



**Mapa de amenaza volcánica del Complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro
Memoria Explicativa**

Pasto, diciembre de 2023





Dirección de
Geoamenazas

Servicio Geológico Colombiano

Julio Fierro Morales

Director general

John Makario Londoño Bonilla

Director técnico de Geoamenazas

Nathalia María Contreras Vásquez

Coordinadora del Grupo de Evaluación de la Amenaza y el Riesgo Geológico

Autores

Gloría Patricia Cortés Jiménez

María Luisa Monsalve Bustamante

Paola Andrea Narváez Obando

Carlos José Muñoz Montoya

Grupo de trabajo: Evaluación de la Amenaza y el Riesgo Geológico

Proyecto: Evaluación de amenazas y riesgos geológicos

Citación: Cortés, G. P., Monsalve, M. L., Narváez, P. A. y Muñoz, C. J. (2023). *Mapa de amenaza volcánica del Complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro - Memoria explicativa*. Pasto: Servicio Geológico Colombiano.



© Servicio Geológico Colombiano. (2023). Esta obra es distribuida bajo licencia internacional Creative Commons atribución/reconocimiento 4.0

Contenido

Resumen	4
Abstract	5
Introducción	6
1. Generalidades	7
1.1. Localización, vías de acceso y drenajes	7
1.2. Metodología	8
1.3. Trabajos anteriores	9
2. Registro geológico e histórico del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro	11
2.1. Registro geológico	11
2.2. Registro histórico	15
3. Amenaza volcánica	17
3.1. Amenaza por avalancha de escombros	18
3.2. Amenaza por corrientes de densidad piroclástica (flujos y oleadas piroclásticas)	19
3.3. Amenaza por lahares (flujos de lodo volcánico)	20
3.4. Amenaza por caída de piroclastos	22
3.4.1. Amenaza por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos	22
3.4.2. Amenaza por caída de piroclastos por proyección balística	23
3.5. Amenaza por flujos de lava	24
3.6. Gases volcánicos	25
3.7. Onda de choque	26
3.8. Sismos volcánicos	26
4. Escenarios eruptivos	27
4.1. Actividad efusiva	27
4.2. Actividad explosiva	27
4.3. Actividad freática - freatomagmática	28
5. Estado actual del volcán	29
6. Zonificación de la amenaza volcánica: mapa de amenaza	35
6.1. Leyenda explicativa de la amenaza del marco principal del mapa de amenaza del CVCCN	36
6.2. Leyenda explicativa de la zonificación de la amenaza por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos	37
6.3. Leyenda explicativa de la amenaza por lahares	39
Conclusiones y recomendaciones	41
Referencias	43

Resumen

El Complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro (CVCCN), está localizado en la frontera colombo - ecuatoriana, en inmediaciones del departamento de Nariño (Colombia) y la provincia del Carchi (Ecuador). Este complejo está compuesto por dos estratovolcanes colapsados, Chiles y Cerro Negro, los cuales alcanzan una altura máxima de 4748 m s.n.m. y 4450 m s.n.m., respectivamente, y el domo Panecillo de Tufiño localizado al oriente del volcán Chiles. Dataciones menores a 10 000 años en algunos depósitos, reportes sobre actividad eruptiva menor, especialmente hacia el sector de las Lagunas Verdes, que posiblemente se presentaron en épocas prehispánicas e históricas, la presencia de fuentes termales y solfataras han permitido considerar estos volcanes como activos, lo cual es confirmado tanto por el incremento en la actividad sísmica registrada desde el año 2013 e intensificada en los años 2014 y 2022, como por la deformación en el complejo, la cual se acentúa recientemente en el volcán Chiles y los cambios en las fuentes termales. El CVCCN cuenta con monitoreo de su actividad, por parte del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), para lo cual se utilizan técnicas de sismología, geoquímica, geodesia y observación de la actividad superficial. A partir de mayo del 2014, basados en los registros de la red instrumental instalada, el nivel de actividad del CVCCN cambió de amarillo (II) a naranja (III), lo cual impulsó el proceso de actualización de los mapas de amenaza volcánica vigentes, elaborados por Ingeominas (hoy SGC) en 1997 (primera versión de los mapas de amenaza para el volcán Chiles y para el volcán Cerro Negro). Una vez se retornó al nivel de actividad amarillo, la actualización se inició con una revisión binacional de la geología y la amenaza, complementadas con simulaciones computacionales de los productos volcánicos que dio como resultado la presentación del mapa de amenazas potenciales del complejo volcánico por parte del Ecuador y la actualización de los mapas de amenaza de los volcanes Chiles y Cerro Negro por parte de Colombia. Con el fin de tener una versión unificada de la presentación de los mapas de amenaza en los dos países, se integran los mapas de amenaza de los volcanes Chiles y Cerro Negro y se presenta la versión del mapa de amenaza del CVCCN, en el cual se consideran como focos o puntos de emisión, las partes altas de los volcanes Chiles y Cerro Negro. De acuerdo con el conocimiento del comportamiento eruptivo del complejo, las erupciones que podrían presentarse serían de carácter efusivo con emisiones de lavas y formación de domos, estos últimos podrían inducir a actividad de tipo explosivo por su destrucción. Adicionalmente podrían generarse corrientes de densidad piroclástica y caída de piroclastos y a partir de la removilización de material depositado en las cuencas de los ríos y quebradas alrededor de los volcanes se podrían también generar lahares (flujos de lodo volcánico), otros fenómenos que pueden ocurrir son ondas de choque, sismos volcánicos y emisión de gases. Las áreas que podrían ser afectadas por estos fenómenos se presentan como zonas de amenaza alta, media y baja: la zona de amenaza alta sería potencialmente afectada por uno o varios de los fenómenos antes mencionados, dentro de esta zona se encuentran poblaciones como Tufiño en el Ecuador, Chiles en Colombia y las poblaciones en los valles de los ríos Mayasquer, San Juan, Játiva o Alumbre y Carchi. En las zonas de amenaza media y baja se presentarían principalmente fenómenos de caída de piroclastos, ondas de choque, emisión de gases y sismos volcánicos, cuyos efectos en cada zona dependerá del tamaño de la erupción y la distancia al foco eruptivo.

Abstract

The Chiles - Cerro Negro Volcanic Complex (CHCNCV) is located on the Colombian-Ecuadorian border, in the vicinity of the department of Nariño (Colombia) and the province of Carchi (Ecuador). This complex is made up of the collapsed stratovolcanoes Chiles and Cerro Negro, which reach a maximum height of 4748 m a.s.l. and 4450 m a.s.l., respectively, and the Panecillo de Tufiño dome located to the east of the Chiles volcano. Dates of less than 10,000 years in some deposits, reports on minor eruptive activity, especially towards the Lagunas Verdes sector, which possibly occurred in pre-Hispanic and historical times, the presence of hot springs and solfataras have allowed these volcanoes to be considered active, which is confirmed by the increase in seismic activity registered since 2013 and intensified in 2014 and 2022, the deformation in the complex, which has recently been accentuated in the Chiles volcano and the changes in the hot springs around the volcanoes. The CVCCN activity is monitored, both by the Colombian Geological Service (SGC), and by the Geophysical Institute of the National Polytechnic School of Ecuador (IG-EPN), by seismology, geochemistry, geodesy techniques and surface activity observation. In May 2014, based on the records of the installed instrumental network, the level of activity of the CVCCN changed from yellow (II) to orange (III), which prompted the process of updating the current volcanic hazard maps prepared by Ingeominas (today SGC) in 1997 (first version of the threat maps for the Chiles volcano and for the Cerro Negro volcano). Once the yellow activity level was returned, the update began with a binational review of the geology and the threat, complemented with computer simulations of the volcanic phenomena that resulted in the presentation of the potential hazard map of the Volcanic Complex by the Ecuador and the updating of the hazard maps of the Chiles and Cerro Negro volcanoes by Colombia. In order to have a unified version of the presentation of the hazard maps in the two countries, the hazard maps of the Chiles and Cerro Negro volcanoes are integrated and the version of the CVCCN hazard map is presented, in which the high parts of the Chiles and Cerro Negro volcanoes are considered the vents or points of emission. According to the knowledge of the eruptive behavior of the complex, the eruptions that could occur would be effusive with lava emissions and formation of domes, the former could induce explosive-type activity due to their destruction. Additionally, and considering the geological evolution of the volcanoes, the generation of pyroclastic density currents and pyroclastic falls are considered. Lahars (volcanic mudflows) can be generated from the remobilization of material deposited in river basins and ravines around volcanoes. Other phenomena that can occur are shock waves, volcanic earthquakes and gas emissions. The areas that could be affected by these phenomena are presented as high, medium and low threat zones: the high threat zone would be potentially affected by one or several phenomena, within this zone there are populations such as Tufiño in the Ecuador, Chiles in Colombia and the populations in the valleys of the Mayasquer, San Juan, Játiva or Alumbre and Carchi rivers. In the medium and low threat zones, pyroclastic falls, shock waves, gas emission and volcanic earthquakes would mainly occur, the effects of which in each zone will depend on the size of the eruption and the distance to the eruptive vent.

Introducción

En Colombia, el concepto de amenaza volcánica se desprende y adapta de la definición general de amenaza considerado en la Ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. De acuerdo con la Ley 1523 de 2012, la amenaza es definida como “El peligro latente de que un evento (en este caso de origen volcánico) se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales” (Congreso de Colombia, 2012).

En mayo de 2014, el CVCCN cambió su nivel de actividad (actualmente Estado de alerta) de amarillo (II) a naranja (III), basados en los registros de la red instrumental instalada, donde se evidenciaron cambios en la ocurrencia y energía de la sismicidad, la cual se asoció a sismos tipo volcano-tectónicos (VT) y variaciones en la deformación volcánica. Se resalta el evento sísmico presentado el 20 de octubre del mismo año, de magnitud 5,8 Mw, con profundidad de 10 km, reportado como sentido por habitantes en poblaciones del sur de Colombia y norte del Ecuador.

El cambio de nivel para estos volcanes precisó el proceso de actualización de los mapas de amenaza volcánica vigentes hasta esa fecha por parte de los organismos encargados en Colombia y Ecuador.

Esta memoria está organizada en siete capítulos en los cuales se abordan diferentes ejes temáticos que se describen brevemente a continuación:

Capítulo 1. Generalidades, tiene como finalidad ubicar al lector en la zona de estudio, definiendo algunos aspectos generales del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro.

Capítulo 2. Trata aspectos relacionados con el registro geológico e histórico del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro.

Capítulo 3. Aborda la amenaza volcánica en general y por fenómeno, de acuerdo con la actividad eruptiva de los volcanes Chiles y Cerro Negro.

Capítulo 4. Se enfoca conceptualmente en los escenarios eruptivos.

Capítulo 5. Se describe el estado actual del volcán a partir de la actividad de los últimos 10 años.

Capítulo 6. Zonificación de la amenaza volcánica, en este apartado se hace referencia al mapa de amenaza volcánica.

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones generales.

1. Generalidades

El Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro (CVCCN) está localizado al norte del Ecuador (Provincia del Carchi) y al suroccidente de Colombia (departamento de Nariño); está constituido por los estrato volcanes contiguos Chiles y Cerro Negro, con una distancia entre sus cimas de 4 km y el domo Panecillo de Tufiño localizado al SE del volcán Chiles.

Este complejo está enmarcado en dos sistemas de fallas principales: falla Chiles - Cumbal con dirección NE-SW y falla Chiles - Cerro Negro con dirección NW-SE. Los edificios volcánicos presentan colapsos hacia el norte en el caso del volcán Chiles, y hacia el occidente en el caso del volcán Cerro Negro (Cortés y Calvache, 1996).

La actividad del complejo volcánico ha sido principalmente de tipo efusivo, aunque también presenta registro de actividad explosiva, que han generado depósitos de flujos piroclásticos y otros depósitos de corriente de densidad piroclástica, asociados principalmente a freatomagmatismo (Cortés y Calvache, 1996).

El número de identificación del CVCCN en la clasificación mundial de volcanes es 351110 de acuerdo con el listado del Global Volcanism Program (Smithsonian Institution, 2014).

1.1. Localización, vías de acceso y drenajes

El CVCCN está localizado en las coordenadas geográficas 00°49' 02" de latitud N y 77° 56'08" de longitud W (volcán Chiles) y 00° 49'50" de latitud N y 77° 57'51" de longitud W (volcán Cerro Negro), a una altitud de 4748 y 4470 m s.n.m. respectivamente; el complejo se encuentra en el dominio de la Cordillera Occidental de Colombia. Se localiza a 20 km al SW de la cabecera municipal de Cumbal, 86 km al SW de la ciudad de San Juan de Pasto (capital del departamento de Nariño) y a 596 km al SW de Bogotá D. C. (capital de Colombia) (figura 1). El CVCCN es vigilado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) a través del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto y por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (IG-EPN).

