



EVALUACIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN AZUFRAL

Manizales y Pasto, diciembre de 2021



El futuro
es de todos

Minenergía

SERVICIO GEOLÓGICO 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). *Evaluación de la amenaza volcánica del volcán Azufral*. Manizales y Pasto: Servicio Geológico Colombiano.

CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
1 GENERALIDADES	10
1.1 Localización	10
1.2 Hidrografía	11
1.3 Población	13
1.4 Atractivos turísticos en el área del volcán Azufral	16
1.4.1 Parque Natural Regional Volcán Azufral-Chaitán	16
1.4.2 Volcán Azufral	18
1.4.3 Laguna Verde	20
1.4.4 Sabana de Túquerres	20
1.5 Acceso y vías de comunicación	21
1.6 Objetivo	21
1.7 Estudios previos	22
2 COSMOVISIÓN DE LAS COMUNIDADES INDIGENAS CON EL VOLCÁN AZUFRAL	28
3 METODOLOGÍA DE TRABAJO	31
4 ASPECTOS GEOLÓGICOS DEL VOLCÁN AZUFRAL	33
4.1 Unidad eruptiva La Calera – ULC (4000 años A.P.)	37
4.2 Unidad eruptiva La Cortadera – ULCo (3900 años A.P.)	37
4.3 Unidad eruptiva El Espino – UEE (3600 años A.P.)	37
4.4 Unidad eruptiva El Carrizo - UEC (3470 ± 60 años A.P.)	38
4.5 Unidad eruptiva Laguna Verde - ULV (280 años A.P.)	39
4.6 Complejo de domos	40
5 ACTIVIDAD HISTÓRICA DEL VOLCÁN AZUFRAL	42
6 ESTADO ACTUAL DEL VOLCÁN: MONITOREO Y VIGILANCIA	55
7 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA	61
7.1 Análisis del volcán Azufral y su entorno	61
7.1.1 Análisis de la geomorfología del volcán y de sus alrededores	63
7.1.2 Estructuras Tectónicas	70

7.1.3	Alteración hidrotermal	72
7.2	Amenaza volcánica	74
7.2.1	Amenaza por corrientes de densidad piroclástica concentradas y diluidas (flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas)	74
7.2.2	Amenaza por caídas piroclásticas	76
7.2.3	Amenaza por <i>lahares</i>	79
7.2.4	Amenaza por Avalancha de Escombros	81
7.2.5	Amenaza por Onda de Choque	83
8	ESCENARIOS ERUPTIVOS	85
	CONCLUSIONES	88
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

RESUMEN

El volcán Azufral, está localizado en el extremo suroccidental del país en el departamento de Nariño y dominio geográfico de la Cordillera Occidental, en las coordenadas 1° 05' 24" N y 77° 43' 19" W, con 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 XVII, registro de actividad superficial desde el siglo XVIII y reportes de actividad eruptiva histórica 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 la evaluación de su amenaza potencial y la elaboración de su mapa de amenaza volcánica.

El edificio volcánico actual del Azufral tiene una laguna cratérica de aproximadamente 1 km de longitud máxima, 0,45 km de ancho máximo y 0,2 km de ancho medio, para un área de 0,21 km² (Burbano, 2015; Torres y Burbano, 2015), denominada Laguna Verde, presentando al sureste un complejo de domos. La actividad actual del volcán Azufral se caracteriza por baja actividad sísmica, emisión de gases desde pequeños campos fumarólicos y presencia de fuentes termales. La actividad más relevante 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.

La evaluación de amenaza del volcán Azufral se realizó a partir del análisis de la estratigrafía más reciente y de las dataciones disponibles hasta el momento, presentado por Calvache *et al.* (2003), así como el análisis de la morfología actual.

De acuerdo al conocimiento del comportamiento eruptivo del volcán, a partir del registro geológico holocénico, las erupciones que podrían presentarse a futuro serían principalmente de carácter explosivo, durante las cuales podrían generarse Corrientes de Densidad Piroclástica concentradas y diluidas (CDPs): flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas; caídas de piroclastos transportados por el viento (de ceniza y *lapilli*) y proyectiles balísticos (bloques y bombas volcánicas); emplazamiento de domos de lava, avalanchas de escombros, emisiones de 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. 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.

ABSTRACT

The Azufral volcano is located in the extreme southwestern part of the country in the department of Nariño and the geographic domain of the Cordillera Occidental, at coordinates 1° 05' 12" N and 77° 43' 19" W, with an altitude of 4070 m. asl 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 from the 17th century, a record of surface activity from the 18th century and reports of historical eruptive activity around 1801. In 1996 Ingeominas, currently the Colombian Geological Service (SGC), began monitoring its activity and the geological-stratigraphic studies, whose results constitute important inputs for the evaluation of its potential hazard and the elaboration of its volcanic hazard map.

The current volcanic building of Azufral has a crater lagoon of 1.02 km of maximum length, a maximum width of 0.45 km and an average width of 0.2 km, for an area of 0.21 km² (Burbano, 2015; Torres and Burbano, 2015), called Laguna Verde, presenting a complex of domes to the southeast. The current activity of the Azufral volcano is characterized by low seismic activity, gas emission from small fumarolic fields and the presence of thermal springs. The most relevant activity since the beginning of the monitoring corresponds to small hydrothermal eruptions in the years 2009, 2010, 2016 and 2017, originating in the "La Playita" sector, northwest of Laguna Verde.

The hazard assessment of the Azufral volcano was carried out based on the analysis of the most recent stratigraphy and the dating available to date, presented by Calvache *et al.* (2003), as well as the analysis of the current morphology.

According to the knowledge of the eruptive behavior of the volcano, based on the Holocene geological record, the eruptions that could occur in the future would be mainly of an explosive nature, during which concentrated and diluted Pyroclastic Density Currents (CDPs) could be generated: pyroclastic flows and surges pyroclastic; wind-borne pyroclastic falls (of ash and *lapilli*) and ballistic projectiles (volcanic blocks and bombs); emplacement of lava domes, debris avalanches, volcanic gas emissions, 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 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.

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la amenaza volcánica de volcanes activos es una de las actividades más importantes que desarrolla el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en gestión del riesgo volcánico. En los últimos años el 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 por sus siglas en inglés).

En Colombia, amenaza, según la Ley 1523 de 2012 es “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”. La evaluación de amenaza volcánica del volcán Azufral, la memoria explicativa de su mapa de amenaza y la información complementaria que se entrega con el informe de simulaciones computacionales, visibiliza la posibilidad de ocurrencia de erupciones futuras en el volcán Azufral y el abanico de fenómenos volcánicos que pueden causar daños y pérdidas en su área de influencia.

La existencia de información geológica y estratigráfica del volcán Azufral, el conocimiento sobre su estilo eruptivo 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 Azufral, que incluyó de manera holística, el análisis de la información obtenida en la revisión de la historia eruptiva del volcán y la simulación computacional de los fenómenos que se pueden presentar en erupciones futuras, independientemente de la no observación hasta el momento de un registro geológico claro para algunos fenómenos como caídas piroclásticas y *lahares*.

Existe una diversidad creciente de tipos de mapas de amenaza volcánica. Actualmente se cuenta con una base de datos de la Comisión de Amenazas y Riesgo volcánico (CVHR por sus siglas en inglés) de la Asociación Internacional de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI por sus siglas en inglés). Las iniciativas anteriores a esta base de datos (Calder *et al.*, 2015) originalmente intentaron clasificar los mapas en 5 categorías: basados en geología, integrados (*bulk eye*), administrativos, basados en modelos simples y basados en modelos probabilísticos. Sin embargo, a lo largo de los talleres sobre el estado de los mapas de amenaza o peligro de dicha comisión, se

comprendió que se necesitaban más categorías para clasificar completamente los mapas y que estas categorías originales mezclaban aspectos de la metodología del mapa (basada en la geología, basado en modelos) con presentación de zonas de peligro (integrado, administrativo).

La base de datos de mapas de peligros ahora clasifica los mapas de acuerdo con una variedad de aspectos del mapa, que incluyen:

- Tipo de Amenaza: ¿qué fenómenos peligrosos están representados en el mapa?
- Presentación de la zona de Amenaza: ¿se combinan las amenazas en zonas integradas o se separan?
- Escala temporal: ¿está el mapa destinado a servir durante mucho tiempo como un mapa de amenaza de largo plazo o se creó el mapa durante o para una crisis a corto plazo?
- Escala espacial: ¿el mapa cubre el volcán, una región completa o solo un flanco del volcán o una sola cuenca?
- Formato de publicación: ¿cuál es el formato físico del mapa?, es un poster o cartel, un letrero, un volante, una figura en una publicación, o un sitio web interactivo, ¿está incluido en un informe de evaluación de amenaza?
- Metodología de zonificación: ¿qué métodos se utilizaron para evaluar la amenaza y crear la zonificación?, si el mapa se basó en modelos ¿qué modelos se utilizaron?
- Tipos de escenarios: ¿el mapa se basa en el escenario más probable o en el escenario máximo (*worse case scenario*)?, ¿en una erupción de cierto tamaño o estilo?, ¿sobre una erupción previa específica?, ¿en una temporada determinada, ubicación del cráter o composición de la erupción?
- Categorización de zonas de amenaza y definición de probabilidad: ¿cómo se definen y categorizan las zonas de amenaza?, ¿cómo se define la probabilidad?, ¿las zonas están definidas como zonas de amenaza alta-media-baja, utilizando probabilidades numéricas o valores estimados (por ejemplo, espesor)?
- Propósito y público: ¿cuál fue el propósito del mapa? concientización sobre amenazas, gestión de crisis, planificación del uso del suelo, ordenamiento territorial, interés científico, ¿quién es el público objetivo? administradores de emergencias, planificadores gubernamentales, científicos, público en general.
- Idioma: ¿en qué idioma o idiomas se presenta el mapa?
- Diseño de mapas y elementos cartográficos: ¿qué esquema de color, tipo de mapa base, estilo de visualización (vista en planta 2D, vista en perspectiva 3D) y plantilla de diseño se utiliza?, ¿qué elementos cartográficos u otros elementos del mapa se incluyen (rutas de evacuación, tiempos de llegada de amenazas (eventos), acciones a tomar, visualización de la incertidumbre)?

De esta forma, los mapas se pueden categorizar utilizando todas o algunas de estas categorías. Por ejemplo, un mapa de amenaza volcánica puede clasificarse según sus características más destacadas o según las necesidades del usuario y, por lo tanto, ser un "mapa integrado, en inglés, a largo plazo, basado en modelos" o un "escenario máximo, estilo poster". Si se requiere información más detallada de cada uno de los aspectos mencionados se sugiere visitar la base de datos volcánicos (<https://volcanichazardmaps.org/the-diversity-of-volcanic-hazard-maps/>).

1 GENERALIDADES

El volcán Azufral (VA) es considerado como uno de los volcanes activos más explosivos de Colombia con registro de erupciones explosivas en el Holoceno (últimos 10 000 años), actividad sísmica y actividad superficial a través de fuentes termales y pequeños campos fumarólicos.

1.1 Localización

suroccidente de la ciudad de Pasto, 30 km al Norte de la frontera Colombo-Ecuatoriana y 10 km al Occidente del municipio de Túquerres, a una altura de 4.070 m s.n.m., en la latitud 1° 05' 24" N y longitud 77° 43' 19" W (figura 1).

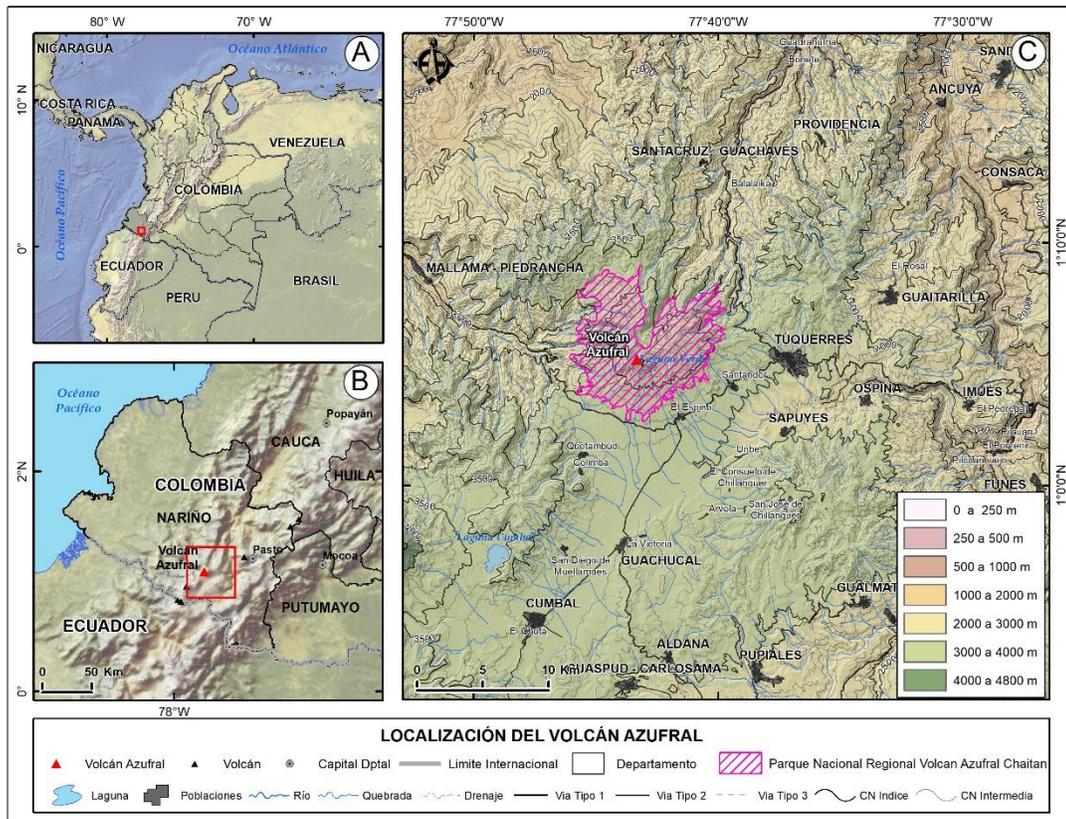


Figura 1. Localización volcán Azufral

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 PNR 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 que, al Sur, es la expresión morfológica de la depresión Cauca – Patía (Calvache *et al.*, 2003). El área proximal del VA se encuentra dentro del denominado “Parque Natural Regional Volcán Azufral Chaitán” y en la que se destaca por su belleza la laguna verde (figura 2), siendo esta un área de conservación a cargo de La Corporación Regional Autónoma de Nariño (Corponariño, 2018).

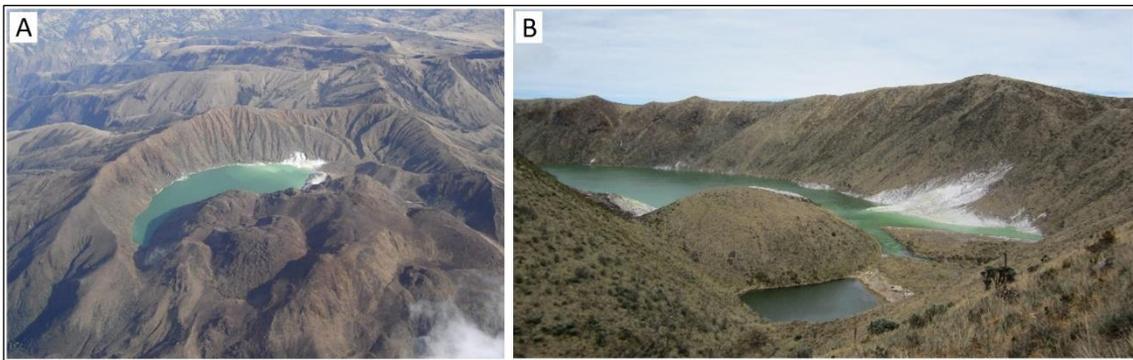


Figura 2. Panorámicas del volcán Azufral

A) fotografía tomada en sobrevuelo desde el sector suroccidental del edificio volcánico. B) fotografía tomada desde El Mirador al noroccidente de la Laguna Verde. En ambas fotografías se observa el cráter actual, la laguna cratérica y el complejo de domos

Fuente: SGC (2008)

1.2 Hidrografía

Desde el punto de vista de su hidrografía, el departamento de Nariño se encuentra dentro de dos grandes vertientes o macrocuencas zonificadas por el IDEAM, la del Pacífico y la Amazonas. Los ríos y quebradas que drenan el volcán Azufral pertenecen a la macrocuenca Pacífica; el río Pacual, localizado al Norte del volcán y el Sapuyes, ubicado al suroriente, drenan sus aguas a la subzona hidrográfica del Río Guáitara que pertenece a la zona hidrográfica Patía y el Río Güiza y sus afluentes, localizados al occidente del volcán, pertenecen a la subzona hidrográfica Río Guiza – Alto Mira de la zona hidrográfica del Río Mira (Corponariño, 2016), como se observa en la figura 3.

El río Pacual desciende sobre terreno montañoso por la ladera norte del volcán, recogiendo a su paso al río Azufral a la altura del poblado Balalaika, y continuando su recorrido alcanzando las poblaciones de Bonete, Cartagena y el municipio de Samaniego, antes de entregar sus aguas al Río Guáitara con un recorrido de 56,8 km; los ríos y quebradas tributarios del Río 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).

El río Sapuyes que nace en el volcán Azufral en la ladera SE, inicialmente toma el nombre de río Las Juntas en el municipio de Guachucal y a partir de la confluencia con la quebrada Chungel, toma el nombre de río Sapuyes, la dirección que toma la microcuenca es suroccidente a oriente, luego de un largo recorrido en los municipios de Guachucal, Sapuyes, Túquerres, Ospina e Imués, en su trayecto semicircular vierte sus aguas en el río Guáitara luego de un recorrido de 65,62 km. El río Sapuyes es un río semi-meandrico cuyo cauce tiene un curso con sinuosidad pronunciada (Corponariño, 2013). Las quebradas tributarias del río Sapuyes son: 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).

