19 de mayo de 2016, se pudo evidenciar que el material emitido corresponde a Azufre elemental, producto de la actividad hidrotermal del volcán (figura 7). El material encontrado se ubicó en el mismo sector W de la Laguna Verde, en la zona denominada como “La Playita” (SGC, 2016).



**Figura 7.** Depósito en el sector La Playita – Laguna Verde  
Fuente: SGC (2016)

En junio de 2017, se observó un pequeño depósito de material (azufre) similar a los observados en el sector de "La Playita" previamente referidos, pero esta vez emitido desde el Domo Mallama, localizado en el costado NW de la Laguna Cratérica; la temperatura máxima tomada en el sitio de depósito del material fue de 35°C (SGC, 2017).

El seguimiento permanente de la actividad del volcán Azufral de manera sistemática desde el año 2008 ha permitido al SGC, a través de su SGC-OVSP, mediante la evaluación



de los diferentes parámetros de monitoreo multiparamétrico, asignar y mantener el nivel IV o nivel Verde en la actividad, que significa, volcán activo con comportamiento estable (Gómez *et al.*, 2021). El SGC-OVSP ha mantenido informadas a las autoridades y comunidades de la evolución de la actividad a través de diferentes boletines publicados periódicamente (SGC, 2021b).

Este capítulo fue elaborado con la participación del Coordinador del SGC-OVSP y del Grupo de monitoreo volcánico del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (SGC-OVSP), que hacen parte de la Dirección Técnica de Geoamenazas del SGC.

## **1.6 Metodología**

La evaluación de la amenaza volcánica para la elaboración de los mapas de amenaza en el Servicio Geológico Colombiano se basa en la información geológica del volcán seleccionado, la morfología del edificio volcánico y las herramientas disponibles para la simulación computacional de los diferentes fenómenos con posibilidad de ocurrir en erupciones futuras. Se debe tener en cuenta el estándar institucional consignado en el documento del “*Procedimiento de Evaluación de la Amenaza Volcánica*”, el cual establece los lineamientos generales para la evaluación, zonificación y representación de la amenaza volcánica en Colombia (SGC, 2017).

Para la metodología de evaluación de amenaza volcánica vigente en el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017) se considera un volcán como activo cuando ha presentado registro de actividad eruptiva, sísmica, emisión de gases o fuentes termales durante los últimos 10.000 años, siendo en estas condiciones un volcán con potencialidad para producir erupciones futuras.

La elaboración del mapa de amenaza del volcán Azufral se realizó teniendo en cuenta el conocimiento geológico que se tiene hasta la fecha sobre este volcán (Bechon y Monsalve, 1991; Fontaine, 1991; Betancur y Correa 1992; Fontaine y Stix, 1993; Fontaine, 1994; Cortés *et al.*, 2001; Torres *et al.*, 2001; Torres *et al.*, 2003; Calvache *et al.*, 2003; Cortés *et al.*, 2009; SGC, 2014; Burbano, 2015; Williams *et al.*, 2017; Castilla *et al.*, 2017; Moreno, 2018; Moreno *et al.*, 2021).

Igualmente, se considera la información disponible de reportes históricos de actividad superficial y eruptiva y aportada por el monitoreo a cargo del SGC- Observatorio Vulcanológico y Sismológico del Pasto (Ingeominas, 2009; Torres y Burbano, 2015; SGC, 2021).

La información recopilada fue objeto de interpretación y análisis con el fin de identificar los fenómenos con potencialidad de ocurrencia futura.

En la evaluación de la amenaza volcánica del Azufral, se optó por trabajar con escenarios de referencia de otros volcanes a nivel nacional o mundial con características comunes (composición del magma, estilo eruptivo, índice de explosividad), para fenómenos que no cuentan con un registro geológico claro, como es el caso de las caídas piroclásticas y las ondas de choque; o donde no fue posible el reconocimiento de sus depósitos en campo, por condiciones de seguridad y orden público, como posibles depósitos de *lahares* en zonas distales al edificio volcánico. Para los fenómenos con registro geológico claro (CDPs) se tomaron las características principales de sus depósitos como insumos para el posterior proceso de simulación computacional de dichos fenómenos, cuyos resultados son presentados por Muñoz *et al.* (2021).

Con la información aportada por el monitoreo volcánico y el diagnóstico llevado a cabo desde el año 2008 por el SGC- OVS-Pasto (SGC, 2021) se caracterizó el estado actual de la actividad del volcán Azufral. Esta información junto con el conocimiento geológico y de la historia eruptiva del volcán sirvió de base para la identificación de posibles centros de emisión y la determinación de escenarios eruptivos futuros.

La información generada en el presente trabajo es la base para el desarrollo de trabajos de simulaciones computacionales, que validados de acuerdo con el conocimiento geológico, son la base para la zonificación de la amenaza por los diferentes fenómenos contemplados en este estudio de evaluación de la amenaza y para la posterior elaboración del mapa de amenaza volcánica y su respectiva memoria, las cuales son presentadas en SGC (2021) y Cortés *et al.* (2021).

Empleando los insumos aportados por la evaluación de la amenaza, se trabajó en la simulación computacional de los fenómenos contemplados. Los resultados de simulaciones computacionales sobre modelos digitales de terreno (DEM, por sus siglas en inglés) se llevaron a cabo utilizando las herramientas específicas para cada fenómeno volcánico, permitieron definir las áreas potencialmente amenazadas en erupciones futuras del volcán Azufral. Para este volcán se realizaron simulaciones de oleadas piroclásticas con *Energy Cone* (Palma, 2013), corrientes de densidad piroclástica concentradas (flujos piroclásticos de pómez y ceniza) con el código TITAN2D (Patra *et al.*, 2005; Simakov, *et al.*, 2019 y Patra *et al.*, 2020); caídas piroclásticas con los códigos Tephra2 (Bonnadonna *et al.*, 2005, 2012; Connor y Connor, 2006; Volentik *et al.*, 2009) y TephraProb (Biass *et al.*, 2016). El apoyo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) fue importante para la simulación de proyectiles balísticos empleando el código Eject! (Mastin, 2001) y la simulación de *lahares*, por el método LaharZ (Iverson *et al.*,

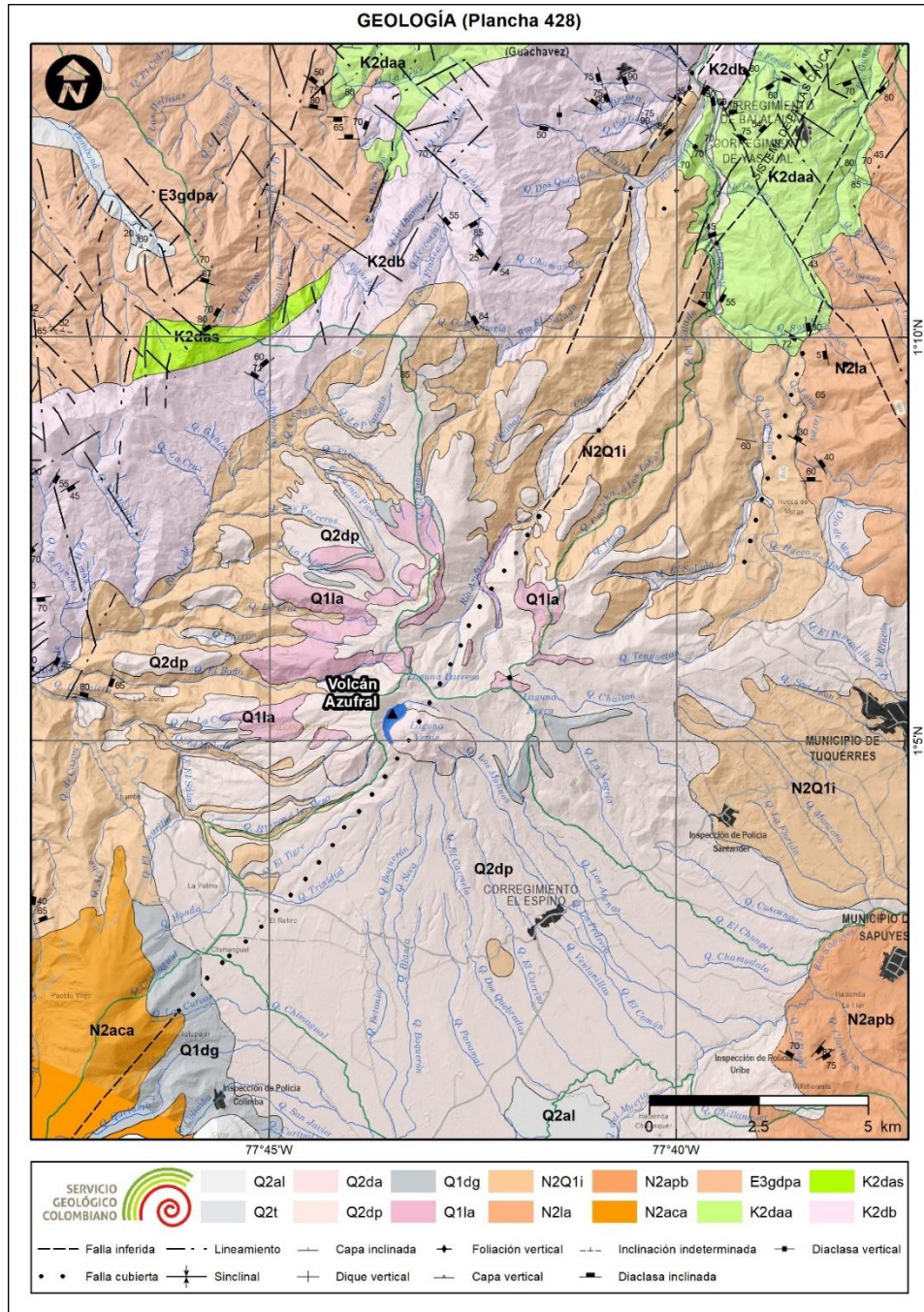
1998; Schilling, 1998; y Schilling, 2014); para avalancha de escombros se utilizó el código Titan 2D (Patra *et al.*, 2005; Simakov, *et al.*, 2019 y Patra *et al.*, 2020) y para la simulación de las ondas de choque se empleó el código *HYDESIm* (Meyer, 2018). Los parámetros requeridos por las herramientas referidas fueron obtenidos principalmente de los trabajos geológicos y estratigráficos existentes y de volcanes de referencia.

El mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral consta de tres zonas de amenaza: alta, media y baja, obtenidas a partir de la integración analítica de las áreas definidas por los modelamientos computacionales de los fenómenos volcánicos e información del registro geológico. La elaboración de la primera versión del mapa de amenaza del volcán Azufral estuvo a cargo de personal del SGC perteneciente a los Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos de Manizales y Pasto.

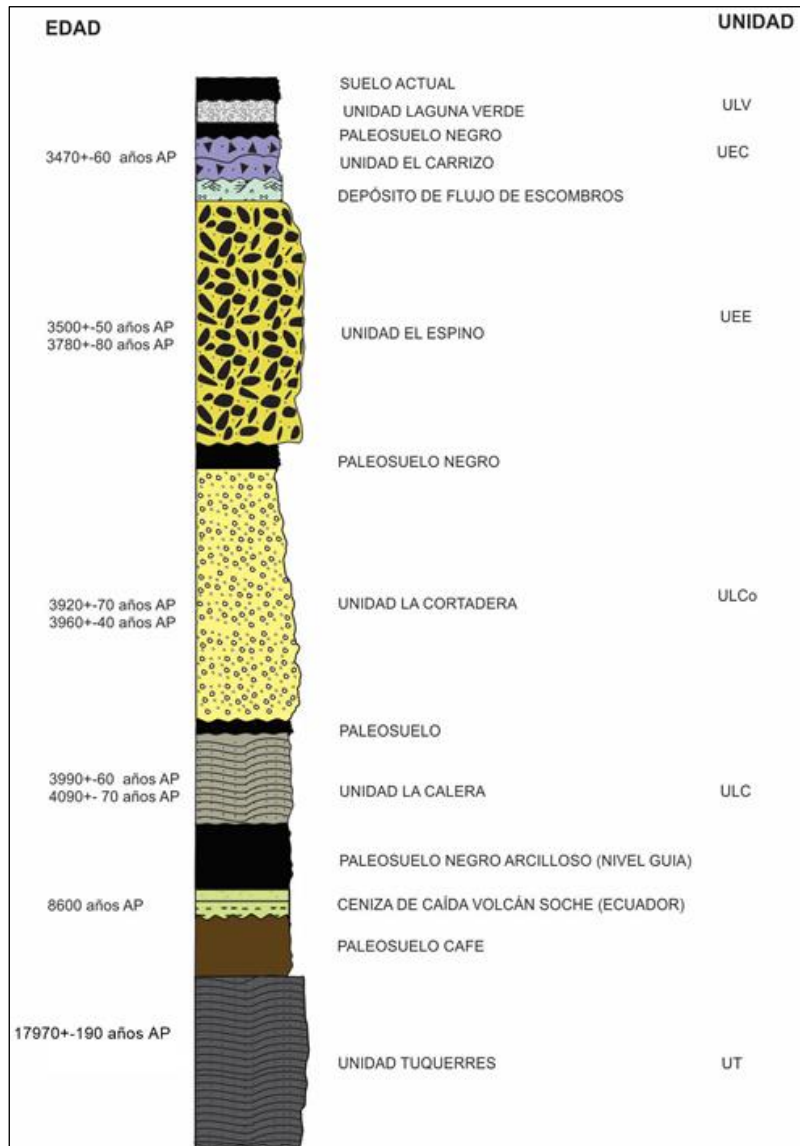
## 2. REGISTRO GEOLÓGICO E HISTÓRICO DEL VOLCÁN AZUFRAL

El registro geológico (figura 8) y estratigráfico de la actividad eruptiva del volcán Azufral evidencia su estilo eruptivo explosivo y amenaza volcánica potencial. El Azufral es un volcán compuesto de composición dacítica, que ha producido durante su historia eruptiva flujos de lava y domos de lava, CDPs concentradas y diluidas (flujos piroclásticos de pómez, flujos piroclásticos de bloques y ceniza, oleadas piroclásticas), avalanchas de escombros y *lahares* (Bechon y Monsalve, 1991; Fontaine, 1991; Betancur y Correa 1992; Fontaine y Stix, 1993; Fontaine, 1994; Cortés *et al.*, 2001; Torres *et al.*, 2001; Torres *et al.*, 2003; Calvache *et al.*, 2003; Cortés *et al.*, 2009; SGC, 2014; Burbano, 2015; Williams *et al.*, 2017; Castilla *et al.*, 2017; Moreno, 2018; Moreno *et al.*, 2021). El volcán Azufral se caracteriza por presentar un complejo de domos, una laguna dentro del cráter actual, la presencia de fuentes termales, campos fumarólicos y por producir erupciones sin evidencia geológica de la formación de grandes columnas eruptivas. Torres *et al.* (2003), con base en los trabajos de Betancur y Correa (1992), Fontaine y Stix (1993), Fontaine (1994) y Torres *et al.* (2001), redefinen la estratigrafía del volcán dividiéndolo en seis unidades eruptivas distribuidas en los últimos 20 000 años. Tal división fue retomada por Calvache *et al.* (2003) para realizar un análisis detallado de cada unidad eruptiva y presentar la distribución de cada tipo de depósito encontrado. En la figura 9 se muestra la columna estratigráfica generalizada propuesta por Calvache *et al.* (2003), en cuya base se encuentra la Unidad Eruptiva denominada Túquerres. En la figura 10 se muestra la distribución en planta de las unidades holocénicas del volcán Azufral de acuerdo con Calvache *et al.* (2003).

La unidad eruptiva Túquerres está constituida por depósitos de CDPs concentradas y diluidas, con espesores máximos de hasta 3,5 m, y por un depósito de avalancha de escombros. En la parte superior de la unidad afloran oleadas piroclásticas de color gris a amarillo, de espesor variable, con estratificación cruzada, compuestos por *lapilli* y ceniza. Los flujos piroclásticos de esta unidad están constituidos por ceniza media a gruesa y *lapilli*, son masivos, de color gris, matriz soportados y con espesores promedio de un metro. Esta unidad aflora al suroeste, al este y al norte del volcán Azufral. Los mejores afloramientos se encuentran localizados sobre los taludes de los caminos de las veredas San Roque, El Chamorro, Tutachá y El Manzano, al sureste en la carretera Túquerres-Santander de Valencia; en el carreteable a la Laguna Verde, en la parte alta de la vía Túquerres-Samaniego; y en la carretera Guachavés-La Planada, en el sector de Chapuésquer, al oeste del volcán. En la base de este depósito se encuentran fragmentos pequeños de madera carbonizada, datados por  $^{14}\text{C}$ , con una edad de  $17\ 970 \pm 190$  años A.P. (Calvache *et al.*, 2003). Para la evaluación de la amenaza volcánica no se tuvo en cuenta esta unidad eruptiva, ya que para tal fin se consideran las unidades eruptivas holocénicas con depósitos claramente asociables al volcán actual.



**Figura 8.** Mapa Geológico del volcán Azufra  
Fuente: modificado de la plancha geológica 428 (Ingeominas, 2003)



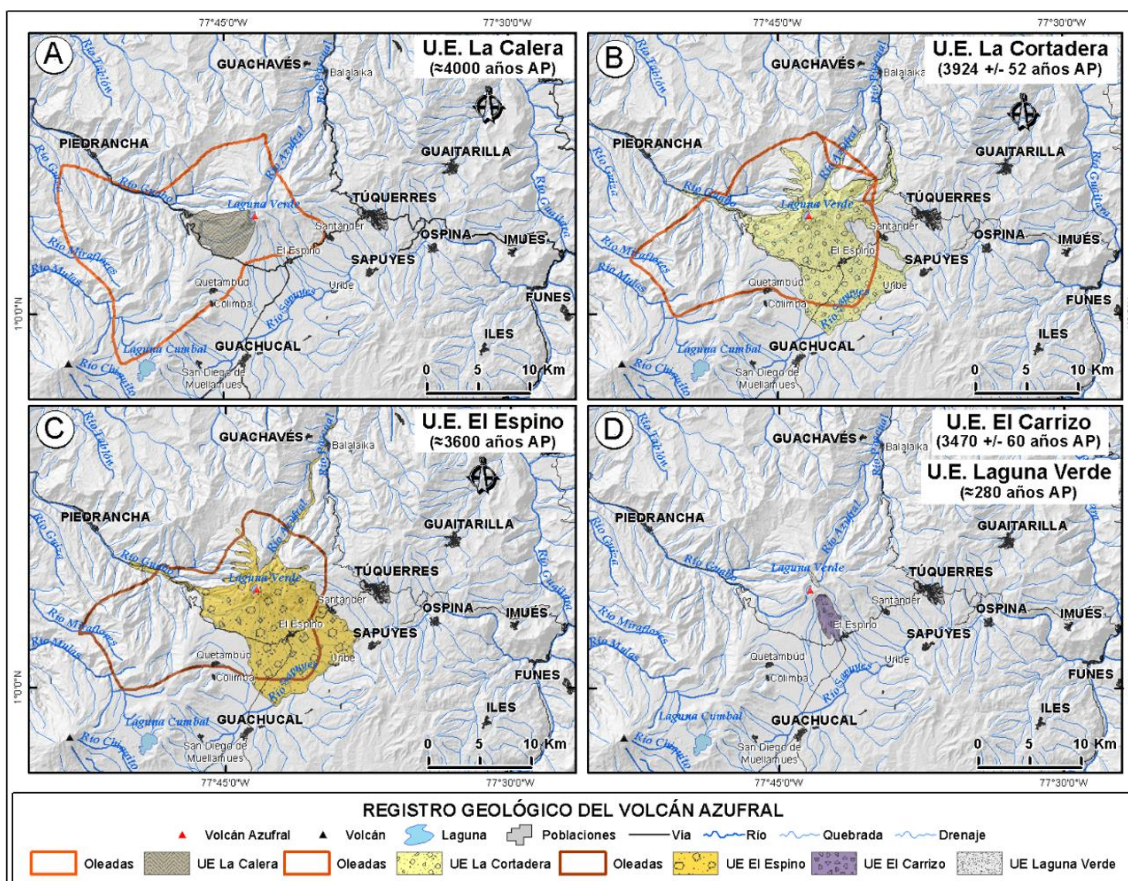
**Figura 9.** Columna estratigráfica generalizada para el volcán Azufral  
Fuente: modificado de Calvache *et al.* (2003)

En la tabla 1, las siglas en las columnas relacionadas con los trabajos de Betancur y Correa (1992), Fontaine y Stix (1993) y Fontaine (1994), corresponden a las denominaciones que los autores definieron en sus estudios para las unidades eruptivas de acuerdo con el tipo de depósito volcánico. Las siglas empleadas por Calvache *et al.* (2003) corresponden a los nombres de los lugares donde mejor afloran los depósitos característicos de las unidades eruptivas propuestas.

**Tabla 1.** Unidades eruptivas en el volcán Azufral para los últimos 20 000 años

Edad (años AP)	Unidad Eruptiva			
	Betancur y Correa (1992)	Fontaine y Stix (1993); Fontaine (1994)	Torres <i>et al.</i> (2001)	Calvache <i>et al.</i> (2003)
280	AC4		Laguna Verde	Laguna Verde (ULV)
2880 ± 200		CP7	La Calera	
3470 ± 60	AF9	CP6		El Carrizo (UEC)
≈ 3600	AF6	L2, CP5	El Espino	El Espino (UEE)
-	AC2, AC3, AF5	RT2, RT3, CP4	Guaicés	La Cortadera (ULCo)
≈ 4000	AC1	RT1	Vervena	La Calera (ULC)
-			La Ciénaga	
17 970 ± 190	AF1, AF2	CP2	Santander de Valencia	Túquerres (UT)

Fuente: autores



**Figura 10.** Unidades geológicas holocénicas del volcán Azufral

A. La Calera. B. La Cortadera. C. El Espino. D. Unidad El Carrizo y Unidad Laguna Verde

Fuente: modificado de Calvache (2013)

### **2.1 Unidad eruptiva La Calera – ULC (4000 años A.P.)**

La unidad eruptiva La Calera (figura 10A) está conformada por depósitos de CDPs concentradas y diluidas (flujos piroclásticos de bloques y ceniza, flujos piroclásticos de pómez y oleadas piroclásticas) con un espesor de 10,5 m. En la base de la secuencia, los depósitos de oleadas piroclásticas de la unidad afloran como capas grises de pocos centímetros de espesor y variaciones granulométricas que ofrecen una apariencia estratificada. Los espesores son de 1,5 m a una distancia de 6 km del volcán. El depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza es caótico, de color gris, masivo, con un espesor máximo de 3 m y se asocia a depósitos originados por la explosión de domos. Aflora al este y sureste del volcán Azufral sobre los taludes de los caminos de las veredas San Roque, El Chamorro, Tutachá y El Manzano (Calvache *et al.*, 2003).

### **2.2 Unidad eruptiva La Cortadera – ULCo (3900 años A.P.)**

La unidad eruptiva La Cortadera (figura 10B) está constituida por una secuencia de depósitos de CDPs concentradas y diluidas (flujos de pómez y oleadas piroclásticas) con un espesor estimado de 9 m. Las oleadas de esta unidad son depósitos de color gris claro a amarillo, distribuidos en capas delgadas de granulometría variable, presentando en algunos sitios estratificación paralela y en otros sitios estratificación cruzada. En cuanto a los flujos piroclásticos de pómez y ceniza son depósitos masivos. Los depósitos de esta unidad afloran principalmente hacia el oeste y suroeste del volcán Azufral, a lo largo de la vía El Espino-Piedrancha, a la altura del corregimiento de Chambú y en la localidad de La Calera; también en la parte sureste del volcán y en las cabeceras de las quebradas Tenguétán u Ortiga y El Salado (Calvache *et al.*, 2003). En los últimos años, esta unidad ha sido objeto de estudios de detalle, referidos como estudios previos en el capítulo 1 de generalidades, los cuales han aportado valiosa información para la caracterización y entendimiento de esta unidad y sus implicaciones de amenaza (Castilla *et al.*, 2017; Sarmiento, 2017; Villamil, 2018 y Gutiérrez, 2019).

### **2.3 Unidad eruptiva El Espino – UEE (3600 años A.P.)**

La unidad eruptiva El Espino (figuras 10C y 11) está constituida por una secuencia de depósitos de CDPs concentradas y diluidas (flujos piroclásticos de pómez, flujos piroclásticos de bloques y ceniza y oleadas piroclásticas), además de un depósito de *lahar*. Los depósitos de flujos piroclásticos de esta unidad tienen espesores variables y en ocasiones pueden alcanzar más de 20 m. Los depósitos de oleadas piroclásticas son matriz soportados, con espesores irregulares y se presentan intercalados con los depósitos de flujos de ceniza y pómez referidos anteriormente. Los espesores de los depósitos de oleadas varían de algunos centímetros, en los altos topográficos, hasta



aproximadamente 10 m en las partes bajas. Es característica la estratificación cruzada y se aprecian variaciones en el tamaño del grano, presentando niveles delgados ricos en arcilla, intercalados con niveles ricos en pómez de granulometría más gruesa (Calvache *et al.*, 2003).



**Figura 11.** Afloramiento de la unidad eruptiva El Espino

Fuente: autores

Esta unidad es la más ampliamente distribuida alrededor del volcán Azufral, aflorando en los sectores norte, sur y oeste. Las mejores exposiciones se encuentran en los sectores de: El Espino (en la vía Túquerres-Tumaco), La Calera, la zona comprendida entre las quebradas Ventanillas y El Carrizo, el valle del río Azufral, el sector de Balalaika y Pieramá. Adicionalmente, en la carretera Túquerres-Laguna Verde, la planicie de Túquerres entre las localidades de Panamá y Chimangual; y en las partes altas del volcán (Calvache *et al.*, 2003).

#### **2.4 Unidad eruptiva El Carrizo - UEC (3470 ± 60 años A.P.)**

La unidad el carrizo (figura 10D) está constituida por un depósito de corriente de densidad piroclástica (flujo de bloques y ceniza) asociado a colapso de domo (figura 12). Se trata de un depósito con un espesor máximo de 6 m, masivo, caótico, de color gris a rojizo, compuesto principalmente por fragmentos líticos monolitológicos, con pómez subordinada en una matriz de ceniza fina. Aflora en forma muy localizada, al suroriente

del volcán Azufral, hacia el sector de Panamal y Aduanal, siguiendo las márgenes de las quebradas el Carmelo y el Carrizo (Calvache *et al.*, 2003).