El acceso al complejo se realiza por los carretables desde la población de Chiles hacia San Felipe en el sector El Tambo (Colombia) y desde la población de Tufiño hasta Maldonado (Ecuador). El ascenso a las partes altas de los volcanes se realiza por numerosos caminos en la región.

Los ríos y quebradas que nacen en la parte alta del CVCCN son: hacia el E las quebradas Los Colorados y Capote, ríos Chiles y Játiva - Alumbre, que desembocan al río Grande, que da formación al río Guáitara o Carchi; hacia el NW el río Blanco o Mayasquer, Cainacán y las quebradas El Tambo, Cucha La Grande; al W y SW las quebradas La Buitrera y Potreritos, que a su vez forman el río Chilmá, que, junto al río de La Plata, forman el río San Juan, afluente del río Mira (figura 1).

En las proximidades del complejo volcánico están localizadas poblaciones rurales y casco urbano de los municipios de Cumbal, con una población cercana a los 40 000 habitantes (cabecera municipal a 20 km al NE del CVCCN), Cuaspud con una población cercana a los 10 000 habitantes (cabecera municipal 26 km al E-NE del CVCCN), Aldana con una población cercana a los 8000 habitantes (cabecera municipal a 30 km al E-NE del CVCCN) y Guachucal con una población cercana a los 20 000 habitantes (cabecera municipal a 30 km al NE del CVCCN) (DANE, 2018).

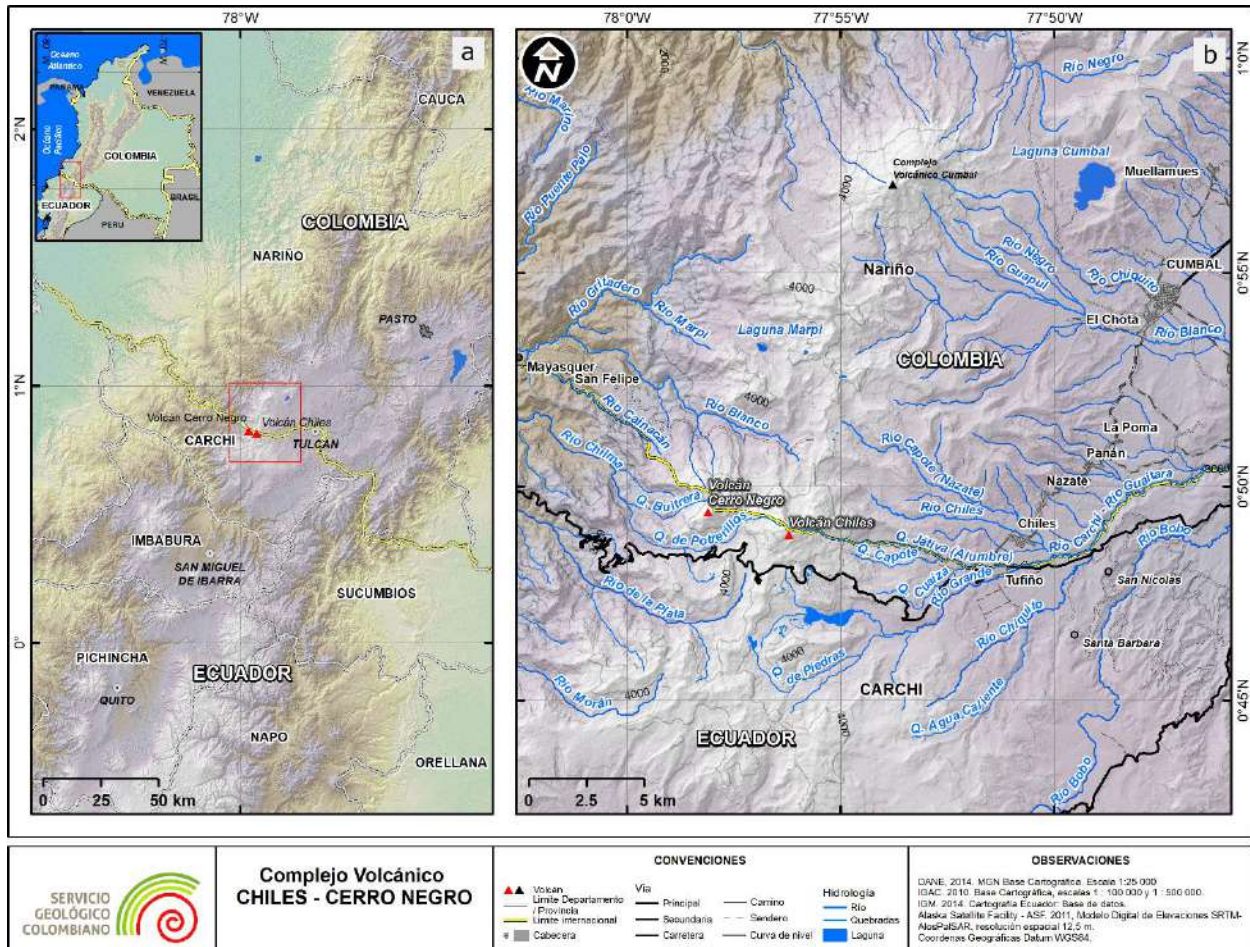


Figura 1. Localización del CVCCN

a) Entorno geográfico del departamento de Narino; b) localización del CVCCN, casco urbano del municipio de Cumbal, vías de acceso y drenajes.

1.2. Metodología

La actualización del mapa de amenaza del CVCCN, debido al incremento de nivel de actividad, tuvo como base los trabajos sobre información geológica existente (Cortés y Calvache, 1996; 1997). Adicionalmente, se llevó a cabo una revisión de campo de los principales depósitos asociados a la actividad del complejo para obtener datos complementarios a utilizar en las simulaciones computacionales.

Por tratarse de volcanes ubicados en el límite fronterizo entre Colombia y Ecuador, se realizaron reuniones binacionales entre el SGC y el IGEPN para revisar la información y, en un trabajo concertado, se evaluó la amenaza del CVCCN; se realizaron simulaciones computacionales de los fenómenos volcánicos asociados, para delimitar las zonas de amenaza y la representación de las mismas, respetando algunos aspectos específicos de las metodologías y forma tradicional de presentación final de los mapas en cada país.

Las simulaciones computacionales de los diferentes fenómenos volcánicos contaron con el acompañamiento técnico de VHUB (Collaborative Volcano Research and Risk Mitigation). Se utilizaron las herramientas LAVA PL (Connor *et al.*, 2012) para flujos de lava; TITAN2D (Patra *et al.*, 2005) para corrientes de densidad piroclástica; TEPHRA2 (Bonadonna *et al.*, 2005) para caídas de piroclastos transportados

eólicamente; GET WIND (Courtland, 2015) para perfiles de viento; Eject! (Mastín, 2001) para caída de piroclastos por proyección balística y LaharZ_py (Iverson *et al.*, 1998; Schilling *et al.*, 1998) para lahares.

1.3. Trabajos anteriores

Los primeros trabajos conocidos sobre los volcanes Chiles y Cerro Negro estuvieron encaminados a estudiar el potencial de azufre en las tobas de la región (Torres, 1982).

Posteriormente, los volcanes Chiles y Cerro Negro fueron objeto de investigaciones geotérmicas, tanto por parte de Colombia como de Ecuador, los cuales definieron de una manera general su evolución geológica y proponen que los centros volcánicos que lo conforman estarían alimentados por una cámara magmática común, razón por la cual los volcanes Chiles y Cerro Negro son considerados como un complejo volcánico. Estos estudios presentan el primer modelo geotérmico para el área (INECEL, Geotérmica Italiana SRL y Olade, 1982; ICEL, 1983; Olade, 1987) y adicionalmente reportan la ocurrencia de al menos tres cráteres de explosión hidrotermal.

Coviello (2000) resume el Modelo geotérmico preliminar del área de Tufiño-Chiles-Cerro Negro I constituido por “una intrusión de magma a una profundidad relativamente somera (fuente de calor); una formación de rocas permeables que aloja a un acuífero confinado y caliente (reservorio), y una capa de rocas impermeables que forman el sello hidráulico y actúan como aislante térmico para impedir la irradiación del calor acumulado en el reservorio” (Coviello, 2000).

Cortés y Calvache (1996) llevaron a cabo el estudio geológico de los volcanes Chiles y Cerro Negro, encaminados a la elaboración de los primeros mapas de amenaza volcánica de estos volcanes, reconocieron el predominio de la actividad efusiva de los volcanes y la similitud en la composición y evolución de sus productos. Identificaron un importante depósito de flujo piroclástico asociado a la actividad del volcán Cerro Negro y el control estructural del complejo ejercido por sistemas de falla de dirección NNE-SSW y NW-SE.

Debido a la reactivación del complejo volcánico en 2014, marcada por el incremento de la actividad sísmica, el SGC y IG-EPN, además de aunar esfuerzos para la vigilancia interinstitucional del complejo volcánico, llevaron a cabo la actualización de los mapas de amenaza volcánica de los volcanes Chiles y Cerro Negro (SGC, 2014a; 2014b).

Sierra (2015) analizó los sismos registrados entre enero y octubre de 2014 en el área del complejo volcánico, con el fin de caracterizar el estado de esfuerzos de la zona, encontrando una distribución bimodal de dirección E-W y N-S, las cuales atribuye a esfuerzos tectónicos locales y a una intrusión magmática, respectivamente.

Bocanegra y Sánchez (2017) realizaron la compilación de un mapa de fallas y lineamientos en la región del CVCCN y proponen nuevos lineamientos en el área. Reconocen dos tendencias principales con orientación: SE-NW (sistema transversal predominante) y SW-NE (sistema longitudinal).

A pesar de no existir reportes precisos sobre la actividad eruptiva histórica en el CVCCN, Monsalve y Laverde (2016) llevaron a cabo la recopilación de documentos cuyos reportes fueron interpretados, por los autores, como signos de actividad eruptiva menor desde épocas prehispánicas tanto en volcán Chiles, hacia el sector de Laguna Verde, como en el anfiteatro del volcán Cerro Negro.

Santamaría *et al.* (2017) llevaron a cabo el análisis de componentes litológicos y dataciones radiométricas de 12 capas de cenizas volcánicas obtenidas por medio de una perforación en la turbera de Potrerillos, en el área de complejo, descartando la posibilidad de que algunos de estos niveles estuvieran asociados a la actividad de los volcanes del CVCCN.

Estudios geológicos más detallados y modelo evolutivo del volcán Chiles, se presentan por Telenchana (2017) quien describe dos unidades litoestratigráficas mayores, desarrollados desde hace aproximadamente 600 ka AP, con un periodo de inactividad entre ellas de aproximadamente 200 ka, cada una con tres subunidades donde se evidencia una evolución desde una composición andesítica a dacítica - riolítica. Por su parte Telenchana *et al.* (2017) presentan el modelo evolutivo del volcán Chiles, desde productos basálticos a riodacíticos.

Rodríguez y Córdoba (2018) presentan la posible afectación por lahares de la población de Panan en el área de influencia del CVCCN, mediante la evaluación probabilista de la amenaza por este fenómeno, usando la herramienta computacional TITAN2F, y la evaluación cuantitativa del riesgo.

García y Sánchez (2019) contribuyen al modelo geotérmico del área con el aporte de datos sobre litología, parámetros geotécnicos de las rocas en el área y sobre el sistema hidrológico. Concluyen que la variabilidad litológica y estructural influyen la permeabilidad regional y local y que en general se favorece la circulación de fluidos acuosos entre las áreas de recarga y descarga del sistema geotérmico).

2. Registro geológico e histórico del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro

En este apartado se abordarán relacionados con la actividad eruptiva desde el registro geológico e histórico.

2.1. Registro geológico

Los volcanes Chiles y Cerro Negro se consideran un complejo volcánico. Los primeros estudios, enfocados en la exploración geotérmica, indicaron una cámara magmática somera común, razón por la cual los productos emitidos por estos volcanes son similares (ICEL, 1983; Olade, 1987).

Para los volcanes Chiles y Cerro Negro, ICEL (1983), propone tres fases en su evolución mientras que Cortés y Calvache (1996) diferencian seis episodios los cuales han sido designados con números del 1 al 6 de acuerdo con su edad relativa. La figura 2 corresponde al mapa geológico de los volcanes Chiles y Cerro Negro elaborado por Cortés y Calvache (1996). La actividad del complejo ha sido principalmente de tipo efusivo, la evidencia de actividad explosiva se restringe a un evento en el volcán Cerro Negro y algunos remanentes de depósitos con fragmentos escoriáceos, identificados en las revisiones de campo para la actualización de los mapas de amenaza de los volcanes Chiles y Cerro Negro, realizados por el Servicio Geológico Colombiano en 2014, en la quebrada Potrerillos, en la vía que conduce de Tufiño a Maldonado en Ecuador.