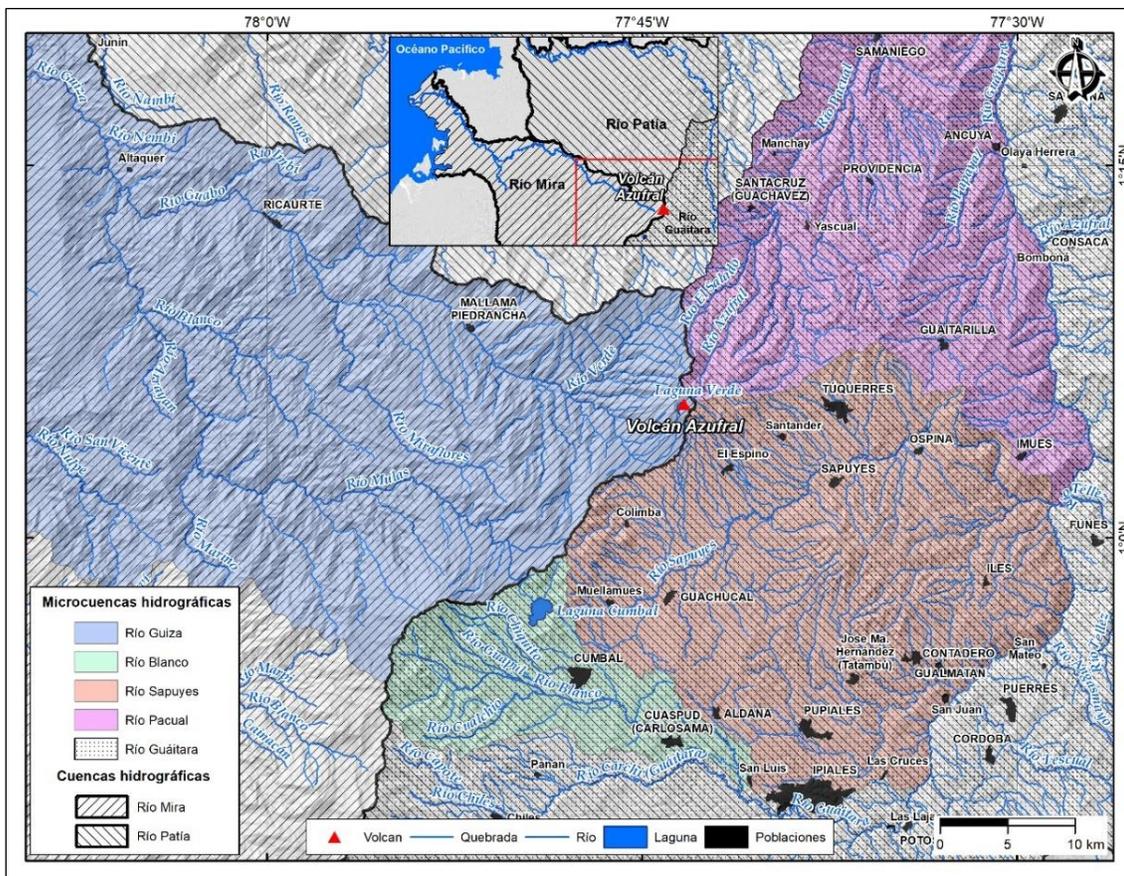


Figura 3. Cuencas y microcuencas hidrográficas e hidrología alrededor del volcán Azufral

Fuente: autores

El río Güiza está formado por los Ríos Guabo y Mulas que nacen en el volcán Azufral cerca del poblado Altaquer (Barbacoas) a 45 km en línea recta de la cima volcánica, descendiendo por terreno montañoso en dirección NE, hasta entregar sus aguas al río Mira cerca a la población de Las Juntas sobre la planicie como un río meándrico. En su recorrido, el río Guabo tiene una longitud aproximadamente de 90 km, y pasa por los municipios de Mallama y Ricaurte; luego el Río Güiza pasa por los poblados de Altaquer, El Diviso (municipio de Barbacoas) y Las Juntas (municipio de Tumaco). Las quebradas que tributan sus aguas al Río Güiza son: 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.

1.3 Población

En las zonas de influencia proximal y media del volcán se encuentran centros poblados pertenecientes a los municipios de Samaniego, Santacruz, Túquerres, Sapuyes, Guachucal, Mallama, Ricaurte, Cumbal, Providencia, Guaitarilla, y Ospina en el departamento de Nariño en Colombia y poblados de la provincia de El Carchi, en el cantón de Tulcán, y las parroquias de Maldonado, Tonal Donoso y El Chical en Ecuador como se observa en la figura 4. Según las proyecciones de población del Departamento Administrativo Nacional de Estadística para el año 2020 (DANE, 2020), los municipios colombianos en mención tienen una población cercana a 200.000 habitantes (tabla 1).

Tabla 1. Municipios y habitantes en zona de influencia proximal del volcán Azufral

Departamento	Municipio	Población Total	Población Cabecera		Población Centros Poblados y Rural disperso	
Nariño	Cumbal	37033	6814	18.4%	30219	81.6%
	Guachucal	19339	2959	15.3%	16380	84.7%
	Guaitarilla	11325	4326	38.2%	6999	61.8%
	Mallama (Piedrancha)	8946	1235	13.8%	7711	86.2%
	Ospina	6993	1958	28.0%	5035	72.0%
	Providencia	5553	1494	26.9%	4059	73.1%
	Ricaurte	20057	2387	11.9%	17670	88.1%
	Samaniego	27742	9432	34.0%	18310	66.0%
	Santacruz (Guachavés)	11074	1528	13.8%	9546	86.2%
	Sapuyes	7232	1396	19.3%	5836	80.7%
Túquerres	44575	17206	38.6%	27369	61.4%	

Proyección de la población para el año 2020 del Censo Nacional de Población y Vivienda

Fuente: DANE (2020)

En la zona de influencia distal en Colombia son afectados municipios y zonas rurales del departamento de Nariño: Tumaco, Barbacoas, Roberto Payán, 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, Imués, Iles, Contadero, Funes, Puerres, Córdoba, Potosí, Ipiales, Gualmatán, Pupiales, Aldana, Cuaspud (Carlosama) y en el departamento del Putumayo, los municipios y zonas rurales de Colón y Santiago, como también en el Ecuador parroquias de las provincias de Carchi, Imbabura y Esmeraldas. Según las proyecciones de población del Departamento Administrativo Nacional de Estadística para el año 2020 (DANE, 2020), los municipios colombianos en mención tienen una población cercana a 1 250 000 habitantes (tabla 2).

Tabla 2. Municipios y habitantes en zona de influencia distal del volcán Azufral

Departamento	Municipio	Población Total	Población en la Cabecera		Población Centros Poblados y Rural disperso	
Nariño	Alban (San José)	9320	2684	28.8%	6636	71.2%
	Aldana	7361	1553	21.1%	5808	78.9%
	Ancuya	8603	2082	24.2%	6521	75.8%
	Arboleda (Berruecos)	8420	1154	13.7%	7266	86.3%
	Barbacoas	56526	12323	21.8%	44203	78.2%
	Buesaco	23910	6575	27.5%	17335	72.5%
	Chachagüí	15303	4423	28.9%	10880	71.1%
	Consacá	13738	2143	15.6%	11595	84.4%
	Contadero	7236	1302	18.0%	5934	82.0%
	Córdoba	15477	3064	19.8%	12413	80.2%
	Cuaspud (Carlosama)	9198	2704	29.4%	6494	70.6%
	Cumbitara	5768	1627	28.2%	4141	71.8%
	El Peñol	7442	1362	18.3%	6080	81.7%
	El Tablón de Gómez	14261	1569	11.0%	12692	89.0%
	El Tambo	13809	5165	37.4%	8644	62.6%
	Funes	7135	3082	43.2%	4053	56.8%
	Gualmatán	7040	2985	42.4%	4055	57.6%
	Íles	7632	2129	27.9%	5503	72.1%
	Imués	7446	1005	13.5%	6441	86.5%
	Ipiales	115836	77031	66.5%	38805	33.5%
	La Florida	9911	1982	20.0%	7929	80.0%
	La Llanada	6470	3151	48.7%	3319	51.3%
	La Unión	31751	12700	40.0%	19051	60.0%
Linares	10012	2193	21.9%	7819	78.1%	
Los Andes (Sotomayor)	9268	4365	47.1%	4903	52.9%	
Nariño	4346	2638	60.7%	1708	39.3%	
Nariño	Pasto (San Juan de Pasto)	392589	305434	77.8%	87155	22.2%

Evaluación de la amenaza volcánica del volcán Azufral

Departamento	Municipio	Población Total	Población en la Cabecera		Población Centros Poblados y Rural disperso	
	Policarpa	9779	2601	26.6%	7178	73.4%
	Potosí	10058	2092	20.8%	7966	79.2%
	Puerres	8365	3438	41.1%	4927	58.9%
	Pupiales	17219	6164	35.8%	11055	64.2%
	Roberto Payán (San José)	12694	3389	26.7%	9305	73.3%
	San Bernardo	9171	2586	28.2%	6585	71.8%
	San Lorenzo	18399	2189	11.9%	16210	88.1%
	San Pedro de Cartago	6820	825	12.1%	5995	87.9%
	Sandoná	19770	10083	51.0%	9687	49.0%
	Taminango	17878	3987	22.3%	13891	77.7%
	Tangua	13321	2757	20.7%	10564	79.3%
	Tumaco	257052	86627	33.7%	170425	66.3%
	Yacuanquer	10955	3319	30.3%	7636	69.7%
Putumayo	Colón	5530	3434	62.1%	2096	37.9%
	Santiago	7308	3427	46.9%	3881	53.1%

Proyección de la población para el año 2020 del Censo Nacional de Población y Vivienda
Fuente: DANE (2020)

En la figura 4, se observan los municipios en la zona de influencia volcánica del V. Azufral.



Figura 4. Municipios en la zona de influencia volcánica
Fuente: autores

1.4 Atractivos turísticos en el área del volcán Azufral

La existencia de volcanes en territorio colombiano ha generado elementos asociados al vulcanismo que benefician a las poblaciones que habitan cerca de ellos. Algunos de esos elementos son el paisaje, los materiales, minerales y el calor interno de la Tierra, que junto con otros factores ambientales, climatológicos y culturales pueden ser aprovechados para el desarrollo socio económico de las comunidades que habitan en las zonas volcánicas. El paisaje es un recurso natural, cultural, económico e incluso pedagógico de un territorio. Tiene un valor social que depende de la percepción, de la memoria histórica y de las señas de identidad de una comunidad. Este recurso puede ser estudiado y aprovechado para contribuir a la conservación de áreas naturales, a la planificación de usos del territorio y a la restauración de zonas alteradas. El paisaje está conformado por partes u objetos, naturales y creados por el hombre, que tienen entidad propia (una cascada, un pueblo, un depósito de suelos, un afloramiento rocoso, una laguna, una cueva, un bosque). Estos elementos del paisaje pueden ser apreciados estéticamente por un observador y generarle emociones, pero también es posible que él pueda comprender los fenómenos que se manifiestan en su forma, en sus rasgos y en la historia de esos elementos, a través de la interpretación. La comprensión de los elementos del paisaje y su historia es fundamental para crear, valorar, y rescatar la identidad cultural de un territorio, y para respetar los recursos naturales de los que depende su supervivencia. Algunos de estos elementos como la geología, los nacimientos de agua, las lagunas y ríos, la biodiversidad, las actividades humanas, y la historia o los acontecimientos de un territorio han dejado su huella en el paisaje, y actualmente son objeto de estudio, interpretación, contemplación y aprovechamiento de las actividades turísticas en diferentes zonas volcánicas del país. El turismo es una estrategia de desarrollo económico local. Sin embargo, los recursos naturales y culturales deben conservarse para su uso continuado en el futuro, y el desarrollo turístico debe planificarse y gestionarse de forma que no cause serios problemas ambientales o socioculturales (UNGRD *et al.*, 2018).

En el área del volcán Azufral existen varios sitios turísticos o con potencial turístico entre ellos la Sabana de Túquerres y el Parque Natural Regional Volcán Azufral - Chaitán, que incluye el volcán Azufral y la Laguna Verde

1.4.1 Parque Natural Regional Volcán Azufral-Chaitán

Corponariño (2018) presenta esta definición de Parque Natural Regional:

Espacio geográfico en el que paisajes y ecosistemas estratégicos en la escala regional, mantienen la estructura, composición y función, así como los procesos ecológicos y evolutivos que los sustentan y cuyos valores naturales y culturales asociados se ponen al

alcance de la población humana para destinarlas a su preservación, restauración, conocimiento y disfrute.

El Parque Natural Regional Volcán Azufral-Chaitán (PNRVAC) surgió de la ampliación, recategorización y cambio de denominación de la Reserva Forestal Protectora Regional Área Circundante del Volcán Azufral (Declarada en 1990 mediante Acuerdo No. 005 de Corponariño), este proceso contó con la participación de diferentes actores sociales: las administraciones municipales de Túquerres, Sapuyes, Mallama y Santacruz, juntas de acción comunal, juntas administradoras de acueductos veredales, docentes y estudiantes de instituciones y centros educativos y los Cabildos, Parcialidades y Resguardos Indígenas del Gran Mallama, Guachavés y Comuneros de Túquerres, con los cuales se realizó el proceso de Consulta Previa. El Cabildo de Guachavés, en el momento de protocolización de la consulta previa, manifestó no estar de acuerdo de vincular a su territorio en el área a declarar (Corponariño, 2018).

El PNRVAC se localiza en el complejo de páramos Chiles – Cumbal, en la cordillera sur-occidental del departamento de Nariño, entre los municipios de Mallama, Santacruz, Sapuyes y Túquerres, con una elevación que va desde los 2.700 hasta los 4.040 m s.n.m., en el cual se destaca valores de paisaje, biodiversidad y patrimonio cultural, este último atribuido a las comunidades allí asentadas, en especial a las indígenas representadas en tres resguardos: El Gran Mallama, Los Comuneros de Túquerres y Guachavés. Esta área es considerada estratégica debido a la confluencia de dos ecorregiones de importancia nacional e internacional: el Chocó Biogeográfico y Los Andes del Norte, con importantes recursos naturales que garantizarían la provisión de servicios ecosistémicos como la regulación de caudales; la captura de CO₂, hábitat de especies de flora y fauna, belleza escénica, aguas termales, entre otros, que benefician aproximadamente a 97.000 habitantes directos (Corponariño, 2018).

El PNRVAC beneficia a las comunidades asentadas en el área de influencia directa, puesto que permite una mayor apropiación social del conocimiento, así como la recuperación de los ecosistemas, al igual que la recuperación de sitios ancestrales y saberes tradicionales que de una u otra manera con el tiempo se han venido perdiendo (Corponariño, 2018).

El PNRVAC tiene un área de 7.528 hectáreas, cubiertas por ecosistemas de Bosque Altoandino, Subpáramo y Páramo. Alberga el Volcán Azufral y la Laguna Verde, los cuales son ecosistemas estratégicos a nivel nacional por su importancia biótica y ecológica, además de ser lugares de gran belleza natural y uno de los atractivos más representativos de Nariño. Sus paisajes son variados de acuerdo con la altura, ahí se encuentran una gran cantidad de especies de flora y fauna al ser un área natural de gran riqueza. Se

encuentra sobre el eje de la Cordillera Occidental, sus terrenos están cubiertos de valle de tundras, campos de frailejones y flores de todos los colores, además se adorna de bruma que sube de la Amazonía o de la costa pacífica. Se han registrado 467 especies de flora y 10 de fauna, y lo riegan 72 quebradas y arroyos que conforman la microcuenca alta del río Güiza. Lo más hermoso de este lugar es la Laguna Verde que se acuna en el cráter del Volcán Azufral (SITUR, 2020).

En el PNRVAC además del volcán Azufral y la Laguna Verde se han identificado una serie de atractivos turísticos entre los que tiene: Laguna Negra y Laguna Cristalina, cascadas Las Tres Pasadas (sector de Guaicés, municipio de Mallama), aguas termales y caídas de agua en la vereda Tercán (municipio de Mallama), fuentes termales de Esnambud (vereda Esnambud, municipio de Túquerres). Otros lugares de valor paisajístico son: El Dedo de Dios (vereda La Oscurana, municipio de Mallama), La Chorrera de Piedrancha (municipio de Mallama), Cerro Negro (vereda Arrayán, municipio de Túquerres) y La Chorrera del Salado (vereda El Salado, municipio de Túquerres) (Corponariño, 2018), como se observa en la figura 5.

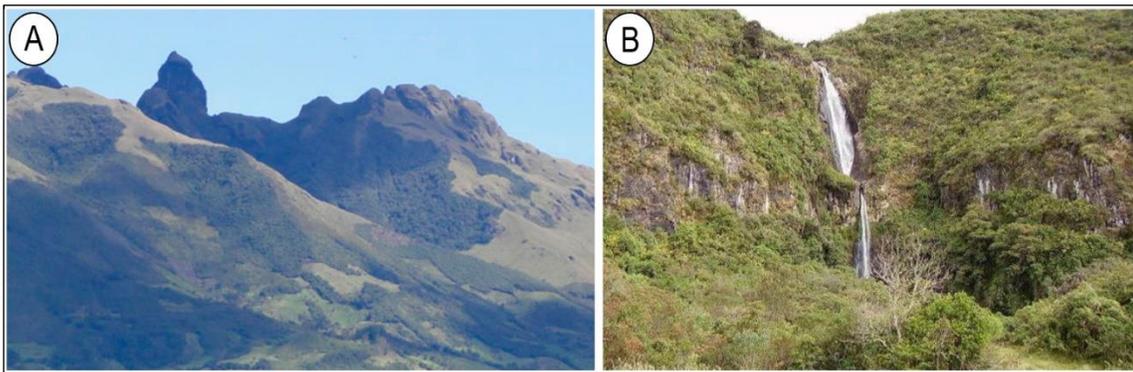


Figura 5. Parque Natural Regional Volcán Azufral-Chaitán

A. Dedo de Dios, B. Cascada

Fuente: Fotografías de Vallejo en Corponariño (2018)

1.4.2 Volcán Azufral

El volcán Azufral es el principal atractivo turístico del PNRVAC, hace parte de los municipios de Túquerres, Sapuyes, Mallama y Santacruz. Alcanza una altura de 4070 m s.n.m. en su cráter se encuentra la Laguna Verde de la cual se dice que es una esmeralda en medio de Los Andes y que ofrece un paisaje único en el sur de Nariño.

Presenta unas características ambientales, sociales y culturales muy importantes como la existencia de alta diversidad biológica, acompañado de la presencia de comunidades campesinas e indígenas, que se encuentran asentadas en su área de influencia. Cuando

está abierto al público, es visitado por caminantes y excursionistas colombianos y extranjeros que tienen la oportunidad de observar múltiples cambios en el paisaje y en las condiciones climáticas durante su ascenso.

Los visitantes al volcán pueden ingresar en vehículo desde el noreste partiendo de la población de Túquerres, pasando por la Vereda San Roque hasta la cabaña Chaitán ('brazo de fuego', en quechua) de Corponariño, la cual corresponde a la ruta más amplia, usada y recomendada. También se puede ingresar desde el sureste por el corregimiento de El Espino siguiendo el camino desde el cementerio, en un ascenso de aproximadamente tres horas (Corponariño, 2018).

Se sugiere contratar el acompañamiento de guías locales conocedores del territorio para orientar en la selección de recorridos según el tiempo y el tipo de experiencia que se quiera tener. Desde la cabaña Chaitán el recorrido hasta el volcán Azufral es de aproximadamente 5 km, recorrido que debe hacerse a pie a un ritmo que permita aclimatarse a la altura. Desde los 3.600 m s.n.m., a los que está la cabaña Chaitán, se asciende hasta los 4.070 del mirador desde donde se observa el cráter del volcán. El ascenso no es muy pronunciado durante la mayor parte del recorrido que se hace siguiendo la vía que serpentea entre la montaña. El último kilómetro es más empinado para finalmente apreciar 170 metros más abajo el cráter del volcán ocupado por La Laguna Verde (figuras 2 y 6), sitio considerado como único.

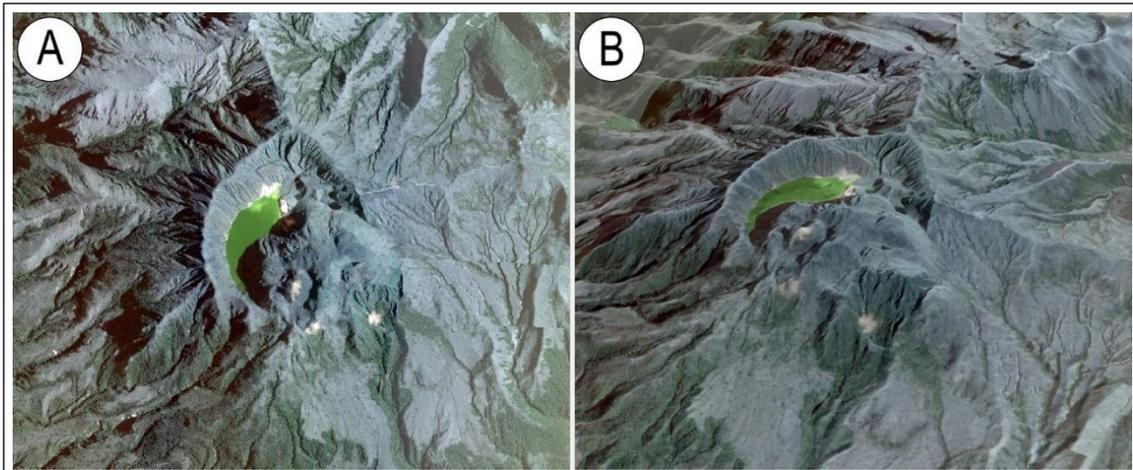


Figura 6. Volcán Azufral, cráter y laguna verde

A. Vista desde el espacio del volcán Azufral, el cráter y la laguna cratérica denominada verde. B. Vista 3D de SE a NE, se observa de igual manera el cráter actual, la laguna cratérica y el complejo de domos

Fuente: autores

Existen dos opciones para descender hasta la laguna. Una por peldaños en pendiente empinada y otra hacia la derecha del mirador por pendiente menos inclinada. Al llegar al terreno plano, a solo 100 m, se puede alcanzar la orilla de la laguna, donde se puede percibir olor a azufre proveniente del agua. En algunos sectores de la laguna se observa burbujeo. En el domo de 300 metros de altura situado a 50 metros a la izquierda de donde termina el camino principal se observa emisión de gases en pequeños campos fumarólicos (adaptado de Uribe, 2015).