Williams (2015) propone reclasificar esta unidad como una avalancha de escombros volcánica, basado en análisis geoquímicos y geomorfológicos. Sin embargo, Williams *et al.* (2017) plantean que las evidencias sedimentológicas del depósito son ambiguas y que la información, que al respecto aportan los afloramientos, no es suficientemente buena como para diferenciar entre los tipos de materiales generados por una avalancha de escombros y un flujo piroclástico de bloques y ceniza. Adicionalmente, Moreno (2018) considera posible la clasificación de estos depósitos propuesta por Calvache *et al.* (2003), debido a la presencia de fragmentos de madera carbonizada, más comunes para flujos piroclásticos de bloques y ceniza.



**Figura 12.** Afloramiento de la unidad eruptiva El Carrizo

Fuente: autores

## **2.5 Unidad eruptiva Laguna Verde - ULV (280 años A.P.)**

La unidad eruptiva Laguna Verde está conformada por depósitos de Corrientes de Densidad Piroclástica (oleadas piroclásticas). Se trata de un depósito constituido principalmente por ceniza fina a media, masivo, con espesor variable, máximo de 40 cm, de color amarillo claro, casi café muy claro. Aflora en sectores próximos al volcán en la carretera Túquerres-Laguna Verde, 3 km antes del cráter, sobre el camino que del cráter

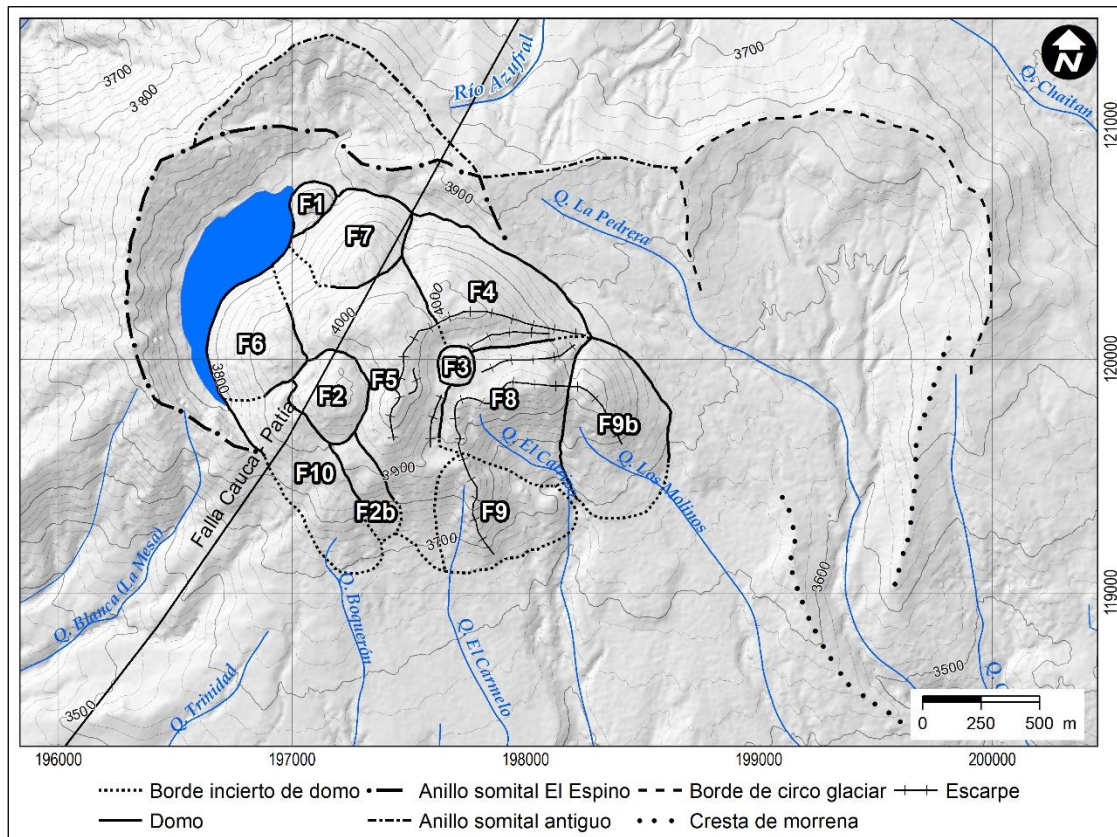
conduce a la localidad de La Planada, a 2 km de distancia; y en la parte baja de la quebrada La Blanca (Calvache *et al.*, 2003).

Castilla *et al.* (2018) reportan que la sucesión piroclástica por ellos estudiada, está cubierta por una superficie erosiva, la cual fue posteriormente cubierta por 4 caídas de ceniza muy finas (denominadas T1 a T4) limitadas por paleosuelos. Los autores proponen que esta sucesión es de fuente externa al Azufral y por lo tanto deben ser estudiados en detalle para confirmar dichas fuentes. Sin embargo, también refieren que estos depósitos que se constituyen como potenciales marcadores estratigráficos fueron preliminarmente definidos como la Unidad Laguna Verde, a lo cual de acuerdo al conocimiento de la unidad reportada por Calvache *et al.* (2003) se considera que se trata de depósitos diferentes y que ante lo manifestado por Castilla *et al.* (2018) debe hacerse un trabajo de mayor detalle en la parte superior de la sucesión piroclástica en el volcán Azufral.

## 2.6 Complejo de domos

Las erupciones formadoras de domos son un estilo común de vulcanismo, especialmente en ambientes de márgenes convergentes, los domos resultantes pueden estar solos, formarse en el cráter de un cono volcánico, o formar parte de un grupo o *complejo de domos* (Fink, 1990).

En cuanto al complejo de domos del volcán Azufral, Fontaine (1994) describe el número de domos, como su emplazamiento, identificando cuatro generaciones, de las cuales las más recientes están relacionadas con la actividad fumarólica actual; en este sentido los domos del más antiguo al más reciente son: F9, F8, F7, F5, F10, F4, F6, F2B, F2, F3 y F1. Por su parte Williams (2015) y Williams *et al.* (2017) reinterpretaban la evolución de los domos, su emplazamiento y aportaron nuevos estudios geoquímicos, encontrando que los domos que conforman el actual complejo poseen un volumen entre 0,2 y 0,3 km<sup>3</sup> de material y fueron emplazados en su mayoría *syn-* o *pos-* El Espino (3720 ± 33 años A.P.) en un lapso de unos 100 a 200 años, formando una secuencia eruptiva que comienza con una erupción explosiva voluminosa que da origen a dicha unidad, un colapso de cráter, el emplazamiento de los domos y el colapso de algunos de estos (Avalancha de escombros - flujo de bloques y ceniza) para dar origen a la unidad El Carrizo (3500 ± 34 años A.P.), originalmente clasificada como flujos de bloques y ceniza (Calvache *et al.*, 2003), pero recientemente descrita como un depósito de avalancha de escombros monolitológico, con base en la alteración hidrotermal presente en los clastos (Williams *et al.*, 2017). La figura 13 muestra la delimitación de los domos que conforman este complejo.



**Figura 13.** Complejo de domos volcán Azufral  
Fuente: modificado de Williams *et al.* (2017)

## 2.7 Registro histórico actividad del volcán Azufral

Si bien no existe un amplio registro histórico de actividad eruptiva del volcán Azufral, como ocurre para volcanes como Galeras, Puracé y Nevado del Ruiz, se cuenta con varios documentos que hacen referencia al volcán desde el siglo XVII y a algunas manifestaciones de actividad superficial que no pasaron desapercibidas para expedicionarios y naturalistas que visitaron la región.

La primera alusión escrita al volcán Azufral, "Chaitán" o "Chaytán" como era llamado por las comunidades indígenas Pastos que habitaban la zona en épocas prehispánicas (Cabildo Indígena de Túquerres, 2009) se remonta al siglo XVI. En la recopilación de las actas y folios del "Libro de Cabildos de la Ciudad de San Juan de Pasto", publicada por el historiador nariñense Emiliano Díaz del Castillo y publicada por la Academia Colombiana de Historia (Díaz del Castillo, 1999), en su folio 254, fechado del 26 de abril de 1565, aparece el registro de un interesante reparto de terrenos para ganado, bajo el título:

Se proveen tierras así: una estancia de media legua para vacas, en cumbal, a alonso de santander; una estancia de una legua para vacas y yeguas, junto al pueblo de males en tucarres, a esteban hernandez guerrero; y una estancia de media legua para vaca entre guachaocal, tuquerres y zapuis a joan rodriguez armero.

En el cuerpo del documento detalla lo siguiente:

En este Cabildo el señor Estevan Hernández Guerrero regidor pidió que los dichos señores le manden proveer de una estancia para vacas y yeguas y otros ganados junto al pueblo de Males de Tucarres, pasado las casas, rozas y cementeras de un principal del dicho pueblo de Tucarres llamado Titamiznán que vira hacia la boca de Mallama por la del Volcán y de ello de le manden dar título para que goce de dicha estancia [...].

Por el contexto geográfico, es claro que "el Volcán", corresponde al volcán Azufral, y su reconocimiento como volcán, sin duda debió obedecer a claras manifestaciones de su actividad, que aunque no necesariamente eruptiva, debió ser lo suficientemente evidente (y lo suficientemente reconocida por los habitantes y autoridades de la región) para ser mencionado y empleado como referencia geográfica para definir linderos y reparticiones de tierras.

Posteriormente sobre el siglo XVII, el historiador nariñense José Rafael Sañudo, en su obra "Apuntes sobre la Historia de Pasto" (Sañudo, 1897), relata lo siguiente:

"[...] Comprendióse en el reparto, el Convento San Agustín, porque poseía tierras en la Provincia de los Pastos; que el gobernador Pedro Lazo de la Vega, por título fechado en Santiago de Cali, a los catorce días de Abril, de 1616, les dio unas, "que están (dice el título) en términos de la Ciudad de Pasto, del pueblo de Túcarres que linda, por la parte de arriba con tierras de Chaytán, que son cuatro lomas de que se hizo merced a Esteban Hernández Izquierdo, las cuales dichas lomas se dividen [...] en una quebrada que llama "Chingüel" que nace del volcán de Chaytán.

"Túcarres" es una denominación antigua para la cabecera municipal de "Túquerres"; y una quebrada actualmente llamada "Chingel", hace parte de la subcuenca del río Sapuyés (Cabildo Indígena de Túquerres, 2009).

La fuente primaria consultada por Sañudo no es referida por dicho autor. De acuerdo con el concepto de Lydia Inés Muñoz Cordero, presidenta de la Academia Nariñense de Historia, Sañudo a finales del siglo XIX tuvo acceso a archivos notariales y judiciales del Cabildo de San Juan de Pasto del siglo XVII, lamentablemente perdidos en la actualidad (Muñoz, comunicación personal, 2019).

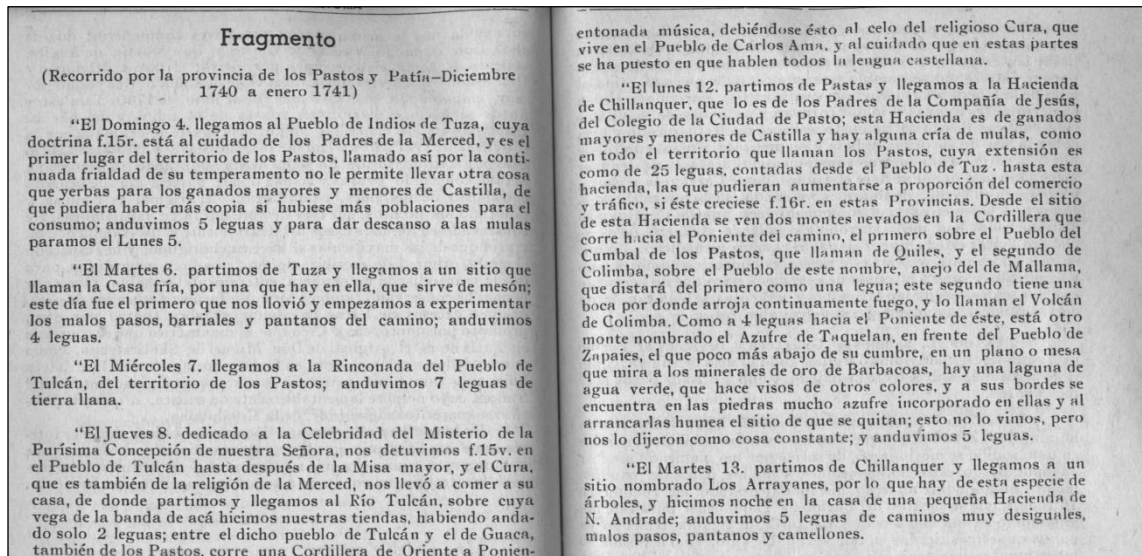
Muñoz *et al.* (2015), en su recopilación etnolingüística de la lengua Pasto, reconoce al vocablo "Chaitán" como un etnotopónimo, que por su etimología se descompone en

/cha/ de "útil", "brazo", "fuerza", /il/ como infijo que articula y /tán/ de "misterio" o "principio". /chait/ de "brazo". En cuanto a su significado se conocen "brazo", "brazo profundo" y "fuerza del principio". En cuanto a ubicación geográfica e histórica se trata de la denominación que los pueblos originarios de la región le daban al volcán Azufra.

Otra de las referencias más antiguas sobre algunos volcanes en Nariño se encuentra en el "Diario de viaje de Don Miguel de Santiesteban de Lima a Caracas - 1740 a 1741". En manuscrito de la transcripción de los apartes relacionados con la Provincia de Los Pastos, realizada por fray Alberto Lee López de la Academia Colombiana de Historia, remitida el 1 de Julio de 1965 a los Señores Ignacio Rodríguez Guerrero y Luis Eduardo Acosta Hoyos, de la Academia Nariñense de Historia, se aclara que para la transcripción se adoptó la ortografía para la época (año 1965) y se ajustaron algunos signos de puntuación entre otros aspectos.

Sobre el volcán Azufra, en párrafo que a continuación se transcribe, a diferencia de la referencia a actividad eruptiva en el "Volcán de Colimba" se encuentra la descripción de un monte nombrado el "Azufre de Taquelan", de la existencia de una laguna de color verde, del azufre incorporado en las rocas y de actividad fumarólica, una situación que en contexto luce similar a la actividad actual del volcán.

"El lunes 12, partimos de Pastas y llegamos a la Hacienda de Chillanquer, que lo es de los Padres de la Compañía de Jesús, del Colegio de la Ciudad de Pasto, esta Hacienda es de ganados mayores y menores de Castilla y hay alguna cría de mulas, como en todo el territorio que llaman los Pastos, cuya extensión es como de 25 leguas, contadas desde el Pueblo de Tuz, hasta esta hacienda, las que pudieran aumentarse a proporción del comercio y tráfico, si este creciese en estas Provincias. Desde el sitio de esta Hacienda se ven dos montes nevados en la Cordillera que corre hacia el Poniente del camino, el primero sobre el Pueblo de Cumbal de los Pastos, que llaman Quiles, y el segundo de Colimba, sobre el Pueblo de este nombre, anejo del de Mallama, que distará del primero como una legua; este segundo tiene una boca por donde arroja continuamente fuego, y lo llaman el Volcán de Colimba. Como a 4 leguas hacia el Poniente del éste, está otro monte nombrado el Azufre de Taquelan, en frente del Pueblo de Zapaies, el que poco más debajo de su cumbre, en un plano o mesa que mira a los minerales de Barbacoas, hay una laguna de agua verde, que hace visos de otros colores, y a sus bordes se encuentra en las piedras mucho azufre incorporado en ellas y al arrancarlas humea el sitio de que se quitan; esto no lo vimos, pero nos lo dijeron como cosa constante; y anduvimos 5 leguas", figura 14.



**Figura 14.** Diario de viaje de Don Miguel de Santiesteban de Lima a Caracas- 1740-1741, relacionada con la Provincia de Los Pastos

Fuente: Academia Nariñense de Historia (1967)

Sobre la denominación de "Azufre de Taquelán", empleada por don Miguel de Santiesteban en 1740, Muñoz *et al.* (2015) también identifica a "Taquelán" como un etnotopónimo. Etimológicamente se descompone en "/Ta/ a. "alto", "altura", "valioso", "cuantioso", "próspero", "floreciente". v. "tener", "haber", "tesoro", "riqueza". /Quer/, /quel/ s. "pueblo", "tierra", "sitio", "lugar", "plano", "llano"/La/, /le/ adv. "ahí"; como significado se propuso "Ahí el pueblo del tesoro". La interpretación de un etnotopónimo, a partir de sus raíces etimológicas, es un proceso que tiene un componente subjetivo que en ocasiones depende del contexto. En el caso del vocablo "Taquelán", teniendo en cuenta su asociación a la zona de la cima del volcán Azufral en el siglo XVIII, podría referirse a un sitio "alto" o de gran "altura" (prefijo "Ta"), pero que en su cima es "plano" o "llano" (sufijo "quel").

En "Alexander Von Humboldt en Colombia. Extractos de sus diarios" de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (1982), en el capítulo "Viaje de Pasto a Quito" se encuentra una de las referencias al volcán Azufral que describe para el año 1801 una importante actividad volcánica no reportada en registro histórico anterior o posterior.

Por la mañana tuvimos una bella vista de Chillanquer, Azufral y de los nevados Cumbal y Chiles, tres elevados colosos montañosos que se extienden de norte a sur y limitan la parte plana de la provincia de los Pastos, hacia el occidente. El Azufral, recostado al oriente del pueblo Sapuyes y Guachucal, rara vez tiene nieve; su dentada falda montañosa se pierde suavemente hacia el norte y sur, y simétricamente en la planicie.

La similitud de ese aplanamiento parece demostrar que el Azufral es un volcán que arrojó, al igual que el Sotará, su cima, antiguamente aguda. Su actual cumbre anteriormente fue su interior. De ahí las enormes masas de azufre natural que aquí se obtiene en los regulares restos de pórfido de diabasa. En la cumbre del Azufral hay varios pequeños cráteres, cuyo humo no se puede distinguir desde la lejanía (como el humo del Cumbal). Una de estas bocas es una charca hirviente de azufre, parecida al de Puracé, de furioso estrépito. Los vapores de azufre se escapan, además, de la tierra húmeda arcillosa y arrojan el lodo a lo alto, como si fuesen cañones. Erupción de polvo, o volcán de aire como el de Girgenti, y aquel que examinamos cerca de Turbaco. De las bocas irrumpen llamas, pero rara vez; esas llamas inflaman el pajonal, la hierba en los contornos. Los habitantes de los alrededores tienen más preocupaciones del Azufral que del mucho más elevado y humeante Cumbal.

Como se observa se hace referencia clara a la existencia de varios cráteres pequeños emitiendo “humo”, que a diferencia del emitido por el Cumbal no se observa desde zonas distantes. Queda a interpretación si la referencia a “humo” corresponde a emisión de gases acompañados de ceniza. Igualmente refiere un cráter con mucha actividad “charca hirviente de azufre” con sonido catalogado como “furioso estrépito” que a partir de datos de la más reciente campaña batimétrica se podría asimilar a una depresión existente en la zona noreste de la laguna cratérica (Torres y Burbano, 2015). Se refiere una importante emisión de gases de azufre desde la “tierra húmeda y arcillosa” arrojando lodo a lo alto como cañones. Finalmente se describe observación ocasional de llamas desde las bocas que queman la vegetación cercana y la preocupación de los habitantes por esta actividad. De esta narración proveniente de tan importante naturalista queda la inquietud de la no referencia a la existencia de la imponente Laguna Verde, quedando a interpretación si esta no tenía agua y por eso la referencia a tierra húmeda y arcillosa desde donde se emitía lodo hacia lo alto. Otra opción es que al parecer para el naturalista era peligroso acercarse lo suficiente a la “charca hirviente de azufre” como para vislumbrar el lago color esmeralda.

En el documento de 1849 “Viajes científicos a los Andes Ecuatoriales” de la Academia de Ciencias de Francia, del naturalista M. Boussingault (1849) (Figura 15), en el texto “*Sobre Volcanes*”, capítulo Volcán de Túquerres (cerca del Ecuador) se encontró la siguiente descripción sobre la actividad observada en el volcán Azufral.



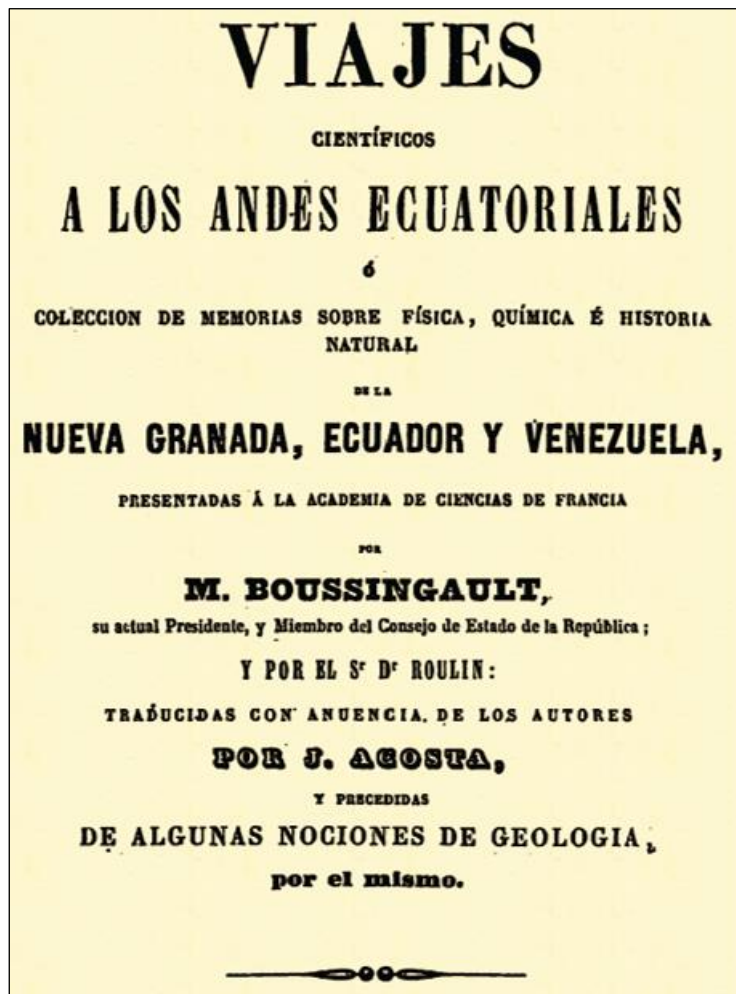


Figura 15. Viajes científicos a los Andes Ecuatoriales (portada)  
Fuente: Boussingault (1849)

Túquerres es una pequeña ciudad de la provincia de los Pastos. Su elevación sobre el nivel del mar es de ... metros. A tres horas de camino al occidente del pueblo, en la ruta que conduce al mar del Sur, se descubre el volcán de Túquerres, que presenta una variedad de colores por cierto sorprendente. La vista se reposa en primer lugar sobre un lago espacioso cuyas aguas son tan verdes, que apenas puede creerse que aquello sea realmente agua. La laguna verde, que es el nombre que le dan los indios, está rodeada de altas murallas circulares de traquita, y el color de esta roca varía del negro al blanco y de este al rojo. En la orilla oriental del Lago se levanta una cúpula casi enteramente formada de azufre, rajada por todas partes y exhalando una multitud de fumaradas que esparcen un fuerte olor de ácido hidrosulfúrico aun a largas distancias. El agua del lago contiene una pequeña cantidad de sulfato de alúmina. Al pie de la cúpula, el agua tenía una temperatura de 27° cent.; dos metros más al centro de la laguna, el termómetro indicaba solamente 10°. Por mis observaciones barométricas, la altura del Lago Verde sobre el nivel del mar será de 3908 metros. Fije particularmente mi atención en una

grieta que exhalaba una corriente de vapor muy fétido, cuya temperatura llegaba a 86°c. El agua obtenida condensando este vapor no contenía ácido hidroclórico. Cien partes de gas recogidas en la misma grieta me dieron 0,86 de ácido carbónico, y me persuadí de que el aire que quedaba por residuo después de la absorción por medio del álcali había sido introducido durante la operación. Analizando el vapor de otras hendiduras menos calientes que me permitían sacar con facilidad el tubo graduado, halle que era lodo ácido carbónico que la sosa absorbía completamente. Cien partes a la misma temperatura y presión analizadas con el acetato ácido de plomo me dejaron por residuo 99,5. Así es que puede admitirse que hay hasta 0,05 de ácido hidrosulfúrico en este gas. Sin duda de esta circunstancia depende la inmensa cantidad de azufre que se encuentra en la solfatara de Túquerres. Los fluidos que exhala el volcán de Túquerres son pues: 1° Vapor de agua a la temperatura de 86° c.; 2° Gas ácido carbónico; 3° Gas ácido hidrosulfúrico.