Cortés y Calvache (1996) refieren la existencia de niveles de caída piroclástica en los alrededores del complejo, suprayaciendo diferentes unidades litológicas e infrayaciendo niveles de suelo. De acuerdo con el seguimiento de espesor y diámetro de partículas del nivel más reciente y de más amplia distribución encontraron que la fuente de dicho nivel no es ninguno de los dos volcanes. Por su parte, Santamaría *et al.* (2017), realizaron análisis de componentes litológicos y dataciones radiométricas a 12 capas de cenizas volcánicas obtenidas por medio de una perforación manual en la turbera de Potrerillos, en el CVCCN. Los resultados permitieron establecer que los componentes no pertenecen a este complejo. De acuerdo con las dataciones radiométricas, no habría existido actividad explosiva significativa en los últimos 6900 años, que corresponde al periodo de registro de la turbera.

Respecto al contexto geológico estructural del CVCCN, se enmarca en dos sistemas de fallas importantes y casi perpendiculares entre sí. El primer sistema tiene una orientación NNE-SSW y lo constituye entre otras la falla Chiles - Cumbal que une ambos volcanes, la falla de Tufiño que delimita el borde occidental del graben. El segundo sistema de orientación NWW-ESE o NW-SE está identificado por las fallas de Chiles Sur, Chiles Norte, Nazate y Río Blanco. Existen además sistemas menores de fallamiento o satélites de los anteriores (ICEL, 1983). Por su parte, Bocanegra y Sánchez (2017), en el estudio del mapa de fallas de los volcanes Chiles - Cerro Negro, reportan 14 nuevos lineamientos en sentido SW-NE y SE-NW.

Para el volcán Chiles, ICEL (1983) propone tres fases en su evolución: la fase I (Chiles I) conformada por lavas andesíticas con dos piroxenos con edades anteriores a 0,51 Ma., muy afectada por acción glacial en donde es común que los valles glaciales coincidan con zonas de fractura por donde ascienden las manifestaciones termales y se relacionan con zonas de alteración hidrotermal y fenómenos de explosión freática (tabla 1). En la fase II (Chiles II), se generaron lavas de composición dacítica a andesítica. Estos autores asumen actividad explosiva para esta fase y explican la ausencia de productos piroclásticos debido a las condiciones subglaciales de la depositación, lo que dio lugar a la formación de lahares y morrenas a partir de los depósitos piroclásticos originales. Para esta fase se cuenta con una datación de entre 0,05 y 0,51 Ma y volúmenes estimados de alrededor de 2,4 km³ (tabla 1).

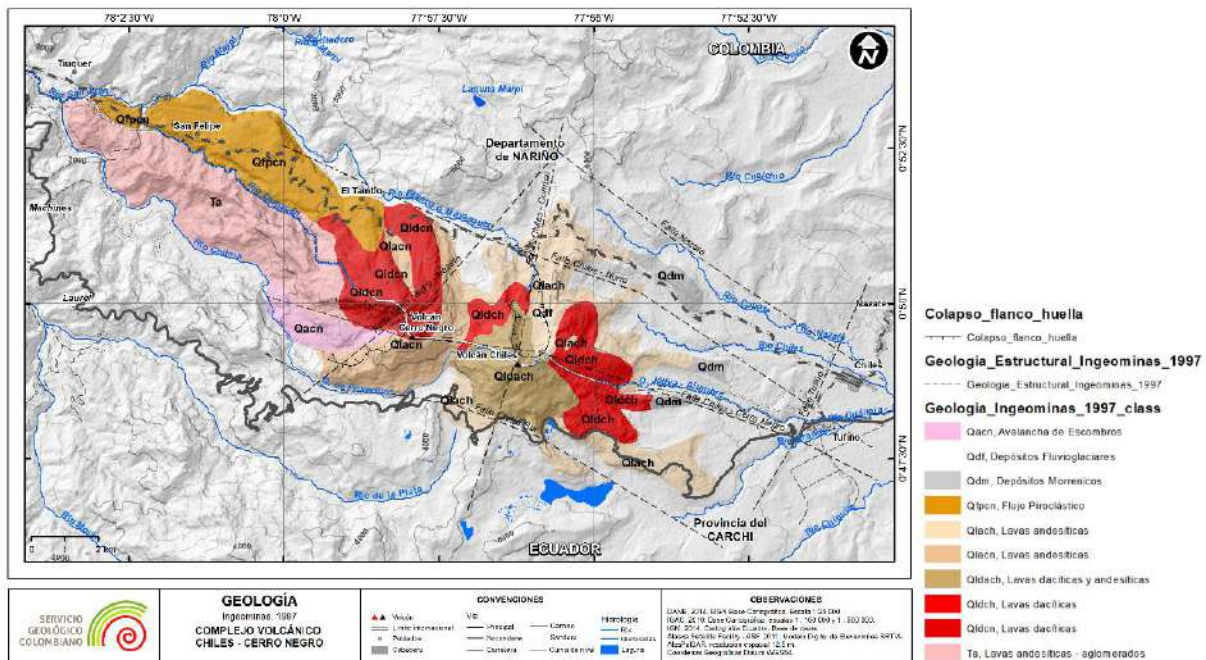


Figura 2. Mapa geológico del Complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro
 Fuente: tomando como referencia los trabajos realizados por Cortés y Calvache (1996).

Dentro de la fase II de ICCL (1983), Cortés y Calvache (1996), diferencian seis episodios de lavas (tabla 1): las del episodio 1 muestran mayor extensión que las del episodio 1 del volcán Cerro Negro, a partir del foco de emisión, con composición andesítica. Al episodio 2 se asocian lavas dacíticas con menor extensión que los depósitos de lavas del episodio 1. El episodio 3 corresponde a un depósito de lava dacítica que se extiende en dirección SE desde la parte alta del volcán, por 2,5 km. El episodio 4 son lavas dacíticas con estructura “cordada” y extensión de 2,5 km aproximadamente, medidos a partir del borde SE del anfiteatro. El episodio 5 corresponde a un depósito de lava, que suprayace los depósitos del episodio 4, la cual presenta una apariencia columnar y composicionalmente corresponde a andesita. El episodio 6 presenta mayor distribución, composicionalmente corresponde a lavas dacíticas y andesitas - dacíticas.

De acuerdo con Telenchana (2017), el volcán Chiles tiene aproximadamente 600 ka (correspondiente a la fase Chiles II de ICCL (1983) y agrupa unidades litoestratigráficas, a las que denomina Chiles I y Chiles II (tabla 1): la unidad Chiles I, que correspondería a los episodios 1, 2 y 3 propuestos por Cortés y Calvache (1996), forman el edificio basal y se caracteriza por registrar depósitos de flujos de lava de composición desde andesitas basálticas hasta riolacitas. Esta unidad a su vez está dividida en tres subunidades: Chil-1a, compuesta por depósitos de lavas andesíticas con dos piroxenos, con espesores menores a 200 m en superficie y una datación K/Ar de 572 ± 5 ka. La subunidad Chil-1b, compuesta por flujos de lava desde andesitas ácidas, hasta dacitas, presenta espesores menores a 200 m en superficie, con una datación K/Ar 397 ± 41 ka. La subunidad Chil-1c, compuesta por depósitos de lavas riolacitas, con espesores al menos de 150 m en superficie y una datación K/Ar de 271 ± 81 ka.

Los productos de la unidad Chiles II, se habrían depositado después de un largo periodo de inactividad. Esta unidad, se encuentra dividida en tres subunidades, que corresponden a los episodios 4, 5 y 6 de Cortés y Calvache (1996): Chil-2a, compuesta por depósitos de lavas andesíticas y andesitas con dos piroxenos, con una datación K/Ar de 57 ± 16 ka y con espesores menores a 20 m en superficie. La

subunidad Chil-2b, compuesta por flujos de lava dacíticas, con edades de 53 ± 3 ka, y 50 ± 5 ka, de acuerdo con una datación K/Ar; presentan espesores menores a 10 m en superficie. La subunidad Chil-2c, compuesta por depósitos de lavas riodacitas, con espesores al menos de 70 m en superficie y una datación K/Ar de 42 ± 14 ka.

Adicional a las unidades mencionadas, Cortés y Calvache (1996) hacen referencia a la estructura de colapso del edificio del volcán localizada en el sector norte con un diámetro aproximado de 1 km. Velásquez y Parra (2002) describen un evento de *debris avalanche* (avalancha de escombros), asociado a la destrucción del edificio del volcán Chiles, pero que traducen, de manera incorrecta, como flujos de escombros (que es un tipo de depósitos de lahar). Según estos autores la avalancha bajó por las vertientes del edificio, cruzando el río Blanco y subiendo en la margen opuesta por las vertientes del Cerro Canguil, dejando un depósito, del cual se conserva menos del 30 %, con bloques decimétricos a métricos, angulares, dispersos caóticamente en una matriz suelta de arenas gruesas y gravas, en su totalidad compuesto por las andesitas del edificio volcánico y sin material juvenil.

Velásquez y Parra (2002) atribuyen la edad del colapso del edificio como anterior a 20 000 años ya que el depósito fue parcialmente erosionado por un episodio de glaciación que llegó aproximadamente hasta la cota 3200 (Q1dg), correlacionable en altura con el estadio glaciar Murillo temprano, definido hasta la cota 3400 en la Cordillera Central por Van der Hammen (1981) en Velásquez y Parra (2002). Por su parte Telenchana (2017) refiere que el depósito de colapso se encuentra cubierto por depósitos de morrenas, y asigna una edad entre 15 y 10 ka AP (tabla 1), debido a la posición estratigráfica con respecto a la unidad Chiles II y los depósitos glaciares. Páez y Sánchez (2022) reportan que área y volumen de afectación por el colapso es $4,04$ km² y $0,46$ km³, respectivamente.

La fase 3 (Chiles III) de ICEL (1983) es descrita como una actividad posterior a la fase 2, que se limitó a depósitos piroclásticos probablemente de tipo freatomagmático, originados por pequeñas explosiones cerca a la cima del volcán que dieron lugar a cráteres con fondo plano, formados por pequeños anillos piroclásticos, compuestos por fragmentos de roca y, de manera subordinada, escorias embebidas en una matriz areno limosa. Telenchana *et al.* (2017b) reporta pequeños domos y cráteres de explosiones freáticas y/o freatomagmática en las partes altas del cono, donde ICEL (1983) reporta espesores de 60 m aproximadamente para los depósitos.

Adicionalmente, Telenchana (2017) resalta que en la parte alta del edificio volcánico afloran “brechas subglaciales”, observadas como grandes bloques sueltos, que se formaron al ocurrir una erupción desde un cráter cubierto por masa glaciar. Estas brechas son bien consolidadas y están formadas por líticos andesíticos a dacíticas.

Tanto ICEL (1983) como Telenchana *et al.* (2017) describen para el volcán Chiles, la existencia de cráteres de explosiones freáticas y/o freatomagmáticas, con depósitos de brechas hidrotermales asociados los cuales suprayacen depósitos glaciares. Los cráteres se localizan en los sectores de Lagunas Verdes, Aguas Hediondas y El Tambo, sobre zonas de fallas o cruce de fallas, como es el caso de Lagunas Verdes. En este último sector ICEL (1983) también reporta la presencia de un depósito de flujo de Ceniza.

ICEL (1983), en las Lagunas Verdes, reporta un cráter con un diámetro de 500 m aproximadamente y los depósitos de brechas ubicados hacia el sector norte, donde se tiene alrededor de 10 m de espesor. Conforme a lo enunciado por ICEL (1983), el cráter de Aguas Hediondas se encuentra localizado en las cercanías de la Fuente Termal de Aguas Hediondas, el cual tiene un diámetro de alrededor de 12 m y 5 m de profundidad, presenta el flanco occidental destruido por la erosión. Sus paredes presentan alteración

hidrotermal. De igual manera, para ICEL (1983), en la vía que conduce hacia La Puerta, en el sector El Tambo, se localiza un cráter de 10 m de diámetro y 12 m de profundidad, con presencia de alteración hidrotermal.