1.4.3 Laguna Verde

Aproximadamente a 3800 m s.n.m. se encuentra la Laguna Verde en el cráter del volcán Azufral formando una coma al revés (figuras 6 y 7); atraídos por el paisaje natural, tradicionalmente este lugar que algunos denominan una esmeralda líquida (el gran tesoro que guarda la montaña de fuego) ha sido visitado por personas provenientes de diferentes lugares a nivel regional, nacional e internacional. Según el mito en la región, la laguna no se deja ver si los visitantes no llegan a ella con respeto y en silencio (SITUR, 2020).



Figura 7. Laguna Verde
Fuente: SGC (2008)

1.4.4 Sabana de Túquerres

La Sabana de Túquerres es una de las más bellas sabanas colombianas, goza de una gran altura y desde su base se puede apreciar en toda su magnitud la cumbre de los volcanes más cercanos y representativos de Nariño como lo son Chiles-Cerro Negro, Cumbal y Azufral. Es una hermosa llanura con abundante vegetación en la que se realizan actividades de producción agrícola y ganadera por poseer suelos fértiles debido a la actividad volcánica (figura 8).



Figura 8. Sabana de Túquerres

Se aprecia al fondo en la planicie la cabecera del municipio de Túquerres, rodeada por áreas rurales agrícolas y ganaderas

Fuente: Sistema de Información Turística de Nariño (2020)

En la parte alta de la Sabana se encuentra Túquerres, La Ciudad Señora de la Sabana, capital del municipio que lleva su nombre, que fue creada en 1541. Es una de las cabeceras municipales más altas del país por estar a 3.100 m s.n.m. El municipio de Túquerres es hoy en día un importante productor de ganado, leche, papa, y la ciudad un centro de comercio y de transporte importante en la región. En Túquerres se puede admirar el Templo de San Pedro y el Convento de la Comunidad de Hermanos Menores Capuchinos (SITUR, 2020).

1.5 Acceso y vías de comunicación

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 Azufral es un carretable en regular estado, que se desprende de la carretera Túquerres – Guachavés (figura 1). 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.

1.6 Objetivo

Este trabajo tiene como objetivo principal presentar la evaluación de la amenaza volcánica del volcán Azufral, realizada a partir del conocimiento adquirido por el Servicio

Geológico Colombiano en estudios geológicos, información de actividad histórica y el monitoreo volcánico en tiempo real. La evaluación es insumo esencial para la elaboración del mapa de amenaza del VA.

1.7 Estudios previos

El volcán Azufral ha sido objeto de diferentes estudios geológicos y estratigráficos 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 este trabajo de evaluación de amenaza.

- 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 riodacíticos 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 Km². 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 14C. 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 14C, 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 ±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±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 CO₂ 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 la misma, 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 CO₂ 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 Azufral. 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 km², tiene un volumen estimado de 0,51 km³, 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 glaciario 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 magmática, 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 freatomagmática como es el caso de un lago intracrático.

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, en 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 porfiríticos 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 ecuatorial, localizado en la Cordillera Occidental y en la Depresión Interandina Cauca – Patía, incluye al volcán Azufral 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 Azufral 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 ϕ : 250–63 μm) y ceniza extremadamente fina (5 ϕ : 63–32 μm).

Jones-Ivey *et al.* (en preparación) 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 1×10^4 y 1×10^{10} m^3 , para ángulos de fricción basal entre 4 y 35 grados. Su escenario de parametrización máxima presenta áreas de afectación aún mayores a la extensión de los depósitos 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.

2 COSMOVISIÓN DE LAS COMUNIDADES INDIGENAS CON EL VOLCÁN AZUFRAL

El área del volcán Azufral hace parte del territorio localizado en el denominado Nudo de la Wuaka o de los Pastos en el que se localizan resguardos indígenas del pueblo de los Pastos. De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Asociación Shaquiñan (2012):

La región se extiende desde los hielos hasta los huaicos, tanto para el mar, como para la inmensa selva amazónica, con gran variedad de ecosistemas naturales y lugares cosmoreferenciales, concebidos como centros energéticos y magnéticos, reguladores climáticos e hidrológicos, sitios sagrados de la diversidad biocultural. [...] La cosmovisión se remite a la percepción cultural andina con un pensamiento propio para planear y visionar su territorio haciendo lectura de las leyes naturales, el cosmos, el tiempo y el espacio.

En la región se han adelantado proyectos de planificación interinstitucional como la Agenda Ambiental en el territorio del nudo de Wuaka o de los Pastos para la permanencia de la vida y la cultura – Shaquilulo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Asociación Shaquiñan, 2012), basada en:

La cosmovisión indígena y dirigida a la reconstrucción de la memoria y de los saberes ancestrales para reordenar la mente sobre los valores, técnicas y conocimientos acerca del cuidado, protección y uso sagrado de la Madre Territorio que permiten generar políticas de gestión ambiental. [...] La vida social, política y cultural de pueblo Pasto fue perturbada por el encubrimiento, la imposición ideológica, política y administrativa liderada por los europeos al pisar territorios andinos. Los pueblos indígenas fueron atomizados por problemas que generaron distorsión del pensamiento propio mantenido por miles de años. La resistencia de los mayores logró que se siga conservando la organización de comunidades originarias, hoy denominadas resguardos indígenas, muchos de los cuales desaparecieron y actualmente están en proceso de constitución. Varios investigadores afirman que, en los tiempos de la colonia e inicios de la república, los pastos tenían 34 resguardos.

Entre los cuales, en los alrededores del volcán Azufral, están los de Mallama, Tucarres, Yascual, Colimba, Guachucal, Sapuyes, Muellamues y Guachavés. En la actualidad los resguardos de Los Pastos están distribuidos entre Colombia y Ecuador, en Colombia en municipios de los departamentos de Nariño y Putumayo.

De acuerdo con la tradición oral y al imaginario colectivo de los habitantes de la región, se conocen algunos mitos y leyendas relacionados con el origen del volcán Azufral y sus lagunas. Una de ellas, de autor anónimo, relata lo siguiente:

Hace un tiempo, un buen tiempo, el Cacique Taquerres perdió su primera hija. La mataron vilmente y nunca nadie supo quién y por qué.

Hace un tiempo, un buen tiempo, el Cacique Taquerres perdió su segunda hija. Murió de amor.

Hace un tiempo, un buen tiempo, el Cacique Taquerres perdió su tercera hija. La amargura le jugó una mala pasada.

En el Azufra, en el volcán, cada una de ellas quedó inmortalizada para mantener el espacio que cada una ocupaba. Desde eso la laguna verde, la barrosa o cristalina, y la laguna negra son presencia física de las hijas del Cacique. La laguna verde representa la Esperanza. La laguna barrosa el amor. La laguna negra, la amargura. La sangre nariñense, los ancestros, Los Pastos, los de Túquerres así lo viven, así lo recuerdan. Es indudable que así sucedió. Así me lo enseñaron. Así es.

Otra leyenda nacida de la creatividad e imaginación de un ilustre hijo del Municipio de Túquerres, Luís Alberto Delgado, quiere dar una explicación sobre el origen del volcán Azufra, y las tres hermosas lagunas (Delgado, 1997, en Ruano, 2020): <http://santanderdevalencia.blogspot.com/p/aspectos-historicos-y-culturales.html>

Era entonces los primeros años de nuestra tierra, hace miles de años y apenas se fundaban las primeras poblaciones de nuestros antepasados; una pareja de indígenas de un pueblo primitivo anterior a los Pastos, se había unido y formado un hogar, muy felices por su capacidad para el amor.

Los dioses les premiaron con un hermoso niño, el que con el cariño de sus padres, crecía fuerte, sano y correctamente educado en las artes primitivas.

Un triste día, regresaba el esposo a su casa, feliz de haber cumplido con su labor de recolección de frutas y raíces, pero, con gran sorpresa encontró solo y frío el hogar, un tremendo desorden en las cosas rústicas que guardaba.

Su mujer y su hijo no aparecían, como si una tremenda fiera que rondaba el lugar se hubiera atrevido a atacar en su ausencia; pero no podía ser así, ella, su mujer era capaz de defender el lugar y luchar contra quien osara atacar al pequeño.

Desesperado salió a buscarlos, - Podía ser – le habrían abandonado – preguntó a sus amigos, nadie en el lugar daba razón de su paradero, ninguna señal para seguir sus rastros, además, no podían atreverse ir a otros territorios donde eran mirados como presas de caza y su carne era apetecida, tierra de sindaguas.

Algo misterioso había ocurrido y no podía adivinarlo. - Claro, adivinarlo – se dijo triste. Y preguntando, aquí y allá por varias lunas, hasta que acudió a los hechiceros.

No busques, tu mujer no volverá, ha sido llevada con tu hijo por los dioses y allá se encuentra muy feliz. Tu hijo tiene reservado un futuro importante, será uno de los hechiceros más grandes de la comarca, ahora comienza su aprendizaje en la alta

montaña de los dioses, sus poderes serán de temor de la tierra y sus entrañas. Llevará un diamante en la frente y se lo conocerá con el nombre de Chispas.

Brujo y soldado derrotará a otros no menos poderosos como el Guangas, el Pilche, el Malaver. Tú debes comprender a los dioses y no llorar ni a tu hijo ni a tu mujer. Nada ni nadie podrá arrancarlos de sus manos; ¡no regresarán!

Pero la pena del joven indio era inmensa: ni las palabras de quienes sabían del extraño suceso lo consolaban; es más no lo convencían, por ello buscó durante mucho tiempo, por los lugares que creyó posibles, recorrió mundos para él permitidos y cuando cansado de buscar se resignó a su pérdida; habían transcurrido treinta y tres lunas... ¡Qué triste era la soledad y la resignación!

Se sentó entonces sobre la montaña y se prometió llorar por última vez y así lo hizo, de tal forma que se escuchó sus quejas en la morada de los dioses y sus lágrimas fueron tantas y tan abundantes que se formó una tras otra, tres hermosas lagunas: La Negra por su dolor, La Verde por su esperanza, y La Blanca por su resignación... Los dioses se compadecieron de aquel amante y lo convirtieron en volcán que continuó lanzando suspiros de dolor, de azufre y gas.

El taita Urco (Galeras) escuchó colérico sus lamentos y lanzó los primeros reproches de ceniza, por romper la paz de las entrañas de la tierra; aún hoy, los dos inmensos volcanes dejan escuchar sus voces de fuego. Y aquel amante, a pesar de su nueva forma y su corazón de piedra, mantuvo su amor inalterable; sus quejidos han sido hasta nuestros días quienes han conmovido nuestra hermosa y fría sabana y su dolor ha hecho fértil nuestra tierra.

Se cuenta que el volcán, durante mucho tiempo se inclinaba hacia uno y otro lado, su cima giraba por los cuatro puntos cardinales, buscando con esperanza en los viejos caminos que llevan a los cercanos pueblos, a su hijo y a su adorada esposa.

La piedra de las tres cruces en El volcán Chaitán o Azufral según (Cabildo Indígena de Túquerres, 2009) es considerado un sitio sacro y cosmoreferencial, límite del resguardo indígena de Túquerres. El volcán también es límite de los resguardos de Guachavés, Mallama y Colimba y sitio donde nacen las aguas de dichos resguardos. La vida del pueblo indígena gira alrededor de elementos como el territorio, la Shagra (el cultivo), el fogón, etc. [...] Los usos y costumbres de las comunidades indígenas indican la relación directa de la Shagra con las formas de producción y su entorno, principalmente con el núcleo familiar y la pacha Mama, donde persiste primordialmente la forma comunitaria de participación de los linajes, los parientes afines y la “amigancia” y mediante formas de participación como la minga o la “prestada de brazo”. Participación comunitaria organizada de acuerdo con la actividad a realizar (preparar el terreno, sembrar, cultivar o cosechar), de acuerdo con las capacidades, de acuerdo con el sexo o de acuerdo con la edad.

3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

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 - OVSPasto (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).

4 ASPECTOS GEOLÓGICOS DEL VOLCÁN AZUFRAL

El registro geológico (figura 9) 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 10 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 11 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}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.

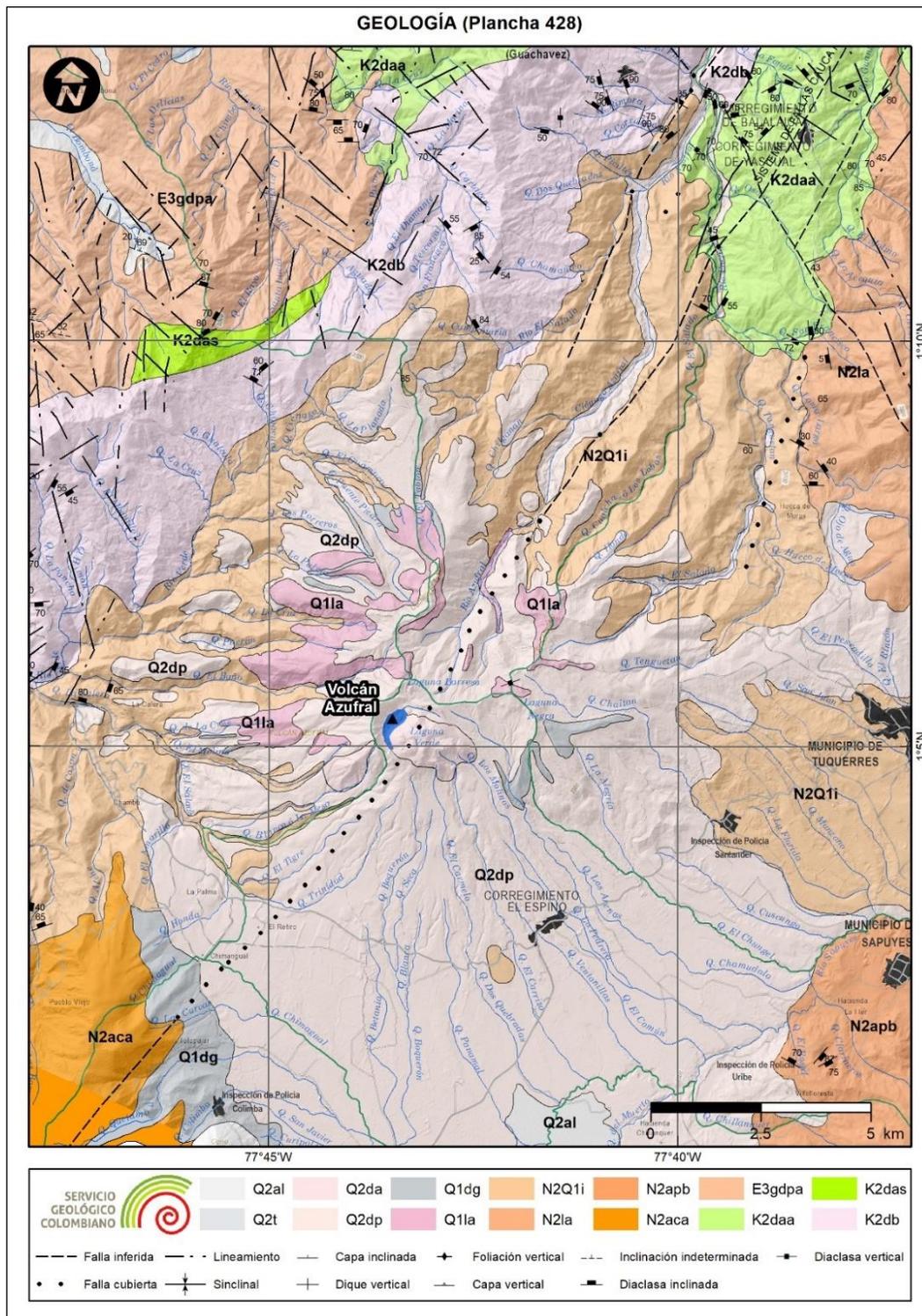


Figura 9. Mapa Geológico del volcán Azufral
Fuente: modificado de la plancha geológica 428 (Ingeominas, 2003)

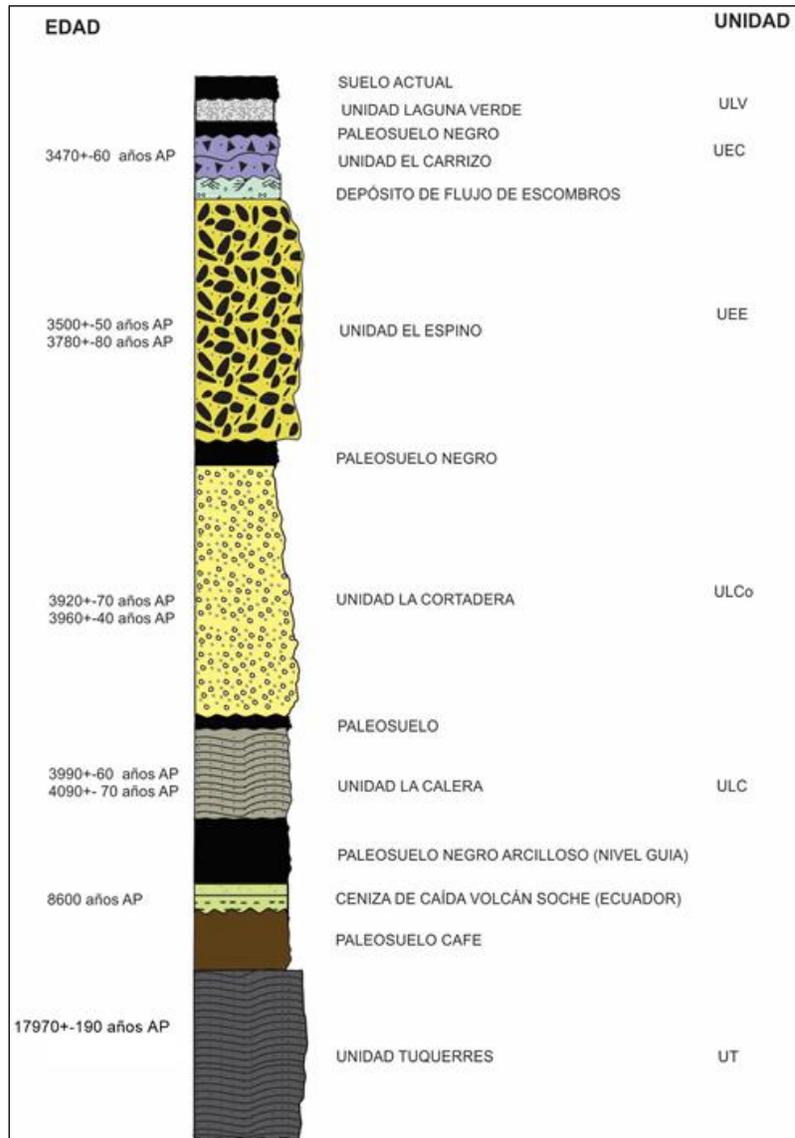


Figura 10. Columna estratigráfica generalizada para el volcán Azufral
Fuente: modificado de Calvache *et al.* (2003)