Más adelante en la recopilación de las memorias de Boussingault se recogen las redacciones posteriores de este autor complementando la información sobre el volcán Azufral con datos adicionales (Boussingault, 1903):

A las 8:30 salí para el Azufral, acompañado por dos indios; la mañana era lindísima. Apenas habíamos salido de la población vi dos volcanes cubiertos de nieve: el Chile y el Cumbal. Subíamos insensiblemente por un camino trazado sobre el pastizal, pero después de haber atravesado la pampa, comenzó la subida; en seguida entramos a un terreno pantanoso del cual salimos para trepar una cuesta que llevaba a un alto, desde donde descubrimos repentinamente el Azufral, lo que nos sorprendió agradablemente (altitud 4.058, temperatura 11°). La vista abarca un circo, se pudiera decir un pozo, encerrado por inmensas murallas de traquitas de colores variados: rojos, amarillos, negros, grises etc., consecuencia de las alteraciones producidas por las exhalaciones volcánicas. El fondo de este recinto encierra tres lagunas de poca extensión; la primera a la que le di el nombre de lago Verde, está situado abajo del alto del Azufral; el lago parece ser de un verde esmeralda magnífico; estimo -porque no lo he medido- que tiene una milla de largo, por media de ancho, aun cuando posiblemente exagere. Más allá hay otras dos más pequeñas, la una con agua de apariencia negra, color que refleja frecuentemente el agua a grandes alturas; la otra con agua cristalina azulosa, lo que prueba que el tinte aparente del líquido depende del color del fondo donde reposa. Así que el agua del lago Verde de tan vivo color esmeralda, al ser colocada en un vaso y vista a trasluz, es tan incolora como la de cualquiera de las otras dos lagunas. El color verde es causado, indudablemente, por el azufre puro que, en bloques considerables, reposa en el fondo del lago. Habiendo admirado el Azufral en conjunto, bajé del caballo para examinar el interior del circo: cuando la roca no ha sido alterada, ofrece todas las características y la constitución de la traquita; los bordes o las paredes suficientemente inclinadas del Lago Verde están recubiertas de fragmentos de azufre de un espesor hasta de dos pies; éste es de un amarillo fuerte y parece haber sido fundido; también se le ve en cristales y algunos pedazos tenían un color verde muy pronunciado. Por todas partes salían vapores de numerosas fumarolas y el gas encerraba una proporción tan fuerte de ácido sulfhídrico, que incomodaba su olor. Almorcé en medio de todos esos chorros de vapor cuya emisión era silenciosa, sin duda porque no llegaba a tener la intensidad de las ruidosas fumarolas del volcán de Pasto. Cerca al punto de llegada al Lago Verde al bajar del alto, sale del agua una especie de cúpula formada de azufre y de materias

terrosas: la superficie está llena de fisuras de donde salen vapor acuoso y gases. Encontré 86° como temperatura del vapor lo que podría ser la de la ebullición del agua a la altitud de donde nos encontrábamos. Por un medio que yo había perfeccionado, pude recoger gas en esa fisura y encontré que su composición es de 85 partes sobre cien de ácido carbónico.

Como se aprecia en el texto, no se usa el término Azufral en la denominación del volcán al que se hace descripción de actividad, pero sin lugar a duda se trata de él. En el texto se hace clara referencia a la Laguna Verde (lo que no se encontró en el diario de Humboldt), a la existencia de actividad fumarólica en la cúpula, que asimilamos al domo de lava que ahora se denomina Mallama (figuras 16, 17 y 18), a las temperaturas en diferentes sectores, composición de gases, etc. En síntesis, se reconoce un cambio muy importante en lo reportado por Humboldt y actividad superficial en cierta manera similar a la que ha presentado el volcán desde que es estudiado y monitoreado por el SGC (ver capítulo 1).



**Figura 16.** Laguna Verde en el volcán Azufral, dibujo de Riou en 1850  
Fuente: André (1884)



**Figura 17.** Laguna verde volcán Azufral, dibujo realizado por el coronel Manuel María Paz (1853) Se observa la laguna craterica del volcán Azufral (llamada Laguna Verde, por la coloración de sus aguas). No se observan signos de actividad superficial  
Fuente: Biblioteca Nacional (2020)



**Figura 18.** Laguna craterica y localización del domo Mallama  
A. Vista general de la laguna craterica y B. Detalle al NW de la laguna, donde se observa la morfología del domo Mallama  
Fuente: Google Earth (2017)

Posteriormente, el naturalista francés Édouard François André visitó la región del volcán Azufral. En su obra “América Pintoresca” (André, 1884), hace una descripción detallada de la zona de la laguna cratérica:

Una de las excursiones proyectadas desde este pueblo consistía en la ascensión al volcán que domina la ciudad, llamado «volcán de Túquerres,» y con más propiedad, «volcán del Azufral» ... A las once y media, después de haber recorrido unos caminos a cual más horroroso, atravesando barrancos y trepando por entre la vegetación rasa que caracteriza la región andina entre los 3,800 y 4,000 metros, llegamos a la Cuchilla, en donde el cráter del volcán abría su boca a nuestros pies. Hacia el Oeste se yergue el pico llamado el Salto, que alcanza 4,200 metros de altura. Al fondo del abismo, que las aguas han rellenado en parte, se encuentran tres lagos contiguos de un efecto extraordinario. Encerrado en un circuito de enormes murallas traquíticas multicolores, tostadas por antiguas erupciones y trituradas por temperaturas muy elevadas, sonrío primero el lago llamado Laguna verde. Ningún calificativo le cuadra mejor que el de esmeraldino, por su brillo y transparencia, y porque el sol, retozando en su vasta superficie, produce incomparables reflejos aumentados por la blancura marmórea de sus orillas y por el tono amarillento claro de los terrenos próximos a la solfatara.

En la parte anterior, otros dos pequeños lagos ofrecen un golpe de vista totalmente distinto; el que se halla situado al Este, de forma prolongada, es negro como la tinta y en el otro más pequeño, de un perímetro casi cuadrado, el agua es transparente como el cristal. Después de contemplar por algún tiempo este precioso espectáculo, descendí los dos o trescientos metros que me separaban del suelo del cráter para practicar algunas observaciones al nivel del agua, que está a la altura de 3,900 metros. Eran las doce del día: el ambiente hermoscado por un magnífico sol, estaba a los + 13° y el termómetro acusaba + 15° sumergido en los lagos menores. Avanzando hacia el Norte, me encontré sobre un sólido montículo de azufre puro, del que salían muchas humaredas a través de un suelo ardiente y resquebrajado, en el cual era imposible sostenerse sin levantar los pies a cada instante, como sucede en la solfatara de Puzol (Nápoles). A dicho montículo se le ha dado el nombre de Cerro Redondo. A algunos metros de allí el termómetro sumergido en Laguna verde, a un metro y medio de su orilla oscilaba entre los + 15 y 18 °, mientras que a quince centímetros más adentro subió rápidamente hasta los + 47°, alcanzando instantáneamente de +90 a 100° al aproximarla a una de las humaredas. Sus exhalaciones se componen de vapores de agua y gas ácido carbónico, conteniendo también una cantidad considerable de gas ácido sulfhídrico, lo cual demuestra la enorme cantidad de azufre producido por la solfatara del Azufral. Esos vapores han impreso sobre las rocas vecinas un tinte verde oscuro, que contrasta notablemente con los tonos rayados de rojo, negro y blanco de los traquitos de la vecina escarpadura, y con el matiz ceniciento de un montón de piedra pómez, desprendida poco antes de mi paso por allí. ¿Cómo ha podido producirse semejante formación geológica? ¿Se debe el cráter actual, al hundimiento de un antiguo cono de traquito, o bien es el receptáculo de las materias ígneas de un viejo volcán? La historia del Azufral no reza una palabra sobre este particular.

Cabe resaltar que André le da la denominación de cerro redondo al hoy conocido como domo Mallama.

En textos de una versión en español del libro “Colombie”, del geógrafo francés, Eliseo Reclus, se encontró una nota al pie de página del geógrafo y militar Payanés Francisco Javier Vergara y Velasco.

Túquerres, de clima extraordinariamente frío, pues en la mesa neva con frecuencia, tiene vecinos otros pueblos de alguna significación, como Pupiales, en cuyas cercanías existen las ruinas llamadas Palacio de Inca; Carlosama, en donde estuvo antes la aduana; Sapuyes, al pié de los “hervideros que se dice que encierran un lago; Guachucal y Cumbal, al pié del volcán de su nombre abriga más de un millar de habitantes, a 3,167 (Reiss y Stubel) a 3,219 metros (Boussingault), y es por lo mismo la población más alta de Colombia. La mesa es un gran centro de producción agrícola y pecuaría. V. y V. (Reclus, 1893).

Es claro que en esta descripción de la zona de la meseta de Túquerres y sus alrededores hace falta la alusión al volcán Azufral y su magnificente Laguna Verde. No obstante, Vergara y Velasco habla de “[...] *“hervideros” que dicen encierran un lago*”, como referencia a la ubicación del pueblo de Sapuyes, que dista unos 12 km del volcán. De hecho, la zona norte y nororiental de la laguna, así como el complejo de domos, se encuentran dentro del perímetro del municipio de Sapuyes (no de Túquerres). Cabe anotar que para Vergara y Velasco la expresión *“al pie”* no era restrictiva a tan *“cortas”* distancias, pues, por ejemplo, decía de Bogotá que se hallaba *“al pie de la cordillera”*; o que en Colombia se extraía el oro y se cultivaba el tabaco *“al pie de los nevados”* (Vergara y Velasco, 1910).

Así que los *“hervideros”* bien podrían estar relacionados con actividad superficial intensa (posiblemente freática), como la descrita por Humboldt; lo suficientemente intensa como para que propios y foráneos, por espacios intermitentes de años o quizás décadas en el siglo XIX, incluso no tengan claro la existencia de una laguna cratérica.

Immanuel Friedlaender visitó el volcán Azufral en 1925, describiendo la existencia de la Laguna Verde, *“conos eruptivos”* en sus orillas y muchas fumarolas expidiendo constantemente *“humos”* y *“vapores de Azufre”* (figuras 19 y 20).

El volcán más cercano al Galeras es el Azufral de Túquerres que está localizado al Oeste de éste. A pesar de su relativa poca altura (4.070 metros y solamente 1.000 sobre la altiplanicie de Túquerres) está constituido en su mayor parte de rocas sueltas, tufas antiguas rodadas y solamente su parte central consta de rocas macizas de las cuales las más antiguas son andesitas y las más recientes dacitas. En un valle profundo, antiguo cráter, se encuentra una laguna verde, a cuyas orillas se ven varios conos eruptivos y muchas fumarolas que expiden constantemente humos y vapores de azufre, el cual se aprovecha para diferentes industrias. Si puedo dar crédito a lo que me contaron algunas personas, está creciendo el cono principal, así que me aseguraron que en dos decenas de años a aumentado el doble de su altura. (Yo conozco este lago, las fumarolas y los conos eruptivos, pero en el espacio de 38 años no se ha observado ningún levantamiento

N del T). Esto me hace creer que no es imposible que haya un levantamiento muy lento, y rogué al señor ingeniero R. Evers que se molestara en seguir mensuras periódicas Friedlaender (1936).

Se asume que los “conos eruptivos” pueden corresponder a los domos de lava más jóvenes. Más que a referencia contundente de actividad eruptiva el texto consigna descripción de actividad superficial similar a la observada en la actualidad (figuras 19 y 20).



**Figura 19.** Sector de La Playita al N de la laguna cratérica  
Fotografía tomada, por el hermano Anacleto como parte del grupo que acompañó la expedición de Immanuel Friedlaender en noviembre de 1925  
Fuente: Friedlaender (1936)



**Figura 20.** Sector del domo Mallama

Fotografía del margen occidental de la laguna cratérica, tomada por el hermano Anacleto como parte del grupo que acompañó la expedición de Immanuel Friedlaender en noviembre de 1925

Fuente: Friedlaender (1936)

Hacia mediados del siglo XX, Ignacio Rodríguez Guerrero (figura 21) consigna información del Doctor Royo y Gómez sobre el volcán Azufral:

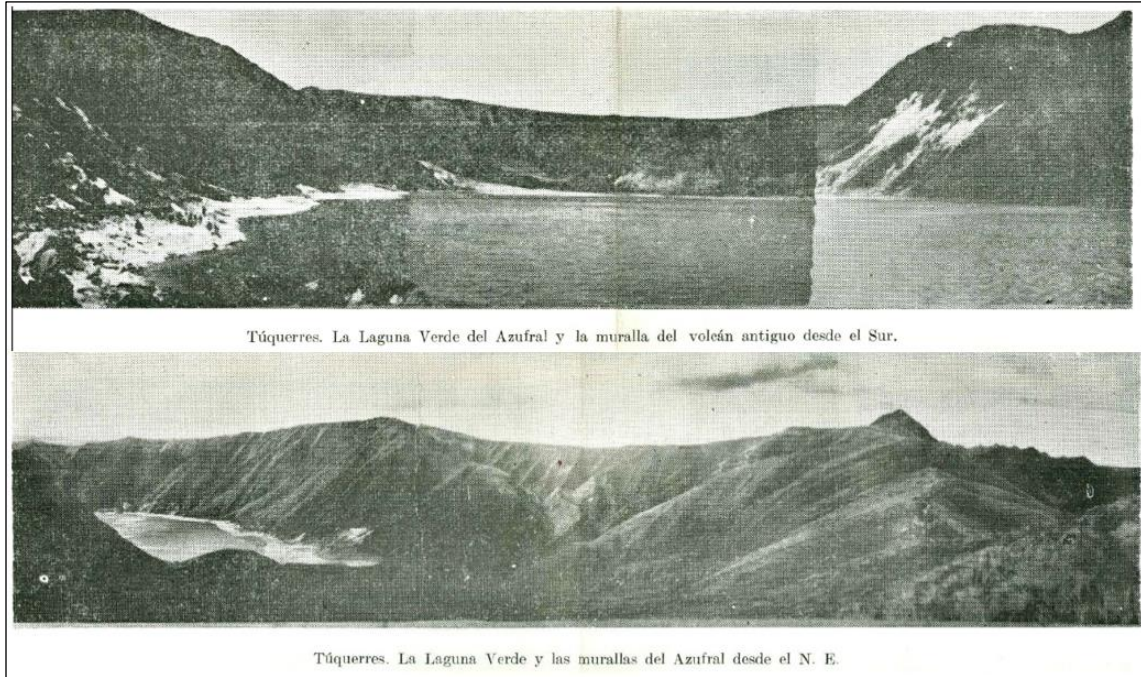
Del Dr. Royo y Gómez son, a propósito del volcán Azufral, estos juiciosos conceptos, suscritos en 1941: Las solfataras se encuentran en el extremo NW de esa Laguna, o sea en la parte más cercana del camino. Hay allí dos focos de solfataras, uno contra la parte interna de la muralla intermedia del cráter y otro al pie de la cima del volcán. La zona que se encuentra junto a la muralla ha alcanzado mayor importancia en épocas anteriores, pero en la actualidad sus fumarolas apenas sí tienen interés. Además del azufre depositado en estas solfataras existe ahí una formación de tipo sedimentario en lechos delgados de este material y sulfatados (¿o boratos?) alternantes con otros de cineritas de grano fino y color blanquecino. Estos sedimentos constituyen una especie de terraza o playa levantada, con un espesor aproximado de unos 250 metros y otros diez de anchura. Han sido depositados por la Laguna cuando ocupaba un área mucho mayor, y por tanto su superficie se encontraba a un nivel más elevado (Rodríguez, 1958).

La otra zona de solfataras forma un cerro cupiliforme con una especie de circo o cráter en la parte oriental. El conjunto tendrá unos 200 metros de diámetro en la base de unos 40 metros de altura en la cima, estando integrado por ceniza, lápilis y bloques lávicos con costra e impregnaciones de azufre. Las solfataras son allí numerosas y a veces de temperatura elevada. El azufre puro está recubriendo la superficie de las grietas por



donde salen los gases y en el resto está mezclado con las cenizas y lúpilis. (Rodríguez, 1958).

En las solfataras aparecen cristales piramidales de azufre que pueden alcanzar 2 centímetros de longitud (muestra número 943); lo hay también en flor y en masas compactas (muestra número 944). Se presenta igualmente fundido, mezclado con ceniza (muestra número 945), formando pequeñas corrientes que, según me manifestó el Dr. Garzón Thomas, aparecieron en coincidencia con el terremoto de 1.936. (Rodríguez, 1958). [...] En total, la cantidad de azufre es bastante grande y la calidad buena, aunque como siempre ocurre en los depósitos fumarolianos, tiene adheridos otros materiales, como cenizas y lúpilis que obligarían a sublimarlo para obtenerlo puro. (Cf. Compilación de los Estudios Geológicos oficiales de Colombia. --Tomo V. Passim). (Rodríguez, 1958).



**Figura 21.** Laguna verde de la expedición de Rodríguez Guerrero

Imágenes del libro Estudios Geográficos del Departamento de Nariño, del Dr. Ignacio Rodríguez Guerrero  
Fuente: Rodríguez (1958)

En 1953 los geógrafos de la comisión corográfica hicieron observaciones en la zona de la laguna cratéica. En sus textos se limitaron a transcribir las observaciones hechas por Boussingault en 1831.

### **3. AMENAZA VOLCÁNICA**

Los volcanes activos tienen implícita la posibilidad de presentar actividad eruptiva en el futuro, por eso además del conocimiento sobre su historia eruptiva y el monitoreo permanente de su actividad actual es indispensable contar con la evaluación de su amenaza volcánica y la representación de esta en un mapa de amenaza volcánica.

Como punto de partida es clave tener presente la definición de “amenaza” consignada en la Ley 1523 del 2012 por la cual se adoptó la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se estableció el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Amenaza es:

El peligro latente de que un evento físico de origen natural [en este caso, volcánico] [...] se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

Como se ha reiterado en varias oportunidades el volcán Azufral se ha caracterizado durante las erupciones ocurridas en el Holoceno por su estilo altamente explosivo, por lo cual se espera igualmente un carácter explosivo en erupciones futuras. De acuerdo con lo anterior en la evaluación de la amenaza volcánica se asumen erupciones similares a las del registro geológico de los últimos 10000 años considerando como centro de emisión la zona de la laguna cratérica (Laguna Verde). La evaluación de la amenaza por cada uno de los fenómenos volcánicos que pueden presentarse en erupciones futuras del volcán Azufral y las respectivas simulaciones permitió obtener la primera versión de la evaluación de amenaza volcánica del Azufral.

Los mapas de amenaza volcánica son en sí mismos un insumo indispensable para las actividades de gestión del riesgo volcánico en un territorio dado. En conjunto, con el análisis de vulnerabilidad e identificación de elementos expuestos, son útiles para direccionar las medidas de planificación del territorio y de reducción del riesgo; igualmente, en el manejo de crisis o situaciones de desastre.

#### **3.1 Amenaza por corrientes de densidad piroclástica (flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas)**

Las corrientes de densidad piroclástica (CDPs) son nubes de material incandescente compuestas por fragmentos de rocas, cenizas y gases calientes (de 300°C a > 800°C) que se mueven a grandes velocidades (de decenas a varios centenares de km/h) desde el centro de emisión por los flancos del volcán. La generación de corrientes de densidad piroclástica (CDPs) está relacionada exclusivamente con las erupciones de tipo explosivo.

Entre ellas han sido reconocidos dos tipos (diluidas y concentradas) a partir de las observaciones directas de erupciones históricas o del estudio de depósitos de origen tanto histórico como prehistórico. Las CDPs diluidas son reconocidas también como oleadas piroclásticas y las CDPs concentradas como flujos piroclásticos. (Wilson y Houghton, 2000).

Las oleadas piroclásticas (CDPs diluidas) son más turbulentas, poseen una menor densidad (mayor contenido de gases) y presentan una mayor distribución, desplazándose en los valles y sobrepasando incluso altos topográficos (Dufek *et al.*, 2015; Cole *et al.*, 2015; Brown y Andrews, 2015). Haciendo parte de las CDPs diluidas existen cuatro tipos: Oleadas asociadas a flujos piroclásticos denominadas oleadas de terreno (*ground surges*) y oleadas de nube de ceniza (*ash cloud surges*), a la base y al tope respectivamente (Fisher, 1979; Cas y Wright, 1987). Oleadas basales asociadas principalmente a la generación de anillos de toba, conos de toba y *maares* producidos por actividad freato-magmática (Fisher y Waters, 1970; Crow y Fisher, 1973). Y oleadas tipo blast asociadas a la explosión lateral debido a la despresurización de un criptodomo (Fisher *et al.*, 1987; Belousov, 1996). Las oleadas pueden alcanzar hasta decenas de kilómetros de distancia, velocidades de hasta centenas de kilómetros por hora (hasta de 1000 km/h) y temperaturas superiores a los 100°C (Wilson y Houghton, 2000; Valentine y Fisher, 2000).

Las CDPs con mayor densidad y concentración de partículas y fragmentos sólidos (flujos piroclásticos) tienden a encausarse por los valles de los ríos. Haciendo parte de estas CDP concentradas existen dos tipos: Flujos piroclásticos de pómez o ignimbritas (*pumice pyroclastic flow or ignimbrite*) y flujos piroclásticos de bloques y ceniza (*block and ash pyroclastic flows*) (Branney y Kokelaar, 2003). Los flujos piroclásticos de pómez están asociados al colapso de columnas eruptivas plinianas o a procesos de *boiling over* y los flujos piroclásticos de bloques y ceniza a colapso de columnas eruptivas vulcanianas o a colapso de domos (Freundt *et al.*, 2000). Los flujos piroclásticos pueden alcanzar distancias de decenas de kilómetros (Freundt *et al.*, 2000) y generalmente temperaturas superiores a los 100°C (>550°C) (Branney y Kokelaar, 2003).

Las CDPs (así como los *lahares*) son la amenaza volcánica que ha causado mayor número de pérdidas de vida en el mundo (Blong 1984; Tilling y Punongbayan, 1989; Baxter, 1990; Self, 2006). Las oleadas y flujos piroclásticos son muy destructivos debido a su alta temperatura, velocidad y gran movilidad. Algunos de sus efectos incluyen asfixia, quemaduras, enterramiento e incineración, así como la destrucción parcial o total de edificaciones a causa de su velocidad de emplazamiento, e incendios en zonas agrícolas y boscosas (Baxter, 1990; Baxter *et al.*, 1998).

En el capítulo 2 se describe de manera detallada los depósitos de CDPs caracterizados para las diferentes unidades eruptivas identificados en la historia geológica del volcán Azufral (figura 10). Según este registro geológico, los flujos piroclásticos de ceniza y pómez con importante presencia de oleadas piroclásticas asociadas (corrientes de densidad piroclástica *sensu stricto*), han dominado en las erupciones del volcán Azufral; la menor presencia de depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza, sugieren actividad eruptiva en condiciones similares a las actuales teniendo en cuenta los domos intracrático que se encuentran en él.

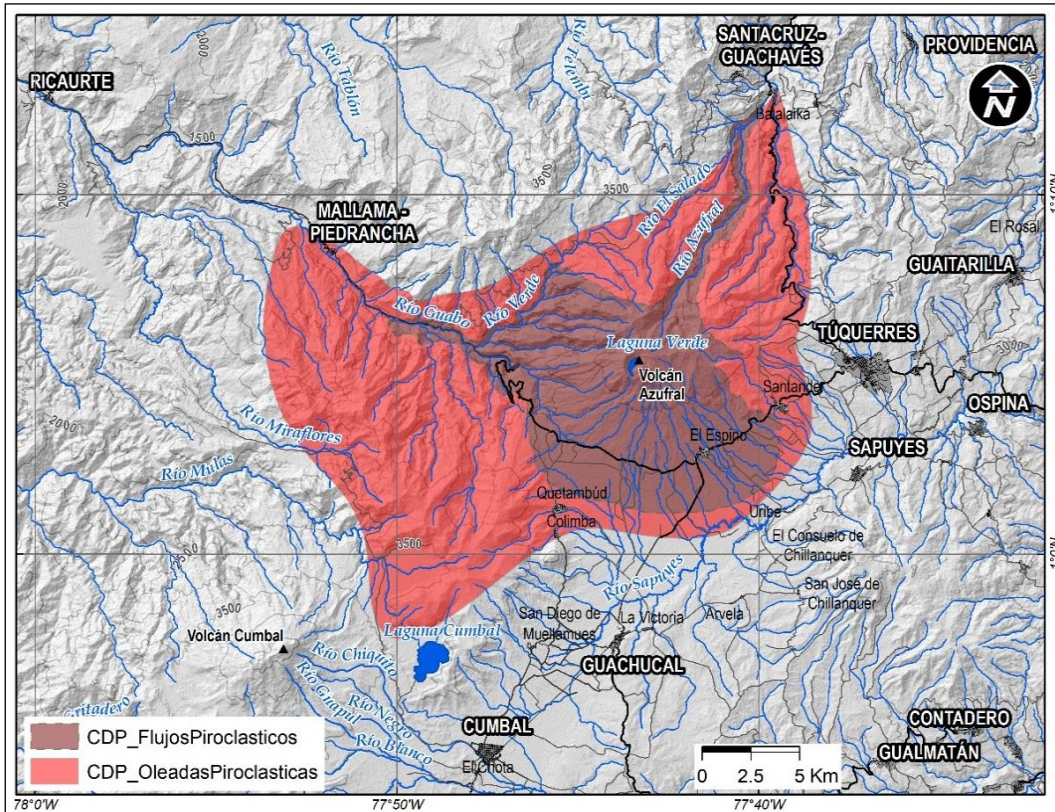
Alrededor del 6% de las erupciones en todo el mundo son erupciones que forman domos de lava. Los domos de lava pueden formarse con relativa rapidez, de días a semanas (pudiendo alcanzar alturas de varios cientos de metros), pero episodios eruptivos pueden extenderse durante años a décadas. Las erupciones de domos de lava varían desde aquellas que se caracterizan por una efusión relativamente pasiva e inofensiva, a otras que pueden exhibir una actividad variada, altamente impredecible y amenazante (Calder *et al.*, 2015). Los lados de estas estructuras están formados por fragmentos inestables de roca. Debido a la posibilidad de acumulación de presión de gas, el domo puede a lo largo de su historia sufrir erupciones explosivas. Las amenazas asociadas con domos de lava incluyen el colapso de porciones de un domo de lava, corrientes de densidad piroclástica (flujos de bloques y ceniza).

Por otra parte, algunos de los depósitos de oleadas piroclásticas alrededor del volcán sugieren orígenes por contacto con agua (oleadas basales) aunque la mayoría de ellas están asociadas a flujos piroclásticos. La generación de oleadas basales al inicio de una actividad futura es muy posible debido a la presencia actual de agua en el cráter (laguna intracrática). El comportamiento más turbulento de las CDPs más diluidas explica su mayor facilidad de sobrepasar las barreras topográficas.

Cualquiera de estos tipos de CDPs es susceptible de generarse en erupciones futuras del volcán. Por consideraciones sobre la dinámica de las CDPs y el conocimiento de que el área en su trayectoria sería totalmente afectada y arrasada, este tipo de fenómeno se zonifica como amenaza alta.