Tabla 1. Unidades eruptivas del volcán Chiles

Chiles							
ICEL, 1983	Fase Chiles I	Fase Chiles II				Fase Chiles III	
	Flujos de lava andesíticas con dos piroxenos	Flujos de lava de composición dacítica a daciandesítica y andesítica					Depósitos de origen freático
Dataciones	0,05 a 0,51 Ma						
Cortés y Calvache, 1996	Chiles						
	Episodio I	Episodio II	Episodio III	Episodio IV	Episodio V	Episodio VI	
	Flujos de lava andesítica	Flujos de lava dacítica	Flujos de lavas dacíticas	Flujos de lava dacítica	Flujos de lava andesítica	Flujos de lava dacítica - andesítica	
Velásquez y Parra, 2002						AE	
Dataciones						Avalancha de escombros	
						2000 años	
Telenchana, 2017	Chiles I			Chiles II			
	Chil-1a	Chil-1b	Chil-1c	Chil-2a	Chil-2b	Chil-2c	
	Lavas andesíticas con dos piroxenos	Flujos de lava desde las andesíticas ácidas hasta dacíticas	Flujos de lavas riódacíticas	Depósitos de lavas andesíticas y andesíticas con dos piroxenos	Flujos de lava dacíticas	Flujos de lavas riódacíticas	Avalancha de escombros
Dataciones	K/Ar de 572 +/- 5 ka	K/Ar 397 +/- 41 ka	K/Ar de 271 +/- 81 ka	K/Ar de 57 +/- 16 ka	53 +/- 3 ka y 50 +/- 5ka	K/Ar de 42 +/- 14 ka	15 y 10 ka AP

Fuente: recopilado de ICEL (1983), Cortés y Calvache (1996), Velásquez y Parra (2002) y Telenchana (2017).

Para el volcán Cerro Negro, ICEL (1983) y Olade (1987) definen tres fases de actividad, mientras que Cortés y Calvache (1996) reportan seis episodios. Las fases definidas por ICEL (1983) y Olade (1987) son (tabla 2): Cerro Negro I, representada por depósitos de flujos de lava y proyectiles balísticos de composición andesítica de serie calco-alcalina, con una edad radiométrica de 1,4 Ma. Cerro Negro II, compuesta por depósitos de flujos de lava de composición dacítica a daciandesítica, con una estimación del volumen en los flujos de lava dacítica de aproximadamente 1,2 km³. Para esta fase se presenta el depósito conocido como “Flujo piroclástico de Mayasquer”, con un volumen máximo estimado de 8,88 km³. En la fase III identifican algunos depósitos originados por actividad explosiva freática con una edad de 0,004 Ma, ubicados en la cima del volcán.

Dentro de la fase Cerro Negro II de ICEL (1983) y Olade (1987), Cortés y Calvache (1996) diferencian cuatro episodios (tabla 2): el 2, 3, 4 y 5. El episodio 2 representa depósitos de flujos de lava en bloques de composición dacítica, localizados al norte del volcán que se extienden hasta el río Blanco. El episodio 3 corresponde a depósitos de corrientes de densidad piroclástica concentradas (bloques y ceniza) de gran magnitud, correspondiente al “Flujo piroclástico de Mayasquer”. Composicionalmente los bloques corresponden a dacitas. El episodio 4 es un depósito de flujos de lava en bloques con características composicionales y texturales similares a las lavas que conforman el episodio 2. El episodio 5 es un depósito de flujos de lava “cordada”, la cual se encuentra hacia el norte del volcán y tiene una extensión de 1,5 km aproximadamente, medidos desde la posible zona de emisión, y composicionalmente corresponde a una lava dacítica.

Tabla 2. Unidades Eruptivas del volcán Cerro Negro

ICEL, 1983	Cerro Negro					
	Fase CN I	Fase CN II				Fase CN III
	Flujos de lava y proyectiles balísticos andesítica	Flujos de lava de composición dacítica a dacianandesítica con anfíbol y flujo piroclástico de Mayasquer				Depósito vulcano clástico con carácter explosivo
Dataciones	1,4 Ma					0,004 Ma
Cortés y Calvache, 1997	Cerro Negro					
	Episodio I	Episodio II	Episodio III	Episodio IV	Episodio V	Episodio VI
	Flujos de lava andesítica	Flujos de lava dacítica	Flujo piroclástico de Mayasquer con bloques de lava dacítica	Flujos de lava dacítica	Flujos de lava dacítica	Avalancha de escombros
Dataciones					6065 +/- 130 a	

Fuente: recopilado de ICEL (1983), Cortés y Calvache (1996; 1997).

El episodio 6 de Cortés y Calvache (1996) corresponde a un depósito de avalancha de escombros, en cuya fase proximal se identificaron estructuras de *hummocks* (joroba de camello). El depósito fue datado en 6065 AP por estos autores.

2.2. Registro histórico

En la primera versión del mapa de amenaza de los volcanes Chiles y Cerro Negro (Cortés y Calvache, 1997), se incluyen los resultados de la investigación llevada a cabo por la Fundación para la Investigación Científica y el Desarrollo Cultural de Nariño - FINCIC (1996), sobre la actividad histórica de estos volcanes, realizada para complementar los estudios de evaluación de amenaza volcánica. La principal reseña sobre la actividad del volcán Chiles es tomada de trabajos de Ignacio Rodríguez Guerrero en el año 1959 (FINCIC, 1996, en Cortés y Calvache, 1997), cuya transcripción es la siguiente: “El volcán Chiles en la frontera colombo-ecuatoriana, cuyo cráter expide por 15 bocas humo, ceniza y vapores sulfúricos, produciendo con frecuencia fuertes bramidos, ha sido estudiado por numerosos geólogos nacionales y extranjeros”.

La falta de datos precisos sobre la actividad eruptiva de estos volcanes se debe posiblemente a la escasa población en la zona que pudiera hacer reportes sobre dicha actividad, que correspondiera a eventos eruptivos menores y por considerarse, algunas veces, a los dos centros volcánicos como un solo volcán.

La recopilación documental de información histórica llevada a cabo por Monsalve y Laverde (2016) sobre la actividad de estos volcanes fue interpretada como actividad eruptiva menor, posiblemente desde épocas prehispánicas, ya que a inicios de la época de la colonia el Chiles era reconocido como volcán, a pesar de encontrarse en un ámbito geográfico aislado. Esto queda reflejado en la etimología del nombre, el cual proviene de “Chi” = resplandecer, “Li” = repetición y “s” = desinencia, es decir, que “alumbraba con frecuencia” (revista del Instituto Histórico del Perú (1906) volumen 1, en Monsalve y Laverde, 2016).

Hacia la segunda mitad del siglo XIX, el volcán Chiles presentó una actividad fumarólica intensa, focalizada en el flanco sur del volcán, la cual pudo estar asociada a eventos eruptivos menores. La primera mención sobre actividad eruptiva en el volcán es referida por Villavicencio (1858) quien indica “sus erupciones son de poca entidad i no causan casi ningún estrago por la distancia en que se halla de los pequeños poblados”, mientras que Pérez (1862) reporta que “el volcán de Chiles tiene 15 bocas humeantes en la parte

perteneciente al Ecuador, las cuales están en el flanco del cerro mucho más abajo de las nieves perpetuas”.

En este mismo período se reportan manifestaciones hidrotermales y fumarólicas al interior del anfiteatro del volcán Cerro Negro y posible actividad eruptiva menor de este último hacia comienzos del siglo XX, mientras que la actividad fumarólica en Chiles para entonces había desaparecido. Reafirmando esta idea del cese de la actividad del volcán Chiles después de 1870 y el aumento en la actividad del volcán Cerro Negro, Arteaga (1910) hace alusión a estos volcanes de la siguiente manera:

El nevado de Chiles mide 4840 metros de altura y como no tiene cráter, nos parece que impropriamente se lo llama volcán; a no ser que se considerara como cráter el volcán de la Oreja [...] De este volcán no hacen mención los geógrafos, no obstante ser activísimo, pues vomita fuego y humo continuamente a una altura de 4292 metros y termina sobre el Cascarillo. Arteaga (1910)

Desde finales de 1923 y comienzos de 1924, en la zona del CVCCN, se registró una importante actividad sísmica, en algunos casos los sismos fueron asociados por la población a actividad eruptiva del volcán Chiles. A pesar de las múltiples menciones a la actividad eruptiva del volcán Chiles en el año de 1923, según FINCIC (1996, en Cortés y Calvache, 1997): “...en entrevistas con gente mayor en la zona no recordaban haber visto el volcán en erupción”.

Debido a la actual reactivación del complejo volcánico, con una fuerte actividad sísmica, que incluye sismos sentidos como el registrado el 20 de octubre del 2014, la Agencia Pública de Noticias de Ecuador y Suramérica (Andes), en un reportaje reciente en Tufiño (Ecuador) sobre estos (<http://www.andes.info.ec/en/node/36006>), refiere que algunos de los habitantes traen a la memoria hechos relacionados con la sismicidad de 1923:

Los habitantes de esta comunidad turística y agropecuaria, ubicada en la zona de influencia de los volcanes Chiles y Cerro Negro, en la frontera entre Ecuador y Colombia, se sienten nerviosos desde el pasado lunes cuando un sismo de 5,9 grados sacudió sus viviendas. En el lugar reina la incertidumbre ante la creciente actividad de los volcanes que tienen a la provincia de Carchi en alerta naranja. (Andes, 25 octubre de 2014)

Y continúan con las narraciones de los habitantes: “Esa tarde estaba arando cuando vino un bramido bien fuerte. Este caballo se corrió del susto”, relata Pedro Paspuel, habitante de Tufiño. Los últimos sismos hicieron que Víctor Chiles recuerde cuando su padre le relató el terremoto de 1923, que abrió las grietas por donde se filtra el agua de las piscinas termales que ahora son atractivo para los turistas.

3. Amenaza volcánica

La definición de amenaza volcánica se adapta de la definición original de amenaza según la Ley 1523 del 2012 así:

Peligro latente de que un evento de origen volcánico se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales. (Congreso de Colombia, 2012)

El CVCCN, según el registro geológico, ha presentado actividad predominantemente efusiva con algunos episodios de actividad explosiva importante. La reactivación y actividad eruptiva de los dos centros eruptivos puede afectar regiones en su área de influencia pertenecientes al departamento de Nariño en Colombia y la provincia del Carchi en Ecuador, donde se encuentran establecidos centros poblados e infraestructura vial de interés binacional.

La delimitación de las zonas de amenaza volcánica como alta, media y baja corresponde a la integración de los resultados de la simulación de los fenómenos volcánicos con posibilidad de ocurrir en el CVCCN, de acuerdo con su grado de afectación, considerando para la evaluación y representación de la amenaza como posibles centros de emisión/erupción, la parte interna y algunos puntos en los bordes de las zonas de colapsos actuales o anfiteatros de los volcanes. La caracterización de los depósitos observados en campo, permiten reconstruir e interpretar la historia eruptiva de los volcanes y obtener los parámetros de entrada para llevar a cabo las simulaciones de los fenómenos volcánicos.

Una erupción volcánica es un evento multi-amenaza ya que durante ella se pueden presentar uno o varios fenómenos de manera simultánea. Las zonas de amenaza volcánica se designan como alta, media y baja de acuerdo con la afectación y potencial de daño de los fenómenos volcánicos al ser humano, bienes, infraestructura y al medio ambiente. Los límites de las áreas de amenaza volcánica son transicionales (líneas punteadas) y de ningún modo representan límites absolutos. En caso de que ocurrieran puntos de emisión fuera de estas zonas, el mapa debe ser actualizado.

Para realizar la zonificación final presentada en el mapa, inicialmente se evaluaron las amenazas por cada uno de los fenómenos volcánicos que pueden ocurrir por la actividad eruptiva de los volcanes Chiles y Cerro Negro, simulando los fenómenos que evidencia el registro geológico y otros que se puedan presentar (SGC, 2014a; 2014b).

Los fenómenos se modelaron utilizando las siguientes herramientas de simulación: flujos piroclásticos con Titan2D (Patra *et al.*, 2005), flujos de lava con LavaPL (Connor *et al.*, 2012), lahares con LaharZ (Iverson *et al.*, 1998; Schilling, 2014), caída de ceniza y lapilli con Tephra2 (Bonadonna *et al.*, 2005), proyectiles balísticos con Eject! (Mastin, 2001), avalanchas de escombros utilizando el concepto de cono de energía (Malin y Sheridan, 1982).

Gráficamente, los mapas de amenaza constan de un recuadro principal que representa en tonalidades de rojo la zona de amenaza alta en la zona proximal e intermedia del CVCCN, un recuadro menor que representa las zonas de amenaza alta, media y baja por caída de piroclastos en su zona proximal, intermedia y distal y un recuadro menor en el que se observa la zona de amenaza alta por lahares en toda su extensión hasta zonas distales. Los recuadros referidos tienen sus correspondientes leyendas

explicativas. Los mapas van acompañados de un apartado de conceptos técnicos y definiciones sobre los tipos de fenómenos volcánicos incluidos en la evaluación de amenaza.