En la tabla 3, 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 3. 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

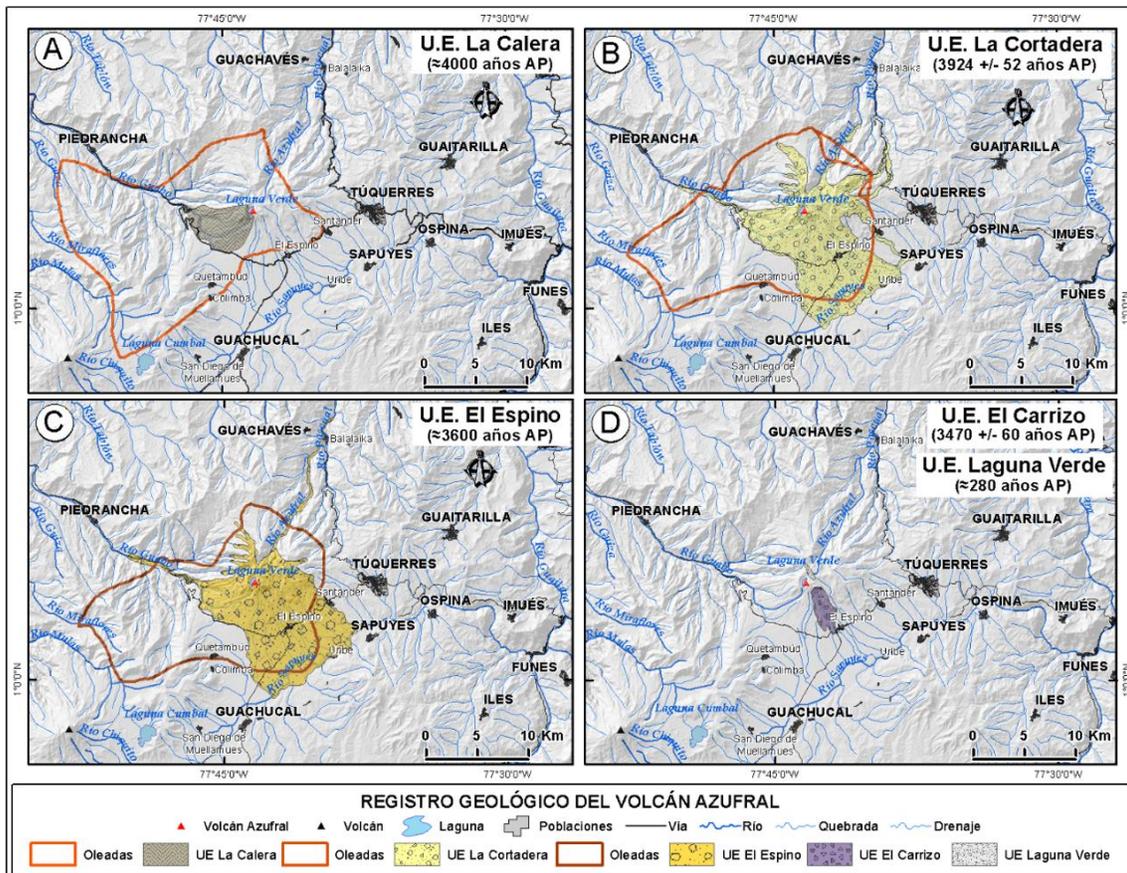


Figura 11. Unidades geológicas holocénicas del volcán Azufral

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

Fuente: adaptado de Calvache 2013

4.1 Unidad eruptiva La Calera – ULC (4000 años A.P.)

La unidad eruptiva La Calera (figura 11A) 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).

4.2 Unidad eruptiva La Cortadera – ULCo (3900 años A.P.)

La unidad eruptiva La Cortadera (figura 11B) 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).

4.3 Unidad eruptiva El Espino – UEE (3600 años A.P.)

La unidad eruptiva El Espino (figuras 11C y 12) 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 12. 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 Panamal y Chimangual; y en las partes altas del volcán (Calvache *et al.*, 2003).

4.4 Unidad eruptiva El Carrizo - UEC (3470 ± 60 años A.P.)

La unidad el carrizo (figura 11D) está constituida por un depósito de corriente de densidad piroclástica (flujo de bloques y ceniza) asociado a colapso de domo (figura 13). 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 Azufra, 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 13. Afloramiento de la unidad eruptiva El Carrizo

Fuente: autores

4.5 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 por Calvache *et al.* (2003) 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.

4.6 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 km³ 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 14 muestra la delimitación de los domos que conforman este complejo.

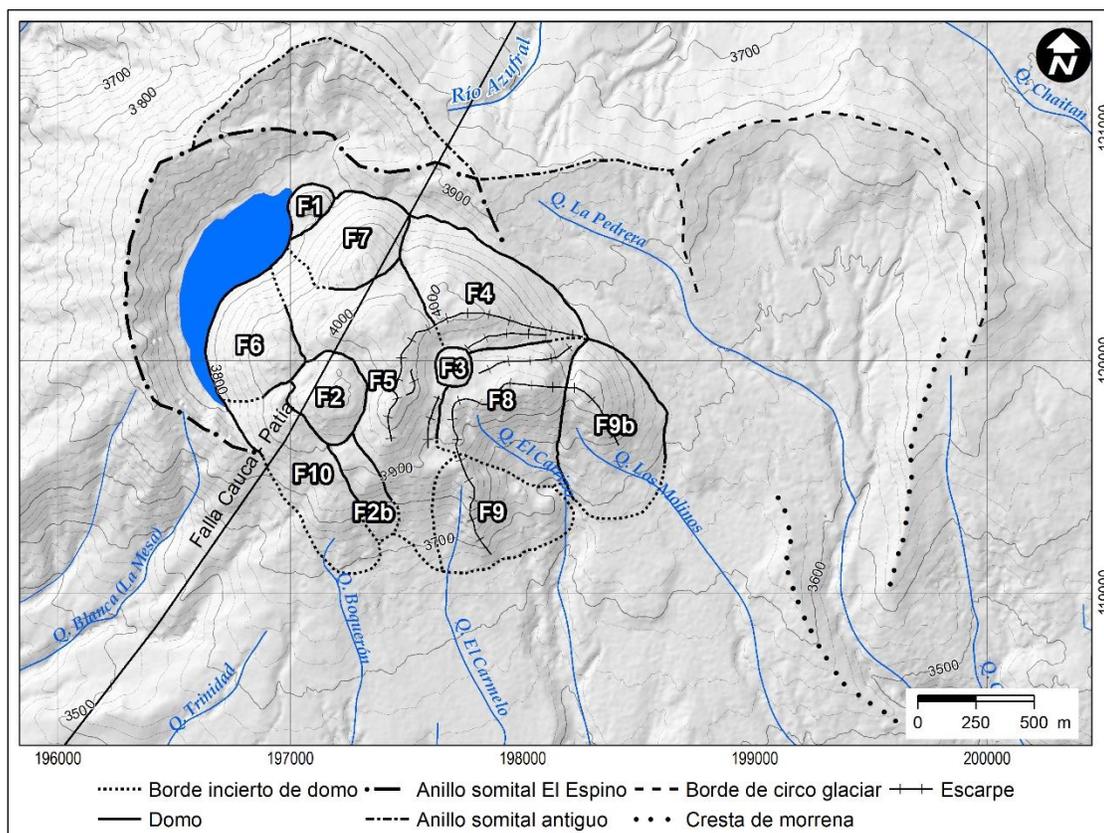


Figura 14. Complejo de domos volcán Azufra
 Fuente: modificado de Williams *et al.* (2017)

5 ACTIVIDAD HISTÓRICA 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 Sapuyes (Cabildo Indígena de Túquerres, 2009).

La fuente primaria consultada por Sañudo no es referida por dicho autor. De acuerdo al 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 Azufral.

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 Azufral, 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 Taquelán", de la existencia de una laguna de color verde, del azufre incorporado en las rocas y de actividad fumarólica (figura 2), 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 15.

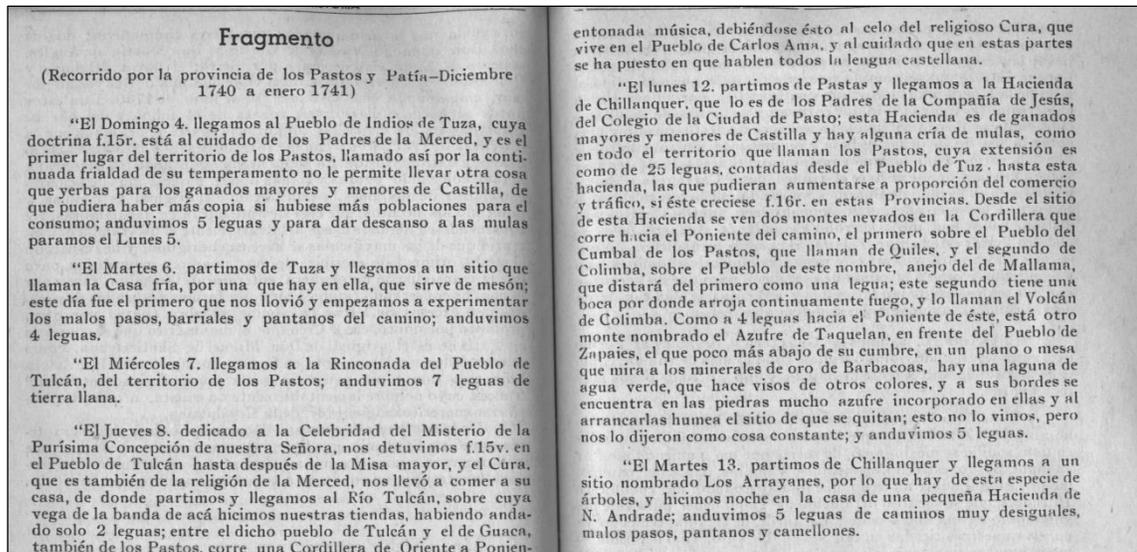


Figura 15. Diario de viaje de Don Miguel de Santiesteban de Lima a Caracas- 1740-1741
Manuscrito relacionado con la Provincia de Los Pastos
Fuente: Academia Nariñense de Historia (1967)

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 pórvido 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 16), 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.

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.

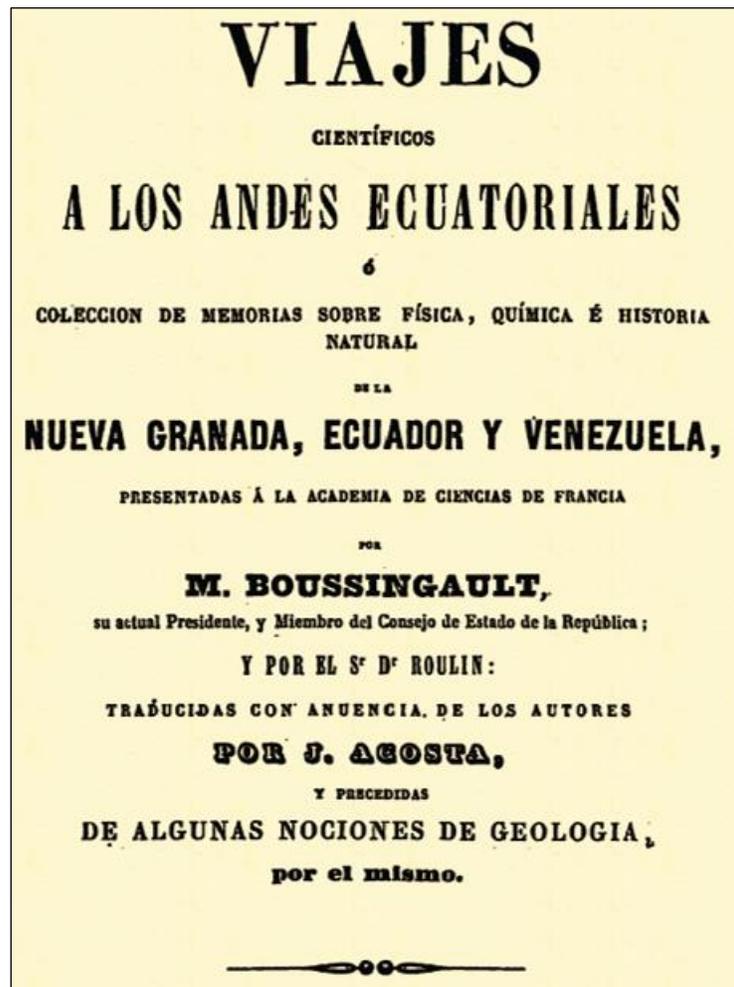


Figura 16. Viajes científicos a los Andes Ecuatoriales (portada)
Fuente: Boussingault (1849)

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 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 6).



Figura 17. Laguna Verde en el volcán Azufral, dibujo de Riou en 1850
Fuente: André (1884)



Figura 18. Laguna cratérica y localización del domo Mallama
A. Vista general de la laguna cratérica 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 rala 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, sonríe 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 ha 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 cratéica
Fotografía tomada, por el hermano Anacleto como parte del grupo que acompañó la expedición de Immanuel Friedlaender en noviembre de 1925
Fuente: Archivo de imágenes en línea ETH Zurich



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: Archivo de imágenes en línea ETH Zurich

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).

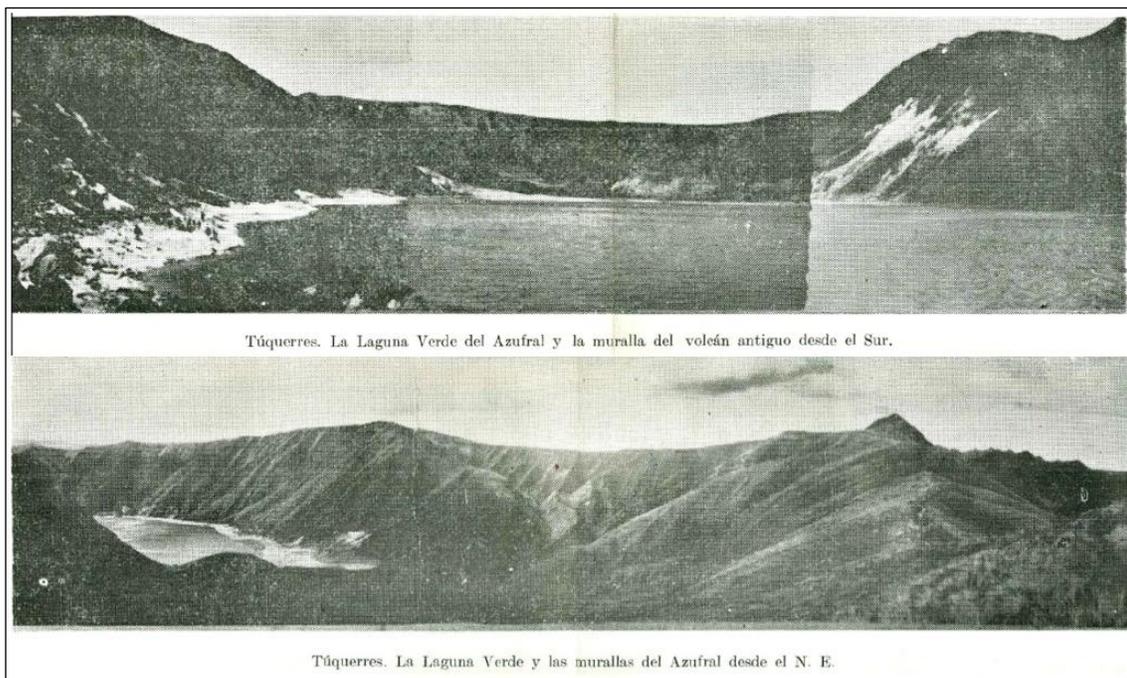


Figura 21. Laguna verde de la expedición de Rodríguez Guerrero

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.

6 ESTADO ACTUAL DEL VOLCÁN: MONITOREO Y VIGILANCIA

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) a través del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (OVSPasto) inició en diciembre de 2008 el monitoreo formal y permanente del volcán Azufral. La primera estación multiparámica, denominada Chaitán, 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 22 ilustra la configuración de la red de monitoreo del Volcán Azufral.

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 23, muestra en un histograma, el comportamiento de la ocurrencia de la sismicidad en la zona de influencia del Volcán Azufral entre 2009 y 2021. Respecto a la sismicidad tipo VT, ésta se ha localizado de manera dispersa (figura 24), 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).

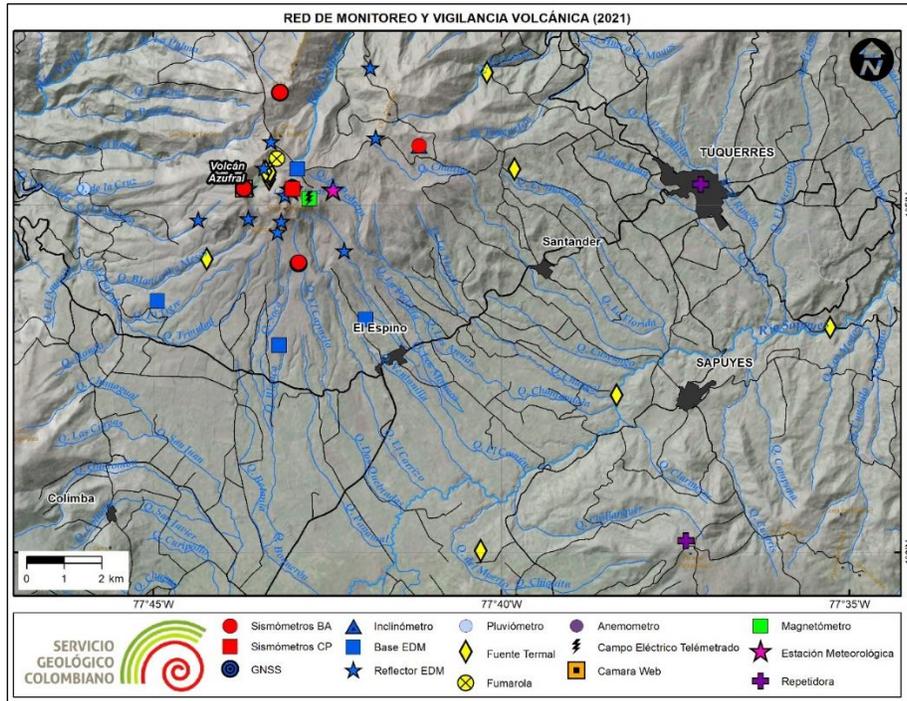


Figura 22. Red de monitoreo y vigilancia volcánica
Fuente: SGC (2021)