Para la zonificación de la amenaza por este tipo de eventos se enfatizó tanto en la configuración actual del terreno y del volcán como en la distribución de los depósitos, en resultados obtenidos a partir de simulaciones con el código Titan2D y con el modelo Cono de Energía. Lo anterior, teniendo como base que: 1) la distribución de las corrientes de densidad piroclástica pasadas, la cual representa zonas susceptibles de ser afectadas por eventos futuros; y 2) que actualmente no existen grandes incisiones en los valles o zonas morfológicas altas que afecten de forma particular y directa la distribución de

estos. En la figura 22 se muestra el área que puede ser afectada por Corrientes de Densidad Piroclástica en el volcán Azufral, de acuerdo con el registro geológico y el resultado de las simulaciones computacionales.



**Figura 22.** Zonificación de la amenaza por CDPs: flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas  
Fuente: autores

Las CDPs afectarían zonas proximales del edificio volcánico, junto con los cauces y valles de los ríos Verde, Sapuyes, Azufral, Guiza, Pacual y las quebradas Blanca, El Molino, La Cruz, El Baño, Puerán, La Palma, La Calera, El Tigre y Trinidad, afluentes de la Q. La Calera - río Guabo; quebradas Boquerón, El Carmelo, Los Molinos, La Alegría, Chaitán, El Chungel, La Pedrera, Ventanilla, El Carrizo, Dos Quebradas y Panamal, afluentes del río Sapuyes. Adicionalmente, el material piroclástico acumulado puede ser removilizados generando *lahares*.

### 3.2 Amenaza por caídas piroclásticas

Durante una erupción volcánica, los piroclastos que son emitidos a través de una columna eruptiva, tamaños hasta 64 mm (ceniza y *lapilli*) pueden ser transportados o

dispersados eólicamente (por acción del viento); los piroclastos mayores a dicho tamaño son emitidos como proyectiles balísticos (bloques y bombas volcánicas).

Las caídas de piroclastos o caídas piroclásticas son eventos asociados a erupciones volcánicas que evidencian tanto la fragmentación del magma ascendente involucrado en la erupción como la fragmentación de las rocas circundantes al conducto volcánico o que hacen parte del edificio mismo. En las partículas que representan la fragmentación del magma juvenil, la morfología por sí misma es evidencia de la naturaleza de la erupción (magmática o hidromagmáticas) (Houghton *et al.*, 2000). Una columna eruptiva puede alcanzar una altura de hasta 50 km (Carey y Bursik, 2000) y las partículas ser dispersadas a grandes distancias (si alcanzan la estratosfera las partículas más finas pueden dar la vuelta al mundo como ocurrió en la erupción del volcán Chichón – México en 1982). Los proyectiles balísticos pueden alcanzar hasta 11 km de distancia como ha sido reportado para el volcán Popocatépetl – México.

### **3.2.1 Amenaza por caída de piroclastos transportados eólicamente**

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

Las caídas de piroclastos pueden causar: oscurecimiento del ambiente, afectación a la salud humana y animal: afecciones respiratorias, irritación de los ojos, intoxicaciones y alergias; daños en las infraestructuras y viviendas: cubrimiento y enterramiento, obstrucción de drenajes artificiales, colapso de techos y líneas de conducción eléctrica, corrosión a elementos metálicos; en la agricultura y ganadería: pérdida parcial o total de cultivos y ganado, contaminación de fuentes de agua por sólidos y químicos; tormentas eléctricas y afectación al transporte aéreo y terrestre (Fisher, 1997; Self, 2006).

Para el caso del volcán Azufral no se cuenta con un registro geológico claro, por lo cual se recurre a escenarios de referencia. Por ejemplo, erupciones de tipo vulcanianas como las ocurridas desde 1989 en el volcán Galeras - Colombia han dispersado material

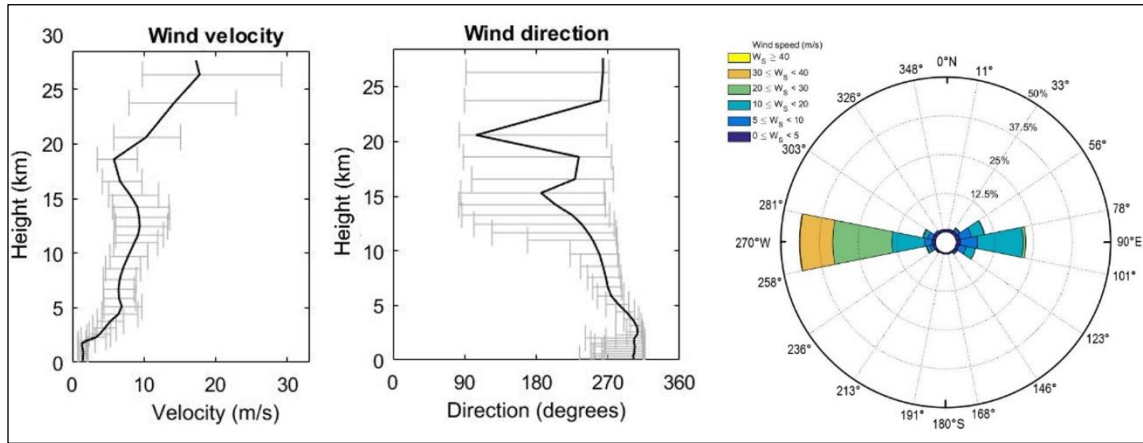
piroclástico que ha llegado hasta el Océano Pacífico (~150 km), aunque la depositación ha sido del orden de milímetros. Erupciones de tipo pliniano como la ocurrida en el volcán Chichón - México en 1982 dispersó material a más de 40 km de distancia desde el cráter dejando en este punto 10 cm de depósito (Macías *et al.* 2008). En el volcán Doña Juana - Colombia, una erupción de este tipo, pero de edad desconocida dispersó material depositando 40 cm de éste a 27 km de distancia (Pulgarín *et al.*, 2008). Para el caso del volcán Azufra, el registro geológico evidencia que las erupciones más explosivas han estado asociadas a la destrucción de domos y a procesos de *boiling over* donde el ascenso de una columna eruptiva no ha sido importante. Dada la ausencia de material de caída piroclástica en el volcán Azufra, pero considerando que durante su historia eruptiva ha presentado erupciones muy explosivas sub-plinianas, se tiene en cuenta la posibilidad de ocurrencia de caídas piroclásticas en caso de presentarse una erupción y por esta razón se realizó la simulación numérica del fenómeno con el programa Tephra2 (Bonnadonna *et al.*, 2005), tomando como referencia la magnitud de erupciones en términos de volumen y altura de columna, para volcanes con actividad similar (tabla 2).

**Tabla 2.** Características de caídas piroclásticas en volcanes con erupciones sub-plinianas a plinianas

Masa (kg)	Volumen (km³)	Altura columna (km)	Volcán	Tipo de erupción	Autor
2,36*10 <sup>11</sup>	0.2	25	Colima	Pliniana	Bonasia <i>et al.</i> (2011)
4*10 <sup>9</sup>	0.003	7	Vesubio	sub-pliniana	Bonasia <i>et al.</i> (2009)
4,34*10 <sup>10</sup>	0.04	15.5	Vesubio	sub-pliniana	Bonasia <i>et al.</i> (2010)
2,9*10 <sup>11</sup>	0.32	18-20	Vesubio	sub-pliniana	Macedonio <i>et al.</i> (2008)
4,5*10 <sup>11</sup>	0.5	18-20	Vesubio	sub-pliniana	Macedonio <i>et al.</i> (2008)
3,8*10 <sup>11</sup>	0.42	18-20	Vesubio	sub-pliniana	Macedonio <i>et al.</i> (2008)
1,1*10 <sup>12</sup>	1.2	18-20	Vesubio	sub-pliniana	Macedonio <i>et al.</i> (2008)
1,2*10 <sup>12</sup>	1.38	18-20	Vesubio	sub-pliniana	Macedonio <i>et al.</i> (2008)
1,8*10 <sup>12</sup>	2	24-32-30	Chichón	pliniana	Bonasia <i>et al.</i> (2012)
2,2*10 <sup>12</sup>	2.44	24-32-30	Chichón	pliniana	Bonasia <i>et al.</i> (2012)
2*10 <sup>12</sup>	2.22	24-32-30	Chichón	pliniana	Bonasia <i>et al.</i> (2012)

Fuente: autores

Los insumos principales del modelo Tephra2 (Bonnadonna *et al.*, 2005), además de las características de la columna, son la dirección y velocidad del viento en diferentes épocas del año, para tal fin se empleó el módulo Analyze Wind del programa TephraProb (Biass *et al.*, 2016), el cual permite calcular estadísticas de la dirección y velocidad del viento, empleando la base de datos del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF ERA-Interim)*, la cual cuenta con información cada 6 horas, para diferentes niveles de altitud entre 0 y 48 km sobre el nivel del mar; el periodo seleccionado para realizar las simulaciones abarca 37 años (1979 - 2015), se conoce que las condiciones de viento varían con la altitud. En la figura 23, se presentan perfiles del viento a diferentes alturas sobre el cráter del volcán Azufra.



**Figura 23.** Perfiles de velocidad y dirección del viento a diferentes alturas sobre el volcán Azufral  
 A. Perfil de velocidad del viento, B. Perfil de dirección del viento C. Rosa de los vientos para una altura de 23,7 km para un periodo entre 1979 a 2015  
 Fuente: autores

De acuerdo con los resultados de las simulaciones computacionales realizadas (empleando 2000 perfiles de viento), el área que puede ser afectada por caídas piroclásticas emitidas por el volcán Azufral, se observa en el mapa de la figura 24. La zona de amenaza alta en color rojo corresponde a zonas donde el espesor del depósito es mayor a 10 cm; el área naranja es la zona de amenaza media, donde el espesor del depósito varía entre 1 – 10 cm; el área amarilla es la zona de amenaza baja con espesores menores a 0,5 mm. A grandes rasgos, se puede observar que la zona de amenaza baja cubre el N de la República del Ecuador y llega hasta el Océano Pacífico.

La zonificación obtenida abarca los municipios de Samaniego, La Llanada, Los Andes, Cumbitara, Policarpa, Linares, El Peñol, El Tambo, Sandoná, Ancuya, Taminango, Nariño, Consacá, La Florida, Sandoná, Policarpa, San Lorenzo, Chachagüí, Pasto, Yacuanquer, Imués, Tangua, Íles, Funes, San Pedro de Cartago, Berruecos, Albán, El Tablón de Gómez, Buesaco, Puerres, Contadero, Gualmatán, Córdoba, Potosí, Ipiales, Pupiales, Aldana, Carlosama, La Unión, San Bernardo, Cumbal, Barbacoas, Tumaco y Roberto Payán, en el Departamento de Nariño; los municipios de Santiago y Colón en el Departamento del Putumayo en Colombia; y los cantones de Tulcán, Espejo, Mira, Montufar, San Pedro de Huacha y Bolívar en la Provincia del Carchi; Ibarra, San Miguel de Urququí y Cotacachi en la Provincia de Imbabura; San Lorenzo, Eloy Alfaro y Rioverde en la Provincia de Esmeraldas; y del cantón de Sucumbíos en la Provincia de Sucumbíos en el Ecuador.



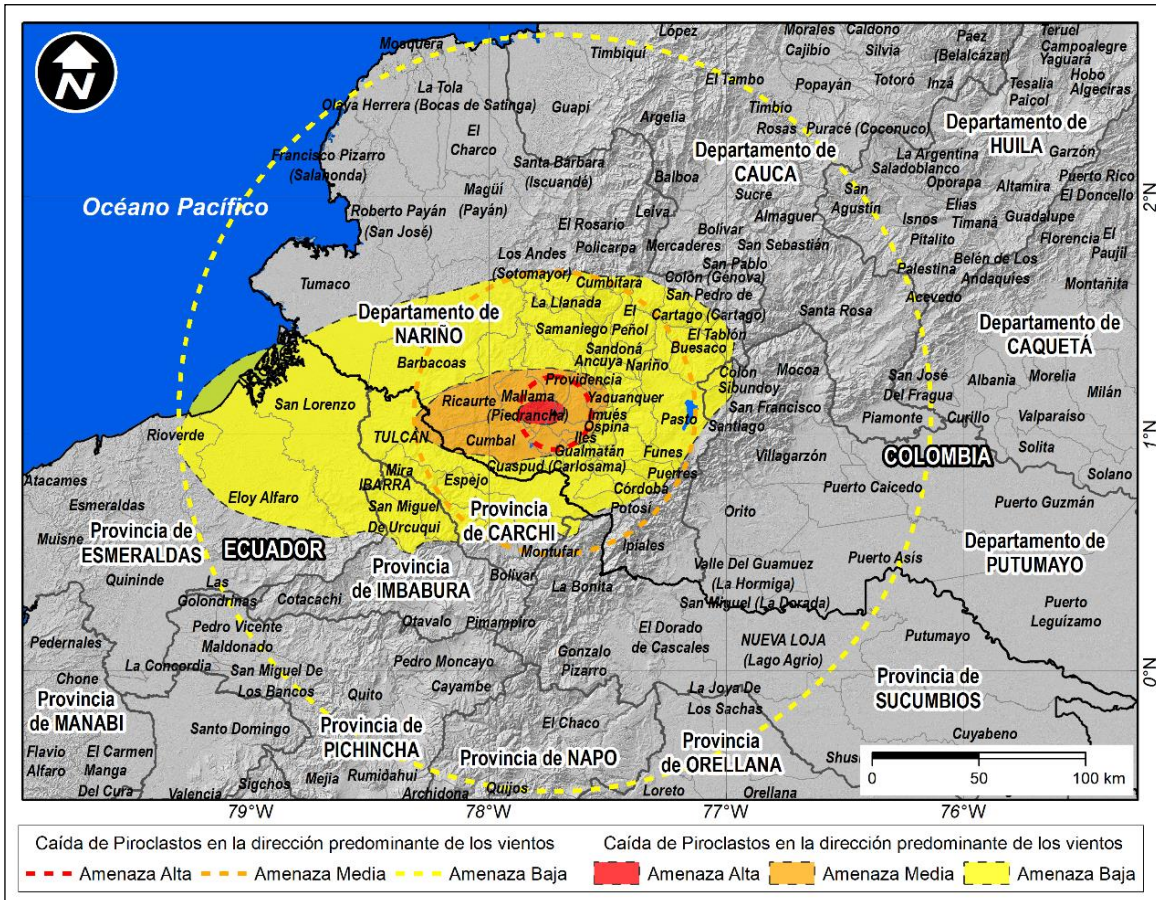


Figura 24. Zonificación de la amenaza para caídas pirolásticas transportadas por el viento: ceniza y lapilli

Fuente: autores

### 3.2.2 Amenaza por caída de piroclastos por proyección balística

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

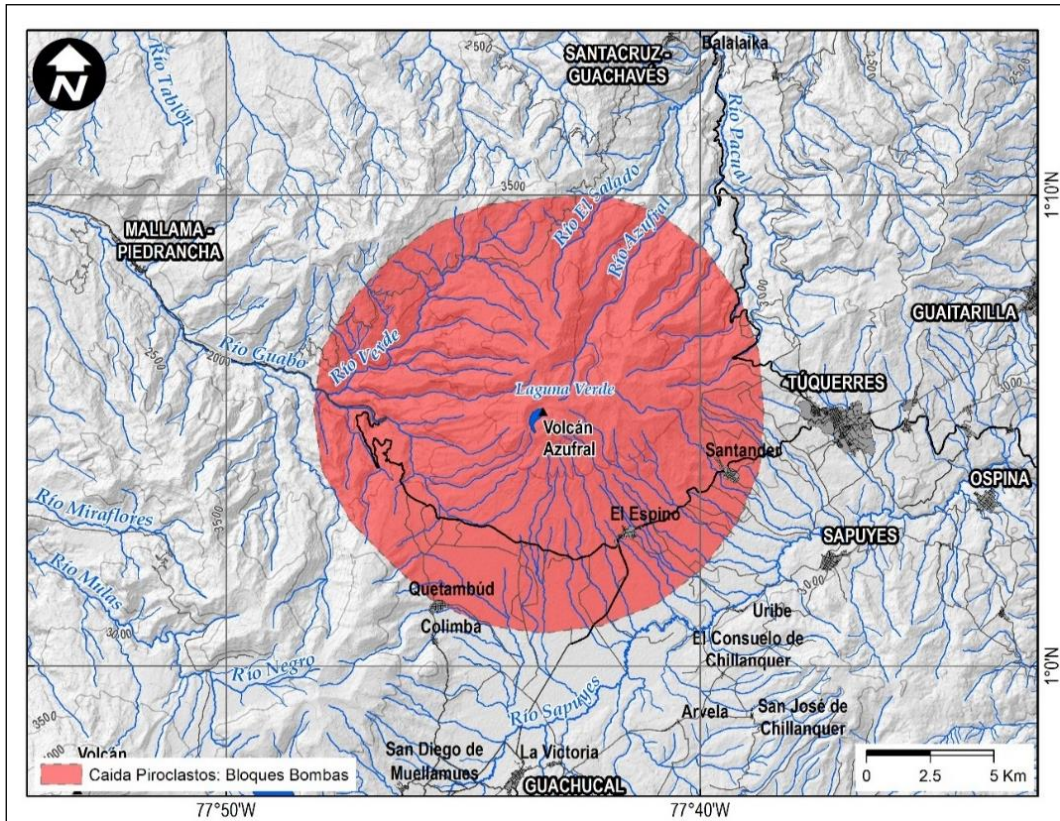
Los efectos causados por los piroclastos emitidos balísticamente varían de acuerdo con su tamaño y a la fuerza del impacto; pueden provocar muerte a personas o animales, causar daños a infraestructuras e incendios; así mismo, las explosiones generadas por este tipo de fenómeno, producidas por la descompresión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

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

En el registro geológico se observan proyectiles balísticos de manera esporádica en las diferentes unidades, por lo tanto, dada la explosividad del Azufral se tiene en cuenta este fenómeno en la evaluación de la amenaza. Los balísticos encontrados en general son más líticos que pumíticos y sus tamaños en general son submétricos fuera del cráter. Los bloques y bombas métricos son más susceptibles de quedar confinados dentro del cráter.

Las simulaciones computacionales para este fenómeno se llevaron a cabo empleando el software *Eject!* (Mastin, 2001), el cual define como parámetros de entrada principales el punto de emisión, la forma, densidad y diámetro del balístico, la velocidad del viento, un gradiente térmico (dependiente de la altitud sobre el nivel del mar), el ángulo y la velocidad de eyección. Como resultados, *Eject!* calcula la trayectoria, junto con el alcance, la velocidad final y la altura máxima alcanzada por el balístico.

De acuerdo con los resultados de las simulaciones, los balísticos alcanzan un radio máximo aproximado de 9 km respecto a la fuente de emisión, sin sobrepasar el área cubierta por la zonificación para caídas piroclásticas de transporte eólico (figura 25). Por la alta peligrosidad del impacto directo de un proyectil balístico, esta zona es considerada como de amenaza volcánica alta.



**Figura 25.** Zonificación de la amenaza por proyección balística: bloques y bombas volcánicas  
Fuente: autores

### 3.3 Amenaza por lahares

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

cratéricos, de lluvias o de corrientes fluviales o reservorios de agua en el interior del volcán.

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

Los *lahares* son eventos secundarios originados por la remoción de material volcánico. Para su generación es indispensable la presencia de agua que puede provenir de hielo, nieve, ríos, lagos o lluvia. Su origen puede ocurrir al momento de la erupción, poco tiempo después o hasta decenas de años posterior a la misma. Igualmente pueden no estar asociados a una erupción como en el caso de la remoción de material producto de una avalancha de escombros asociada a un sismo. Por estas razones la mayoría de las veces los *lahares* son los eventos más peligrosos asociados a los volcanes. Estos eventos pueden ser pequeños o alcanzar magnitudes enormes. Se conocen distancias alcanzadas de hasta 300 km siempre a temperaturas menores a 100°C. En ellos puede haber localmente zonas calientes que superen la temperatura de ebullición del agua. Los *lahares* pueden alcanzar velocidades de decenas de kilómetros. (Vallance, 2000; Rodolfo, 2000).

El reconocimiento de depósitos de *lahares* asociados a la actividad eruptiva del volcán Azufral es muy limitado en la zona de influencia proximal y media. En la zona distal, el acceso a afloramientos tanto por la condición selvática como por orden público ha sido nulo. Sin embargo, a pesar de esta situación, se espera que la acumulación de depósitos piroclásticos (CDPs: flujos y oleadas y Caídas Piroclásticas: Ceniza y Lapilli) en las fuentes hídricas que nacen en el volcán, generará represamientos, cuya ruptura desencadenará la formación de *lahares* secundarios, tanto de tipo flujos hiperconcentrados como de escombros.

Para efectuar las simulaciones de *lahares* se utilizó el software *LaharZ* (Iverson *et al.*, 1998; Schilling, 1998 y 2014) desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), contándose con la asistencia técnica de expertos del Programa de Asistencia en Desastres Volcánicos (VDAP) del USGS. Como información de entrada para el desarrollo de las simulaciones se estimaron volúmenes de material sólido (delimitados para las diferentes microcuencas de las vertientes que nacen en el volcán) proveniente de los resultados de acumulación de ceniza y *lapilli* obtenidos a partir de las simulaciones para

dicho fenómeno; junto con el material aportado por las Corrientes de Densidad Piroclástica CDPs, también obtenidas mediante simulaciones con Titan2D.

Producto de los trabajos de simulación, en el mapa de la figura 26 se observa la zonificación por *lahares* para el volcán Azufral, los cuales afectarían los cauces de los ríos Azufral y Pacual al NE, de los ríos Mulas, Miraflores y Guabo, siguiendo su curso por el río Guiza y Mira al W, y por los afluentes del río Sapuyes que descenden por el SE.

Los *lahares* por la microcuenca de los ríos Guabo-Güiza hacia el costado NW del volcán (figura 26A), podrían originarse por los ríos Guabo, Miraflores, Mulas y la Q. El Carmen y continuarían por el río Güiza, que aguas abajo recibe el nombre de río Mira, avanzando un poco más de 140 Km en dirección al océano Pacífico. Por el SSW, podría originarse flujos por el río Blanco (figura 26B), que llegarían a la laguna de Cumbal con un avance aproximado de 3,3 Km., los cuales requieren estudios adicionales y detallados.

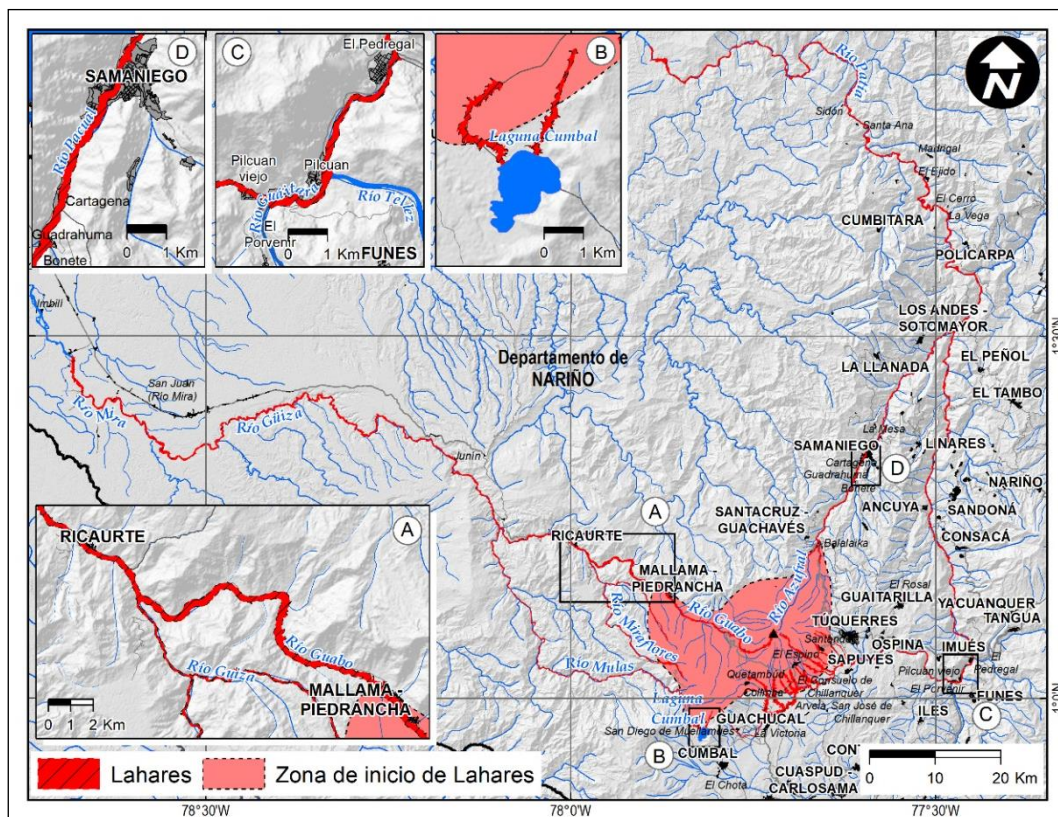


Figura 26. Zonificación de la amenaza por *lahares*

Fuente: autores

En la microcuenca de los ríos Sapuyes – Guáitara por el costado S y SE del volcán (figura 26C), podrían originarse *lahares* por las quebradas El Pueblo, San Javier, San Juan,

Boquerón, Dos Quebradas, Ventanilla, El Común, Chamundala, Chungel, Cuscungo, Chaitán y El Manzano, y se encauzarían por el río Sapuyes hasta encañonarse por el río Guáitara hasta llegar al río Patía, avanzando alrededor de 188 Km.

Los *lahares* que podrían originarse en las laderas NE por la microcuenca del río Pacual (figura 26D), descenderían por los ríos Azufral y Pacual, y luego continuarían por el río Guáitara avanzando hacia el río Patía con un recorrido de 142 Km.

### **3.4 Amenaza por avalancha de escombros**

Son grandes deslizamientos de roca del edificio volcánico que pueden suceder como resultado de la inestabilidad de sus laderas. Puede deberse al ascenso de material volcánico (magma: roca fundida en el interior del volcán), o a un fuerte sismo cercano. Algunas veces estos deslizamientos están acompañados por actividad magmática que causa explosiones dirigidas (*blast*) en la misma dirección del deslizamiento. Las avalanchas de escombros son muy violentas, rápidas, móviles y arrasaron con todo lo que encuentran en su trayectoria. Una avalancha de escombros volcánica se forma cuando un deslizamiento volcánico gana aceleración debido a una rápida pérdida de resistencia en la base de la masa rocosa; el resultado es un movimiento rápido de la masa deformada que viaja pendiente abajo y puede extenderse decenas de kilómetros desde la base del edificio volcánico (De Vries y Davies, 2015).