A continuación, se describen los fenómenos considerados en orden de su peligrosidad y potencial de daños.

3.1. Amenaza por avalancha de escombros

Una avalancha de escombros volcánica se forma cuando un deslizamiento volcánico se acelera 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 (Van Wyk de Vries y Davies, 2015). Los grandes deslizamientos de roca del edificio volcánico pueden ocurrir como resultado de la inestabilidad de sus laderas, la cual a su vez puede deberse al ascenso de material volcánico (magma: roca fundida en el interior del volcán), cambios en el sistema hidrotermal que progresivamente alteran las rocas y precipita material, grandes eventos de caída de lluvia o fusión glacial, peso del material de erupciones recientes, aceleración sísmica y movimiento de fallas regionales que cortan el volcán (Van Wyk de Vries y Davies, 2015).

En ocasiones el colapso del edificio es acompañado por actividad eruptiva, caracterizada por explosiones de extrema violencia (*blast*), que generalmente están dirigidas en la misma dirección del deslizamiento. Las avalanchas de escombros son muy rápidas, móviles y arrasan con todo lo que encuentran a su paso. Sin embargo, cabe anotar que estos eventos son muy poco frecuentes en la vida de un volcán ya que la desestabilización de un edificio se puede tardar de decenas a centenares de miles de años (Van Wyk de Vries y Davies, 2015).

El anfiteatro en el volcán Chiles evidencia un colapso del flanco norte del volcán, mientras que el del volcán Cerro Negro evidencia un colapso del flanco occidental ocurrido hace 6065 ± 130 años AP (Cortés y Calvache, 1996), en este volcán se observan *hummocks* que confirman la ocurrencia de avalanchas de escombros. En la figura 3, se presenta la zona que podría ser afectada por avalancha de escombros representada en el polígono con líneas inclinadas de color morado.

En el volcán Chiles, el registro geológico de flujos piroclásticos es menos frecuente que otros fenómenos. En el volcán Cerro Negro se tiene el registro geológico de una importante unidad de CDP, que aflora sobre la margen izquierda del río Blanco o Mayasquer, conocida como el depósito de Flujo piroclástico de Mayasquer (Cortés y Calvache, 1996), que evidencia el potencial explosivo que pueda tener el volcán en erupciones futuras. La figura 4 presenta la zona de amenaza alta, para un VEI 3 (polígono de color rojo) y para un VEI 4 (polígono de color rosado).

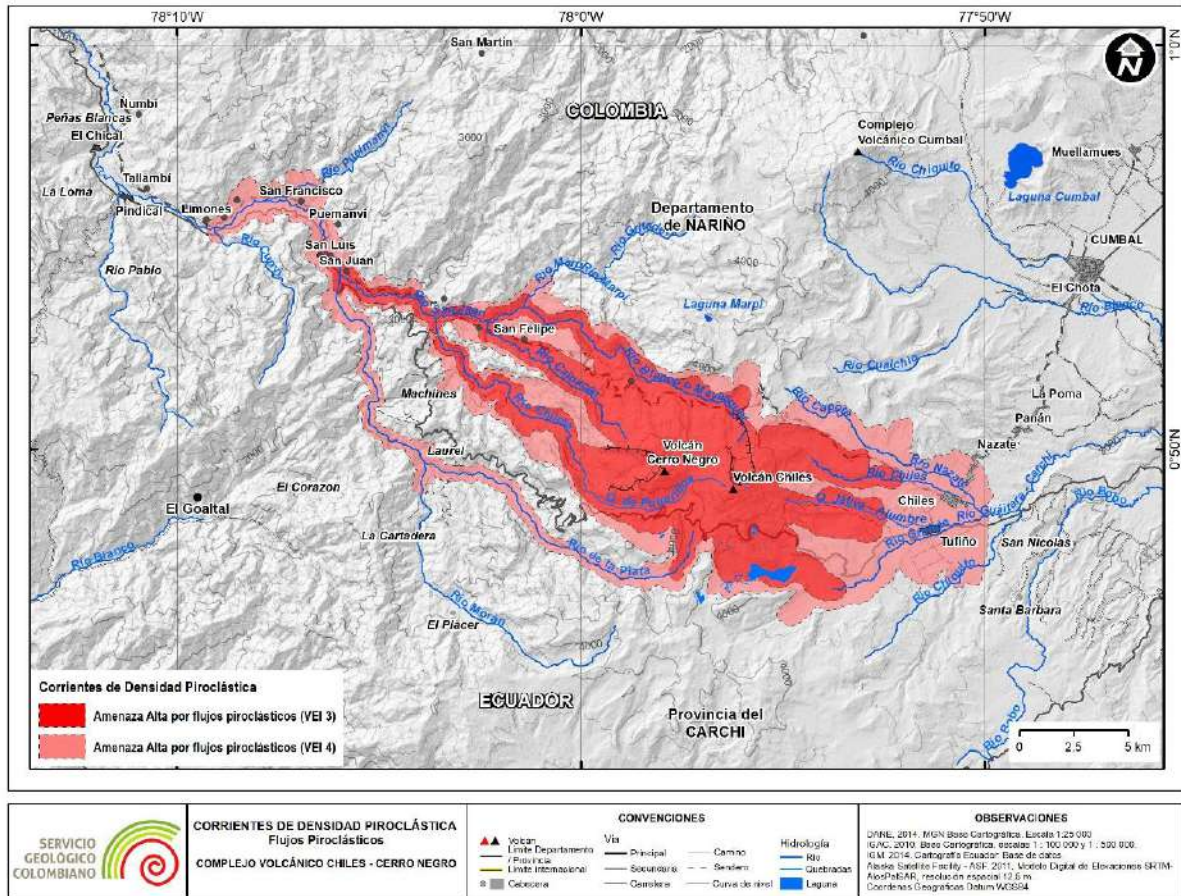


Figura 4. Área que podría ser afectada por corrientes de densidad piroclástica

3.3. Amenaza por lahares (flujos de lodo volcánico)

El término lahar proviene de Indonesia. 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). Todos los lahares tienen un componente de agua como parte del flujo. Un lahar puede comenzar como un flujo de escombros (masa sólida > 80 % de la masa total del flujo), bajando pendientes empinadas, pero a través de la sedimentación (reducción de volumen) convertirse en flujos hiperconcentrados (masa de material sólido entre 40 % y 80 % (Beverage y Culbertson, 1964) y a medida que la sedimentación avanza en terrenos planos convertirse en flujos normales de corriente (sólidos < 40 %).

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. Pueden viajar varias decenas de kilómetros por los cañones y valles de los ríos donde el confinamiento topográfico y una pendiente suficiente del lecho evita una reducción significativa. Los lahares suelen ser de corta duración, pero su descarga puede ser muy alta, con órdenes de magnitud por encima del flujo normal del río.

Estos fenómenos se pueden generar directa o indirectamente por actividad volcánica, durante (lahares primarios) o después (lahares 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, corrientes fluviales o reservorios de agua en el interior del volcán.

Los lahares pueden causar: arrasamiento y destrucción de vegetación, cultivos y de las estructuras existentes a lo largo de su trayectoria (puentes, casas e infraestructura); enterramiento y aislamiento pasivo y tardío de grandes extensiones de terreno (cerca al cauce y por fuera de él) incluida la infraestructura ubicada sobre las mismas; relleno de cauces naturales y artificiales; inundación de las regiones aledañas, en el caso de presentarse represamiento de los ríos y quebradas. Por la rapidez con la cual pueden formarse, por su velocidad y su energía, un lahar es un fenómeno muy peligroso y la probabilidad de sobrevivir a su impacto directo es mínima.

En el CVCCN, el registro geológico de lahares se ha observado en Maldonado y la vía que conduce de Rumichaca a Tufiño (Ecuador) y en el sector de Cristo Rey cerca al corregimiento de Chiles (Colombia).

Se espera que la acumulación de depósitos piroclásticos (CDP: flujos y oleadas y caídas piroclásticas: ceniza y *lapilli*) en las fuentes hídricas que nacen en el volcán, podría generar represamientos, cuya ruptura desencadenaría la formación de lahares secundarios, tanto de tipo flujos hiperconcentrados como de escombros. La figura 5 muestra las zonas que podrían ser afectadas por flujos de lodo volcánicos (lahares) para volúmenes de hasta 20 millones m³.

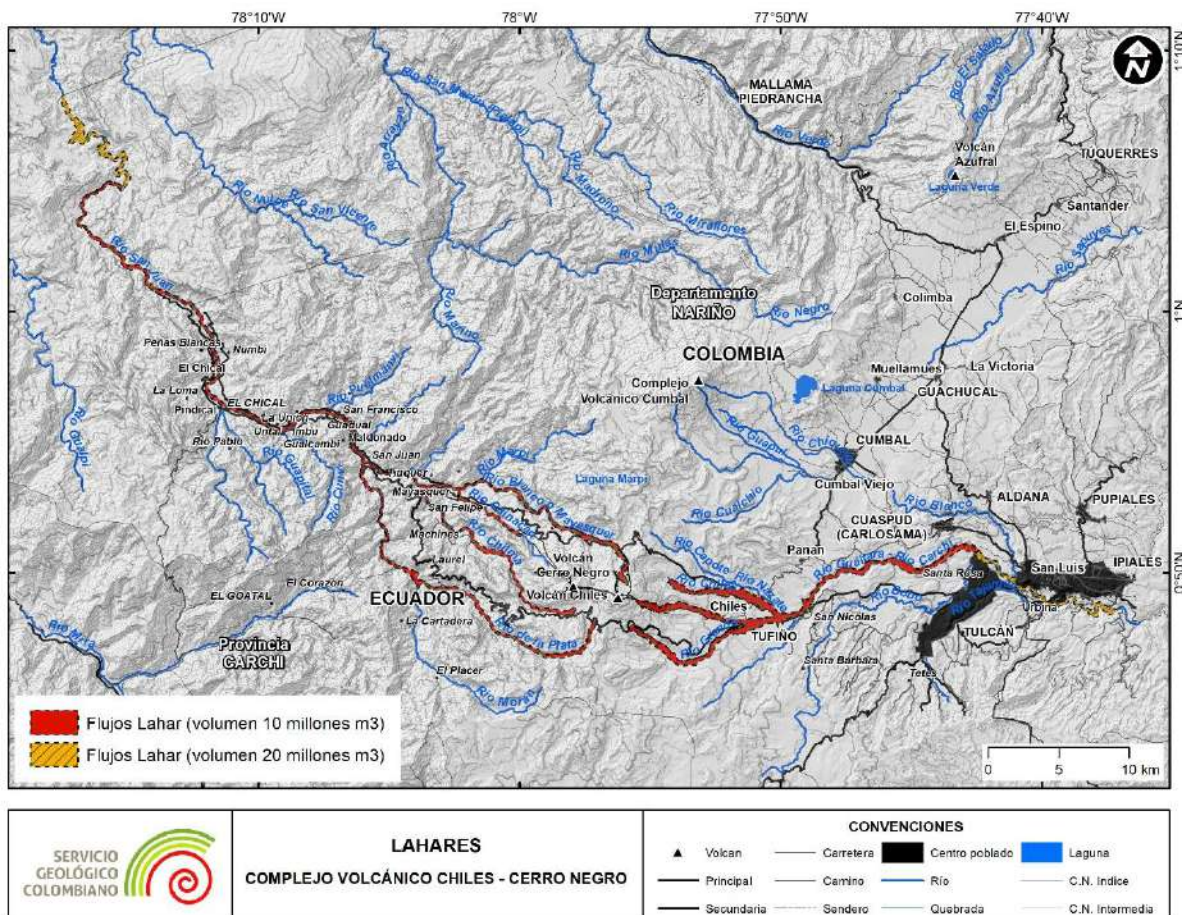


Figura 5. Área que podría ser afectada por flujos de lodo volcánico (lahares)

3.4. Amenaza por caída de piroclastos

Como consecuencia de las erupciones explosivas, los volcanes expiden a la atmósfera partículas fragmentadas (piroclastos) que, de acuerdo con su tamaño, se conocen como: ceniza (menor de 2 mm); lapilli (2 a 64 mm) y bombas y bloques (mayor de 64 mm).

3.4.1. Amenaza por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos

La ceniza y el lapilli son transportados por el viento hasta zonas alejadas del volcán (cientos o miles de km) y depositados por efecto de la gravedad, formando capas que siguen la topografía preexistente y, en general, cubren un área muy extensa. La cantidad de piroclastos acumulados y su tamaño de grano disminuyen con la distancia al volcán. En la mayoría de las erupciones se producen caídas piroclásticas y su distribución dependerá de la dirección y velocidad del viento predominante. Las caídas de piroclastos pueden causar oscurecimiento del ambiente y tormentas eléctricas, efectos en la salud humana y animal (infecciones respiratorias, irritación de los ojos y las vías respiratorias, intoxicaciones y alergias); en la infraestructura y viviendas (cubrimiento y enterramiento, obstrucción de drenajes artificiales, colapso de techos y líneas de conducción eléctrica y 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) y afectación al transporte aéreo y terrestre (Fisher, 1997; Self, 2006).