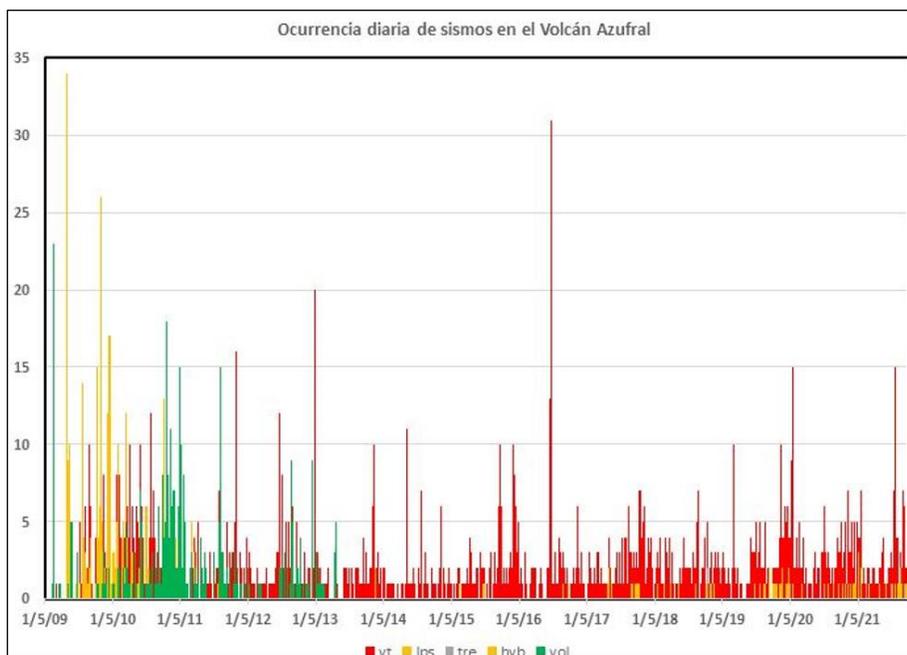


Figura 23. Histograma del número de eventos volcánicos por tipo entre mayo de 2009 y diciembre de 2021
Fuente: SGC (2021)

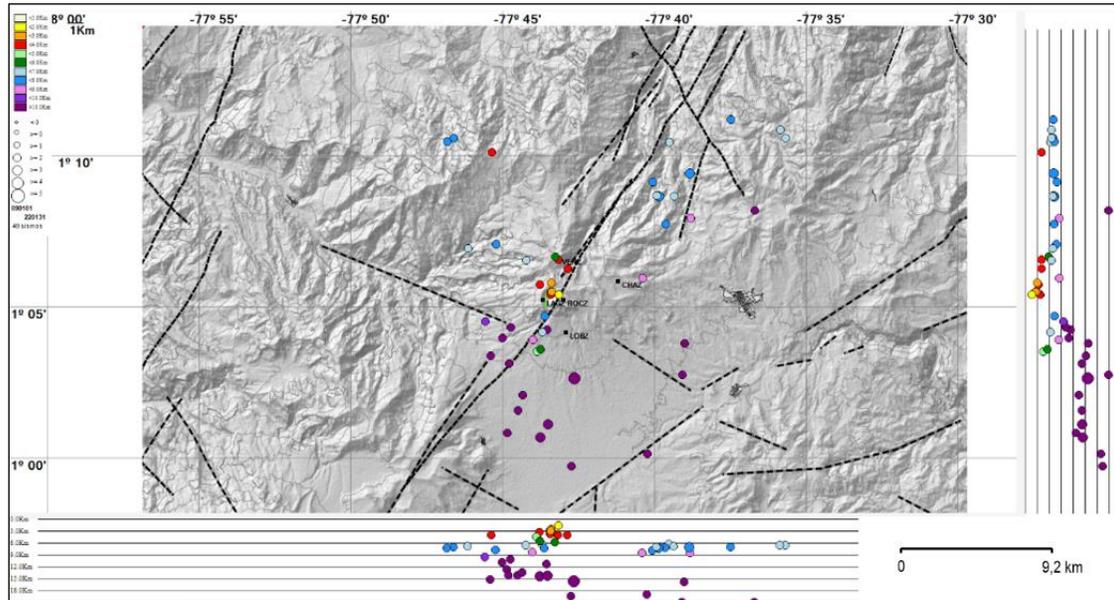


Figura 24. Localización epicentral e hipocentral de sismos de fractura con magnitud local > 2 Registrados en la zona de influencia del volcán Azufral entre mayo de 2009 y enero de 2022, con sus respectivos cortes N-S (derecha) y E-W (abajo), y con intervalos que representan 3.0 km de profundidad con 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-OVSPasto 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 25 ilustra algunos aspectos de la actividad hidrotermal que se presentó en el año 2009.



Figura 25. Emisión de gases al noroeste de la Laguna Verde Azufral
Sector “La Playita” en julio de 2009
Fuente: SGC (2009)

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 Azufra 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 26). El material encontrado se ubicó en el mismo sector W de la Laguna Verde, en la zona denominada como “La Playita” (SGC, 2016).



Figura 26. 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-OVSPasto, 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.

7 EVALUACIÓN DE LA 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.”

El proceso de evaluación de la amenaza volcánica de un volcán activo parte del conocimiento de su historia eruptiva, de la caracterización de su estilo eruptivo, la identificación de los fenómenos volcánicos que han ocurrido en el pasado y que de acuerdo con sus manifestaciones de la actividad actual se pueden repetir en eventos eruptivos futuros. Igualmente es muy importante conocer la morfología del volcán y de su área de influencia ya que es ella quien controla la trayectoria de varios fenómenos y la distribución de depósitos de la erupción. Por lo anterior son insumos iniciales los estudios geológicos y estratigráficos, el registro histórico y estudios geomorfológicos disponibles o que se realicen en el proyecto de evaluación de la amenaza.

Para la evaluación de la amenaza volcánica del volcán Azufral se utilizó principalmente el estudio de Calvache *et al.* (2003) y sus consideraciones sobre geología, estratigrafía y geomorfología. Se hace referencia a trabajos recientes realizados en el área de estudio y se aclaran algunos aspectos.

7.1 Análisis del volcán Azufral y su entorno

La actividad holocénica del volcán Azufral, además de las dataciones de ^{14}C disponibles (Calvache *et al.*, 2003), se evidencia por la buena conservación morfológica del complejo de domos contiguo a la laguna cratérica y de las sucesiones de CDPs que lo caracterizan. La tabla 4 muestra una compilación y un análisis estadístico de los resultados de dataciones calibradas presentadas en Fontaine (1994) y Calvache *et al.* (2013), modificado de Williams (2015).

Tabla 4. Compilación de resultados de dataciones de ^{14}C calibradas para el volcán Azufral

Unidad	Muestra	Edad ^{14}C	^{14}C Desviación Estándar	Rango 2σ	Área relativa bajo la curva de distribución de probabilidad	Mediana Probabilidad	Promedio Radiocarbono por Unidades
Carrizo	CP6-1	3470	60	3589 - 3884	1.000	3744	3500 ± 34
	Esp-4	3500	50	3641 - 3894	1.000	3772	
	CP5-1	3540	70	3638 - 3988	0.987	3825	
4046 - 4066				0.013			
Espino	CP5-2	3660	70	3734 - 3741	0.003	3990	3720 ± 33
				3776 - 3788	0.006		
				3827 - 4161	0.971		
				4169 - 4178	0.004		
				4199 - 4228	0.016		
	CP5-3	3680	60	3846 - 4156	0.990	4018	
				4207 - 4221	0.010		
	Esp-3	3750	70	3903 - 4299	0.967	4115	
				4327 - 4354	0.019		
				4369 - 4386	0.011		
	CP5-4	3780	80	3930 - 3944	0.010	4164	
				3967 - 4413	0.990		
	Esp-1	3800	100	3901 - 4437	0.998	4193	
4491 - 4495				0.002			
Cortadera	Cort-2	3920	70	4104 - 4106	0.001	4349	3924 ± 52
				4149 - 4528	0.999		
	Cort-1	3930	80	4095 - 4120	0.012	4362	
				4145 - 4579	0.984		
4770 - 4780	0.004						
Calera	CP3-1	3990	60	4247 - 4620	0.980	4467	4055 ± 35
				4765 - 4785	0.020		
	Cal-1	4070	90	4299 - 4327	0.014	4588	
				4354 - 4369	0.008		
				4399 - 4838	0.979		
	CP3-2	4100	70	4438 - 4488	0.093	4629	
4497 - 4826				0.907			
Túquerres	Tuq-1	17970	190	21242 - 22296	1.000	21761	

Fuente: modificado de Williams (2015)

En el capítulo 6 se hizo referencia a las manifestaciones de actividad actual que lo catalogan como volcán activo con comportamiento estable. El SGC OVS-Pasto monitorea este volcán y cuenta con líneas base de diferentes parámetros, lo que es muy importante y permitirá identificar cambios en su comportamiento que evidencien inestabilidad del sistema volcánico.

7.1.1 Análisis de la geomorfología del volcán y de sus alrededores

La morfología del área del Azufral y sus alrededores son originados de manera predominante por procesos exógenos de sedimentación y emplazamiento de materiales como consecuencia del vulcanismo, así como por los procesos de erosión e interacción de dichos materiales con el agua, el viento, etc. Algunas formas del paisaje son asociadas a procesos de inestabilidad del edificio volcánico. En este trabajo se considera la información geomorfológica consignada en González *et al.* (2002), Calvache *et al.* (2003), Servicio Geológico Colombiano y Universidad de Caldas (2015).

González *et al.* (2002) elaboraron el mapa geomorfológico de la plancha 428 Túquerres a escala 1:100.000 (figura 27), refiriendo que la zona de estudio pertenece a dos provincias fisiográficas principales, el Altiplano Nariñense y la Cordillera Occidental, los autores, por la escala de trabajo, no describen geoformas en sentido estricto. A continuación, se presentan descripciones de las unidades morfológicas que componen estas provincias fisiográficas en la zona de influencia del volcán Azufral.

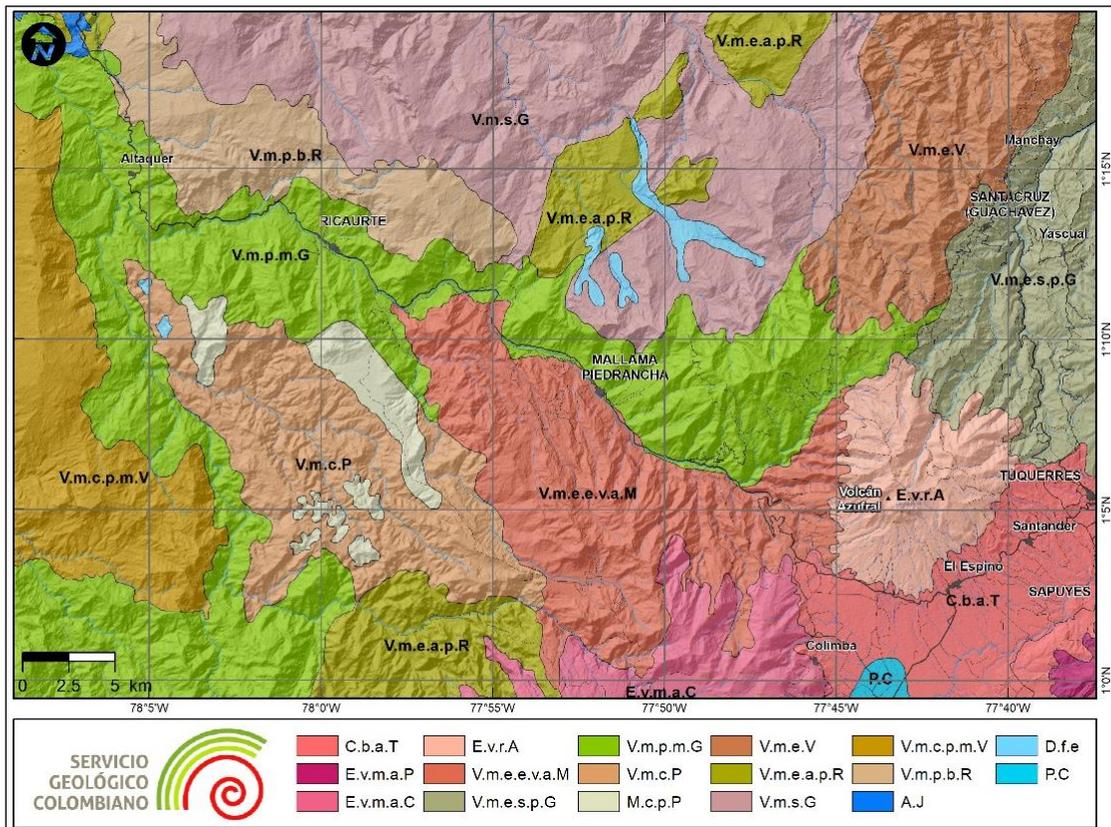


Figura 27. Mapa Geomorfológico del volcán Azufral
Fuente: modificado de González *et al.* (2002)

Servicio Geológico Colombiano y Universidad de Caldas (2015) presentan el mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa (escala 1:100.000) de la Plancha 428 Túquerres. En este mapa se detallan las geoformas de origen volcánico y glaciar en el área de influencia del volcán Azufral.

En el mapa presentado por González *et al.* (2002) se muestran las principales unidades Geomorfológicas: Edificio volcánico reciente del Azufral (E.v.r.A), colinas bajas alargadas de Túquerres (C.b.a.T), planicie de Cumbal (P.C), edificios volcánicos muy antiguos de Cumbal (E.v.m.a.C), vertientes montañosas escarpadas de edificios volcánicos antiguos de Miraflores (V.m.e.e.v.a.M), edificio volcánico muy antiguo de Pajablanca (E.v.m.a.P), vertientes montañosas escarpadas suavizadas por depósitos piroclásticos de Guachavés (V.m.e.s.p.G), vertientes montañosas de pendiente moderada del Guiza (V.m.p.m.G), vertientes montañosas escarpadas de alta pendiente de Ramos (V.m.e.a.p.R), vertientes montañosas cortas de Pialapí (V.m.c.P) y montañas con cimas planas de Pialapí (M.c.p.P).

7.1.1.1 Altiplano Nariñense

El Altiplano Nariñense es una superficie relativamente plana, localizada al sur del Departamento de Nariño, que se extiende desde Túquerres, al norte, hasta los límites con la República del Ecuador; se caracteriza por presentar un relieve suave con alturas desde 2800 hasta 3200 m s.n.m. En esta provincia fisiográfica se diferencian las siguientes unidades geomorfológicas: Planicie del Cumbal y Colinas bajas alargadas de Túquerres.

La Planicie de Cumbal (PC) está localizada en el sector sur oriental de la plancha 428 (H10), cubre un área de 25 km² (figura 28), corresponde a una altiplanicie de origen hidrovulcánico, formada por la acción de las aguas lluvias sobre productos volcánicos provenientes principalmente de los volcanes Azufral y Cumbal, y posiblemente de otros centros volcánicos. En general, esta planicie se caracteriza por una superficie plana con relación a las unidades que la circundan, está ubicada en la cota 3200 m s.n.m. y no está afectada por procesos de denudación e incisión actual de los drenajes. La edad de formación de la planicie parece ser muy reciente (Holoceno), puesto que en ella no se pueden diferenciar los depósitos volcánicos recientes del Azufral, lo cual implica que durante las últimas erupciones del volcán, la unidad estaba en formación; además, la unidad tiene un grado de disección mínimo, solamente el río Juntas la corta a menos de dos metros de profundidad y forma paredes subverticales.

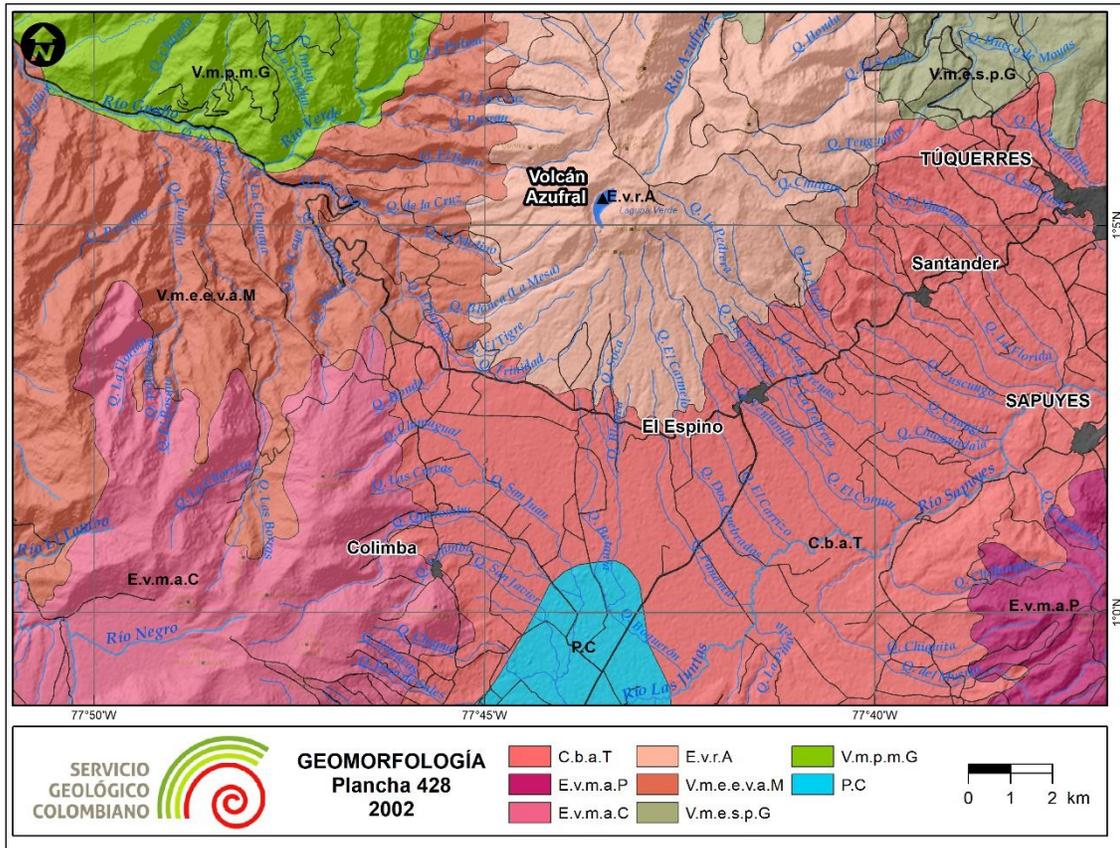


Figura 28. Detalle del mapa Geomorfológico del volcán Azufral

Se muestran las principales unidades Geomorfológicas: Edificio volcánico reciente del Azufral (E.v.r.A), Colinas bajas alargadas de Túquerres (C.b.a.T), Planicie de Cumbal (P.C), Edificio Volcánico muy antiguo de Pajablanca (E.v.m.a.P)

Fuente: modificado de González *et al.* (2002)

González *et al.* (2002) refiere que en cercanías al volcán Azufral, se presentan pequeñas colinas dispersas, alargadas en dirección NW y con alturas de 3 a 5 m; producidas por erupciones violentas (flujos piroclásticos) denominadas como *mound field* (campo de montículos), las cuales son más antiguas, por encontrarse sus bases colmatadas por el horizonte A de esta planicie. Sin embargo, Calvache *et al.* (2003) clasifican estos montículos como *hummocks* asociados a un evento de avalancha de escombros generada por inestabilidad y colapso de un edificio anterior al volcán Azufral actual.

La unidad Colinas bajas alargadas de Túquerres (C.b.a.T) está localizada en el sector suroriental de la plancha 428 (figura 28), ocupa un área de 150 km², se caracteriza por formar una superficie con relieve suave que tiene un ángulo de inclinación de 5°. Altitudinalmente se desarrolla entre las cotas 3000 a 3400 m s.n.m., que corresponde a la base del volcán Azufral, en ella se encuentran localizadas las cabeceras municipales de

Túquerres y Sapuyes. Esta unidad corresponde a una geoforma volcánica antigua que después de haber sido disectada y erodada en sus vertientes, fue cubierta por los depósitos volcánicos recientes, dando como resultado las formas suaves actuales del paisaje; razón por la cual, las colinas reflejan una topografía preexistente que correspondería a antiguos depósitos piroclásticos del Azufral semejantes a los depósitos recientes, que cubren y suavizan la unidad. Son colinas bajas, con alturas menores de 30 m, los filos son alargados con dirección sur, con longitud mayor a 3 km, redondeados y, en ocasiones, escalonados, lo que refleja pulsos en el levantamiento de la cordillera y la antigüedad del edificio volcánico. Las vertientes son cóncavas cortas y con pendientes de ángulos suaves (20°) y refleja también la antigüedad del basamento de esta unidad (González *et al.*, 2002).