Como se describió de manera detallada en los capítulos relacionados con la geología y la geomorfología, el volcán Azufral posee un cráter con diámetro estimado de 3 km, el cual está ocupado por una serie de domos de lava y un lago intracraterico; el edificio volcánico es atravesado por un sistema de fallas, la principal corresponde a la falla normal Cauca-Patía con una dirección predominante N30°E a N40°E.

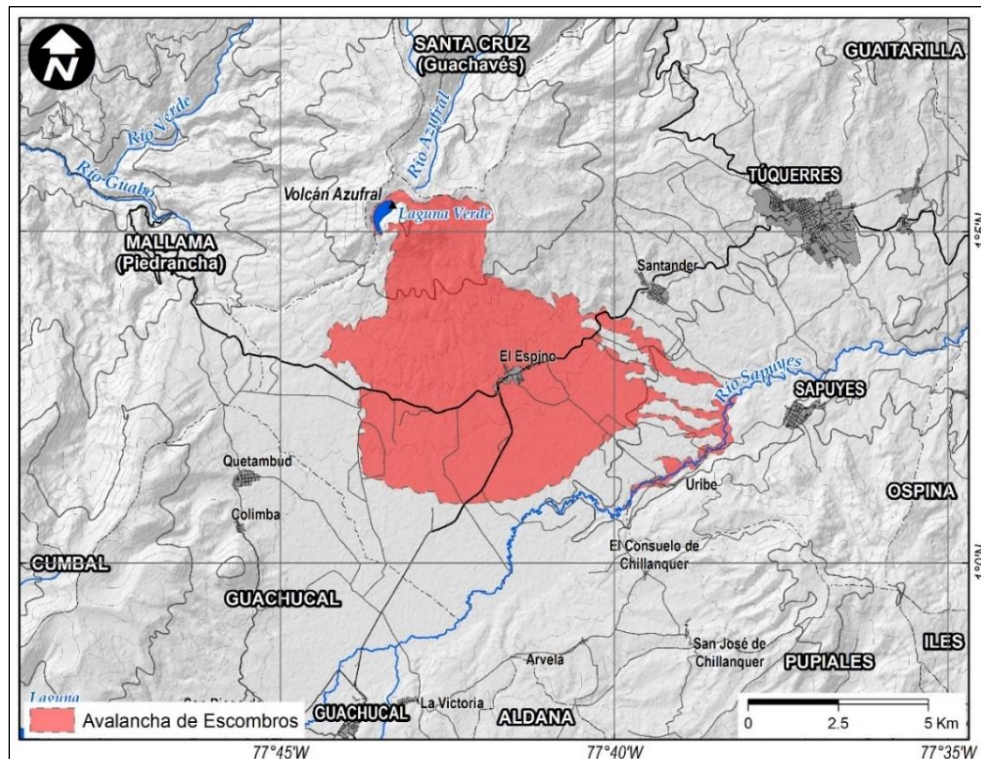
Dentro de las características geomorfológicas del cráter se encuentran: una cicatriz en forma de herradura, limitado por el anfiteatro que define el antiguo edificio volcánico colapsado, el complejo de domos, y ladera abajo se localizan montículos con una morfología típica, asociadas a remanentes de avalancha de escombros conocida como hummocky surface (Ui, 1983; Siebert, 1984; Ui *et al.*, 2000; Van Wyk de Vries y Davies, 2015), algunos detalles de la morfología se aprecian en la figura 13.

A partir del registro geológico, se han identificado depósitos de avalancha de escombros asociados al volcán Azufral: en la denominada Sabana de Túquerres, al sur del área de estudio, desde el nacimiento de la quebrada Chimangual al sur occidente hasta las cercanías de la quebrada El Común al sur oriente en elevaciones entre 3100 y 3000 m s.n.m., que presentan una morfología de pequeños montículos aislados unos de otros en

la Sabana de Túquerres (Calvache *et al.*, 2003). De acuerdo a relaciones de campo se establece que el depósito de avalancha de escombros fue cubierto por los depósitos correspondientes a la unidad estratigráfica El Espino, los cuales suavizaron la paleotopografía en montículos típicos de facies proximales de las avalanchas de escombros.

Para la zonificación de la amenaza por avalanchas de escombros, basados en la caracterización geomorfológica efectuada en el presente trabajo, se empleó la herramienta de simulación Titan2D (Patra *et al.*, 2005; Simakov, *et al.*, 2019 y Patra *et al.*, 2020).

La avalancha de escombros simulada cubre una superficie de 49,5 km<sup>2</sup>, con un avance máximo de 10,1 km (llegando el río Sapuyes), alcanzando velocidades hasta de 21,3 m/s, con un espesor promedio de 6,4 m, a su paso, podría afectar principalmente la población de El Espino (con sus áreas rurales aledañas) y las carreteras que comunican a las poblaciones de Túquerres, Santander, El Espino, San Roque y Guachucal (figura 27).



**Figura 27.** Zonificación de la amenaza por avalancha de escombros  
Fuente: autores

### 3.5 Amenaza por onda de choque

Las ondas de choque se generan por 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, pudiendo ocasionar en raros casos la muerte a personas que se encuentren en áreas proximales del volcán y 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 por efecto de las ondas explosivas (Pulgarín y Zuluaga, 2019).

Para la evaluación de amenaza por ondas de choque para este volcán, teniendo en cuenta que este fenómeno no deja un registro geológico, se debe recurrir a escenarios de referencia para erupciones sub-plinianas a plinianas, para los cuales se tenga el registro instrumental del nivel energético de las ondas de choque generadas; se cita como ejemplo la erupción pliniana de 2010 del volcán Eyjafjallajökull, la cual generó una energía aproximada de  $3 \pm 1,6 \times 10^{13}$  Joules ( $7,17 \pm 3,82$  kT), de acuerdo con Ripepe *et al.* (2013) citado por Medici *et al.* (2013).

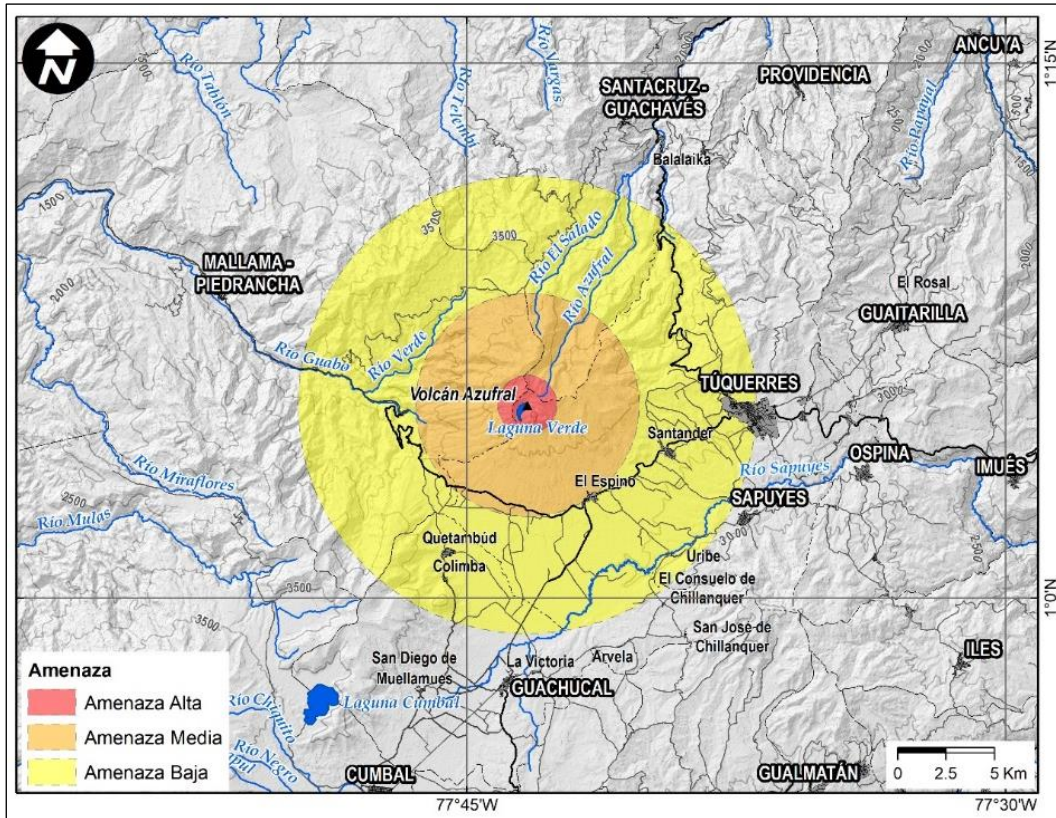
De acuerdo con los resultados obtenidos y la definición de umbrales para la amenaza por ondas de choque que se basa en los trabajos de Carey (1997), Johnson (1971), Taniguchi y Suzuki (1993) y Glasstone y Dolan (1977), en la figura 28 se presenta la zonificación para este fenómeno, que se resume de la siguiente manera:

**Amenaza alta:** Zona en la que se esperan sobrepresiones mayores o iguales a los 13,8 kPa (2 psi), alcanzando un radio de 1,53 km y cubriendo un área de 7,3 km<sup>2</sup> sobre la cima volcánica. En esta zona la onda explosiva puede ocasionar la muerte a personas y la destrucción de estructuras de concreto, incluso reforzadas.

**Amenaza media:** zona en la que se esperan sobrepresiones menores a 13,8 kPa (2 psi) pero mayores a 1,7 kPa (0,25 psi) que corresponde a una franja con radio mayor a 1,53 km, pero sin superar los 5,77 km y afectando un área de 95,8 km<sup>2</sup>, alcanzando la parte alta del poblado El Espino. En esta zona podría producirse rotura de vidrios, ocasionado heridas a personas alcanzadas por sus fragmentos; daños en los marcos de ventanales y en puertas de madera. Las personas podrían ser arrojadas al suelo por acción de las ondas explosivas.



Amenaza baja: zona en la que se esperan sobrepresiones menores 1,7 kPa (0,25 psi) y hasta 0,7 kPa (0,1 psi), cubriendo una franja con un radio mayor a 5,77 km hasta 11,82 km, afectando 333,4 km<sup>2</sup>, y afectando los poblados de Colimba, El Espino, Santander y Túquerres. En esta zona podría producirse rotura de vidrios y ocasionar heridas por los fragmentos y pánico entre las personas.



**Figura 28.** Zonificación para la amenaza por onda de choque

Fuente: autores

## **4. 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 se tiene sobre la historia eruptiva y el registro geológico de los depósitos asociados al volcán.

Se considera que eventuales erupciones del volcán Azufra 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 zona de la laguna cratérica adena a al complejo de domos, sin descartar actividad tectónica o fallamiento en el área de dicho complejo, que pueda favorecer nuevo ascenso de magma en esta zona.

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 usada 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.

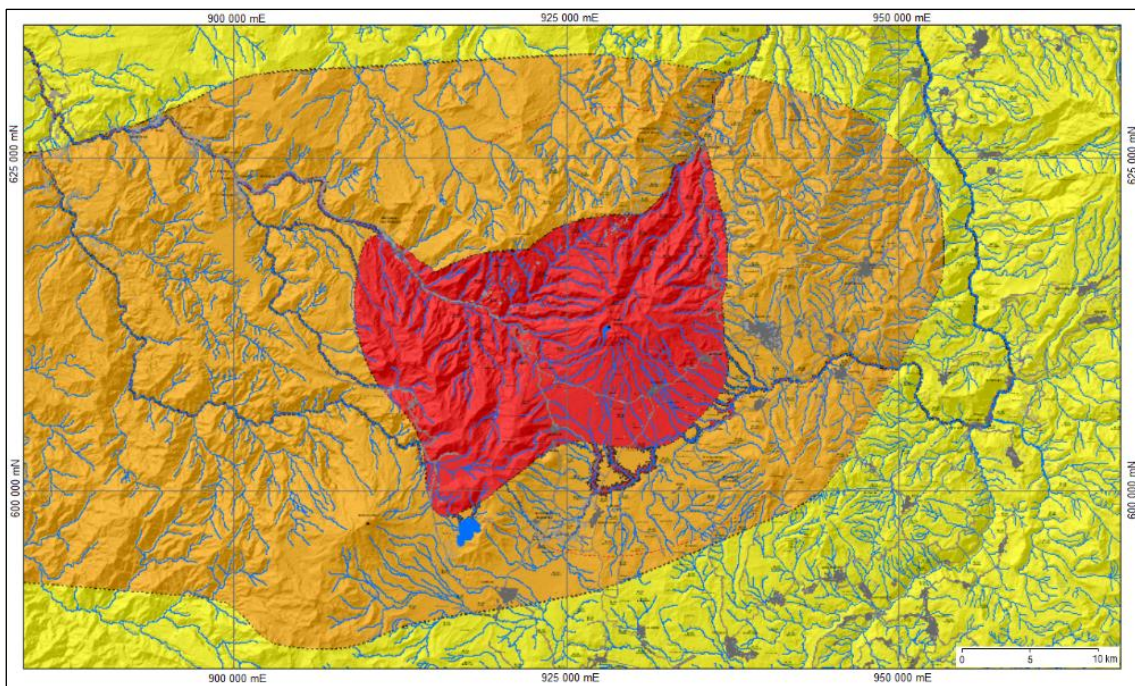
Este tipo de delimitación se basa en la potencialidad de los daños que pueden ocasionar los distintos fenómenos volcánicos y considera la posibilidad de afectación en áreas por uno o varios de estos fenómenos en simultáneo. Esta zonificación se elabora mediante la superposición de las áreas de amenaza 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 general a escala de impresión 1: 85 000 donde se representa la integración de las zonas de amenaza por los diferentes fenómenos; y dos marcos complementarios que representan las zonificaciones de la amenaza por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos (escala de impresión 1: 2 000 000), y de la amenaza por *lahares* (escala de impresión 1: 500 000) (véase el anexo)

### **4.1 Zonificación de amenaza volcánica integrada (mapa principal)**

Este mapa es la representación cartográfica de la evaluación de la amenaza, resultado de la integración de los registros geológicos que permiten conocer los diferentes eventos


volcánicos y su posibilidad de ocurrencia, así como también el resultado de simulaciones computacionales, considerando como posible foco de emisión/erupción principal el área de la laguna cratérica y del complejo de domos del volcán Azufra; en caso de que ocurrieran focos de emisión fuera de esta zona, el mapa debe ser actualizado. El mapa (figura 29) incluye las zonas de amenaza para los fenómenos volcánicos para un escenario eruptivo máximo, de acuerdo con la metodología del SGC; sin embargo, se pueden presentar escenarios eruptivos menores, en los que puede ocurrir fenómenos volcánicos como emisiones de gases, caídas piroclásticas y la generación de flujos piroclásticos y *lahares* de menor magnitud.



**Figura 29.** Mapa de zonificación de la amenaza volcánica integrada (mapa principal)

Fuente: autores

- **ZONA DE AMENAZA ALTA**

 Corresponde a la zona que podría ser afectada por CDPs (oleadas piroclásticas y flujos piroclásticos de pómez y ceniza y de bloques y ceniza), caídas piroclásticas de ceniza y *lapilli* con espesores mayores a 10 cm, proyectiles balísticos de diámetros métricos a submétricos en un radio aproximado de 9 km respecto al foco eruptivo, domos de lava, ondas de choque, gases y sismos volcánicos. Las CDPs afectarían zonas proximales del edificio volcánico, junto con los cauces y valles de los ríos Verde, Sapuyes, Azufra, Guiza, Pacual y las quebradas Blanca, El Molino, La Cruz, El Baño, Puerán, La Palma, La Calera, El Tigre y Trinidad, afluentes de la Q. La Calera - río Guabo; quebradas Boquerón, El Carmelo, Los Molinos,

La Alegría, Chaitán, El Chungel, La Pedrera, Ventanilla, El Carrizo, Dos Quebradas y Panamal, afluentes del río Sapuyes. Adicionalmente, el material piroclástico acumulado puede ser removilizado por el agua generando *lahares*. Esta zona comprende los municipios de Mallama (Piedrancha), Santacruz, Túquerres, Sapuyes, Guachucal y Cumbal, Santacruz (Guachavés), Túquerres, Sapuyes, Guachucal y Cumbal en el departamento de Nariño.



Corresponde a la zona que podría ser afectada por lahares, que descenderían por los ríos Pacual y Azufral al NNE alcanzando el río Guáitara y Patía y sectores rivereños de los municipios de Santacruz, Providencia, Samaniego, La Llanada, Los Andes (Sotomayor), Cumbitara, y Policarpa. Los lahares también podrían descender por afluentes del río Sapuyes al SSE llegando al río Guáitara y Patía, alcanzando sectores rivereños de los municipios de Guachucal, Sapuyes, Túquerres, Imués, Ospina, Iles, Funes, Guaitarilla, Yacuanquer, Consacá, Sandoná, Ancuya, Providencia, Linares, El Tambo, El Peñol, Policarpa, El Rosario, El Charco y Magüi. Por el río Blanco hacia el S, podrían originarse lahares llegando a la laguna de Cumbal, alcanzando sectores rurales de los municipios de Cumbal y Guachucal. Se requieren estudios adicionales y detallados del comportamiento de lahares al llegar a la laguna de Cumbal. Hacia el NW los lahares descenderían por los ríos Mulas, Miraflores y Guabo alcanzando los ríos Güiza y Mira y las cabeceras y áreas rurales de los municipios de Mallama y Ricaurte y poblaciones rurales de los municipios de Cumbal, Barbacoas y Tumaco.

• **ZONA DE AMENAZA MEDIA**



Corresponde a la zona afectada principalmente por caída de piroclastos por transporte eólico con depósitos de ceniza y lapilli de espesor entre 1 y 10 cm que podrían afectar en Colombia al departamento de Nariño, en las poblaciones de los municipios de Mallama (Piedrancha), Santacruz (Guachavés), Túquerres, Providencia, Samaniego, Ancuya, Guaitarilla, Imués, Ospina, Sapuyes, Guachucal, Iles, Pupiales, Pupiales, Aldana, Cuaspud, Cumbal y Ricaurte; y en el Ecuador en la provincia del Carchi, en el Cantón de Tulcán, podría afectar poblaciones de las parroquias de Maldonado y El Chical.

• **ZONA DE AMENAZA BAJA**



Corresponde a la zona afectada principalmente por caída de piroclastos por transporte eólico con depósitos de ceniza y lapilli de espesor entre 0,5 mm y 1 cm, que podrían afectar en Colombia al departamento de Nariño en los municipios y zonas rurales de Tumaco, Barbacoas, Roberto Payán, Ricaurte, Mallama, Santacruz, Túquerres, Providencia, Samaniego, La Llanada, Los Andes (Sotomayor), Ancuya, Linares, Cumbitara, Policarpa, el Peñol, Taminango, San Lorenzo,

La Unión, San Pedro de Cartago (Cartago), Arboleda (Berruecos), San Bernardo, Albán (San José), El Tablón, Buesaco, Chachagüí, El Tambo, La Florida, Nariño, Sandoná, Consacá, Yacuanquer, Tangua, Pasto, Guaitarilla, Imués, Ospina, Iles, Contadero, Funes, Puerres, Córdoba, Potosí, Ipiales, Gualmatán, Pupiales, Aldana, Cuaspud (Carlosama), Cumbal y en el departamento del Putumayo, en los municipios y zonas rurales de Colón y Santiago; como también en el Ecuador, las provincias de Carchi, Imbabura y Esmeraldas.

En la ventana principal del mapa se muestra un *zoom* a la parte proximal del volcán, donde se puede apreciar mejor las áreas que podrían ser afectadas por corrientes de densidad piroclástica, *lahares* y caídas piroclásticas. En las ventanas a la derecha del mapa, se puede ver arriba toda la extensión de la zona que puede ser afectada por caídas piroclásticas y abajo el área que puede ser afectada por *lahares*.

#### 4.2 Zonificación de la amenaza por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos

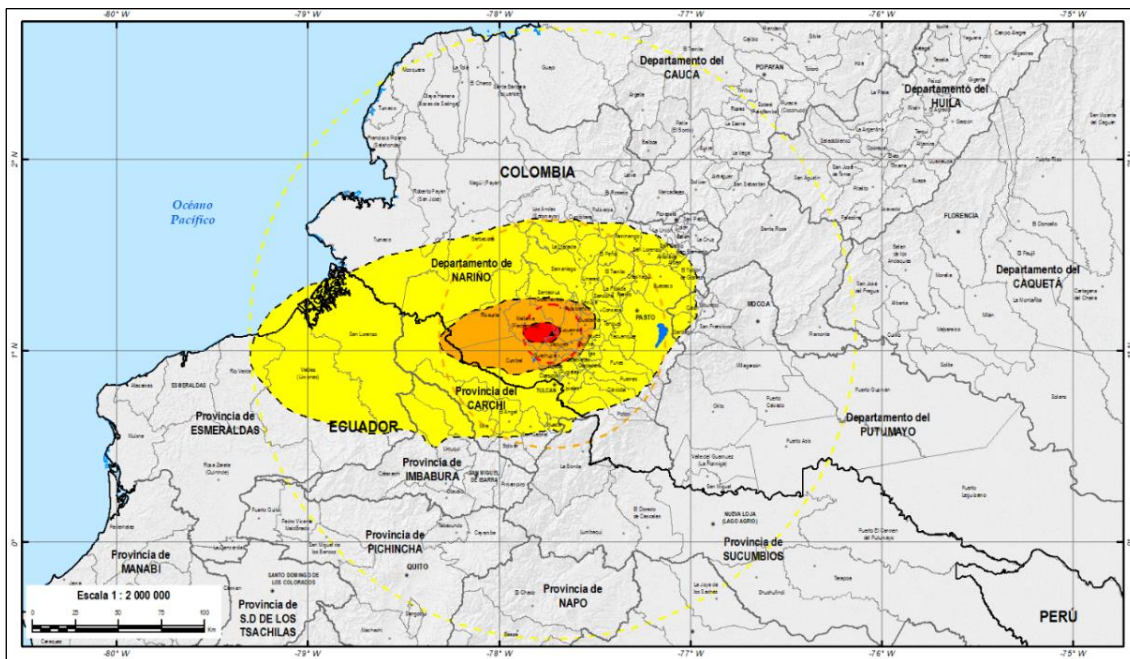


Figura 30. Mapa de zonificación de la amenaza por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos  
Fuente: autores

En la zonificación de amenaza para la caída de piroclastos por transporte eólico, se representa la afectación que se puede generar en un escenario con una columna eruptiva hasta de 20 km de altura sobre la cima del edificio volcánico, representando

tanto la tendencia predominante de los vientos como las posibles variaciones en dirección de los vientos en los diferentes meses del año (figura 30).

- **ZONA DE AMENAZA ALTA**



Esta zona representa un área con acumulaciones mayores a 10 cm para ceniza y *lapilli* (equivalente a cargas sobreimpuestas mayores a 107,5 kg/m<sup>2</sup> para ceniza y *lapilli* secos; y mayores a 215 kg/m<sup>2</sup> para ceniza y *lapilli* saturados), dispersándose en la dirección predominante de los vientos al oeste-noroeste (WNW) en una distancia aproximada de 17 km, afectando las áreas rurales de los municipios de Santacruz y Túquerres, Guachucal y Cumbal (principalmente en el área circundante al volcán Azufral, correspondiente al Parque Natural Regional Volcán Azufral - Chaitán), Sapuyes y Mallama-Piedrancha (incluyendo áreas de la Reserva Natural de Pueblo Viejo), en el departamento de Nariño.



Zona expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones mayores a 10 cm, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluso aquellas no contempladas por las tendencias principales de los vientos), en un radio igual al máximo alcance de la depositación obtenido para esta zona de amenaza, lo cual podría afectar las cabeceras y áreas rurales de los municipios de Mallama (Piedrancha), Santa Cruz (Guachavés), Túquerres, Sapuyes y Guachucal, junto con áreas rurales de los municipios de Guaitarilla, Ospina, Pupiales, Aldana y Cumbal en el departamento de Nariño.

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.

- **ZONA DE AMENAZA MEDIA**



Esta zona representa un área con acumulaciones entre 1 y 10 cm para ceniza y *lapilli* (equivalentes a cargas sobreimpuestas entre 10,8 kg/m<sup>2</sup> y 107,5 kg/m<sup>2</sup>, para ceniza y *lapilli* secos; y entre 21,5 kg/m<sup>2</sup> y 215 kg/m<sup>2</sup>, para ceniza y *lapilli* saturados), dispersándose en la dirección predominante de los vientos al oeste-noroeste (WNW) en una distancia aproximada de 66 km, afectando las cabeceras y áreas rurales de los municipios de Mallama (Piedrancha), Santacruz (Guachavés), Túquerres, Providencia, Samaniego, Ancuya, Guaitarilla, Imués, Ospina, Sapuyes, Guachucal, Iles, Pupiales, Aldana, Cuaspud, Cumbal y Ricaurte; y las poblaciones de Balalaika y Manchag (Santacruz); Yascual, Santander, Pinzón, Cuatro Esquinas, Albán y Los Arrayanes (Túquerres); Indo Santa Rosa (Ancuya); El Rosal (Guaitarilla); Santa Ana (Imués); San

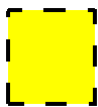
Isidro y Cunchila (Ospina); El Espino y Uribe (Sapuyes); Quetambúd, Colimba, Muellamues, La Victoria, Chillanquer, Arvela, San José de Chillanquer (Guachucal); San Isidro, San Francisco, Villa Nueva, Chambú, Palmar y Ospina Pérez (Ricaurte); Chucunes, El Arenal, San Miguel, El Arco y El Carmelo (Mallama).



Zona expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones entre 1 cm a 10 cm, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluso aquellas no contempladas por las tendencias principales de los vientos), empleando un radio igual al máximo alcance de la depositación obtenido para esta zona de amenaza, lo cual podría afectar las cabeceras y áreas rurales de los municipios de Guaitarilla, Imués, Ospina, Iles, Pupiales, Aldana, Cumbal, Ricaurte, Los Andes (Sotomayor), La Llanada, El Peñol, El Tambo, Linares, Samaniego, Sandoná, Consacá, Yacuanquer, Contadero, Tangua, Funes, Puerres, Córdoba, Potosí, Ipiales, Cuaspud (Carlosama), Chachagüí (incluyendo el aeropuerto Antonio Nariño), Nariño, Pasto; junto con áreas rurales de los municipios de Santa Cruz, Túquerres, Guachucal, Barbacoas, Policarpa, Taminango, Buesaco en el departamento de Nariño, como también en áreas urbanas y rurales en Ecuador.