Para el caso de los volcanes Chiles y Cerro Negro no se cuenta con un registro geológico claro de depósitos de caída piroclástica, sin embargo, el registro de actividad explosiva que ha generado CDP, permite inferir la posibilidad de que esa actividad explosiva pueda estar acompañada por caída de piroclastos. Por lo tanto, para delimitar las zonas que podrían ser afectadas por este fenómeno, se considera un escenario para una erupción VEI 4, considerando una columna eruptiva de 18 km. La figura 6 muestra la zonificación de la amenaza por caídas de piroclastos con dispersión en la dirección predominante de los vientos: amenaza alta (polígono rojo), media (polígono naranja) y baja (polígono amarillo), considerando una columna eruptiva de 18 km. Los círculos representan con líneas discontinuas, el área que podría ser potencialmente afectada con tendencia del viento diferente de la principal.

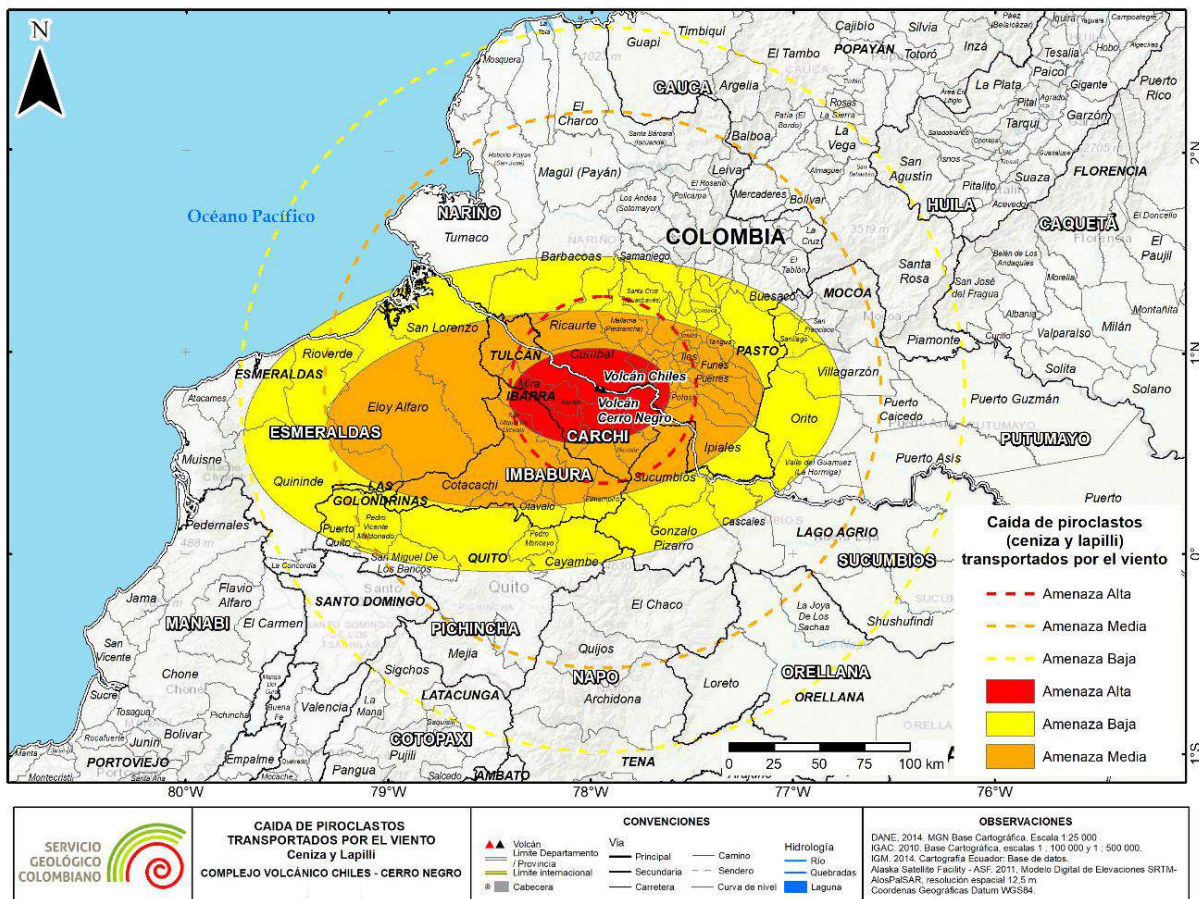


Figura 6. Zonificación de la amenaza por caídas de piroclastos (ceniza y lapilli) transportados por el viento

3.4.2. Amenaza por caída de piroclastos por proyección balística

Los proyectiles balísticos (bombas y bloques) son emitidos durante erupciones explosivas a velocidades de decenas a centenares de metros por segundo; siguen una trayectoria parabólica en el aire, que es mínimamente afectada por el viento, y finalmente caen sobre el suelo (Wilson, 1972; Tsunematsu *et al.*, 2016). 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 de cobertura vegetal o de viviendas (Blong, 1984; Baxter y Gresham, 1997; Oikawa *et al.*, 2016). La figura 7 muestra las áreas que podrían ser afectadas por caída de piroclastos por

proyección balística: amenaza alta para VEI 4 (polígono de color rosado, con puntos de color rosado) y VEI 3 (polígono de color rojo, con puntos de color rojo).

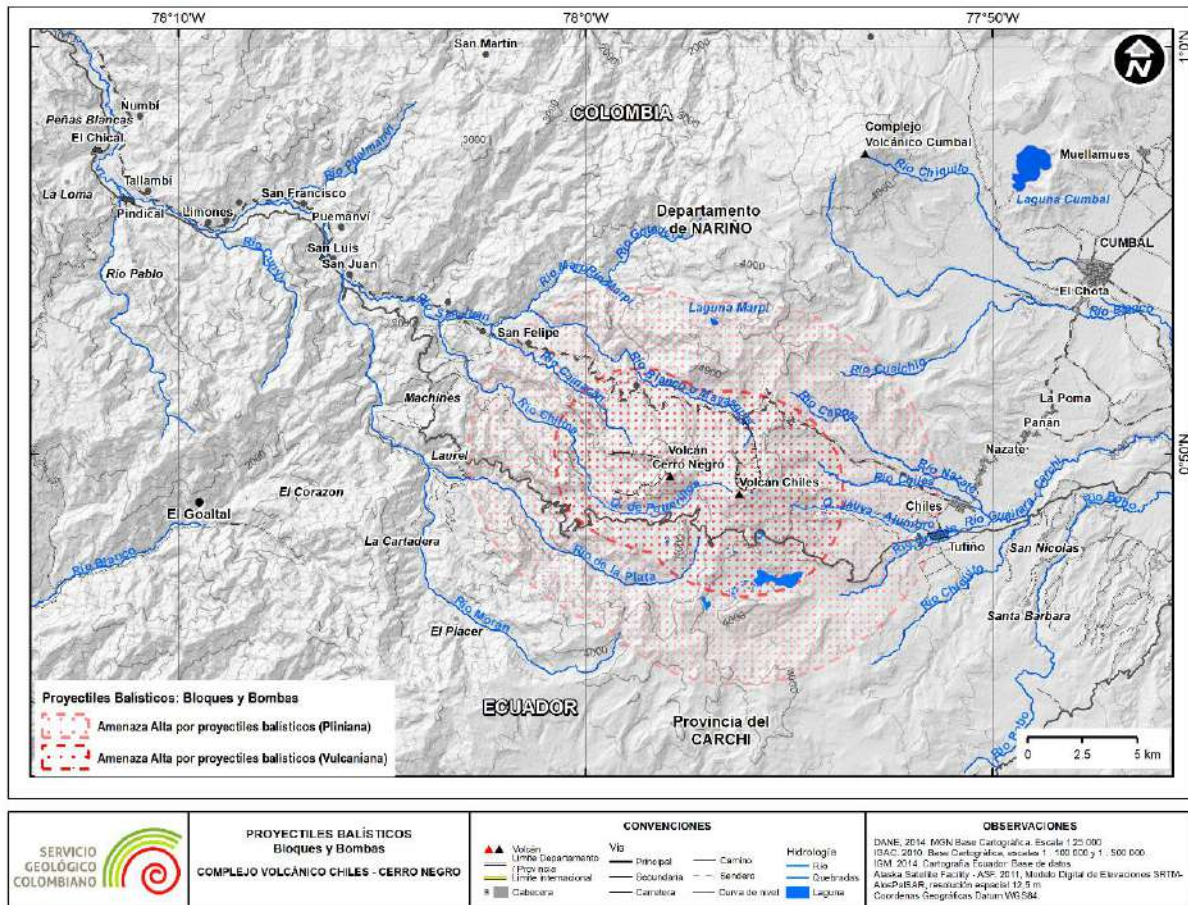


Figura 7. Área que podría ser afectada por caídas de piroclastos por proyección balística (bloques y bombas volcánicas)

3.5. Amenaza por flujos de lava

Los flujos de lava son emanaciones de roca fundida o magma por el cráter o grietas en los flancos del cono activo. Los flujos de lava pueden alcanzar temperaturas en un rango de 800 a 1200 °C que al salir del cráter tienden a canalizarse a lo largo de los valles; su velocidad y alcance dependen de su composición, la morfología representada por la pendiente del valle y las barreras topográficas que encuentren a su paso. Existen lavas fluidas y lavas viscosas: las primeras pueden extenderse hasta decenas de kilómetros desde el foco de emisión; las segundas se mueven solamente unos pocos kilómetros por hora y raras veces se extienden a más de 8 km desde los focos de emisión. Cuando las lavas son muy viscosas se acumulan en los centros de emisión formando montículos escarpados o en forma de cúpula conocidos como domos de lava, que al enfriarse llegan a taponarlos. Los flujos de lava se mueven relativamente lento, de manera que las personas pueden alejarse de su trayectoria y escapar del peligro inmediato; sin embargo, todo en su camino será derribado, rodeado, sepultado y quemado debido a sus altas temperaturas. La duración de erupciones individuales cubre un amplio rango y, mientras que algunas pueden llegar a décadas, la mayoría se encuentran entre días y meses (Kilburn, 2015).

Las lavas específicamente pueden causar: destrucción de infraestructura, enterramiento, quema de cultivos e incendios forestales. Las muertes atribuidas a los flujos de lava son a menudo debido a causas indirectas, tales como las explosiones cuando la lava interactúa con el agua, asfixia debido a los gases tóxicos acompañantes, flujos piroclásticos por colapso de domos y frentes de lava y formación de lahares por deshielo debido a la temperatura del flujo. En caso de que se presente una erupción que genere flujos de lava, se debe prestar atención al avance de estos hacia centros poblados o infraestructura. La figura 8 muestra el área que podría ser afectada por flujos de lava: amenaza alta para lavas dacíticas (polígono con líneas inclinadas de color rosado) y para lavas andesíticas (polígono con líneas inclinadas de color rojo).