Es común observar, hacia el sector sur, montículos aislados formados por flujos piroclásticos recientes de la misma edad de los de la Planicie de Cumbal, *mound field*, *Hummocks* en el sentido de Calvache *et al.* (2003). Debido a la poca cohesión de los depósitos que cubren esta unidad, los suelos son altamente susceptibles al lavado por aguas de escorrentía que en algunos casos pueden desarrollar surcos o cárcavas.

7.1.1.2 Cordillera Occidental

La Cordillera Occidental presenta varios tipos de vertientes montañosas erosionadas, que se localizan altitudinalmente entre las cotas 1500 m s.n.m en la parte oeste hasta los 4000 m s.n.m en la parte oriental (volcanes) y en donde se han identificado además de la unidad geomorfológica Edificios volcánicos, 9 tipos de vertientes montañosas, una unidad referida como montañas con cimas planas de Pialapí (M.c.b.P) y el abanico de Junín (A.J), como se observa en la figura 27 (González *et al.*, 2002).

En cuanto a la unidad edificios volcánicos González *et al.* (2002) diferenciaron tres tipos de edificios volcánicos, los cuales, por sus rasgos morfológicos, se dividieron en edificios volcánicos recientes, antiguos y muy antiguos, correspondientes respectivamente a los volcanes Azufral, a la caldera pre-Cumbal y a las estructuras volcánicas erodadas conocidas como Pajablanca (E.v.m.a.P) y Rosales (figura 28).

La unidad Edificio volcánico reciente del Azufral (E.v.r.A), que está conformado por flujos piroclásticos y domos, se desarrolla sobre lavas andesíticas correspondientes a edificios volcánicos antiguos (González *et al.*, 2002). Esta unidad ocupa un área aproximada de 20 km² en la plancha 428 (figura 29) y se caracteriza por presentar un cráter dentro del cual se encuentra la Laguna Verde, a la cual llegan numerosos drenajes subparalelos. Las vertientes son escarpadas, rectas y cortas; a mitad de estas se presentan remanentes de flujos piroclásticos recientes a manera de terrazas que no se separaron como unidades

Se puede considerar como edificio volcánico, la masa que se encuentra por encima de la cota 3400 m s.n.m., ligeramente por encima de la carretera Túquerres – Tumaco (González *et al.*, 2002).

Servicio Geológico Colombiano y Universidad de Caldas (2015) refieren de manera detallada para la zona del volcán Azufral, además de los domos (Vd), como geoformas de origen volcánico: escarpe del cráter (Vce), flujo de lava (Vfl), escarpe de flujo de lava (Vfle), escarpe de flujo piroclástico aterrazado (Vfpe), ladera volcánica (VI) y manto de piroclastos (Vmp). Como geoformas de origen glacial originadas por procesos de erosión intensa ocasionados por el movimiento de masas de hielo en zonas de alta montaña durante épocas glaciales, se definen: artesa glacial (Gag), circo glacial y de nivación (Gd), artesa glacial (Gag) espinazo glaciado (Geg), flancos de valle glaciario (Gflv), flujo volcánico glaciado (Gfv), sierra glaciada (Gsd). Como geoformas de origen denudacional, resultantes de la acción de procesos erosivos de origen gravitacional y fluvial y que dejan remanentes de las unidades preexistentes y crean nuevas formas de relieve como: colina residual (Dcr), loma denudada (Dld), lomo denudado (Dlde), lomeríos disectados (Dldi), ladera erosiva (Del), lomeríos poco disectados (Dlpd), sierra denudada (Dsd) (figura 30).

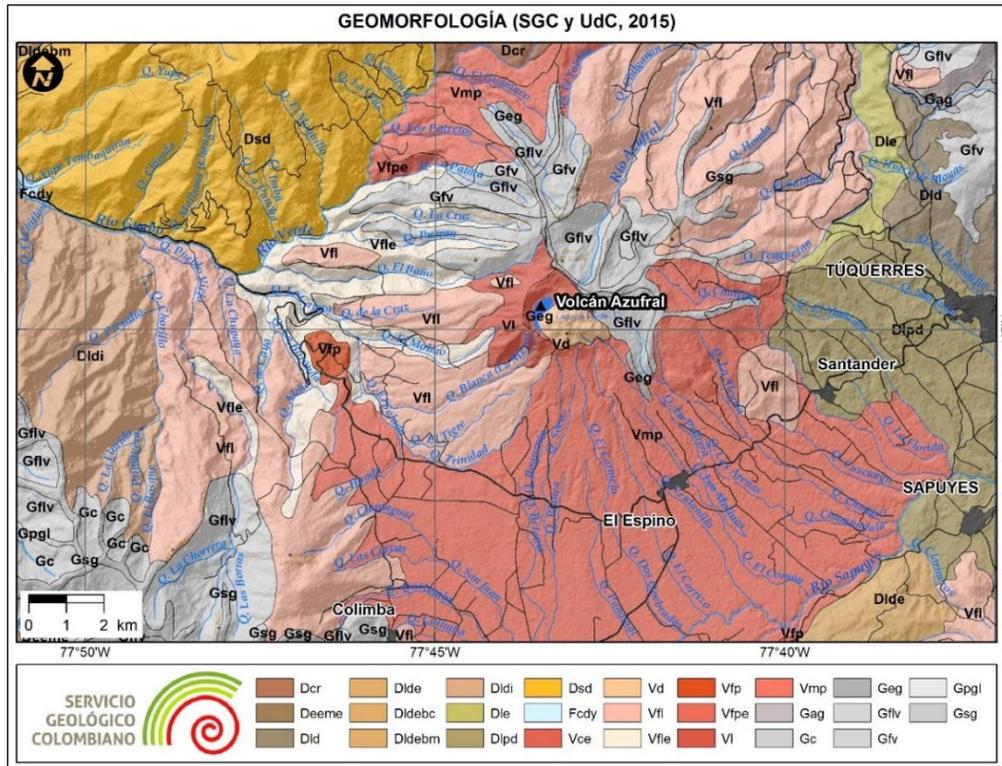


Figura 30. Geomorfología del volcán Azufral
 Las convenciones identifican las unidades geomorfológicas más relevantes en la zona
 Fuente: modificado de SGC y UdC (2015)

Adicionalmente en la zona del Azufral se identifican depósitos morrénicos compuestos de bloques de lavas andesíticas y lavas de composición similar dispuestas en forma caótica mal seleccionadas, sin estratificación interna, en una matriz areno arcillosa de color amarillo a blanco amarillento y con continuidad interrumpida por depósitos piroclásticos recientes (SGC y UdC, 2015).

Los procesos morfodinámicos asociados a esta unidad tienen que ver esencialmente con la profundización de los cauces y la erosión de sus márgenes, a partir de los cuales se generan cárcavas y surcos, tal como se puede observar en la parte alta del volcán.

Al NW del volcán Azufral se encuentra la unidad geomorfológica denominada “Vertientes montañosas escarpadas de edificios volcánicos antiguos de Miraflores” (V.m.e.e.v.a.M) (figura 29). Las vertientes tienen formas complejas y responden a la alternancia de flujos de lavas con flujos piroclásticos; verticales en las primeras y con pendientes de hasta 45° (100%) en los últimos. Los valles son estrechos, en V y forman cañones. Es común observar en las vertientes, superficies planas que corresponden a CDPs recientes del volcán Azufral a manera de terrazas que suavizan la topografía general. El basamento de la unidad está constituido principalmente por lavas y CDPs correspondientes a los antiguos edificios volcánicos del Azufral o del Cumbal. A pesar de las fuertes pendientes que se presentan en el área, los procesos morfodinámicos son escasos y están restringidos a caídas de roca que se desprenden de los flujos de lava o depósitos ignimbríticos, o erosión laminar que modela lentamente las superficies de los depósitos de CDPs.

La unidad geomorfológica “Vertientes montañosas escarpadas suavizadas por depósitos piroclásticos de Guachavés” (V.m.e.s.p.G) se extiende desde el sur del volcán Azufral hasta el límite norte de la plancha 428 (figuras 27 y 29). En esta unidad se encuentran los centros rurales de Guachavés, Manchay, Yascual y Balalaika. Las alturas, en esta unidad, varían desde los 2800 hasta los 2100 m s.n.m., con un desnivel entre valles y cimas de hasta 800 m. Esta unidad comprende dos geoformas en sentido estricto: la primera formada por las vertientes sobre saprolitos de rocas cristalinas y la segunda corresponde a las partes altas y antiguos valles en los que se han podido preservar los depósitos de CDPs de diferentes edades que suavizan la topografía.

La unidad geomorfológica “Vertientes montañosas de pendiente moderada del Güiza” (V.m.p.m.G), se presenta para la zona más cercana al volcán Azufral como una franja irregular localizada a la margen derecha del río Guabo - Güiza hasta la localidad de Chucunés, en donde se presenta en ambos márgenes para prolongarse en dirección NW a las planchas vecinas (figuras 27 y 29). En esta franja del río Guabo - Güiza, los filos son agudos, tienen longitudes de 2 a 5 km y dirección N - S a N10°E. Las vertientes son, en

general, cortas, con pendientes de 35° a 40°, escalonadas, cóncavas a rectas. Los escalones o peldaños pueden indicar diferentes períodos de levantamiento de la Cordillera Occidental. En esta unidad se encuentran las cabeceras municipales de Ricaurte y Piedrancha.

A lo largo del río Guabo - Güiza es posible observar un valle producto de actividad torrencial sub-reciente varios pulsos de depósitos de *lahar* que podría relacionarse con la actividad volcánica del Azufral. Esta unidad geomorfológica se desarrolla principalmente sobre rocas cretácicas del Grupo Diabásico, el miembro silicificado del Grupo Dagua (en el sentido de Nelson, 1957) y la granodiorita de Piedrancha.

El volcán Azufral es el sitio de nacimiento de los principales drenajes (o de afluentes que van a éstos) en profundos cañones a través de los cuales se encausarían flujos de lava, CDPs, o *lahares*, algunos de los cuales podrían potencialmente alcanzar sectores bajos de estos valles, donde se encuentran poblaciones como Balalaika (río Azufral), Samaniego (río Pacual), Santander (quebrada Chaitán), El Espino (quebradas Los Molinos y El Común), El Guabo (río Guabo), Piedrancha (río Guabo) y Ricaurte (río Güiza). Para todas estas poblaciones se determinará su grado de amenaza volcánica en la fase de zonificación, dentro del trabajo de elaboración del mapa de amenaza (Cortés *et al.*, 2021a)

7.1.2 Estructuras Tectónicas

Según la cartografía Geológica Regional de la plancha 428 Túquerres (González *et al.*, 2002), existen dos direcciones principales de fallamiento; una con rumbo NE-SW y otra transversal con rumbo NW-SE (figura 31). Entre las de dirección NE-SW se encuentran el sistema de fallas Cauca – Patía, y las fallas Cuercuel, Junín – Sambiambí y Río Marino. Las transversales son fallas de menor longitud y están siendo desplazadas por las primeras, entre ellas se encuentran las fallas del río Güiza, del río Vegas y la del río Miraflores (González *et al.*, 2002).

El Sistema de Fallas Cauca – Patía tiene una dirección de N30°E y una longitud de más de 400 km, se extiende desde Ecuador hasta el Departamento de Caldas en Colombia (González *et al.*, 2002). Según AIS *et al.* (1998), este sistema es de tipo normal con fuerte buzamiento hacia el oeste y controla en gran parte el trayecto del río Cauca.

En La Verbena y otros sitios sobre la carretera Túquerres – Tumaco, Ingeominas (1982) describe estructuras tipo graben con desplazamientos de hasta 0,4 m en cenizas volcánicas recientes y paleosuelos que atribuyen a la Falla Cauca – Patía. La prolongación hacia el sur de esta falla pasa por el cráter del volcán Azufral, estando cubierta con sus

La Falla Río Marino toma su nombre del río del mismo nombre en la Plancha 428 Túquerres; con una dirección de N30°E y una longitud de 46 km en la plancha. Los datos recolectados alrededor de esta falla no son concluyentes para determinar su tipo de movimiento, pero en cercanías al río Madroño, corta en el sentido del rumbo y en forma sinistral a fallas de dirección NW-SE (González *et al.*, 2002).

Las fallas Río Güiza y Río Vegas son subparalelas entre sí, y se entrecruzan en cercanías de la localidad de Altaquer. Son fallas de dirección N35°W que controlan los valles de los ríos Güiza y Vegas. Su longitud en la plancha es de 46 km. Estas fallas son cortadas por las fallas Río Madroño y Junín - Sambiambí. (González *et al.*, 2002).

La Falla Río Vargas toma su nombre del río del mismo nombre en la esquina nororiental de la Plancha 428 Túquerres. Tiene una dirección de N35°W y una longitud de 25 km dentro de la plancha. (González *et al.*, 2002).

7.1.3 Alteración hidrotermal

El volcán Azufral es uno de los sistemas definidos como objetivo prioritario para la exploración geotérmica en el país (OLADE, 1982). Una de las evidencias de la existencia de un sistema geotérmico además de las manifestaciones superficiales de descarga de fluidos, es la formación de minerales secundarios producidos por la interacción roca – fluido hidrotermal. La formación de estos minerales también llamados de alteración hidrotermal depende de variables como temperatura, proceso de ebullición, tipo de roca y composición de los fluidos geotérmicos. En consecuencia, a partir de su identificación es posible plantear hipótesis sobre las características fisicoquímicas (pH y temperatura) del fluido hidrotermal (Browne, 1997). Las áreas alteradas hidrotermalmente pueden potencialmente ser propensas a originar zonas inestables o de debilidad del edificio.

Carvajal *et al.* (2008) infirieron la localización del sistema geotérmico del Volcán Azufral, en el edificio volcánico y evaluaron las características y procesos del fluido desde el reservorio, a partir de la cartografía superficial de alteración hidrotermal y sus características mineralógicas. Esta investigación estuvo enmarcada dentro del proyecto de Investigación geológica, sísmica y geotérmica en el Altiplano Nariñense realizado conjuntamente por Ingeominas y la Universidad Nacional de Colombia, enmarcado en el Programa de exploración de aguas subterráneas de Ingeominas (PEXAS). De manera específica se realizó la cartografía de alteración hidrotermal superficial a partir de muestreo y análisis de rocas frescas y alteradas. El estudio, basado en alteración superficial, permitió establecer una zonación vertical identificando las zonas argílicas avanzada, argílica, fílica y propilítica (figura 32). Se reconocieron rellenos de cuarzo y otras formas de sílice que rellenan fracturas abiertas con dirección NW – SE. La zonación

vertical ha sido establecida anteriormente a partir de estudio de líticos recolectados en un depósito piroclástico en el área del Espino en el estudio de Reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Colombia. El modelo conceptual preliminar basado en la alteración hidrotermal superficial permite inferir un sistema geotérmico maduro de alta temperatura (> 250°C) con una fuente de calor magmática localizada principalmente hacia el E del volcán, el cual es consistente con el modelo geoquímico basado en la distribución y caracterización de manifestaciones superficiales (fuentes termales y fumarolas) del Volcán Azufral. La caracterización mineralógica de la alteración hidrotermal se realizó mediante la aplicación de análisis petrográficos, difracción de Rayos-X y espectrometría de onda corta infrarroja (PIMA).

En el contexto de la amenaza volcánica del volcán Azufral, la alteración argílica avanzada identificada por Carvajal *et al.* (2008), y caracterizada por la asociación de alunita, cuarzo, caolinita, esmectita y cristobalita se localiza en los cuerpos rocosos en el borde norte y noroeste de la laguna cratérica (laguna Verde), principalmente en la zona del domo Mallama y en el sector de la playita (figura 32).

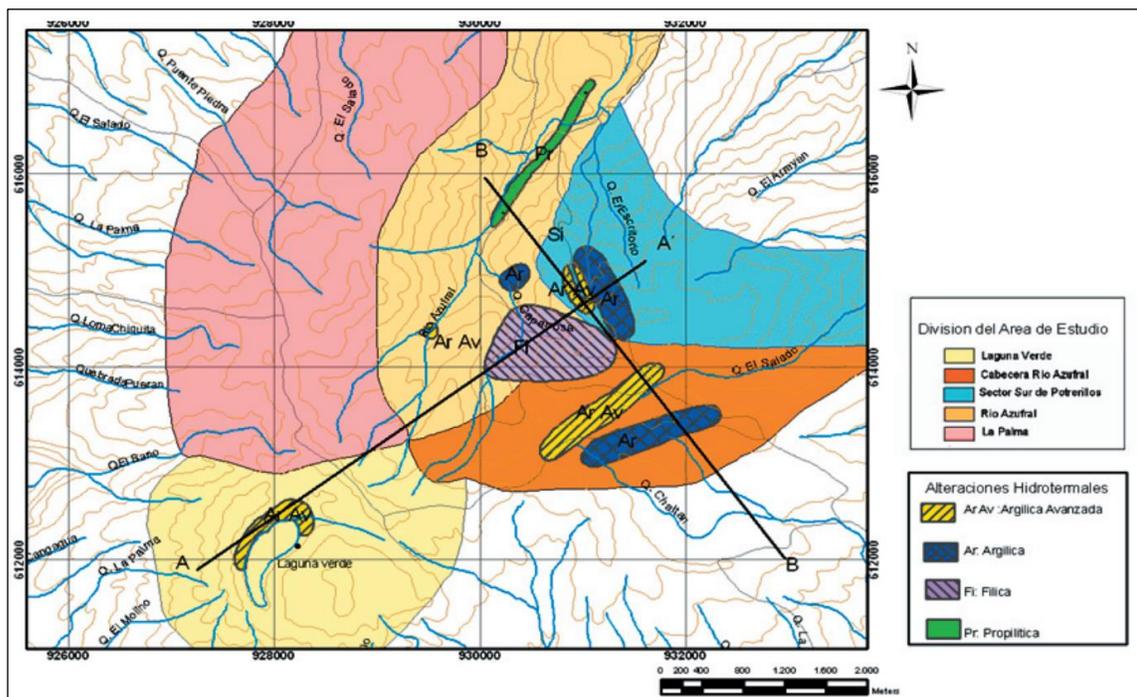


Figura 32. Distribución espacial de la alteración hidrotermal reconocida en el volcán Azufral
Fuente: Carvajal *et al.* (2008).

7.2 Amenaza volcánica

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, de acuerdo a la metodología del Servicio Geológico Colombiano, para la elaboración de la primera versión del mapa de amenaza volcánica.

De acuerdo con la compilación de información producto del presente trabajo, los fenómenos volcánicos que a continuación se describen, afectarían áreas del volcán tanto en las zonas proximal como distal, según su distribución y volumen, de acuerdo con la magnitud de una eventual erupción.

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

Las corrientes de densidad piroclástica (CDP) 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 (CDP) 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 CDP diluidas son reconocidas también como oleadas piroclásticas y las CDP concentradas como flujos piroclásticos. (Wilson y Houghton, 2000).

Las oleadas piroclásticas (CDP diluidas) son más turbulentas, poseen una menor densidad (mayor contenido de gases) y presentan una mayor distribución, desplazándose en los valles y sobrepasando incluso altos topográficos (Dufek, *et al.*, 2015; Cole *et al.*, 2015; Brown y Andrews, 2015). Haciendo parte de las CDP 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 CDP 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 *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 CDP (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 4 se describe de manera detallada los depósitos de CDPs caracterizados para las diferentes unidades eruptivas identificados en la historia geológica del volcán Azufra (figura 11). 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 Azufra; 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 intracráticos 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 antes mencionados son 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.