En esta zona pueden ocurrir: deformación o colapso de techos e incluso 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.

- **ZONA DE AMENAZA BAJA**



Esta zona representa un área con acumulaciones entre 0,5 mm a 1 cm para ceniza (equivalentes a cargas sobrepuestas entre 0,5 kg/m<sup>2</sup> y 10,8 kg/m<sup>2</sup>, para ceniza seca; y entre 1,1 kg/m<sup>2</sup> y 21,5 kg/m<sup>2</sup>, para ceniza saturada), dispersándose en la dirección predominante de los vientos al oeste-noroeste (WNW) a una distancia aproximada de 176 km, y podrían afectar a los municipios y zonas rurales de Tumaco, Barbacoas, Roberto Payán, Ricaurte, Mallama, Santacruz, Túquerres, Providencia, Samaniego, La Llanada, Los Andes (Sotomayor), Ancuya, Linares, Cumbitara, Policarpa, el Peñol, Taminango, San Lorenzo, La Unión, San Pedro de Cartago (Cartago), Arboleda (Berruecos), San Bernardo, Albán (San José), El Tablón, Buesaco, Chachagüí, El Tambo, La Florida, Nariño, Sandoná, Consacá, Yacuanquer, Tangua, Pasto, Guaitarilla, Imués, Ospina, Iles, Contadero, Funes, Puerres, Córdoba, Potosí, Ipiales, Gualmatán, Pupiales, Aldana, Cuaspud (Carlosama) y Cumbal en el departamento de Nariño; y en los municipios y zonas rurales de Colón y Santiago en el departamento del Putumayo en

territorio Colombiano, y en las provincias del Carchi, Imbabura y Esmeraldas en el Ecuador.



Zona expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones entre 0,5 mm a 1 cm, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluso aquellas no contempladas por las tendencias principales de los vientos), empleando un radio igual al máximo alcance de la depositación obtenido para esta zona de amenaza, lo cual podría afectar otras cabeceras y/o zonas rurales de los municipios de Magüi (Payán), El Charco, Santa Bárbara (Iscuandé), Leiva, El Rosario, Policarpa, Taminango, San Lorenzo, Buesaco, Barbacoas, Olaya Herrera (Bocas de Satinga), La Tola, Tumaco, Francisco Pizarro (Salahonda), Colón (Génova), Belén, La Cruz, San Pedro de Cartago, San Bernardo, Albán (San José), San Pablo, La Unión y El Tablón de Gómez, en el departamento de Nariño; junto con zonas rurales de los municipios de Los Andes, Mosquera, Funes, Puerres, Córdoba y Potosí, en el departamento de Nariño; cabeceras y áreas rurales de los municipios de Guapi, Argelia, La Sierra, Patía (El Bordo), Sucre, La Vega, Balboa, Mercaderes, Bolívar, San Sebastián, Florencia, Santa Rosa y Piamonte, en el departamento del Cauca; y en áreas rurales de los municipios de Timbiquí, El Tambo, Timbío, Sotaró y Paletará, en el departamento del Cauca; áreas rurales del Municipio de San Agustín, en el departamento del Huila; cabeceras y áreas rurales de los municipios de Colón, Sibundoy, San Francisco, Mocoa, Santiago, Villagarzón, Puerto Guzmán, Puerto Caicedo, Orito, Puerto Asís, Valle del Guamuez (La Hormiga) y San Miguel (La Dorada), en el departamento del Putumayo en territorio Colombiano; como también en áreas urbanas y rurales en el Ecuador.

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

### 4.3 Zonificación de la amenaza por *lahares*

El mapa de zonificación de amenaza alta por *lahares* (figura 31), representa la zona de inicio y los diferentes cauces por donde podrían descender los flujos.



La zona de iniciación de *lahares* es un área susceptible a una variedad de procesos, donde se generan, movilizan y depositan los materiales producto de CDPs, de explosión y colapso domos y flujos de lava, caídas piroclásticas, avalanchas de escombros, etc. y cuyo límite representa las áreas donde estos depósitos, al interactuar con el agua de precipitaciones, ríos, quebradas y lagunas, empiezan a removilizarse, propiciando la formación de *lahares*, posterior a posible ruptura de represamientos naturales.





Los *lahares* se zonifican para los principales cauces que nacen de la parte alta del volcán Azufral y a partir de las principales cuencas hidrográficas. Los volúmenes máximos esperados son: 338 millones de m<sup>3</sup> en el río Güiza hacia el NW, de 117 millones de m<sup>3</sup> en el río Pacual hacia el NE, de 245 millones de m<sup>3</sup> por el río Sapuyes hacia el SSE y de 6 millones de m<sup>3</sup> por el río Blanco hacia el S.

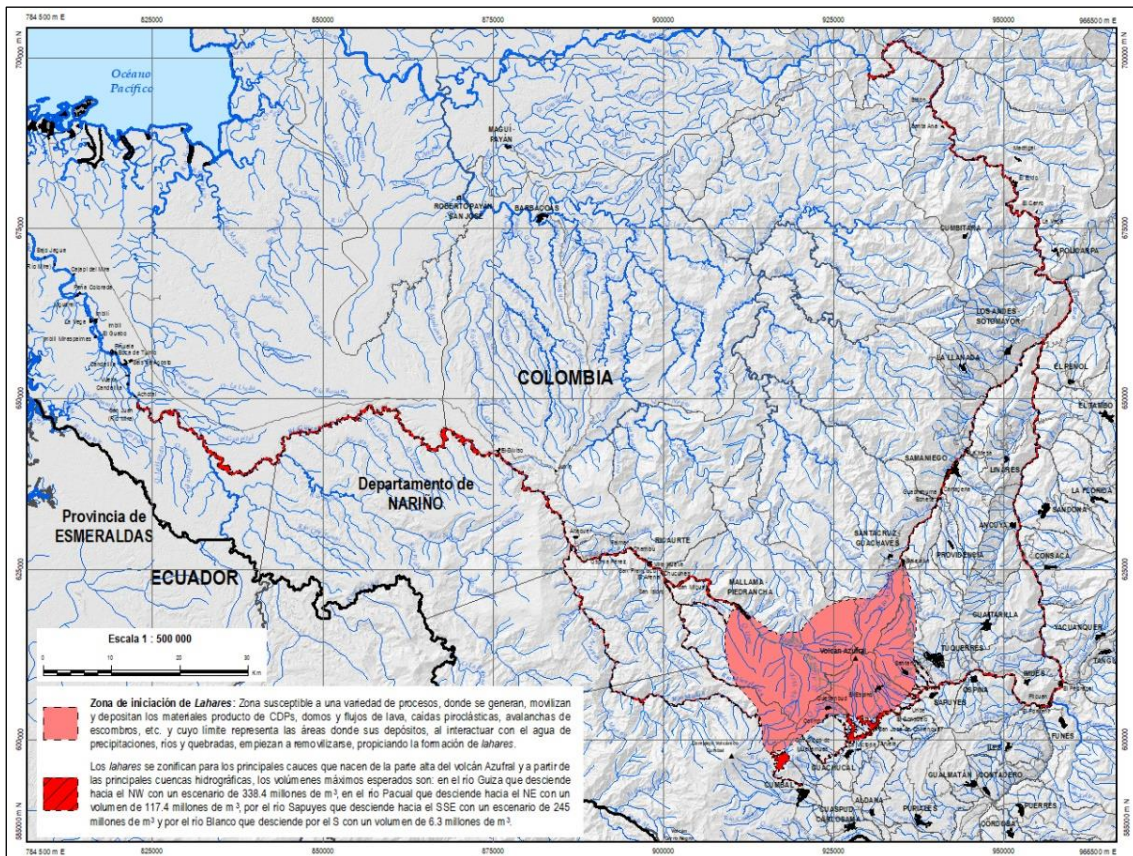


Figura 31. Mapa de zonificación de la amenaza por *lahares*

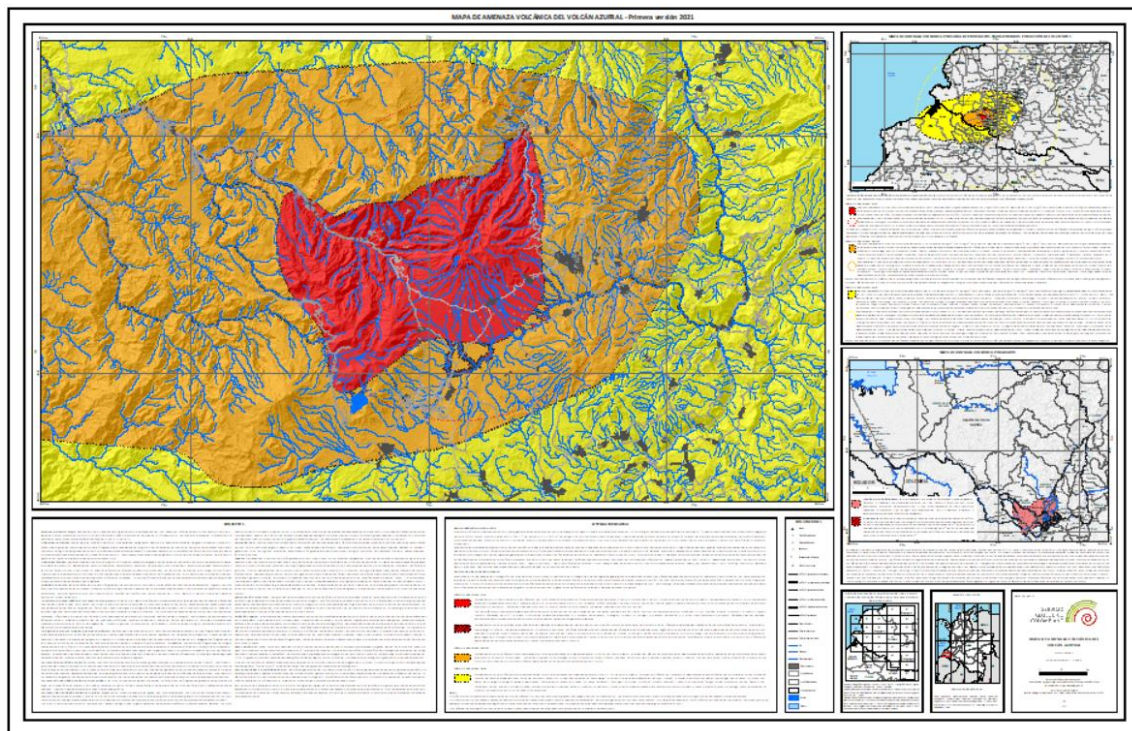
Fuente: autores

Los *lahares* que podrían originarse por el costado NW del volcán, descenderían por los cauces de los ríos Guabo, Miraflores y Mulas y la Q. El Carmen, continuando por el río Güiza, que aguas abajo recibe el nombre de río Mira, avanzando un poco más de 140 km, afectando a su paso las poblaciones de Piedrancha, el Carmelo, El Arco, San Miguel, San Isidro, Chucunes y El Arenal en Mallama, como también sectores rurales del Municipio de Cumbal, los poblados de San Francisco, Villanueva, Chambú, Palmar, Ospina Pérez en Ricaurte y algunas zonas rurales del cauce del río Güiza pertenecientes al Municipio de Barbacoas y el poblado de San Juan y aledaños sobre el cauce del río Mira en el Municipio

de Tumaco. Los *lahares* que podrían originarse en las laderas NNE, descenderían por los ríos Azufral y Pacual continuando por el río Guáitara y posteriormente por el río Patía, avanzando alrededor de 142 km; afectando a su paso los poblados de Balalaika en Santacruz (Guachavés), Bonete y Guadruma en Providencia; Cartagena y el casco urbano del Municipio de Samaniego y sectores rurales de los municipios de La Llanada, Los Andes (Sotomayor), Cumbitara y aguas abajo por el río Patía en el poblado de La Vega en Policarpa. Los *lahares* al SSE también podrían descender por las quebradas El Pueblo, San Javier, San Juan, Boquerón, Dos Quebradas, Ventanilla, El Común, Chamundala, Chungel, Cuscungo, Chaitán y El Manzano afluentes y por el mismo río Sapuyes; afectando a su paso los poblados de Muellamues en Guachucal, Uribe en Sapuyes, zonas rurales del Municipio de Túquerres, el Porvenir en Iles, Pilcuán viejo y Pilcuán en Imués; y continuando su recorrido encañonado por el río Guáitara, alcanzando sectores rurales en los municipios de Ospina, Funes, Guaitarilla, Yacuanquer, Consacá, Sandoná, Ancuya, Providencia, Linares, El Tambo, El Peñol, hasta alcanzar aguas abajo en las planicies del río Patía a la población de La Vega en Policarpa, y también zonas rurales de los municipios de El Rosario, El Charco y Magüi, avanzando alrededor de 188 Km. Por el río Blanco hacia el S, podría originarse también flujos llegando a la laguna de Cumbal, los cuales requieren estudios adicionales y detallados, afectando áreas rurales de los municipios de Cumbal y Guachucal (figura 31).

#### **4.4 Mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral**

En la composición de la plancha del mapa de amenaza volcánica (figura 32), se observa en la parte superior izquierda el mapa principal (zonificación del mapa de amenaza integrada), en la parte superior derecha la amenaza por caída de piroclastos transportados por acción del viento y en la parte inferior derecha, la amenaza por *lahares*.



**Figura 32.** Mapa de Amenaza Volcánica del Volcán Azufra  
Fuente: autores

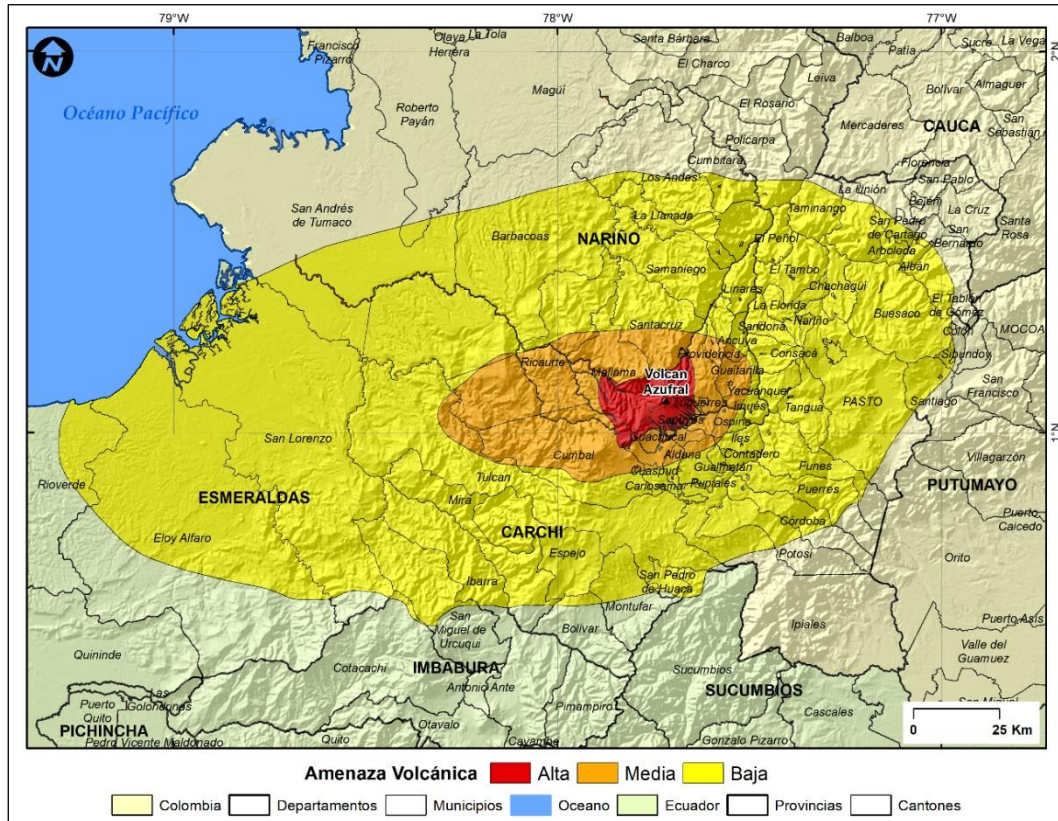
## 5. POBLACIÓN EN EL ÁREA DE INFLUENCIA VOLCÁNICA

De acuerdo con el censo de población y vivienda del Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, realizado en el 2018 y de acuerdo con la proyección de población para el año 2020, se determina la población en zona de influencia por amenaza volcánica alta, media y baja.

### 5.1 Análisis poblacional para la zonificación integrada de la amenaza volcánica (Contemplando la zonificación de caídas piroclásticas para las tendencias principales de los vientos)

Los municipios en la zona de influencia de amenaza volcánica por CDPs (flujos y oleadas piroclásticas), *lahares*, avalancha de escombros, ondas de choque y caída de ceniza y *lapilli* transportada en la dirección preferencial de los vientos son: Alban, Aldana, Ancuya, Arboleda, Barbacoas, Buesaco, Cuaspud, Chachagüí, Consacá, Contadero, Córdoba, Cumbal, Cumbitara, El Charco, El Peñol, El Rosario, El Tablón de Gómez, El Tambo, Funes, Guachucal, Guaitarilla, Gualmatán, Íles, Imués, Ipiales, La Florida, La Llanada, La Unión, Linares, Los Andes-Sotomayor, Magüi, Mallama, Nariño, Ospina, Pasto, Policarpa, Potosí, Providencia, Puerres, Pupiales, Ricaurte, Roberto Payán, Santacruz, Samaniego, San Bernardo, San Lorenzo, San Pedro de Cartago, Sandoná, Sapuyes, Taminango, Tangua, Tumaco, Túquerres y Yacuanquer del Departamento de Nariño y Colón y Santiago del Departamento del Putumayo, con una población estimada en 1 089 573 habitantes, según el Censo de Población y Vivienda del DANE, proyectada para el año 2020.

En el Ecuador los cantones en zona de influencia volcánica son: Tulcán, Bolívar, Espejo, Mira, Montufar y San Pedro de Huaca en la provincia del Carchi, los cantones de Eloy Alfaro, San Lorenzo y Rioverde en la Provincia de Esmeraldas, los cantones de Ibarra, Cotacachi, San Miguel de Ucuquí en la Provincia de Imbabura y el cantón de Sucumbíos en la Provincia que lleva su nombre con una población aproximada de 360 000 habitantes (figura 33 y tabla 3).



**Figura 33.** Análisis poblacional para la zonificación integrada de la Amenaza volcánica  
 El mapa muestra las poblaciones en zona de influencia por amenaza de CDPs (flujos y oleadas piroclásticas), lahares, avalancha de escombros, ondas de choque y caída de piroclastos transportados por el viento en la dirección preferencial de los vientos  
 Fuente: autores

**Tabla 3.** Municipios y población en zona de influencia por CDPs

MPIO	CABECERA	Tip o	Área Km <sup>2</sup>	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Suma Porc Mpal	Fenómenos
Alban	San José	Urb	0.4	9320	6705.0	Baja	0.4	2682	29%	97.9%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	38.1		174.2	Baja	37	6446	69%	97.9%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Aldana	Aldana	Urb	0.3	7361	5173.3	Baja	0.3	1552	21%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	47.1		123.3	Baja	25.4	3133	43%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufra

MPIO	CABECERA	Tip o	Área Km <sup>2</sup>	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Suma Porc Mpal	Fenómenos
						Media	21.8	2689	37%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Ancuya	Ancuya	Urb	0.4	8603	5215.0	Baja	0.4	2086	24%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	68.3		95.4	Alta	1.2	115	1%	100.0 %	Lahares
						Baja	47.1	4494	52%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	20	1908	22%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Arboleda	Berruecos	Urb	0.3	8420	3836.7	Baja	0.3	1151	14%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	59.8		121.6	Baja	59.8	7269	86%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Barbacoas	Barbacoas	Rur	2719.3	56526	16.3	Alta	10.8	176	0%	64.8%	Lahares
						Baja	2231	36281	64%	64.8%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	9.7	158	0%	64.8%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Buesaco	Buesaco	Urb	1.1	23910	5987.3	Baja	1.1	6586	28%	98.8%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	633.1		27.4	Baja	622.4	17031	71%	98.8%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Cuaspud	Carlosama	Urb	1.1	9198	2460.9	Baja	1.1	2707	29%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	56		115.9	Baja	50.6	5865	64%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	5.5	638	7%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufra

MPIO	CABECERA	Tip o	Área Km <sup>2</sup>	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Suma Porc Mpal	Fenómenos
Chachagúí	Chachagúí	Urb	0.9	15303	4905.6	Baja	0.9	4415	29%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	144.9		75.1	Baja	145	10896	71%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Consacá	Consacá	Urb	0.5	13738	4278.0	Baja	0.5	2139	16%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	118.4		98.0	Alta	0.8	78	1%	100.1 %	Lahares
Contadero	Contadero	Urb	0.5	7236	2612.0	Baja	0.5	1306	18%	119.8 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	42.6		139.2	Baja	42.6	5930	82%	119.8 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Córdoba	Córdoba	Urb	0.7	15477	4387.1	Baja	0.7	3071	20%	71.0%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	303		40.9	Baja	193.3	7914	51%	71.0%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Cumbal	Cumbal	Urb	2	37033	3406.5	Baja	0.1	341	1%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	2	6813	18%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	908.5		Alta	29.3	975	3%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli - Balísticos - Avalancha Escombros - CDPs	
					Alta	5	166	0%	100.2 %	Lahares	
					Baja	224.7	7474	20%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli	
Media	651	21655	58%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom						

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufra

MPIO	CABECERA	Tip o	Área Km <sup>2</sup>	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Suma Porc Mpal	Fenómenos
											viento: Ceniza y Lapilli
Cumbitara	Cumbitara	Urb	0.3	5768	5430.0	Baja	0.3	1629	28%	51.6%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	353.6		11.7	Alta	7.7	90	2%	51.6%	Lahares
						Baja	107.6	1259	22%	51.6%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
El Charco	El Charco	Rur	2481.4	22550	6.1	Alta	0.2	1	0%	0.0%	Lahares
El Peñol	El Peñol	Urb	0.4	7442	3407.5	Baja	0.4	1363	18%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	119.1		51.0	Alta	1.1	56	1%	100.1 %	Lahares
						Baja	118.1	6028	81%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
El Rosario	El Rosario	Rur	518.2	12062	19.9	Alta	0.6	12	0%	0.1%	Lahares
El Tablón de Gómez	El Tablón de Gómez	Urb	0.2	14261	7835.0	Baja	0.2	1567	11%	52.2%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	305.9		41.5	Baja	141.8	5884	41%	52.2%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
El Tambo	El Tambo	Urb	1	13809	5166.0	Baja	1	5166	37%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	245.5		35.2	Alta	1	35	0%	100.1 %	Lahares
						Baja	244.8	8618	62%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Funes	Funes	Urb	0.8	7135	3851.3	Baja	0.8	3081	43%	88.8%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	392.7		10.3	Alta	0.5	5	0%	88.8%	Lahares
						Baja	314.5	3247	46%	88.8%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Guachucal	Guachucal	Urb	0.7	19339	4235.7	Media	0.7	2965	15%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli



Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufra

MPIO	CABECERA	Tip o	Área Km <sup>2</sup>	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Suma Porc Mpal	Fenómenos
		Rur	154.4		106.0	Alta	23.9	2535	13%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli - Balísticos - Avalancha Escombros - CDPs
						Alta	7.5	795	4%	100.2 %	Lahares
						Baja	0.1	11	0%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	123.2	13065	68%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Guitarilla	Guitarilla	Urb	1.2	11325	3601.7	Media	1.2	4322	38%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	115.1		60.8	Alta	1.2	73	1%	100.1 %	Lahares
						Baja	25.1	1527	13%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	89	5415	48%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Gualmatán	Gualmatán	Urb	0.7	7040	4262.9	Baja	0.7	2984	42%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	29.1		139.4	Baja	29.1	4056	58%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	0.1	14	0%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Íles	Íles	Urb	0.4	7632	5315.0	Baja	0.4	2126	28%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	79.9		68.9	Alta	0.3	21	0%	100.1 %	Lahares
						Baja	76.6	5279	69%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	3.1	214	3%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufra

MPIO	CABECERA	Tip o	Área Km <sup>2</sup>	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Suma Porc Mpal	Fenómenos
Imués	Imués	Urb	0.3	7446	3353.3	Baja	0.3	1006	14%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	81.1		79.4	Alta	2.1	167	2%	100.0 %	Lahares
						Baja	53.4	4240	57%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	25.6	2033	27%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Ipiiales	Ipiiales	Urb	14.3	115836	5387.6	Baja	14.3	77042	67%	72.8%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	1516.8		25.6	Baja	283	7238	6%	72.8%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
La Florida	La Florida	Urb	0.9	9911	2202.2	Baja	0.9	1982	20%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	135		58.7	Baja	135.1	7935	80%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
La Llanada	La Llanada	Urb	0.4	6470	7870.0	Baja	0.4	3148	49%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	243.6		13.6	Alta	0.2	3	0%	100.1 %	Lahares
						Baja	243.7	3323	51%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
La Unión	La Unión	Rur	140.4	31751	135.8	Baja	14.4	1955	6%	6.2%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Linares	Linares	Urb	0.3	10012	7293.3	Baja	0.3	2188	22%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	134.8		58.0	Alta	4	232	2%	100.1 %	Lahares
						Baja	131	7603	76%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Los Andes	Sotomayor	Urb	0.7	9268	6231.4	Baja	0.7	4362	47%	73.1%	Caída Piroclastos direcc predom