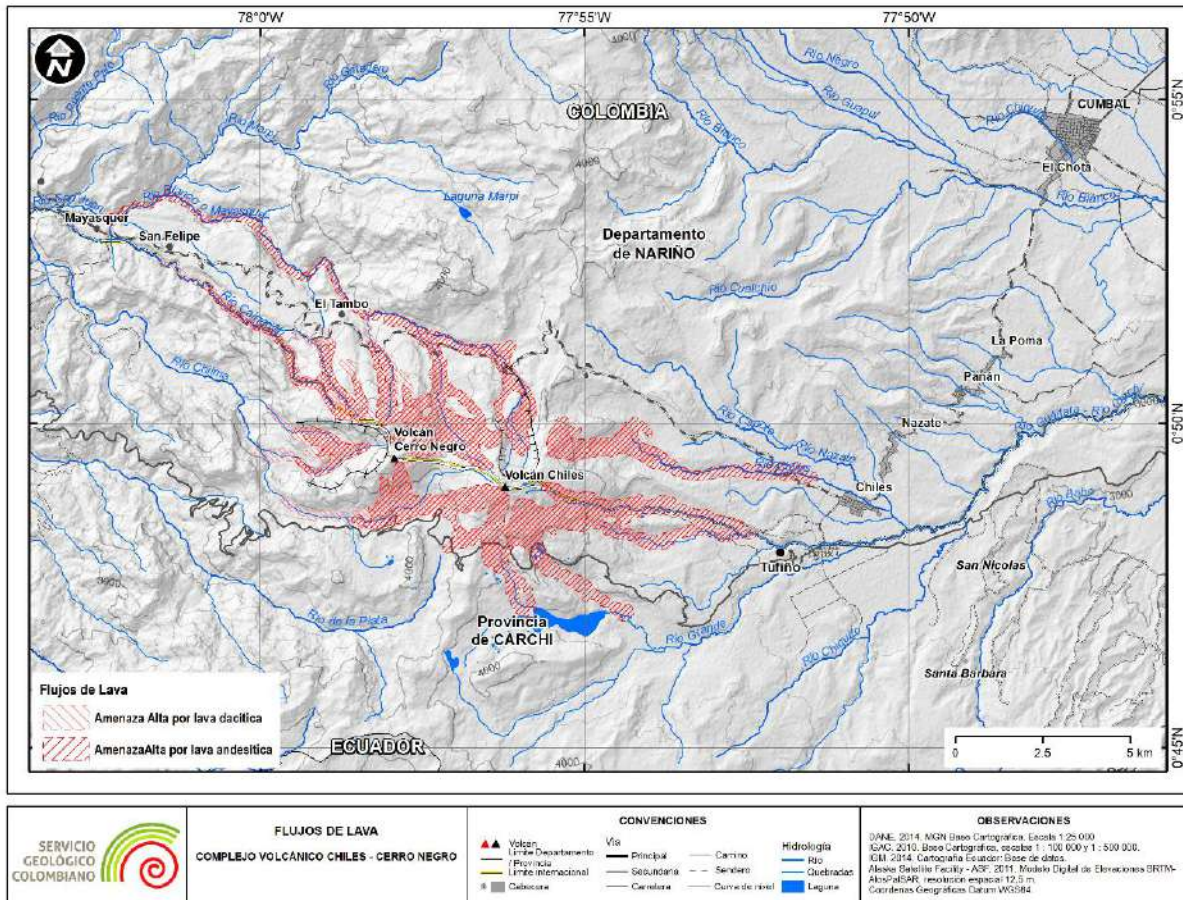


Figura 8. Área que podría ser afectada por flujos de lava

3.6. Gases volcánicos

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

3.7. Onda de choque

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

3.8. Sismos volcánicos

Los sismos generados por la actividad interna de un volcán generalmente no son de gran magnitud. Sin embargo, en la zona del CVCCN se han registrado sismos sentidos, incluso con magnitudes superiores a 5. Los sismos volcánicos, dependiendo de la magnitud y la distancia al epicentro, pueden ocasionar desde daños menores en la infraestructura y líneas vitales hasta colapso de viviendas; igualmente pueden ocasionar movimientos en masa.

4. Escenarios eruptivos

Cepeda (2009) define los escenarios eruptivos como la descripción de la dinámica, las características y propiedades de una erupción en un volcán específico, así como la identificación del área sujeta a su influencia directa.

Con el fin de proponer los escenarios eruptivos que podrían suceder en un futuro en el CVCCN, se considera la evolución y el registro geológico de sus productos teniendo en cuenta la hipótesis, planteada en los diferentes estudios, de la existencia de una cámara magmática somera común a los volcanes Chiles y Cerro Negro. Los escenarios eruptivos propuestos en este trabajo tienen como fin complementar la información del mapa de amenaza y ser útil en el manejo de crisis volcánicas (por parte de técnicos, autoridades y comunidad en general) en el complejo volcánico.

Una erupción futura puede presentar varias fases eruptivas, con la generación de uno o varios fenómenos. Con la información que se tiene sobre el volcán, no es posible establecer la duración del proceso eruptivo. Teniendo en cuenta lo anterior para una erupción futura, se contemplan los siguientes escenarios.

4.1. Actividad efusiva

De acuerdo con el registro geológico la actividad efusiva, con generación de flujos de lava, ha sido predominante dando lugar a la construcción de los edificios que conforman el CVCCN. La característica principal de esta actividad es la evolución de sus productos, desde andesitas a riolacitas como se aprecia en la tabla 1, donde diferentes autores, describen dicha evolución en las unidades propuestas para el volcán Chiles. Es de anotar que para el volcán Cerro Negro se observa una tendencia evolutiva similar.

Si la reactivación del complejo volcánico se debe a una intrusión magmática profunda de composición básica, se podrían generar flujos de lava de composición intermedia, los cuales podrían alcanzar distancias mayores. Si el magma implicado en la erupción ha evolucionado, debido al tiempo considerable de reposo, se podrían presentar lavas ácidas de corto alcance o emplazamiento de domos. La figura 8 muestra el alcance de las lavas que podrían presentarse.

4.2. Actividad explosiva

Si bien en el registro geológico no se ha observado evidencia de actividad explosiva frecuente, a excepción de remanentes de depósitos de flujos de escoria y el depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza (de gran magnitud) denominado Flujo de Mayasquer, no se descarta que otros depósitos originados por actividad explosiva se hayan presentado y hayan sido erosionados del registro debido a las glaciaciones y el tiempo transcurrido entre las erupciones efusivas documentadas. Adicionalmente, aunque no existe mucha literatura sobre la actividad acompañante de flujos de lava de composición ácida, algunos ejemplos recientes son las erupciones de los volcanes Cordón Caulle y Chaitén en Chile, que registraron fases eruptivas subplinianas iniciales, seguidas por extrusión de lava y cenizas (Seropian *et al.*, 2021).

Igualmente, teniendo en cuenta la historia evolutiva del complejo y el estado actual de evolución, tanto una mezcla de magmas como el emplazamiento de domos, podrían dar lugar a actividad explosiva con la generación de CDP (flujos y oleadas piroclásticas) y caídas piroclásticas (por proyección balística y transporte por acción de los vientos). Las figuras 4, 6 y 7 muestran el alcance que tendrían los productos piroclásticos en caso de presentarse una actividad de tipo explosivo.

4.3. Actividad freática - freatomagmática

De acuerdo con las observaciones de ICEL (1983), Telenchana (2017) y Telenchana *et al.* (2017), sobre la actividad freática/freatomagmática en el complejo, así como a la actividad histórica recopilada por Monsalve y Laverde (2016), este tipo de actividad puede ocurrir en los sitios donde se han identificado los cráteres de explosión o hacer parte del proceso eruptivo a través de los focos principales de los volcanes Chiles y Cerro Negro, afectando áreas cercanas a estos.

Los flujos de lodo o lahares pueden presentarse durante las erupciones, principalmente asociada a actividad explosiva, y después de estas afectando los valles de los ríos y quebradas que nacen el complejo, como se indica en la figura 5.

5. Estado actual del volcán

En agosto de 2013, mediante la red de monitoreo de actividad del Complejo Volcánico Cumbal (CVC), localizada al noreste del CVCCN, se detectó una actividad sísmica alta, varios de los sismos fueron reportados como sentidos por los residentes de las poblaciones vecinas a la frontera entre Colombia y Ecuador especialmente en Chiles y Tufiño, respectivamente. Esta actividad se asoció con una posible actividad de alguno de estos volcanes, por lo que el SGC junto con el IG-EPN instalaron, a partir de noviembre de 2013, una red compartida de monitoreo de estaciones sísmicas de banda ancha, así como de inclinómetros electrónicos y estaciones GNSS (por su sigla en inglés *Global Navigation Satellite System*, sistema de navegación por satélite). En 2022 después de un incremento en la sismicidad registrada a partir del 27 de mayo, y en acuerdo con las autoridades de los resguardos indígenas del Chiles y Mayasquer, el SGC incrementó la red de monitoreo del CVCCN, llegando a un total de 12 estaciones y 31 sensores (figuras 9 y 10).

Desde el inicio de la operación de la red sísmica y hasta julio de 2023, se tiene un registro de cerca de 1 200 000 eventos sísmicos, caracterizado principalmente por la ocurrencia de sismos volcano-tectónicos (VT) asociados a fallamiento frágil de roca. Desde octubre de 2014 se detectaron sismos de muy largo periodo (VLP, por su sigla en inglés *very long period*), los cuales se interpretan como cambios de volumen o transporte de masa desencadenados por perturbaciones de presión transitoria generadas por movimiento de fluidos. A partir del 2015 se destaca la ocurrencia de sismos de largo periodo (LP, por su sigla en inglés *long period*) que se interpretan como resonancia en cavidades con circulación de fluidos magmáticos o hidrotermales, los cuales se han incrementado significativamente a partir de mayo de 2023 (figura 11a, 11b y 11c, tabla 3).

Durante los 10 años de monitoreo continuo en el CVCCN, la actividad sísmica se ha caracterizado por ser fluctuante, con incrementos tanto en número como en energía de los sismos tipo VT, destacándose los siguientes periodos: agosto – octubre de 2013 (observaciones en la red sísmica del CVC), marzo – mayo de 2014, septiembre – diciembre de 2014, marzo – noviembre de 2018, mayo – octubre de 2022, marzo – junio de 2023 y agosto de 2023 (figura 11a). Muchos de los sismos han sido sentidos por pobladores de la zona de influencia del CVCCN, siendo los más relevantes: 16 de octubre de 2013 (Magnitud 4,3), 30 de abril de 2014 (Magnitud 4,6), 20 de octubre de 2014 (Magnitud 5,6), 21 de marzo de 2018 (Magnitud 3,7), 14 de febrero de 2019 (Magnitud 4,9), 25 de julio de 2022 (Magnitud 5,7), 25 de abril de 2023 (Magnitud 4,3) (figura 11d, tabla 4). Estos incrementos en la sismicidad han estado acompañados por una continua deformación que principalmente se evidencia con las series interferométricas en la zona del volcán Chiles y de inclinometría electrónica (figura 11e y 11g), cambios que también se han observado en las estaciones de GNSS desde su instalación (figura 11f) principalmente en las cercanas al volcán Chiles. Se destaca que algunas variaciones en las tasas de deformación han precedido o han acompañado los incrementos de la sismicidad. Estos cambios en el comportamiento de la actividad volcánica hasta la fecha no se han reflejado en la ocurrencia de actividad eruptiva.

Mapa de amenaza volcánica del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro, Memoria explicativa

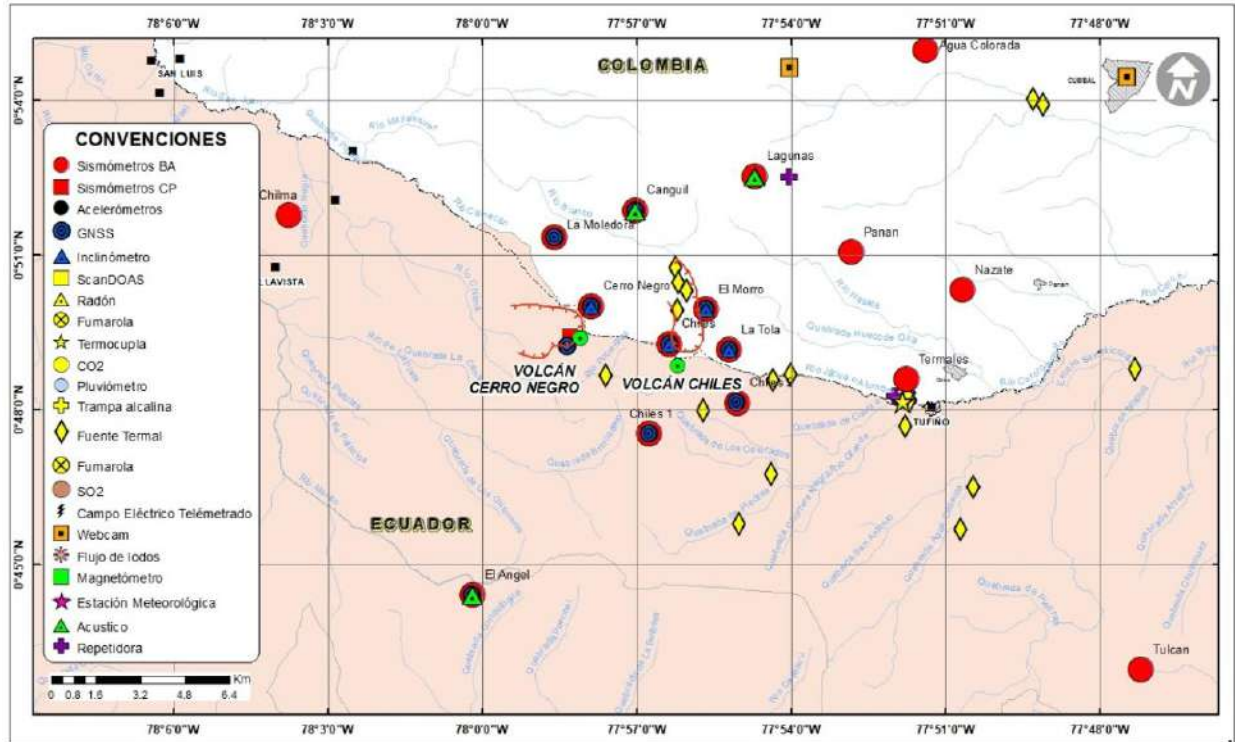


Figura 9. Localización de estaciones telemétricas (sismómetros, inclinómetros y GNSS) y sitios de muestreo en fuentes termales para la vigilancia volcánica del CVCCN