7.2.2 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 hidromagmática) (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 Popocatepetl – México.

7.2.2.1 Amenaza por caídas piroclásticas por transporte eólico

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 Azufral, el registro geológico evidencia que las erupciones más explosivas han estado asociadas a la destrucción de domos y a procesos *boiling over* donde el ascenso de una columna eruptiva no ha sido importante. Dada la ausencia de material de caída piroclástica en el volcán Azufral, 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 para las posteriores simulaciones computacionales se tomará como referencia la magnitud de erupciones en términos de volumen y altura de la columna para volcanes con actividad similar (tabla 5).

Tabla 5. Características de caídas piroclásticas en volcanes con erupciones sub-plinianas a plinianas

Masa (kg)	Volumen (km ³)	Altura columna (km)	Volcán	Tipo de erupción	Autor
2,36x10 ¹¹	0.2	25	Colima	Pliniana	Bonasia <i>et al.</i> , 2011
4x10 ⁹	0.003	7	Vesubio	sub-pliniana	Bonasia <i>et al.</i> , 2009
4,34x10 ¹⁰	0.04	15.5	Vesubio	sub-pliniana	Bonasia <i>et al.</i> , 2010
2,9x10 ¹¹	0.32	18-20	Vesubio	sub-pliniana	Macedonio <i>et al.</i> , 2008
4,5x10 ¹⁰	0.5	18-20	Vesubio	sub-pliniana	Macedonio <i>et al.</i> , 2008
3,8x10 ¹⁰	0.42	18-20	Vesubio	sub-pliniana	Macedonio <i>et al.</i> , 2008
1,1x10 ¹²	1.2	18-20	Vesubio	sub-pliniana	Macedonio <i>et al.</i> , 2008
1,2x10 ¹²	1.38	18-20	Vesubio	sub-pliniana	Macedonio <i>et al.</i> , 2008
1,8x10 ¹²	2	24-32-30	Chichón	pliniana	Bonasia <i>et al.</i> , 2012
2,2x10 ¹²	2.44	24-32-30	Chichón	pliniana	Bonasia <i>et al.</i> , 2012
2x10 ¹²	2.22	24-32-30	Chichón	pliniana	Bonasia <i>et al.</i> , 2012

Fuente: autores

7.2.2.2 Amenaza por caídas piroclásticas 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 a su tamaño y a la fuerza del impacto; pueden provocar muerte a personas o animales, causar daños a infraestructuras e incendios; así mismo, las explosiones generadas por este tipo de fenómeno, producidas por la descompresión del sistema, ocasionan adicionalmente efectos de ondas de choque.

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 Azufra 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.

7.2.3 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 Azufra 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.

Bechon y Monsalve (1991) hacen referencia general a depósitos de *lahares* andesíticos, refiriéndose a *lahares* cuyos fragmentos son de composición andesítica que superpuestos con depósitos de flujos dieron lugar a la formación del edificio del volcán Azufra.

Fontaine (1994) hace referencia a dos unidades de *lahar*, una asociada a las erupciones iniciales del volcán Azufra, de carácter andesítico (L1) y otra unidad asociada a depósitos riodacíticos (L2). Sobre los afloramientos de *lahares* L1, Fontaine (1994) refiere que se encuentran al Este y al ENE de la caldera. Los afloramientos más distales se encuentran a 8 km de dicha caldera y están formados por bloques andesíticos heterolitológicos que varían de subredondeados a redondeados en una matriz de grano fino completamente meteorizada. El tamaño de los bloques de andesita puede alcanzar hasta 2 m, dichos depósitos son masivos. Los *lahares* L1 son el resultado de la removilización de flujos de lava en bloques. Igualmente, Fontaine (1994) afirma que las facies distales de los flujos de lava en bloques pueden representar una transición a un flujo piroclástico. Este material piroclástico, así como los depósitos de bloques de lava, podrían ser fuentes potenciales para desencadenar *lahares*. El depósito de *lahar* L2 está situado al Sur del volcán en la región de El Espino, 5 km al sur de la caldera, está compuesto por fragmentos de domo de la generación 2 de Fontaine (1994), los bloques contenidos en este *lahar* son redondeados e involucran un período de erosión fluvial de depósitos de flujo piroclástico infrayacentes.

Calvache *et al.* (2003), hacen referencia al Depósito de Flujo de Escombros de la Unidad El Espino, que presenta una distribución muy restringida, aflorando en la vía Túquerres-Tumaco, en el sector comprendido entre las quebradas Ventanillas y El Carrizo. Se trata de un depósito de color café claro, masivo, heterolitológico, con vesículas, de espesor irregular, entre 30 cm y 2 m, matriz soportado por arena fina a media con clastos subangulares y subredondeados de material volcánico de hasta 12 cm. Se encuentra

suprayaciendo los depósitos de flujo de ceniza y pómez y oleadas piroclásticas de la Unidad El Espino, correlacionable con el depósito L2 reportado por Fontaine (1994).

Para la evaluación de la amenaza, se hizo un análisis del sistema fluvial alrededor del volcán, donde las principales fuentes hídricas fluyen hacia el NW por la microcuenca del Río Guabo, conformado por los ríos Miraflores (Q. El Carmen) y Mulas, alcanzando la cuenca del río Guiza hasta llegar al río Mira; hacia el S por el río Blanco (Q. La Yegua y Q. Cuacés) llegando a la laguna de Cumbal (por lo cual se recomienda estudios adicionales y detallados de los lahares con respecto a la laguna), al S y SE por la microcuenca del río Sapuyes conformado por el río Las Juntas y tributarios (Q. Pueblo, Q. Colimba, Q. San Juan, Q. Las Curvas, Q. Chimingual, Q. Juanambú, Q. Boquerón, Q. Panamal, Q. Dos Quebradas, Q. El Carrizo y Q. Ventanillas) y el Río Sapuyes y tributarios (Q. La Pedrera, Q. Chamundala, Q. Chungel, Q. Cuscungo, Q. Chaitán, Q. El Manzano y Q. Tutacha) alcanzando los flujos las aguas del río Guáitara y hacia el NE por la microcuenca del Río Pacual (Río Azufral), llevando los flujos por el río Guáitara y alcanzando la cuenca del río Patía.

7.2.4 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 magmático 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 arrasan 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 33.

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. Es así como la evidencia del evento es principalmente morfológica ya que adicionalmente se estableció que los depósitos muestreados en algunos montículos a partir de perforaciones manuales de hasta 2.50 m de profundidad, son masivos, matriz soportados, compuestos por fragmentos juveniles de pómez y líticos de composición dacítica, característicos de la unidad El Espino. Según Calvache *et al.* (2003), Betancur y Correa (1992) describieron estos depósitos y los asociaron a la unidad AF6 (equivalente a la unidad eruptiva El Espino), refiriendo que la morfología observada obedece a procesos deposicionales locales. Fontaine (1994) define este depósito como un depósito secundario producto de retrabajamiento y estratigráficamente localizado hacia el techo de la Unidad CP5 (equivalente a la unidad eruptiva El Espino) y refiere que no se clasifica como de avalancha de escombros, debido a que no se observan otras características que permitan esta clasificación.

En el capítulo 4, se hace una descripción detallada del complejo de domos del volcán Azufral. La figura 33 muestra la reinterpretación de Williams *et al.* (2017) para dicho complejo, tomada en cuenta en el presente trabajo, junto con rasgos geológicos, como el trazo de la falla Cauca-Patía que atraviesa el edificio volcánico, que puede implicar una zona de debilidad del mismo; y rasgos geomorfológicos, incluyendo un mapa de pendientes, que evidencia la susceptibilidad del área del complejo de domos a fenómenos de colapso gravitacional, que también pueden ser originados por inestabilidad del edificio volcánico asociada a alteraciones hidrotermales y deformación volcánica derivada de futuros procesos eruptivos, junto con actividad sísmica volcánica y/o tectónica.

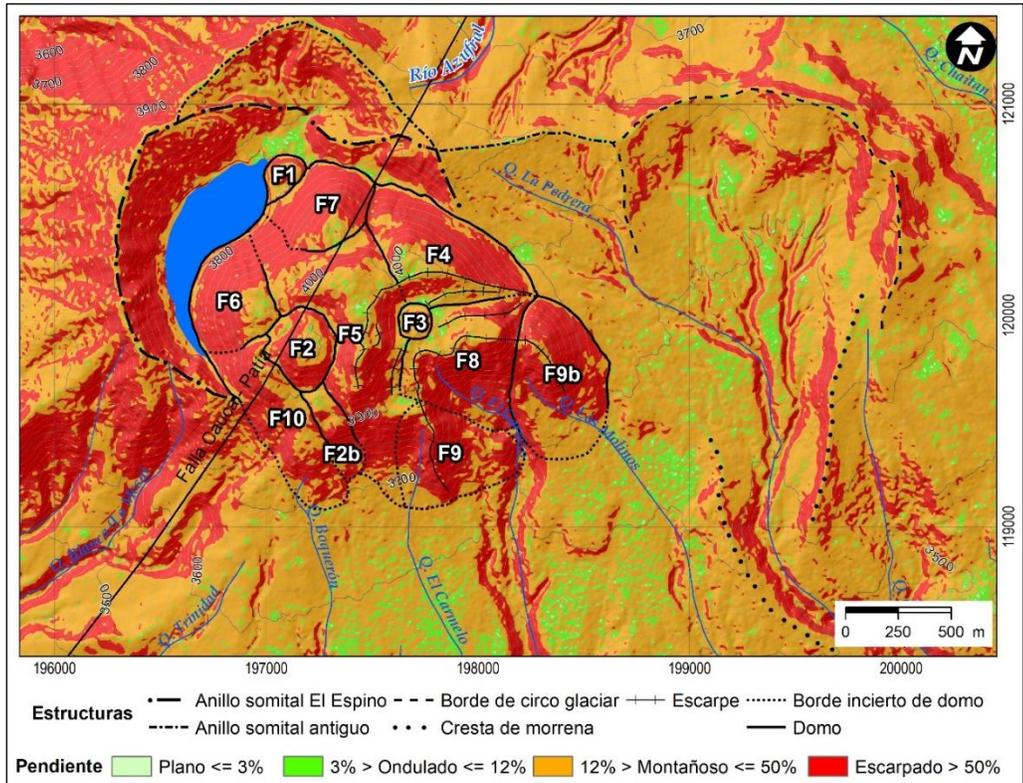


Figura 33. Estructuras, complejo de domos y mapa de pendientes

Fuente: modificado de Williams *et al.* (2017)

7.2.5 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).

8 ESCENARIOS ERUPTIVOS

Un escenario eruptivo se corresponde con la descripción de la dinámica, las características y propiedades de una erupción en un volcán específico, así como con la identificación del área sujeta a su influencia directa (Cepeda, 2009). Según Cepeda (2009) pueden establecerse escenarios eruptivos pasados, de referencia, presentes, potenciales y posibles.

La formulación de escenarios eruptivos en la evaluación de la amenaza volcánica es una herramienta base en momentos de una reactivación o de una crisis volcánica, que favorecen la toma de decisiones en respuesta a la gestión integral del riesgo. Sin embargo, también tienen la finalidad de complementar la información del mapa de amenaza volcánica y ser de utilidad no solo a las autoridades sino también a los técnicos y comunidades en el manejo de la crisis (Monsalve, 2014).

En este trabajo, si bien se tiene en cuenta la propuesta de definición de escenarios de Cepeda (2009), se abordarán en este capítulo los escenarios eruptivos pasados y de referencia. Los escenarios eruptivos pasados, se definen a partir de la reconstrucción de la historia eruptiva holocénica del volcán descrita en detalle en el capítulo 4 del presente informe. En el cual se identifican 5 unidades eruptivas: La Calera, La Cortadera, El Espino, El Carrizo y Laguna Verde; junto con la evolución del complejo de domos existente. El análisis detallado del comportamiento eruptivo del volcán Azufral, a partir de las evidencias de su registro geológico y estratigráfico conlleva a la identificación de múltiples escenarios de referencia para cada fenómeno volcánico, sin definir uno único, en virtud a las particularidades del estilo eruptivo del volcán. Esta especificidad permitió la identificación, no solo de volcanes de referencia, sino, dentro de la historia eruptiva de estos volcanes, erupciones tipo que se ajustan al comportamiento mostrado por el volcán Azufral. Las erupciones de referencia empleadas como insumo fundamental para la simulación computacional de los fenómenos volcánicos previstos se muestran de manera detallada en las tablas 6, 7, 8. De manera general los volcanes de referencia incorporados al análisis son Pinatubo (Filipinas), Chichón (México), Chaitén (Chile), Vesubio (Italia), Cerro Negro (Nicaragua), Colima (México), Arenal (Costa Rica), Mt. Spurr (Estados Unidos) y Eyjafjallajökull (Islandia). Los escenarios eruptivos potenciales se abordaron para cada fenómeno en el capítulo 7 de Evaluación de la amenaza volcánica.

En actividad eruptiva futura del volcán Azufral, además de erupciones magmáticas, la existencia de la laguna cratérica constituye una condición que puede favorecer la interacción entre el magma en ascenso y el agua de la Laguna Verde (agua externa) posibilitando la ocurrencia de erupciones explosivas freatomagmáticas; en el contexto

de la vulcanología a nivel mundial a este tipo de proceso se le conoce como Molten-Fuel Coolant Interaction (MFCI).

Por otra parte, los escenarios eruptivos presente y posibles aplican cuando el volcán inicie una eventual etapa de “reactivación” (en términos eruptivos) o crisis volcánica, donde la información del monitoreo multiparamétrico en tiempo real juega un papel importante que irá mostrando la evolución de la actividad volcánica.

Tabla 6. Volcanes de referencia en la definición de escenarios eruptivos, base para la parametrización de simulaciones computacionales de caída de piroclastos

Fenómenos	Caída de piroclastos transportados por el viento: ceniza y lapilli				Caída de piroclastos por proyección balística: bloques y bombas	
	Altura de la columna	Masa	Granulometría	Coefficiente difusión	Velocidad	Tamaño proyectiles
VESUBIO 79 AD	18 a 20 km (Macedonio, 2008)	-	-1Φ a 3Φ (Bonasia <i>et al.</i> , 2009)	1000, 2000, 10 000 (Bonasia <i>et al.</i> , 2010)	155 - 840 (Taddeucci <i>et al.</i> , 2017)	0,1 a 2 (Taddeucci <i>et al.</i> , 2017)
CHICHON (abril 1982)	20 km (Espíndola <i>et al.</i> , 2008), 24 - 30 - 32 km (Bonasia <i>et al.</i> , 2012), 24.7 km (Sigurdsson citado Medina, 1987)	-	-4Φ a 4Φ (Bonasia <i>et al.</i> , 2012)	4000 a 10 000 (Bonasia <i>et al.</i> , 2012)	600 (Taddeucci <i>et al.</i> , 2017 y Alvarado <i>et al.</i> , 2006)	0,5 a 1,5 (Taddeucci <i>et al.</i> , 2017 y Alvarado <i>et al.</i> , 2006)
PINATUBO (14-15 junio 1991)	21-24 >30 km (Hoblitt <i>et al.</i> , 1991), 35 km (Paladio <i>et al.</i> , 1996)	0,17 km ³ (Paladio <i>et al.</i> , 1996)	-	-	-	-
CHAITÉN (mayo 30 km)	30 km (Watt <i>et al.</i> , 2009)	0,17 km ³ (Watt <i>et al.</i> , 2009)	-	-	-	-
CERRO NEGRO (1992)	-	-	-4Φ a 4Φ, media 0Φ y SD 1,5Φ (Courtland, 2016)	-	-	-
COLIMA	-	-	-6Φ y 6Φ, media de -0,5Φ y SD de 1,8Φ (Biass <i>et al.</i> , 2017)	-	-	-
MOUNT SPURR (1992)	-	-	-	-	155 - 840 (Taddeucci <i>et al.</i> , 2017)	0,1 a 2 (Taddeucci <i>et al.</i> , 2017)
ARENAL (1968)	-	-	-	-	600 (Taddeucci <i>et al.</i> , 2017 y Alvarado <i>et al.</i> , 2006)	0,5 a 1,5 (Taddeucci <i>et al.</i> , 2017 y Alvarado <i>et al.</i> , 2006)

Fenómenos	Caída de piroclastos transportados por el viento: ceniza y lapilli				Caída de piroclastos por proyección balística: bloques y bombas	
Parámetros	Altura de la columna	Masa	Granulometría	Coefficiente difusión	Velocidad	Tamaño proyectiles
AZUFRAL	20 km	0,172 km ³	-4Φ a 4Φ y media 0,42Φ y SD 1,33Φ	2000	300 a 500 m/s	0.5 a 1

Fuente: autores

Tabla 7. Volcanes de referencia en la definición de escenarios eruptivos, base para la parametrización de simulaciones computacionales de corrientes de densidad piroclástica (CDP) y ondas de choque

Fenómenos	CDP: Flujos Piroclásticos		CDP: Oleadas piroclásticas	Onda de Choque
Parámetros	Volumen	Fricción basal	H/L	Energía
AZUFRAL	0,32 km ³	10°	0,1 a 0,2	3 ± 1,6x10 ¹³ Joules (7,17 ± 3,82 kT)
CHICHON (abril 1982)	-	-	0,1 a 0,2 (Macías <i>et al.</i> , 2008)	
Eyjafjallajökull (2010)	-	-	-	3 ± 1,6x10 ¹³ Joules (7,17 ± 3,82 kT), (Ripepe <i>et al.</i> , 2013 citado por Medici <i>et al.</i> , 2013)

Fuente: autores

Tabla 8. Volcanes de referencia en la definición de escenarios eruptivos, base para la parametrización de simulaciones computacionales de avalanchas de escombros y lahares

Fenómenos	Avalancha de Escombros	Lahares
Parámetros	Volumen	Volumen
AZUFRAL	90 000 000 m ³	Depende de la microcuencia
COLIMA	METODOLOGÍA: Colima (Borselli <i>et al.</i> , 2011)	-

Fuentes: autores

CONCLUSIONES

El volcán Azufral es uno de los volcanes con mayor potencial explosivo del segmento sur de volcanes activos en Colombia, en su historia eruptiva holocénica se identifican 5 unidades eruptivas: La Calera, La Cortadera, El Espino, El Carrizo y Laguna Verde, en cuya evolución se desarrolló un complejo de domos en el sector E del edificio volcánico actual, contiguo a la laguna cratérica.

Para la evaluación de la amenaza volcánica del volcán Azufral, siguiendo la metodología vigente en el SGC, se tomó como base el conocimiento del volcán y de su historia eruptiva, considerando como foco eruptivo para futuras erupciones el área de la laguna cratérica.

Los principales fenómenos considerados en esta evaluación, de acuerdo a la identificación clara de sus depósitos y a la recurrencia mostrada en el transcurso de historia geológica, son: corrientes de densidad piroclástica diluidas (oleadas piroclásticas) y concentradas (flujos piroclásticos de “ceniza y pómez” y de “bloques y ceniza”); caídas de piroclásticos por proyección balística (bloques y bombas volcánicas).