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral

MPIO	CABECERA	Tip o	Área Km <sup>2</sup>	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Suma Porc Mpal	Fenómenos
		Rur	952.5		5.2						viento: Ceniza y Lapilli
						Alta	3.4	18	0%	73.1%	Lahares
						Baja	465.1	2396	26%	73.1%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Magüi	Payan	Rur	1799.5	25543	10.0	Alta	6.8	68	0%	0.3%	Lahares
Mallama	Piedrancha	Urb	0.3	8946	4096.7	Alta	0.2	819	9%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli - Balísticos - Avalancha Escombros - CDPs
						Alta	0.1	410	5%	100.1 %	Lahares
		Rur	566.4		13.6	Alta	221.3	3015	34%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli - Balísticos - Avalancha Escombros - CDPs
						Alta	10.1	138	2%	100.1 %	Lahares
						Baja	49.4	673	8%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	286.5	3903	44%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Nariño	Nariño	Urb	0.3	4346	8796.7	Baja	0.3	2639	61%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	24.9		68.6	Baja	24.9	1707	39%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Ospina	Ospina	Urb	0.5	6993	3918.0	Media	0.5	1959	28%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Alta	1.3	102	1%	100.0 %	Lahares
		Rur	64.1		78.5	Baja	24	1885	27%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	38.8	3047	44%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral

MPIO	CABECERA	Tip o	Área Km <sup>2</sup>	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Suma Porc Mpal	Fenómenos
Pasto	San Juan de Pasto	Urb	25.1	392589	12165.7	Baja	25.1	305360	78%	96.5%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	1071.1		81.4	Baja	903.6	73588	19%	96.5%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Policarpa	Policarpa	Urb	0.3	9779	8683.3	Baja	0.3	2605	27%	41.9%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	432.6		16.6	Alta	4.9	81	1%	41.9%	Lahares
						Baja	85.3	1415	14%	41.9%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Potosí	Potosí	Urb	0.3	10058	6966.7	Baja	0.3	2090	21%	64.1%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	386.6		20.6	Baja	211.4	4357	43%	64.1%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Providencia	Providencia	Urb	0.3	5553	4986.7	Media	0.3	1496	27%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	39.5		102.7	Alta	0.3	31	1%	100.2 %	Lahares
						Baja	10.4	1068	19%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	28.9	2968	53%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Puerres	Puerres	Urb	1	8365	3440.0	Baja	1	3440	41%	84.5%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	348		14.2	Baja	256.6	3631	43%	84.5%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Pupiales	Pupiales	Urb	1.5	17219	4114.7	Baja	1.5	6172	36%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	127.6		86.6	Baja	96.4	8346	48%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufra

MPIO	CABECERA	Tip o	Área Km <sup>2</sup>	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Suma Porc Mpal	Fenómenos
						Media	31.4	2718	16%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Ricaurte	Ricaurte	Urb	0.4	20057	5980.0	Alta	0.2	1196	6%	100.2 %	Lahares
						Media	0.2	1196	6%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	1050.6		Alta	8	135	1%	100.2 %	Lahares	
					Baja	392.3	6596	33%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli	
					Media	652.2	10966	55%	100.2 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli	
Roberto Payan	San José	Rur	1450	12694	6.4	Baja	41.4	266	2%	2.1%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Santacruz	Guachavés	Urb	0.2	11074	7620.0	Media	0.2	1524	14%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Alta	49	869	8%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli - Balísticos - Avalancha Escombros - CDPs
		Rur	538.3		Alta	2.3	41	0%	100.1 %	Lahares	
					Baja	318.2	5645	51%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli	
					Media	169.6	3009	27%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli	
Samaniego	Samaniego	Urb	2.2	27742	4286.8	Alta	0.6	2572	9%	100.1 %	Lahares
						Baja	1.6	6859	25%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	600.5		Alta	2.2	67	0%	100.1 %	Lahares	
					Baja	589.2	17966	65%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli	

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufra

MPIO	CABECERA	Tip o	Área Km <sup>2</sup>	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Suma Porc Mpal	Fenómenos
						Media	9.9	302	1%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
San Bernardo	San Bernardo	Urb	0.3	9171	8623.3	Baja	0.1	862	9%	17.4%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	64.7		101.8	Baja	7.2	733	8%	17.4%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
San Lorenzo	San Lorenzo	Urb	0.3	18399	7276.7	Baja	0.3	2183	12%	87.1%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	248.1		65.4	Baja	211.8	13843	75%	87.1%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
San Pedro de Cartago	San Pedro de Cartago	Urb	0.2	6820	4115.0	Baja	0.2	823	12%	67.4%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	55.3		108.4	Baja	34.8	3774	55%	67.4%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Sandoná	Sandoná	Urb	1.7	19770	5926.5	Baja	1.7	10075	51%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	99.5		97.4	Alta	0.7	68	0%	100.0 %	Lahares
						Baja	98.9	9637	49%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Sapuyes	Sapuyes	Urb	0.5	7232	2790.0	Media	0.5	1395	19%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	114.6		50.9	Alta	62.3	3173	44%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli - Balísticos - Avalancha Escombros - CDPs
						Alta	12.5	637	9%	100.1 %	Lahares
						Media	40	2037	28%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Taminango	Taminango	Urb	0.4	17878	9965.0	Baja	0.4	3986	22%	88.6%	Caída Piroclastos direcc predom

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufra

MPIO	CABECERA	Tip o	Área Km <sup>2</sup>	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Suma Porc Mpal	Fenómenos
											viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	233.5			59.5	Baja	199.2	11851	66%	88.6%
Tangua	Tangua	Urb	0.7	13321	3934.3	Baja	0.7	2754	21%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	216.6		48.8	Baja	216.7	10572	79%	100.0 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Tumaco	San Andrés de Tumaco	Rur	3577.1	257052	47.6	Alta	17.6	839	0%	19.2%	Lahares
						Baja	1020.5	48624	19%	19.2%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Túquerres	Túquerres	Urb	3.9	44575	4414.1	Media	3.9	17215	39%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	211.6		129.3	Alta	59.6	7706	17%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli - Balísticos - Avalancha Escombros - CDPs
						Alta	5.4	698	2%	100.1 %	Lahares
						Baja	5.8	750	2%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
						Media	141	18231	41%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Yacuanquer	Yacuanquer	Urb	0.6	10955	5540.0	Baja	0.6	3324	30%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	101.8		75.0	Alta	0.9	67	1%	100.1 %	Lahares
						Baja	101	7571	69%	100.1 %	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
Colon	Colon	Urb	1.8	5530	1907.8	Baja	1.8	3434	62%	77.9%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	62.4		33.6	Baja	26	873	16%	77.9%	Caída Piroclastos direcc predom

MPIO	CABECERA	Tip o	Área Km <sup>2</sup>	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Suma Porc Mpal	Fenómenos
											viento: Ceniza y Lapilli
Santiago	Santiago	Urb	0.8	7308	4281.3	Baja	0.8	3425	47%	67.2%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli
		Rur	340.2		11.4	Baja	130.2	1486	20%	67.2%	Caída Piroclastos direcc predom viento: Ceniza y Lapilli

(flujos y oleadas piroclásticas), *lahares*, avalancha de escombros, ondas de choque y caída de piroclastos transportados por el viento en la dirección preferencial de los vientos

Fuente: autores

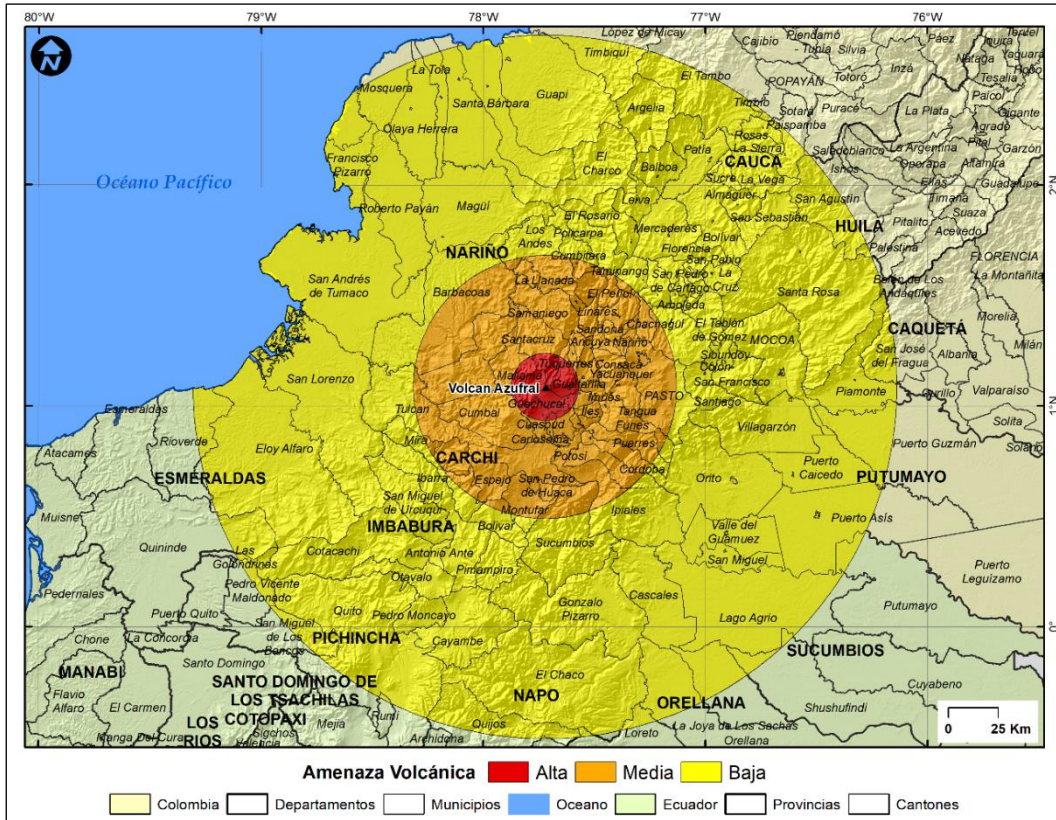
## 5.2 Análisis poblacional para la zonificación de caídas piroclásticas (Contemplando todas las direcciones posibles de viento)

Los municipios en la zona de influencia por amenaza volcánica por caída de piroclastos transportados omnidireccionalmente por los vientos (ceniza y *lapilli*) son: San José del Fragua en el Departamento del Caquetá), Almaguer, Argelia, Balboa, Bolívar, El Tambo, Florencia, guapi, La Sierra, La Vega, Mercaderes, Patía, Piamonte, Puracé, Rosas, San Sebastián, Santa Rosa, Sotará-Paíspamba, Sucre, Timbío, Timbiquí en el Departamento del Cauca, Pitalito y San Agustín en el Departamento del Huila, Alban, Aldana, Ancuya, Arboleda, Barbacoas, Belén, Buesaco, Chachagüí, Colón, Consacá, Contadero, Córdoba, Cuaspud, Cumbal, Cumbitara, El Charco, El Peñol, El Rosario, El Tablón de Gómez, El Tambo, Francisco Pizarro, Funes, Guachucal, Guaitarilla, Gualmatán, Íles, Imués, Ipiales, La Cruz, La Florida, La Llanada, La tola, La Unión, Leiva, Linares, Los Andes, Magüi, Mallama, Mosquera, Nariño, Olaya Herrera, Ospina, Pasto, Policarpa, Potosí, Providencia, Puerres, Pupiales, Ricaurte, Roberto Payan, Samaniego, San Bernardo, San Lorenzo, San Pablo, San Pedro de Cartago, Sandoná, Santa Bárbara, Santacruz, Sapuyes, Taminango, Tumaco, Tangua, Túquerres, Yacuanquer del Departamento de Nariño y Colón, Mocoa, Orito, Puerto Asís, Puerto Caicedo, Puerto Guzmán, San Francisco, San Miguel, Santiago, Sibundoy, Valle del Guamuez, Villagarzón del Departamento de Putumayo, con una población estimada en 2 249 371 habitantes, según el Censo de Población y Vivienda del DANE, proyectada para el año 2020.

Del lado Ecuatoriano se encuentran en zona de influencia volcánica, los cantones de Tulcán, Bolívar, Espejo, Mira, Montufar y San Pedro de Huaca de la Provincia del Carchi, los cantones de Eloy Alfaro, Quinindé, San Lorenzo y Rioverde en la Provincia de Esmeraldas, los cantones de Ibarra, Antonio Ante, Cotacachi, Otavalo, Pimampiro y San Miguel de Urucuquí en la Provincia de Imbabura, los cantones de Archidona, El Chaco y Quijos de la Provincia de Napo, los cantones de Cayambe, Pedro Moncayo, Rumiñahui,



San Miguel de los Bancos y Pedro Vicente Maldonado y la ciudad capital de Quito en la Provincia de Pichincha, los cantones de Lago Agrio, Gonzalo Pizarro, Putumayo, Shushufindi, Sucumbíos y Cascales en la provincia de Sucumbíos, los cantones de Orellana, La Joya de los Sachas y Loreto en la Provincia de Orellana, con una población aproximada de 3 350 000 habitantes (figura 34 y tabla 4).



**Figura 34.** Análisis poblacional para la zonificación de caídas de piroclásticas. El mapa presenta las poblaciones en la zona de influencia por caída de piroclastos (ceniza y lapilli) considerando todas las direcciones de los vientos. Fuente: autores

**Tabla 4.** Población categorizada en urbana y rural por municipio, localizada en la zona de influencia por caída de piroclastos transportados omnidireccionalmente por los vientos (ceniza y lapilli)

MUNICIPIO	CABECERA	Tipo	Área Km2	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km <sup>2</sup>	AME Pob	Porc Mpal	Sum Porc Mpal
<b>DEPARTAMENTO DEL CAQUETÁ</b>										
San José del Fragua	San José del Fragua	Rur	1302.9	13099	4.9	Baja	389.1	1913	14.6%	14.6%
<b>DEPARTAMENTO DEL CAUCA</b>										
Almaguer	Almaguer	Urb	0.4	18177	3207.5	Baja	0.4	1283	7.1%	100.0%

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral

MUNICIPIO	CABECERA	Tipo	Área Km2	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km²	AME Pob	Porc Mpal	Sum Porc Mpal
		Rur	235.8		71.6	Baja	235.9	16901	93.0%	100.0%
Argelia	Argelia	Urb	0.5	26588	5414.0	Baja	0.5	2707	10.2%	100.1%
		Rur	772.9		30.9	Baja	773.5	23900	89.9%	100.1%
Balboa	Balboa	Urb	0.8	21437	6775.0	Baja	0.8	5420	25.3%	100.1%
		Rur	411.2		39.0	Baja	411.5	16029	74.8%	100.1%
Bolívar	Bolívar	Urb	0.8	36994	6095.0	Baja	0.8	4876	13.2%	100.0%
		Rur	795		40.4	Baja	795.3	32130	86.9%	100.0%
El Tambo	El Tambo	Rur	2731.2	53769	18.6	Baja	1154.9	21463	39.9%	39.9%
Florencia	Florencia	Urb	0.1	5303	12280.0	Baja	0.1	1228	23.2%	100.0%
		Rur	56.4		72.3	Baja	56.4	4075	76.8%	100.0%
Guapi	Guapi	Urb	2.5	27696	5590.0	Baja	2.5	13975	50.5%	99.3%
		Rur	2556.7		5.4	Baja	2521.2	13530	48.9%	99.3%
La Sierra	La Sierra	Urb	0.6	10655	2961.7	Baja	0.6	1777	16.7%	101.2%
		Rur	204.3		43.5	Baja	207.3	9008	84.5%	101.2%
La Vega	La Vega	Urb	0.5	24642	2082.0	Baja	0.5	1041	4.2%	100.0%
		Rur	514.5		45.9	Baja	514.5	23601	95.8%	100.0%
Mercaderes	Mercaderes	Urb	2.6	23097	2296.9	Baja	2.6	5972	25.9%	100.0%
		Rur	693.3		24.7	Baja	693.7	17135	74.2%	100.0%
Patía	El Bordo	Urb	2.3	37494	5921.3	Baja	2.3	13619	36.3%	100.0%
		Rur	751		31.8	Baja	751.3	23885	63.7%	100.0%
Piamonte	Piamonte	Urb	0.4	9259	5457.5	Baja	0.4	2183	23.6%	93.4%
		Rur	1102.8		6.4	Baja	1008	6468	69.9%	93.4%
Puracé	Coconuco	Rur	846.8	17569	18.7	Baja	4.4	82	0.5%	0.5%
Rosas	Rosas	Urb	0.2	11539	5445.0	Baja	0.2	1089	9.4%	100.0%
		Rur	168.5		62.0	Baja	168.5	10450	90.6%	100.0%
San Sebastián	San Sebastián	Urb	0.2	11062	3340.0	Baja	0.2	668	6.0%	100.0%
		Rur	418		24.9	Baja	418	10394	94.0%	100.0%
Santa Rosa	Santa Rosa	Urb	0.4	5383	1685.0	Baja	0.4	674	12.5%	99.4%
		Rur	3612.6		1.3	Baja	3587.4	4676	86.9%	99.4%
Sotará	Paísamba	Rur	514.7	14210	26.5	Baja	235	6230	43.8%	43.8%
Sucre	Sucre	Urb	0.2	9669	8220.0	Baja	0.2	1644	17.0%	100.1%
		Rur	135.3		59.3	Baja	135.4	8031	83.1%	100.1%
Timbío	Timbío	Rur	198.5	36287	109.2	Baja	41.4	4522	12.5%	12.5%
Timbiquí	Timbiquí	Rur	2052.8	26607	9.9	Baja	703.2	6961	26.2%	26.2%
<b>DEPARTAMENTO DEL HUILA</b>										
Pitalito	Pitalito	Rur	619	128630	85.9	Baja	32.6	2802	2.2%	2.2%
San Agustín	San Agustín	Rur	1386.1	33727	16.2	Baja	868.1	14029	41.6%	41.6%
<b>DEPARTAMENTO DE NARIÑO</b>										

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral

MUNICIPIO	CABECERA	Tipo	Área Km2	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km²	AME Pob	Porc Mpal	Sum Porc Mpal
Alban	San José	Urb	0.4	9320	6705.0	Baja	0.4	2682	28.8%	100.0%
		Rur	38.1		174.2	Baja	38.1	6638	71.2%	100.0%
Aldana	Aldana	Urb	0.3	7361	5173.3	Media	0.3	1552	21.1%	100.0%
		Rur	47.1		123.3	Alta	13.5	1665	22.6%	100.0%
						Media	33.6	4144	56.3%	100.0%
Ancuya	Ancuya	Urb	0.4	8603	5215.0	Media	0.4	2086	24.2%	100.1%
		Rur	68.3		95.4	Media	68.4	6527	75.9%	100.1%
Arboleda	Berruecos	Urb	0.3	8420	3836.7	Baja	0.3	1151	13.7%	100.0%
		Rur	59.8		121.6	Baja	59.8	7269	86.3%	100.0%
Barbacoas	Barbacoas	Urb	0.8	56526	15380.0	Baja	0.8	12304	21.8%	100.1%
		Rur	2719.3		16.3	Media	1304.2	21209	37.5%	100.1%
						Baja	1420.2	23096	40.9%	100.1%
Belén	Belén	Urb	0.3	6301	10816.7	Baja	0.3	3245	51.5%	100.0%
		Rur	41.4		73.8	Baja	41.4	3056	48.5%	100.0%
Buesaco	Buesaco	Urb	1.1	23910	5987.3	Baja	1.1	6586	27.5%	100.0%
		Rur	633.1		27.4	Media	120.2	3289	13.8%	100.0%
						Baja	513.3	14046	58.7%	100.0%
Chachagüí	Chachagüí	Urb	0.9	15303	4905.6	Media	0.9	4415	28.9%	100.0%
		Rur	144.9		75.1	Media	137.7	10347	67.6%	100.0%
						Baja	7.3	549	3.6%	100.0%
Colon	Génova	Urb	0.2	8316	5460.0	Baja	0.2	1092	13.1%	100.0%
		Rur	61.4		117.7	Baja	61.4	7224	86.9%	100.0%
Consacá	Consacá	Urb	0.5	13738	4278.0	Media	0.5	2139	15.6%	100.1%
		Rur	118.4		98.0	Media	118.5	11609	84.5%	100.1%
Contadero	Contadero	Urb	0.5	7236	2612.0	Media	0.5	1306	18.0%	100.0%
		Rur	42.6		139.2	Media	42.6	5930	82.0%	100.0%
Córdoba	Córdoba	Urb	0.7	15477	4387.1	Media	0.7	3071	19.8%	100.1%
		Rur	303		40.9	Media	251.1	10281	66.4%	100.1%
						Baja	52.1	2133	13.8%	100.1%
Cuaspud	Carlosama	Urb	1.1	9198	2460.9	Media	1.1	2707	29.4%	100.1%
	Carlosama	Rur	56		115.9	Media	56.1	6503	70.7%	100.1%
Cumbal	Cumbal	Urb	2	37033	3406.5	Media	2	6813	18.4%	100.1%
		Rur	908.5		33.3	Alta	26.1	868	2.3%	100.1%
						Media	883.9	29402	79.4%	100.1%
Cumbitara	Cumbitara	Urb	0.3	5768	5430.0	Media	0.3	1629	28.2%	100.1%
		Rur	353.6		11.7	Media	83.7	980	17.0%	100.1%
						Baja	270.3	3164	54.9%	100.1%
El Charco	El Charco	Urb	0.8	22550	9192.5	Baja	0.8	7354	32.6%	98.4%

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufra

MUNICIPIO	CABECERA	Tipo	Área Km2	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km²	AME Pob	Porc Mpal	Sum Porc Mpal
		Rur	2481.4		6.1	Baja	2423.4	14841	65.8%	98.4%
El Peñol	El Peñol	Urb	0.4	7442	3407.5	Media	0.4	1363	18.3%	100.1%
		Rur	119.1		51.0	Media	116	5921	79.6%	100.1%
						Baja	3.2	163	2.2%	100.1%
El Rosario	El Rosario	Urb	0.3	12062	5916.7	Baja	0.3	1775	14.7%	100.1%
		Rur	518.2		19.9	Baja	518.7	10297	85.4%	100.1%
El Tablón de Gómez	El Tablón de Gómez	Urb	0.2	14261	7835.0	Baja	0.2	1567	11.0%	100.0%
		Rur	305.9		41.5	Baja	306	12698	89.0%	100.0%
El Tambo	El Tambo	Urb	1	13809	5166.0	Media	1	5166	37.4%	100.1%
		Rur	245.5		35.2	Media	245.7	8650	62.6%	100.1%
Francisco Pizarro	Salahonda	Urb	0.3	14158	18210.0	Baja	0.3	5463	38.6%	100.2%
		Rur	524.5		16.6	Baja	525.8	8717	61.6%	100.2%
Funes	Funes	Urb	0.8	7135	3851.3	Media	0.8	3081	43.2%	100.0%
		Rur	392.7		10.3	Media	333	3438	48.2%	100.0%
						Baja	60	619	8.7%	100.0%
Guachucal	Guachucal	Urb	0.7	19339	4235.7	Alta	0.7	2965	15.3%	100.1%
		Rur	154.4		106.0	Alta	129.1	13691	70.8%	100.1%
						Media	25.5	2704	14.0%	100.1%
Guitarilla	Guitarilla	Urb	1.2	11325	3601.7	Media	1.2	4322	38.2%	100.1%
		Rur	115.1		60.8	Alta	5.6	341	3.0%	100.1%
						Media	109.7	6674	58.9%	100.1%
Gualmatán	Gualmatán	Urb	0.7	7040	4262.9	Media	0.7	2984	42.4%	100.0%
		Rur	29.1		139.4	Media	29.1	4056	57.6%	100.0%
Íles	Íles	Urb	0.4	7632	5315.0	Media	0.4	2126	27.9%	100.1%
		Rur	79.9		68.9	Media	80	5513	72.2%	100.1%
Imués	Imués	Urb	0.3	7446	3353.3	Media	0.3	1006	13.5%	100.1%
		Rur	81.1		79.4	Media	81.2	6448	86.6%	100.1%
Ipiales	Ipiales	Urb	14.3	115836	5387.6	Media	14.3	77042	66.5%	100.0%
		Rur	1516.8		25.6	Media	463.9	11865	10.2%	100.0%
						Baja	1054.3	26965	23.3%	100.0%
La Cruz	La Cruz	Urb	0.8	18643	9990.0	Baja	0.8	7992	42.9%	100.0%
		Rur	237.5		44.8	Baja	237.6	10655	57.2%	100.0%
La Florida	La Florida	Urb	0.9	9911	2202.2	Media	0.9	1982	20.0%	100.1%
		Rur	135		58.7	Media	135.1	7935	80.1%	100.1%
La Llanada	La Llanada	Urb	0.4	6470	7870.0	Media	0.4	3148	48.7%	100.1%
		Rur	243.6		13.6	Media	243.9	3326	51.4%	100.1%
La Tola	La Tola	Urb	0.6	7460	4843.3	Baja	0.6	2906	39.0%	88.6%
		Rur	414.5		11.0	Baja	336.9	3701	49.6%	88.6%