Pese a no contar con un registro geológico claro para algunos fenómenos como caídas piroclásticas por transporte eólico, avalanchas de escombros y *lahares* secundarios, dichos fenómenos fueron contemplados en esta evaluación. Esto en función de la explosividad característica mostrada por este volcán a lo largo de su historia geológica y de la dinámica hidrológica dentro de su zona de influencia. Para el caso de las caídas piroclásticas, cambios en el estilo eruptivo, pueden generar procesos de fragmentación más eficiente y columnas eruptivas de mayor altura (subplinianas a plinianas). Y en relación a los *lahares*, la acumulación en los cauces fluviales de material piroclástico, puede propiciar la obstaculización de dichos cauces y el consecuente represamiento de las corrientes de agua, que al romperse, generan incrementos importantes de los caudales facilitando la movilización del material piroclástico y otros sólidos que el *lahar* vaya arrastrando e incorporando a su paso. Con respecto a las avalanchas de escombros, zonas de susceptibilidad por alteración hidrotermal y por altas pendientes (principalmente hacia el flanco suroriental del volcán), junto con eventuales procesos de deformación volcánica y ocurrencia de sismicidad volcánica y/o tectónica de niveles energéticos importantes, puede propiciar la ocurrencia de colapsos de flanco del edificio volcánico. El fenómeno de generación de ondas de choque, típico de erupciones explosivas y que no deja ningún registro geológico, también fue considerado incluyendo escenarios de referencia.

En las erupciones explosivas además de la ocurrencia de los fenómenos referidos anteriormente, pueden ocurrir fenómenos como: sismos y emisión de gases volcánicos a la atmosfera y que pueden producir grados de afectación dentro de la zona de influencia volcánica, dependiendo de su magnitud y nivel de energía.

Para la evaluación de la amenaza volcánica del volcán Azufral, el escenario eruptivo potencial consideró los escenarios eruptivos pasados definidos a partir de su historia eruptiva holocénica y múltiples escenarios de referencia para cada fenómeno volcánico. Se identificaron no solo volcanes de referencia, sino erupciones tipo de éstos, que se ajustan al comportamiento mostrado por el volcán Azufral.

La zonificación de la amenaza de la actividad eruptiva futura, se adelantará teniendo en cuenta los análisis y resultados del presente informe y a su vez será el insumo para la realización de simulaciones computacionales de los fenómenos volcánicos considerados, cuyos resultados son base para la elaboración de la primera versión del mapa de amenaza volcánica del volcán Azufral.

De acuerdo a la cosmovisión de las comunidades indígenas de la zona de influencia del volcán Azufral, hay un reconocimiento a la existencia del mismo y de su actividad superficial, pero no se cuenta con alusiones o indicios claros que puedan ser interpretados a su actividad eruptiva.

Respecto a la actividad histórica, desde la segunda mitad del siglo XVI, se encontraron alusiones del reconocimiento del Azufral como volcán y de su actividad superficial, especialmente desde el siglo XIX. Particularmente, las descripciones de Humboldt en 1801, dan cuenta de actividad que podría interpretarse como manifestaciones eruptivas menores freáticas o hidrotermales, que pudieron en su momento haber reducido de manera considerable el volumen de agua presente en la Laguna Verde, hasta el punto de ser descrita por Humboldt como una solfatara. A partir de las descripciones de Boussingault de 1831, las manifestaciones de actividad superficial, principalmente del sector del domo Mallama, reportadas por diversos autores, describen rasgos de actividad superficial muy similares a los de la época actual.

El volcán Azufral es monitoreado de manera permanente desde el año 2008, el diagnóstico integral de los diferentes parámetros de monitoreo ha permitido establecer para este volcán un nivel de actividad Verde (IV), definido como un volcán activo con comportamiento estable, de acuerdo a la escala de niveles de actividad del SGC. Desde el inicio del monitoreo, la actividad superficial más importante ha sido registrada en julio de 2009, julio-agosto de 2010, mayo de 2016, junio y agosto de 2017, consistente en

actividad superficial de pequeños flujos de azufre en el sector de la Playita y domo Mallama.

Con el fin aportar a la gestión del riesgo volcánico del volcán Azufra, dado su potencial explosivo es importante, además de contar con la evaluación de la amenaza presentada en este trabajo, garantizar y fortalecer el monitoreo volcánico multiparamétrico, y el diagnóstico integral de su actividad, llevado a cabo por el SGC a través del OVS-Pasto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. (1982). *Alexander Von Humboldt en Colombia. Extractos de sus diarios*. Biblioteca Digital Andina. Consultado el 10 de febrero de 2020, en <https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/23>. 143p.
- Academia Nariñense de Historia. (1967). *Diario de viaje de Don Miguel de Santiesteban de Lima a Caracas 1740-1741 relacionada con la Provincia de Los Pastos*, 7 (50).
- André, É. F. (1884). *América equinoccial (Colombia-Ecuador). América pintoresca: Descripción de viajes al nuevo continente*. 477-859. Barcelona: Montaner y Simon.
- Bechón, F. y Monsalve, M. L. (1991). *Activité Récente Préhistorique du Volcán Azufral (S-W de la Colombie)*. Acad. Sci. Paris. Francia. Tomo 313, Serie II, pp. 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., Connor, L. (2016). TephraProb: a Matlab package for probabilistic hazard assessments of tephra fallout. *Journal Appl. Volcanol*, 5 (10). <https://doi.org/10.1186/s13617-016-0050-5>.
- Bonadonna, C., Connor, C., Houghton, B., Connor, L., Byrne, M., Laing, A., Hincks, T. (2005) Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal Geophysics Research*, 110 (B3).
- Bonadonna, C., Folch, A., Loughlin, S., 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) pp. 1-10.
- Boussingault, J. B. (1849). *Viajes científicos a los Andes ecuatoriales o colección de memorias sobre física, química é historia natural de la Nueva Granada, Ecuador y Venezuela*. Traducción por J. Acosta. París, Francia: Librería Castellana 2, calle Saint Germain Des Prés Disponible en línea en: <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/9506>
- Boussingault, J. B. (1903). *Memorias*. Chamerot et Renouard, Paris. Ed. Banco de la República, 1985, Bogotá, 5 vol.
- Branney, M. J. y Kokelaar. P. (2003). *Piroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites*. Geological Society, London, Memoirs, 27, 121 p.
- Browne, P. (1997). *Hydrothermal alteration*. Geothermal Institute. The University of Auckland.
- Burbano, V. (2015). *Modelo Conceptual de La Laguna Verde del Volcán Azufral 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 Azufral*. XV Congreso Colombiano de Geología. Bucaramanga. Poster.
- Cabildo Indígena de Túquerres. (2009). *Plan de Justicia y Vida para el Resguardo Indígena de Túquerres*. 148p. Disponible en línea en: https://siic.mininterior.gov.co/sites/default/files/plan_de_justicia_y_vida_para_e_ri_de_tuquerres_2009.pdf
- Calder, E., Lavalley, Y., Kendrick, J. y Bernstein, M. (2015). *Lava Dome Eruptions*. Encyclopedia of Volcanoes. Second edition. Academic Press. ISBN: 978-0-12-385938-9
- Calvache, M. L., Cortés, G. P., Torres, M. P. y Monsalve, M. L. (2003). *Geología y estratigrafía del volcán Azufral*. Bogotá: Ingeominas.
- Carey, S. y Bursik, M. (2000). *Volcanic plumes*. Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, p.p. 527-544.
- Carvajal, D., Alfaro, C., Molano, C., Romero, D. y Mojica, J. (2008). *Contribución al Modelo Geotérmico del Volcán Azufral a partir de identificación de zonas de Alteración Hidrotermal*. Geología Colombiana No. 33, pp. 99-108. Bogotá. ISSN 0072-0992.
- Cas, R. A. F. y Wright, J. V. (1987). *Volcanic Successions, Modern and Ancient*. Allen and Unwin Ltd. London.
- Castilla, S. C., Pardo, N., Larrea, P., Zuluaga, C. A., Sarmiento, S., Noguera, D. y Sarmiento, G. A. (2019). Pre-eruptive conditions and pyroclastic emplacement of the last known vulcanian eruption of Azufral Volcano, SW Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 91 august, 372- 386. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.08.007>
- Clarke, A. B., Ongaro, T.E. y Belousov, A. (2015). *Vulcanian Eruptions*. Encyclopedia of volcanoes, Second Edition. Academic Press. Doi: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00028-6
- 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]. Do: 48.411.
- Connor, L, 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. (2013). *Plan de ordenamiento del recurso hídrico río Sapuyes*. Disponible en línea en: https://www.corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/po_rhriosapuyes.pdf
- Corponariño. (2016). *Plan de acción institucional 2016 -2019*. Disponible en línea en: <https://corponarino.gov.co/corporacion/planificacion-ambiental/pai/>
- Corponariño. (2018). *Declaratoria del Parque Natural Regional volcán Azufral-Chaitán*. Disponible en línea en: <http://corponarino.gov.co/wpcontent/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.
- Cortés, G. P., Calvache, M. L., Monsalve, M. L. y Torres, M. P. (2001). *Depósitos de oleadas de piroclastos vs. depósitos de caída piroclástica del estrato Volcán Azufral, Colombia*. VIII Congreso Colombiano de Geología. Memorias. Manizales.
- Cortés, G. P., Calvache, M. L. y Murcia H. F. (2009). *Mapa de Amenaza del Volcán Azufral*. 27 p. Manizales: Ingeominas. No publicado.
- 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 y retroproyecciones 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/proyeccionesdepoblacion/Municipal/anexo-proyecciones-poblacion-Municipal_Area_2018-2035.xlsx
- 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 (10), 10267-10283.
- 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, pp. 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.
- Gómez, D. y Ponce, P. (2009). *Informe de visita técnica al volcán Azufral – Laguna Verde Departamento de Nariño*. Informe interno. Ingeominas, agosto.
- Gómez, D., López Vélez, C. M., Monsalve Bustamante, M. L., Agudelo Restrepo, A. del P., Cortés Jiménez, G. P. y Calvache Velasco, M. L. (2021). Active volcanism in Colombia and the role of the Servicio Geológico Colombiano. *Volcanica*, 4(1), 113–139. doi: 10.30909/vol.04.S1.113139.

- Gutiérrez, M. (2019). *Claves para entender el mecanismo de fragmentación en una de las erupciones más recientes del volcán de Azufral (Nariño), Colombia*. Tesis de Pregrado Universidad de Los Andes, Bogotá.
- 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.
- Ingeominas (Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras). (2010). *Informe mensual de actividad del Volcán Galeras y de los volcanes Doña Juana, Cumbal y Azufral*. 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.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Asociación Shaquiñan. (2012). *Agenda ambiental en el territorio del Nudo de la Wuaka o de Los Pastos para la permanencia de la vida y la cultura – Shaquilulo*. 66 p. Disponible en línea en: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/ordenamiento-ambiental-territorial-y-coordinacion-del-sina/agendas-ambientales/pueblo-indigena-pastos-del-nudo-de-los-pastos-narino>
- Monsalve, M. L. (2020). *The volcanic front in Colombia: Segmentation and recent and historical activity*. Gómez, J. y Pinilla–Pachón, A. O. (editors), *The Geology of Colombia*, Volume 4 Quaternary. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, 97- 159. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.03>
- Moreno, A. (2018). *Caracterización geológica de un depósito de avalancha de escombros localizado al nororiente del volcán Azufral (Nariño, Colombia)*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- Moreno A., Sánchez, J. y Murcia, H. (2021). Evidences of an unknown debris avalanche event (<0.58 Ma), in the active Azufral volcano (Nariño, Colombia). *Journal of South American Earth Sciences* (107). September.
- Muñoz, L. I., Ágreda, E., Ruano, E. A., Tarapué, 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). Pasto.
- Nelson, W. (1957). Contribution to geology of the Central and Western Cordillera of Colombia in the sector between Ibagué and Cali. *Leidse Geol. Meded (Leiden)*, 22, 1 – 76.
- OLADE (Organización Latinoamericana de Energía). (1982). *Estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Colombia*. Informe final. Ingeominas, 1985. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia. (CEGOC) XXI, Bogotá.

- 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.
- Pulgarín, B., Navarro, S., 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.
- Pulgarín, B. y Zuluaga, I. (2019). *Evaluación de la amenaza volcánica del volcán Sotará*. Popayán y Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- 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), Ediciones Sol y Luna, Bogotá. Disponible en línea en: <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/geografia/colomb/colom4.htm>
- Rodríguez Guerrero, I. (1958). *Estudios Geográficos del Departamento de Nariño*. Imprenta Departamental. Pasto.
- Sañudo, J. R. (1897). *La Colonia en el Siglo XVII*. En: Apuntes sobre la Historia de Pasto, 2da Parte, Tipografía de Alejandro Santander. Pasto. p.33.
- Schilling, S. P. (1998). *LaharZ, GIS programs for automated mapping of lahar inundation hazard zones*: U.S. Geological Survey Open File Report 98638, 80. Disponible en línea en: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr98638>.
- Sarmiento, S. (2017). *Mecanismos de transporte y acumulación de los depósitos más recientes del volcán Azufral*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano) y UdC (Universidad de Caldas). (2015). *Memoria explicativa del mapa de geomorfología aplicado a movimientos en masa escala 1:100 000, plancha 428, Túquerres, Departamento de Nariño*. Convenio Especial de Cooperación No 036 de 2013. Manizales.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2016). *Informe mensual de actividad de los volcanes Galeras, Cumbal, Chiles – Cerro Negro, Las Ánimas, Doña Juana y Azufral, mayo 2017*. Disponible en <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Informes%20tcnicos/Mayo%20de%202016.pdf>
- SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2017). *Procedimiento de Evaluación de la Amenaza Volcánica*. Versión 5. Disponible en línea en: <https://srv-iso.sgc.gov.co/Isolucion/Administracion/frmFrameSet.aspx?Ruta=Li4vRnJhbWVWTZXRBCnRpY3Vsby5hc3A/UGFnaW5hPUJhbmNvQ29ub2NpbWllbnRvNFNHQ1Byby9GLOY2Njk2OTY3LUUzRUUtNEZCQS1BNEYyLTNfQzczMkNGRTcwMi9GNjY5Njk2Ny1FM0VFLTRGQkEtQTRGMi0zRUM3MzJDRkU3MDIuYXNwJkIEQVJUSUNVTE89MTM1OTQ=>

- SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2017b). *Informe mensual de actividad de los volcanes Galeras, Cumbal, Chiles – Cerro Negro, Las Ánimas, Doña Juana y Azufral, agosto 2017*. Disponible en línea en: https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Informes%20tcnicos/informe_tecnico_volcanes_del_sur_ago_2017.pdf
- SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2021). *Informe mensual de actividad de los volcanes Galeras, Cumbal, Chiles – Cerro Negro, Las Ánimas, Doña Juana y Azufral. Noviembre*. Disponible en línea en: https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Informes%20tcnicos/Informe_tecnico_volcanes_del_sur_nov_2021.pdf
- Siebert, L. (1984). Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 22, 163–197.
- Sistema de Información Turística de Nariño - SITUR. (2020). *Atractivos turísticos de Nariño*. Disponible en línea en: <https://siturnarino.com/attractivos-turisticos/parque-natural-regional-volcan-azufral>
- 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.
- Torres, P., Calvache, M. L., Cortés, G. P. y Monsalve, M. L. (2003). *Propuesta estratigráfica para la definición formal de la Formación Azufral, Colombia*. IX Congreso Colombiano de Geología. Memorias, 96–97. Medellín.
- UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres), SGC (Servicio Geológico Colombiano) y OCYT (Observatorio Colombiano en Ciencia y Tecnología). (2018). *Volcán Riesgo y Territorio. El Volcán es Beneficio*. Disponible en línea en: http://www.volcanriesgoyterritorio.gov.co/images/conociendo_volcan/beneficio/beneficio_paisaje.pdf
- Uribe, J. (2015). *Una Esmeralda entre Las Nubes*. Sección Tendencias, Revista Semana Sostenible Disponible en línea en: <https://sostenibilidad.semana.com/tendencias/articulo/volcan-azufral-narino-una-esmeralda-entre-nubes/33407>
- 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.
- Vergara y Velasco, F. J. (1910). *Atlas Completo de Geografía Colombiana*. Imprenta eléctrica. Bogotá. Disponible en línea en: https://bibliotecanacional.gov.co/es-co/colecciones/biblioteca-digital/mapoteca/Documents/912.86_v37v35a.pdf
- Villamil, E. (2018). *Mecanismos de fragmentación, transporte y acumulación de la unidad La Cortadera del volcán Azufral, Nariño*. Tesis Universidad de Los Andes, Bogotá.
- Volentik, A., Connor C., Connor L., 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, pp. 545-554.
- Williams, M. (2015). *Eruption History and Pyroclastic Flow Modeling at Azufral Volcano, Colombia*. University at Buffalo.
- Williams, M., Bursik, M. I., Cortés, G. P. y García, A. M. (2017). Correlation of eruptive products, Volcano Azufral, Colombia: Implications for rapid emplacement of domes and pyroclastic flow units. *Journal Volcanology Geotherm. Res*, 341, 21-32.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización volcán Azufral	10
Figura 2. Panorámicas del volcán Azufral	11
Figura 3. Cuencas y microcuencas hidrográficas e hidrología alrededor del volcán Azufral	12
Figura 4. Municipios en la zona de influencia volcánica	15
Figura 5. Parque Natural Regional Volcán Azufral-Chaitán	18
Figura 6. Volcán Azufral, cráter y laguna verde	19
Figura 7. Laguna Verde	20
Figura 8. Sabana de Túquerres	21
Figura 9. Mapa Geológico del volcán Azufral	34
Figura 10. Columna estratigráfica generalizada para el volcán Azufral	35
Figura 11. Unidades geológicas holocénicas del volcán Azufral	36
Figura 12. Afloramiento de la unidad eruptiva El Espino	38
Figura 13. Afloramiento de la unidad eruptiva El Carrizo	39
Figura 14. Complejo de domos volcán Azufral	41
Figura 15. Diario de viaje de Don Miguel de Santiesteban de Lima a Caracas- 1740-1741	44
Figura 16. Viajes científicos a los Andes Ecuatoriales (portada)	48
Figura 17. Laguna Verde en el volcán Azufral, dibujo de Riou en 1850	49
Figura 18. Laguna cratérica y localización del domo Mallama	49
Figura 19. Sector de La Playita al N de la laguna cratérica	52
Figura 20. Sector del domo Mallama	53
Figura 21. Laguna verde de la expedición de Rodríguez Guerrero	54
Figura 22. Red de monitoreo y vigilancia volcánica	56
Figura 23. Histograma del número de eventos volcánicos por tipo entre mayo de 2009 y diciembre de 2021	56
Figura 24. Localización epicentral e hipocentral de sismos de fractura con magnitud local > 2	57
Figura 25. Emisión de gases al noroeste de la Laguna Verde Azufral	58
Figura 26. Depósito en el sector La Playita – Laguna Verde	59
Figura 27. Mapa Geomorfológico del volcán Azufral	63
Figura 28. Detalle del mapa Geomorfológico del volcán Azufral	65
Figura 29. Detalle del mapa Geomorfológico del volcán Azufral	67
Figura 30. Geomorfología del volcán Azufral	68
Figura 31. Geología Estructural	71
Figura 32. Distribución espacial de la alteración hidrotermal reconocida en el volcán Azufral	73
Figura 33. Estructuras, complejo de domos y mapa de pendientes	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Municipios y habitantes en zona de influencia proximal del volcán Azufral	13
Tabla 2. Municipios y habitantes en zona de influencia distal del volcán Azufral	14
Tabla 3. Unidades eruptivas en el volcán Azufral para los últimos 20 000 años	36
Tabla 4. Compilación de resultados de dataciones de ¹⁴ C calibradas para el volcán Azufral	62
Tabla 5. Características de caídas piroclásticas en volcanes con erupciones subplinianas a plinianas	78
Tabla 6. Volcanes de referencia en la definición de escenarios eruptivos, base para la parametrización de simulaciones computacionales de caída de piroclastos	86
Tabla 7. Volcanes de referencia en la definición de escenarios eruptivos, base para la parametrización de simulaciones computacionales de corrientes de densidad piroclástica (CDP) y ondas de choque	87
Tabla 8. Volcanes de referencia en la definición de escenarios eruptivos, base para la parametrización de simulaciones computacionales de avalanchas de escombros y <i>lahares</i>	87