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral

MUNICIPIO	CABECERA	Tipo	Área Km2	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km²	AME Pob	Porc Mpal	Sum Porc Mpal
La Unión	La Unión	Urb	1.3	31751	9760.0	Baja	1.3	12688	40.0%	100.0%
		Rur	140.4		135.8	Baja	140.5	19077	60.1%	100.0%
Leiva	Leiva	Urb	0.2	9571	14945.0	Baja	0.2	2989	31.2%	100.0%
		Rur	309.2		21.3	Baja	309.4	6586	68.8%	100.0%
Linares	Linares	Urb	0.3	10012	7293.3	Media	0.3	2188	21.9%	100.1%
		Rur	134.8		58.0	Media	135	7836	78.3%	100.1%
Los Andes	Sotomayor	Urb	0.7	9268	6231.4	Media	0.7	4362	47.1%	100.1%
		Rur	952.5		5.2	Media	462.9	2384	25.7%	100.1%
						Baja	490.9	2528	27.3%	100.1%
Magüi	Payan	Urb	0.4	25543	18920.0	Baja	0.4	7568	29.6%	100.1%
		Rur	1799.5		10.0	Baja	1802.7	18007	70.5%	100.1%
Mallama	Piedrancha	Urb	0.3	8946	4096.7	Alta	0.1	410	4.6%	100.1%
						Media	0.2	819	9.2%	100.1%
		Rur	566.4		13.6	Alta	273.7	3729	41.7%	100.1%
						Media	293.6	4000	44.7%	100.1%
Mosquera	Mosquera	Rur	763.6	12582	8.8	Baja	549.2	4853	38.6%	38.6%
Nariño	Nariño	Urb	0.3	4346	8796.7	Media	0.3	2639	60.7%	100.0%
		Rur	24.9		68.6	Media	24.9	1707	39.3%	100.0%
Olaya Herrera	Bocas de Satinga	Urb	0.9	25210	12028.9	Baja	0.9	10826	42.9%	98.4%
		Rur	997.4		14.4	Baja	969.3	13979	55.4%	98.4%
Ospina	Ospina	Urb	0.5	6993	3918.0	Media	0.5	1959	28.0%	100.1%
		Rur	64.1		78.5	Alta	5.5	432	6.2%	100.1%
						Media	58.7	4610	65.9%	100.1%
Pasto	San Juan de Pasto	Urb	25.1	392589	12165.7	Media	25.1	305360	77.8%	100.0%
		Rur	1071.1		81.4	Media	806.7	65697	16.7%	100.0%
						Baja	265.1	21589	5.5%	100.0%
Policarpa	Policarpa	Urb	0.3	9779	8683.3	Baja	0.3	2605	26.6%	100.1%
		Rur	432.6		16.6	Media	17.7	294	3.0%	100.1%
						Baja	415.4	6889	70.4%	100.1%
Potosí	Potosí	Urb	0.3	10058	6966.7	Media	0.3	2090	20.8%	100.1%
		Rur	386.6		20.6	Media	319.7	6589	65.5%	100.1%
						Baja	67.3	1387	13.8%	100.1%
Providencia	Providencia	Urb	0.3	5553	4986.7	Media	0.3	1496	26.9%	100.2%
		Rur	39.5		102.7	Media	39.6	4067	73.2%	100.2%
Puerres	Puerres	Urb	1	8365	3440.0	Media	1	3440	41.1%	100.1%
		Rur	348		14.2	Media	293.5	4154	49.7%	100.1%
						Baja	54.8	776	9.3%	100.1%
Pupiales	Pupiales	Urb	1.5	17219	4114.7	Media	1.5	6172	35.8%	100.1%

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral

MUNICIPIO	CABECERA	Tipo	Área Km2	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km²	AME Pob	Porc Mpal	Sum Porc Mpal
		Rur	127.6		86.6	Alta	15.9	1377	8.0%	100.1%
						Media	111.9	9688	56.3%	100.1%
Ricaurte	Ricaurte	Urb	0.4	20057	5980.0	Media	0.4	2392	11.9%	100.2%
		Rur	1050.6		16.8	Media	1052.5	17697	88.2%	100.2%
Roberto Payan	San José	Urb	0.2	12694	16920.0	Baja	0.2	3384	26.7%	100.2%
		Rur	1450		6.4	Baja	1453.2	9331	73.5%	100.2%
Samaniego	Samaniego	Urb	2.2	27742	4286.8	Media	2.2	9431	34.0%	100.1%
		Rur	600.5		30.5	Media	601.3	18335	66.1%	100.1%
San Bernardo	San Bernardo	Urb	0.3	9171	8623.3	Baja	0.3	2587	28.2%	100.1%
		Rur	64.7		101.8	Baja	64.8	6594	71.9%	100.1%
San Lorenzo	San Lorenzo	Urb	0.3	18399	7276.7	Baja	0.3	2183	11.9%	100.1%
		Rur	248.1		65.4	Media	0.3	20	0.1%	100.1%
						Baja	248	16209	88.1%	100.1%
San Pablo	San Pablo	Urb	0.9	14793	4367.8	Baja	0.9	3931	26.6%	100.1%
		Rur	110.7		98.1	Baja	110.8	10872	73.5%	100.1%
San Pedro de Cartago	San Pedro de Cartago	Urb	0.2	6820	4115.0	Baja	0.2	823	12.1%	100.2%
		Rur	55.3		108.4	Baja	55.4	6008	88.1%	100.2%
Sandoná	Sandoná	Urb	1.7	19770	5926.5	Media	1.7	10075	51.0%	100.0%
		Rur	99.5		97.4	Media	99.6	9705	49.1%	100.0%
Santa Bárbara	Iscuandé	Urb	0.4	13242	8862.5	Baja	0.4	3545	26.8%	99.9%
		Rur	1220.5		7.9	Baja	1218.3	9680	73.1%	99.9%
Santacruz	Guachavés	Urb	0.2	11074	7620.0	Alta	0.2	1524	13.8%	100.1%
		Rur	538.3		17.7	Alta	134.1	2379	21.5%	100.1%
						Media	404.9	7183	64.9%	100.1%
Sapuyes	Sapuyes	Urb	0.5	7232	2790.0	Alta	0.5	1395	19.3%	100.1%
		Rur	114.6		50.9	Alta	114.7	5842	80.8%	100.1%
						Media	0.1	5	0.1%	100.1%
Taminango	Taminango	Urb	0.4	17878	9965.0	Baja	0.4	3986	22.3%	100.1%
		Rur	233.5		59.5	Media	38.6	2296	12.8%	100.1%
						Baja	195.1	11607	64.9%	100.1%
Tumaco	San Andrés de Tumaco	Urb	6.2	257052	13970.0	Baja	6.2	86614	33.7%	100.1%
		Rur	3577.1		47.6	Baja	3583.3	170733	66.4%	100.1%
Tangua	Tangua	Urb	0.7	13321	3934.3	Media	0.7	2754	20.7%	100.0%
		Rur	216.6		48.8	Media	216.7	10572	79.4%	100.0%
Túquerres	Túquerres	Urb	3.9	44575	4414.1	Alta	3.9	17215	38.6%	100.1%
		Rur	211.6		129.3	Alta	175.8	22731	51.0%	100.1%
						Media	36	4655	10.4%	100.1%
Yacuanquer	Yacuanquer	Urb	0.6	10955	5540.0	Media	0.6	3324	30.3%	100.1%

Memoria explicativa del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral

MUNICIPIO	CABECERA	Tipo	Área Km2	Pob Total	Dens Pob	AME	AME Área Km²	AME Pob	Porc Mpal	Sum Porc Mpal
		Rur	101.8		75.0	Media	101.9	7638	69.7%	100.1%
<b>DEPARTAMENTO DEL PUTUMAYO</b>										
Colon	Colon	Urb	1.8	5530	1907.8	Baja	1.8	3434	62.1%	100.0%
		Rur	62.4		33.6	Baja	62.4	2096	37.9%	100.0%
Mocoa	Mocoa	Urb	5.6	58938	7265.9	Baja	5.6	40689	69.0%	100.0%
		Rur	1296.4		14.1	Baja	1296.4	18249	31.0%	100.0%
Orito	Orito	Urb	7	38744	2969.6	Baja	7	20787	53.7%	100.0%
		Rur	1927.5		9.3	Baja	1928.2	17964	46.4%	100.0%
Puerto Asís	Puerto Asís	Urb	5.6	67211	7240.9	Baja	5.6	40549	60.3%	85.4%
		Rur	2805.5		9.5	Baja	1769.5	16816	25.0%	85.4%
Puerto Caicedo	Puerto Caicedo	Urb	1	16007	6397.0	Baja	1	6397	40.0%	100.0%
		Rur	923.9		10.4	Baja	923.7	9608	60.0%	100.0%
Puerto Guzmán	Puerto Guzmán	Urb	0.8	36665	5990.0	Baja	0.8	4792	13.1%	28.9%
		Rur	4573.2		7.0	Baja	832.9	5805	15.8%	28.9%
San Francisco	San Francisco	Urb	0.7	5567	4722.9	Baja	0.7	3306	59.4%	100.0%
		Rur	405.7		5.6	Baja	405.8	2262	40.6%	100.0%
San Miguel	La Dorada	Urb	1	19434	5168.0	Baja	1	5168	26.6%	100.0%
		Rur	375.4		38.0	Baja	375.5	14270	73.4%	100.0%
Santiago	Santiago	Urb	0.8	7308	4281.3	Baja	0.8	3425	46.9%	100.0%
		Rur	340.2		11.4	Baja	340.4	3885	53.2%	100.0%
Sibundoy	Sibundoy	Urb	2.9	15473	3500.0	Baja	2.9	10150	65.6%	100.0%
		Rur	94.6		56.3	Baja	94.6	5323	34.4%	100.0%
Valle del Guamuez	La Hormiga	Urb	2.7	34660	5816.7	Baja	2.7	15705	45.3%	100.0%
		Rur	809.9		23.4	Baja	810.1	18960	54.7%	100.0%
Villagarzón	Villagarzón	Urb	2.4	24096	6078.3	Baja	2.4	14588	60.5%	100.0%
		Rur	1391.6		6.8	Baja	1391.7	9509	39.5%	100.0%

Fuente: autores

## CONCLUSIONES

La actividad más reciente del volcán Azufral (<10.000 años) no presenta depósitos de flujos de lava como productos asociados. Los domos en el interior del cráter (al menos cuatro generaciones) son la única representación de material efusivo expulsado por el volcán. La ausencia de depósitos de flujos de lava concuerda con la actividad altamente explosiva representada por los depósitos asociados al volcán, además de ser evidencia de que los domos actuales corresponden al fin de una o más erupciones explosivas y no a actividad efusiva característica. En este sentido la amenaza por flujos de lava no es considerada.

El mapa de amenaza del volcán Azufral es una recopilación de las zonas que pueden ser afectadas por diferentes fenómenos que hacen parte del registro geológico del holoceno y que son el insumo principal para delimitar el área que puede ser afectada en actividad volcánica futura. El fenómeno más recurrente en el volcán Azufral en el periodo reciente son las corrientes de densidad piroclástica diluidas y concentradas (CDP), su ocurrencia corresponde a la amenaza de mayor severidad y amplitud del volcán Azufral.

La delimitación de los diferentes fenómenos volcánicos en los mapas de amenaza volcánica son representaciones no definitivas, en este sentido, los mapas son dinámicos y los cambios responden tanto al avance en el conocimiento geológico a nivel general como al avance en el conocimiento específico de cada volcán.

Independientemente de la forma de representación escogida (metodología) para ilustrar la amenaza volcánica, la definición de las zonas de amenaza debe tener en cuenta mínimamente el comportamiento geológico del volcán a través del tiempo, el estado actual del mismo, y la morfología tanto del volcán como del área de influencia. La presencia de nieve y/o hielo, el caudal de los ríos y la posibilidad de lluvias deben ser factores por considerar; simulaciones asistidas por computador pueden ser de gran ayuda.

En la zona de amenaza volcánica alta, es pertinente restringir el desarrollo urbanístico y las actividades que allí se realicen deben ser suspendidas en caso del incremento de la actividad volcánica. Las zonas de amenaza media deben conservar normalmente la actividad urbana y/o rural sin incrementarla, aunque con un amplio conocimiento por parte de la población acerca de la zona de amenaza en la que se encuentran y de las implicaciones que esto conlleva (principalmente en términos de evacuación). En la zona de amenaza baja es factible incrementar las actividades, con base en las medidas de mitigación definidas y en las posibilidades de su aplicación.



Hace parte del área en amenaza alta las zonas que pueden ser afectadas por CDP, *lahares* y caídas piroclásticas con espesores mayores a 10 cm.

De acuerdo con esta zonificación, por *lahares* pueden ser afectadas las poblaciones El Ejido, Samaniego por la cuenca del río Pacual, Piedrancha por la cuenca del río Güiza y El Espino, Sapuyes y Santander por la cuenca del río Sapuyes.

En la zona de amenaza alta por caída de piroclastos definida por espesores mayores a 10 cm, se encuentran las poblaciones Colimba, Muellamues, Piedrancha, Túquerres, Sapuyes, El Espino, Santander, Yascual, Guaitarilla y Bomboná.

En la socialización del mapa de amenaza se debe incluir mínimamente las personas que habitan en esta zona y aún las cercanas a ella. Es muy importante que cada persona asuma la convivencia con el volcán, visualice lo que éste podría hacer a través de lo ocurrido en otros volcanes y que finalmente conozcan los pasos a seguir en caso de un evento futuro.

.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- André, É. F. (1884). *América equinoccial (Colombia-Ecuador)*. Wiener, Charles and Jules Crevaux and Désiré Charnay and André, Édouard François (eds.), *América pintoresca: Descripción de viajes al nuevo continente*. pp. 477-859.
- Bechón, F. y Monsalve, M. L. (1991). *Activité Récente Préhistorique du Volcán Azufra (S-W de la Colombie)*. Acad. Sci. Paris. Francia. 313 (2), 99-104.
- Belousov, A. (1996). Deposits of the 30 March 1956 directed blast at Bezymianni volcano, Kamchatka, Russia. *Bulletin of Volcanology*. 57,649-662.
- Blass, S., Bonadonna, C. y Connor, L. (2016). TephraProb: a Matlab package for probabilistic hazard assessments of tephra fallout. *Journal Appl. Volcanology*. 5 (10).
- Bonadonna, C., Connor, C., Houghton, B., Connor, L., Byrne, M., Laing, A. y Hincks, Tk. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal Geophys Res*. 110 (B3).
- Bonadonna, C., Folch, A., Loughlin, S. y Puempel, H. (2012). Future developments in modelling and monitoring of volcanic ash clouds: outcomes from the first IAVCEI-WMO workshop on Ash Dispersal Forecast and Civil Aviation. *Bulletin of Volcanology*. 74 (1), 1-10.
- Branney, M. J. y Kokelaar, P. (2003). *Piroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites*. Geological Society, London, Memoirs, 27: 121.
- Burbano, V. (2015). *Modelo Conceptual de La Laguna Verde del Volcán Azufra basado en Estudios Hidrológicos e Hidroquímicos*. Tesis de Maestría. Ingeniería Ambiental. Universidad Mariana. Pasto.
- Burbano, V. y Torres, R. (2015). *Batimetría de la Laguna Cratéica "Laguna Verde" del Volcán Azufra*. XV Congreso Colombiano de Geología. Bucaramanga. Poster.
- Cabildo Indígena de Túquerres. (2009). *Plan de Justicia y Vida para el Resguardo Indígena de Túquerres*. 148 p. Disponible en línea en: [https://siic.mininterior.gov.co/sites/default/files/plan\\_de\\_justicia\\_y\\_vida\\_para\\_e\\_ri\\_de\\_tuquerres\\_2009.pdf](https://siic.mininterior.gov.co/sites/default/files/plan_de_justicia_y_vida_para_e_ri_de_tuquerres_2009.pdf)
- Calvache, M. L., Cortés, G. P., Torres, M. P. y Monsalve, M. L. (2003). *Geología y estratigrafía del volcán Azufra*. Ingeominas.
- Carey, S. y Bursik, M. (2000). *Volcanic plumes*. Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, pp. 527-544.
- Cas, R. A. y Wright, J. V. (1987). *Volcanic Successions, Modern and Ancient*. Allen and Unwin Ltd. London. 546.
- Congreso de la República de Colombia. (2012). Ley 1523 de 2012. Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. [Ley 1523 del 24 de abril 2012].

- Connor, L. y Connor, C. (2006). *Inversion is the key to dispersion: understanding eruption dynamics by inverting tephra fallout*. Mader, HM, Coles SG, Connor CB, Connor LJ, editors. *Stat Volcanol*. London: Geological Society of London: 2006.231–42.
- Corponariño. (2018). *Declaratoria del Parque Natural Regional volcán Azufral-Chaitán. Documento síntesis*. Disponible en línea en: <http://corponarino.gov.co/wp-content/uploads/2019/06/Documento-Sintesis-PNR-Volc%C3%A1n-Azufral-Chaitan-IAvH-2018.pdf>
- Correa, A. M. y Betancur. T. (1992). *Estudio geológico de los depósitos piroclásticos proximales del volcán Azufral, Colombia*. Tesis en Geología. Universidad Nacional de Colombia.
- Crowe, B. M. y Fisher, R. V. (1973). Sedimentary structures in base surge deposits with special reference to cross bedding; Ubehebe Crater, Death Valley, California. *Geological Society of America Bulletin*, (84), 663-682.
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2020). *Proyecciones de población municipal para el periodo 1985-2035 con base en el CNPV 2018*. Disponible en línea en: <https://www.dane.gov.co/files/censo2018>
- Fisher, R. V. y Waters, A. (1970). Base surge bed forms in maar volcanoes. *American Journal Sciences*, 268, 157-180.
- Fisher, R. V. (1979). Models for pyroclastic surges and pyroclastic flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 6, 305-318.
- Fisher, R. V., Glicken, H. X. y Hoblitt, R. P. (1987). May 18, 1980. Mount St. Helens deposits in South Coldwater Creek, Washington. *Journal of Geophysical Research*, 92(B10), 10267-10283.
- Fisher, R. V. (1997). *Hazards Volcanic Events*. Disponible en línea en: <http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>
- Fontaine, E. (1991). *Evolution petrologique et Geochimique du complex de domes du Volcán Azufral Colombie (Amerique du Sud)*. Université du Montreal.
- Fontaine, E. y Stix, J. (1993). *Evolution petrologique et Geochimique du complex de domes du Volcán Azufral (Colombie, Amerique du Sud)*. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 317, Serie II, 1501-1508.
- Fontaine, E. (1994). *Evolution volcanologique et geochemique du Volcán Azufral. Colombie, Amerique du Sud*. Universidad de Montreal, Canadá.
- Freundt, A., Wilson, C. y Carey, S. (2000). *Ignimbrites and block and ash flow deposits*. Encyclopedia of Volcanoes: Academic Press. pp. 581-600.
- Friedlander, E. (1936). Estudio científico de algunos volcanes de Colombia. *Ilustración Nariñense*, 59 (1), 6 - 10. Pasto.
- Houghton, B., Wilson, C., Smith, R. y Gilbert, J. (2000). *Phreatoplinian eruptions*. Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press. pp. 513-525.
- Ingeominas (Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras). (2009). *Guía para la evaluación de la amenaza volcánica*. Informe interno.

- Iverson, R., Schilling, S. y Vallance, J. (1998). Objective delineation of areas at risk from inundation by lahars. *Geological Society of America Bulletin*, 110 (8), 972–984.
- Muñoz, L. I., Ágreda, E., Ruano, E. A., Tarapués, F., Cuacialpud, H. J., Mora, L., Cueltán, J., Moreno, L. y Cabrera, D. L. (2015). *Lengua de los Pastos. Vocabulario Básico y Etimologías Sagradas*. Academia Nariñense de Historia. Etnoeducadores y Comunidad Indígena de los Pastos (Nariño).
- Palma, J. L. (2013). *Energy cone*. Disponible en línea en: <https://vhub.org/resources/energy>
- Pardo, N., Avellaneda, J. D., Rausch, J., Jaramillo, D. y Gutiérrez, M. (2020). Decrypting silicic magma/plug fragmentation at Azufral crater lake, Northern Andes: insights from fine to extremely fine ash morpho-chemistry. *Bulletin of volcanology* 82 (12), 79.
- Parra, E. y Cepeda, H. (1989). Volcanic hazard maps of the Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, (42), 117-127.
- Patra, A., Bauer, K., Andrew, C., Nichita, C., Pitman, E., Sheridan, M., Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Stinton, A.J. y Namikawa, L. M. (2005). Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139 (1-2), 1-21.
- Patra, A., Bevilacqua, A. Akhavan, S., Pitman, A., Bruce, E., Bursik, M. y Hyman, D. (2020). Comparative Analysis of the Structures and Outcomes of Geophysical Flow Models and Modeling Assumptions Using Uncertainty Quantification. *Frontiers in Earth Science*, (8), 275.
- Pulgarín, B., Navarro, S. P., Monsalve, M. L., Cortés, G. P., Calvache, M. L., Pardo, N. y Murcia, H. F. (2008). *Geología e historia eruptiva del Complejo Volcánico Doña Juana*. Informe interno. Ingeominas.
- Rodolfo, K. S. (2000). *The hazard from lahars and Jökulhlaups*. Encyclopedia of Volcanoes: Academic Press. pp. 973-996.
- Reclus, E. (1893). *Serie Viajes*. No. 7, 252 p. Traducción y anotaciones de F. J. Vergara y Velasco (1893), publicada en 1965. Ediciones Sol y Luna, Bogotá. Disponible en línea en: <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/geografia/colomb/colom4.htm>
- Sañudo, J. R. (1897). *La Colonia en el Siglo XVII*. Apuntes sobre la Historia de Pasto, 2da Parte. Tipografía de Alejandro Santander. Pasto.
- Sarmiento, S. (2017). *Mecanismos de transporte y acumulación de los depósitos más recientes del volcán Azufral*. Tesis. Universidad Nacional de Colombia.
- Schilling, S. P. (1998). *LaharZ, GIS programs for automated mapping of lahar inundation hazard zones*: U.S. Geological Survey Open-File Report 98-638, 80 p. Disponible en línea en: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr98638>.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2013). *Procedimiento de Evaluación de Amenaza Volcánica*.

- SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2016). *Informe sobre erupción hidrotermal*. Mayo 2016.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2020). *Resumen Actividad del Volcán Azufral 2009-2020*. Informe interno. Pasto.
- Siebert, L., (1984). Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 22, 163–197.
- Simakov, N., Ivey, J., Renette, L., Safaei, A., Aghakhani, A., Hossein, J., Matthew, D. y Patra, A. (2019). *Modernizing Titan2D, a parallel AMR geophysical flow code to support multiple rheologies and extendability*. *International Conference on High Performance Computing*. 101-112. Springer Ed.
- Torres, R. y Burbano, V. (2015). *Informe Técnico Batimetría Laguna Verde del Volcán Azufral*. Servicio Geológico Colombiano.
- Torres, P., Cortés, G. P., Calvache, M. L., y Monsalve, M. L. (2001). *Geología y Estratigrafía del Volcán Azufral*. Ingeominas, sin publicar.
- Valentine, G.A. y Fisher, R.V., (2000). *Pyroclastic surges and blasts*. *Encyclopedia of Volcanoes*: Academic Press, pp. 571-580.
- Vallance, J. W. (2000). *Lahars*. *Encyclopedia of Volcanoes*: Academic Press, pp. 601-625.
- Volentik, A., Connor C., Connor L. y Bonadonna, C. (2009). *Aspects of volcanic hazards assessment for the Bataan nuclear power plant, Luzon Peninsula, Philippines*. Cambridge University Press.
- Wilson, C. y Houghton, B. (2000). *Pyroclastic transport and deposition*. *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, 545-554.
- Williams, M. (2016). Correlation of eruptive products based on Titanomagnetite geochemistry, volcano morphology and radiocarbon dating, volcán Azufral, Colombia: implications for rapid emplacement of domes and pyroclastic flows units. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 341.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización del volcán Azufral	10
<b>Figura 2.</b> Panorámicas del volcán Azufral	11
<b>Figura 3.</b> Red de monitoreo y vigilancia volcánica	21
<b>Figura 4.</b> Histograma del número de eventos volcánicos por tipo entre mayo de 2009 y diciembre de 2021	21
<b>Figura 5.</b> Localización epicentral e hipocentral de sismos de fractura con magnitud local mayor a 2	22
<b>Figura 6.</b> Emisión de gases al noroeste de la Laguna Verde Azufral	23
<b>Figura 7.</b> Depósito en el sector La Playita – Laguna Verde	24
<b>Figura 8.</b> Mapa Geológico del volcán Azufral	29
<b>Figura 9.</b> Columna estratigráfica generalizada para el volcán Azufral	30
<b>Figura 10.</b> Unidades geológicas holocénicas del volcán Azufral	31
<b>Figura 11.</b> Afloramiento de la unidad eruptiva El Espino	33
<b>Figura 12.</b> Afloramiento de la unidad eruptiva El Carrizo	34
<b>Figura 13.</b> Complejo de domos volcán Azufral	36
<b>Figura 14.</b> Diario de viaje de Don Miguel de Santiesteban de Lima a Caracas- 1740-1741, relacionada con la Provincia de Los Pastos	39
<b>Figura 15.</b> Viajes científicos a los Andes Ecuatoriales (portada)	41
<b>Figura 16.</b> Laguna Verde en el volcán Azufral, dibujo de Riou en 1850	43
<b>Figura 17.</b> Laguna verde volcán Azufral, dibujo realizado por el coronel Manuel María Paz (1853)	44
<b>Figura 18.</b> Laguna cratérica y localización del domo Mallama	44
<b>Figura 19.</b> Sector de La Playita al N de la laguna cratérica	47
<b>Figura 20.</b> Sector del domo Mallama	48
<b>Figura 21.</b> Laguna verde de la expedición de Rodríguez Guerrero	49
<b>Figura 22.</b> Zonificación de la amenaza por CDPs: flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas	53
<b>Figura 23.</b> Perfiles de velocidad y dirección del viento a diferentes alturas sobre el volcán Azufral	56
<b>Figura 24.</b> Zonificación de la amenaza para caídas piroclásticas transportadas por el viento: ceniza y <i>lapilli</i>	57
<b>Figura 25.</b> Zonificación de la amenaza por proyección balística: bloques y bombas volcánicas	59
<b>Figura 26.</b> Zonificación de la amenaza por <i>lahares</i>	61
<b>Figura 27.</b> Zonificación de la amenaza por avalancha de escombros	63
<b>Figura 28.</b> Zonificación para la amenaza por onda de choque	65
<b>Figura 29.</b> Mapa de zonificación de la amenaza volcánica integrada (mapa principal)	67

<b>Figura 30.</b> Mapa de zonificación de la amenaza por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos	69
<b>Figura 31.</b> Mapa de zonificación de la amenaza por <i>lahares</i>	73
<b>Figura 32.</b> Mapa de Amenaza Volcánica del Volcán Azufra	75
<b>Figura 33.</b> Análisis poblacional para la zonificación integrada de la Amenaza volcánica	77
<b>Figura 34.</b> Análisis poblacional para la zonificación de caídas de piroclásticas	89

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Unidades eruptivas en el volcán Azufral para los últimos 20 000 años	31
<b>Tabla 2.</b> Características de caídas piroclásticas en volcanes con erupciones sub-plinianas a plinianas	55
<b>Tabla 3.</b> Municipios y población en zona de influencia por CDPs	77
<b>Tabla 4.</b> Población categorizada en urbana y rural por municipio, localizada en la zona de influencia por caída de piroclastos transportados omnidireccionalmente por los vientos (ceniza y <i>lapilli</i> )	89



## **INDICE DE MAPAS**

Mapa de Amenaza Volcánica del Volcán Azufral, 1ra versión, 2021 (en el bolsillo)