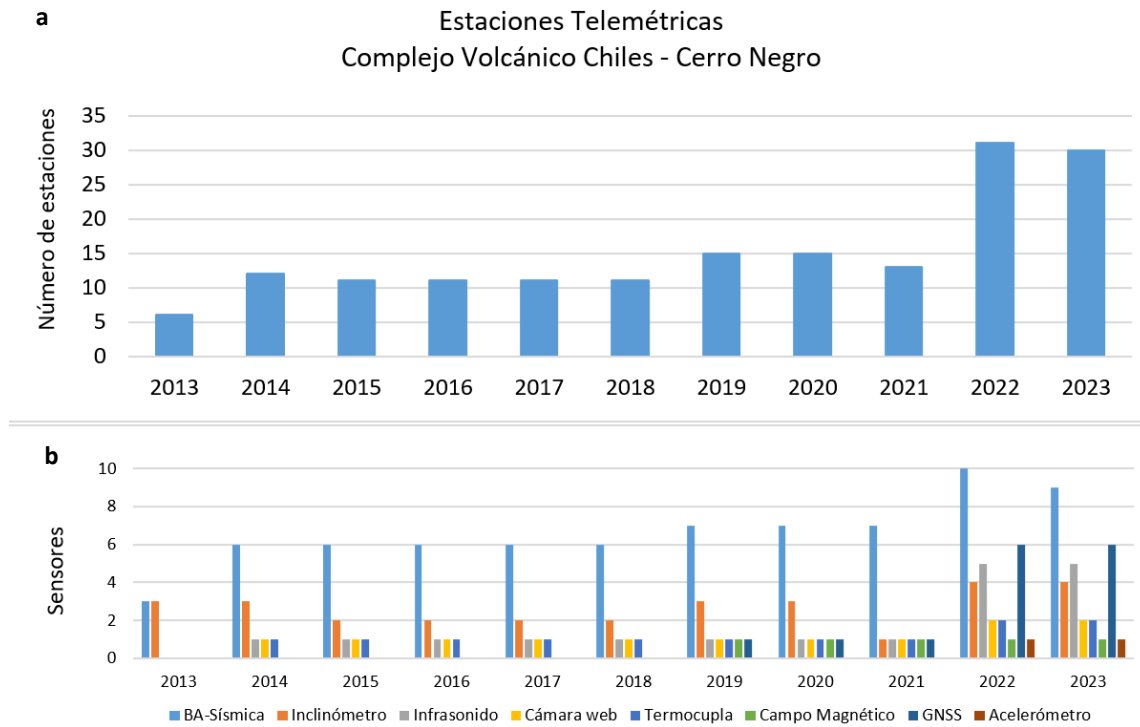


Figura 10. Evolución de la red de estaciones telemétricas del CVCCN entre 2013 – 2023

a) Número de estaciones por año; b) número de sensores de mediciones de parámetros físicos por año.

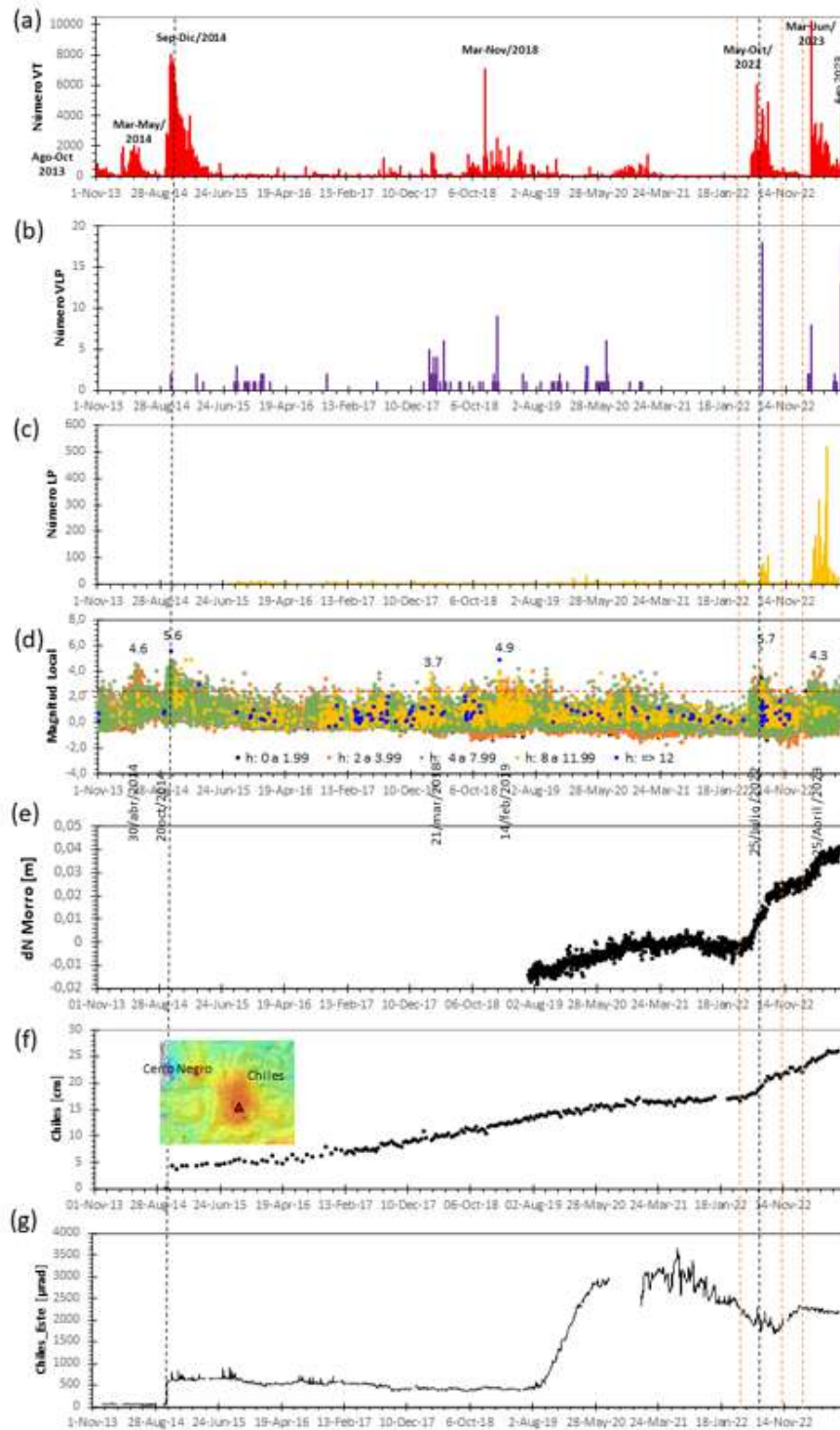


Figura 11. Ocurrencia diaria de sismos en el CVCCN desde noviembre de 2013 a agosto 9 de 2023 a) VT; b) VLP; c) LP; d) magnitudes locales; e) desplazamiento en la dirección N en metros del GNSS de Morro; f) desplazamientos en la dirección LOS (Línea de observación satelital) de la zona indicada por el triángulo en el volcán Chiles y g) inclinación en la componente E del inclinómetro electrónico Chiles. Las líneas verticales negras discontinuas destacan el tiempo en el que ocurrieron los sismos de magnitudes locales 5,6 el 20 de octubre 2014 y 5,7 el 25 de julio de 2022 y las líneas verticales discontinuas en naranja resaltan los inicios de periodos de incremento en la deformación y de los enjambres en 2022 y 2023. Fuente: SGC (2023-2013).

Tabla 3. Registro del número de sismos del CVCCN desde el año 2013 hasta julio de 2023

Año	VTA	LP	VLP	HB	Total
2013	14 356	0	0	0	14 356
2014	440 119	1	2	0	440 122
2015	94 391	174	23	55	94 643
2016	12 703	170	6	79	12 958
2017	16 644	168	1	19	16 832
2018	82 276	157	58	51	82 542
2019	100 462	95	38	54	100 649
2020	41 096	819	31	33	41 979
2021	9 836	262	0	5	10 103
2022	178 479	1 864	18	298	180 659
2023	196 226	7 406	25	180	203 837
Total					1 198 680

Tabla 4. Sismos sentidos con magnitud relevante en la zona de influencia del CVCCN entre 2013 y 2023

Fecha	Magnitud
16 de octubre de 2013	4,3
30 de abril de 2014	4,6
20 de octubre de 2014	5,6
21 de marzo de 2018	3,7
14 de febrero de 2019	4,9
25 de julio de 2022	5,7
25 de abril de 2023	4,3

La sismicidad VT se distribuye espacialmente al S y SE del CVCCN principalmente, con profundidades que no superan los 15 km bajo el nivel de la cima del volcán Chiles, aproximadamente 4700 m s.n.m. Los hipocentros más superficiales se localizan en zonas más proximales a la cima de Chiles (figura 12). Se resaltan tres fuentes o zonas sísmicas, una mediando los dos volcanes, otra al S y SSE del volcán Chiles a distancias menores de 4 km y la más lejana al SE de Chiles a distancias hasta de 14 km debajo de la caldera Potrerillos (figura 13). Desde que se inició el monitoreo del CVCCN, la localización de las fuentes sísmicas de los VT ha mostrado una migración desde la parte distal al SE a la parte proximal al S del volcán Chiles.

La actividad superficial del CVCCN se caracteriza principalmente por la presencia de solfataras y fuentes termales (actividad hidrotermal). El seguimiento de parámetros fisicoquímicos y composición química se realiza desde el lado ecuatoriano en: Aguas Hediondas, Potrerillos, Lagunas Verdes, Artesón, Hondón, Aguas Negras, Monte Lodo, Tablones y desde el lado colombiano en: Tambo, Río Blanco, La Cristalina, Rincón Bello, El Infiernillo, La Peña y Baño Grande. En Aguas Hediondas, Aguas Negras, Lagunas Verdes y La Peña, las mediciones han indicado mayores emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), los cuales son gases tóxicos que dependiendo de la concentración y tiempo de exposición pueden suponer un grave riesgo para las personas y los animales, de hecho, se han observado pequeñas aves muertas. El manantial termal Aguas Hediondas ha presentado mayores cambios en los parámetros fisicoquímicos: descenso del pH, un leve incremento de temperatura y conductividad eléctrica. Los parámetros fisicoquímicos medidos en el Hondón muestran: incremento en las emisiones gaseosas, altas temperaturas y cambios morfológicos, que indican una perturbación del sistema hidrotermal que puede estar relacionada con la interacción con el sistema magmático. Por otra parte, hasta el momento no se ha detectado dióxido de azufre (SO_2), lo que sugiere que hasta el momento no hay magma a niveles superficiales.

6. Zonificación de la amenaza volcánica: mapa de amenaza

La zonificación es el resultado de la integración de las simulaciones computacionales de los fenómenos volcánicos con posibilidad de ocurrencia en el CVCCN, obtenidas a partir de la caracterización de los depósitos volcánicos, observados en campo, considerando como posibles centros de emisión las zonas de colapso (anfiteatro) y sectores alrededor de los bordes cratéricos. Los fenómenos volcánicos se modelaron utilizando las siguientes herramientas de simulación: para corrientes de densidad piroclástica - Titan2D (Patra *et al.*, 2005), para flujos de lava - LavaPL (Connor *et al.*, 2012), para lahares - LaharZ (Iverson *et al.*, 1998; Schilling, 2014), para caída de piroclastos transportados por el viento - Tephra2 (Bonadonna *et al.*, 2005), para caída de piroclastos por proyección balística - Eject! (Mastin, 2001) y para avalancha de escombros - cono de energía (Malin y Sheridan, 1982).

La representación de la amenaza por actividad futura del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro (CVCCN) considera erupciones similares a las comprendidas en el registro geológico y que el centro o foco de emisión de la actividad futura serán el interior y/o el borde de los anfiteatros presentes en los volcanes Chiles y Cerro Negro.

El mapa de amenaza volcánica para el CVCCN presenta tres zonas de amenaza (figura 14) designadas como alta, media y baja, cuyos límites son transicionales. Esta zonificación está basada en la potencialidad de los daños que causan los diferentes fenómenos volcánicos y la posibilidad de que un área determinada pueda ser afectada por más de uno de ellos.

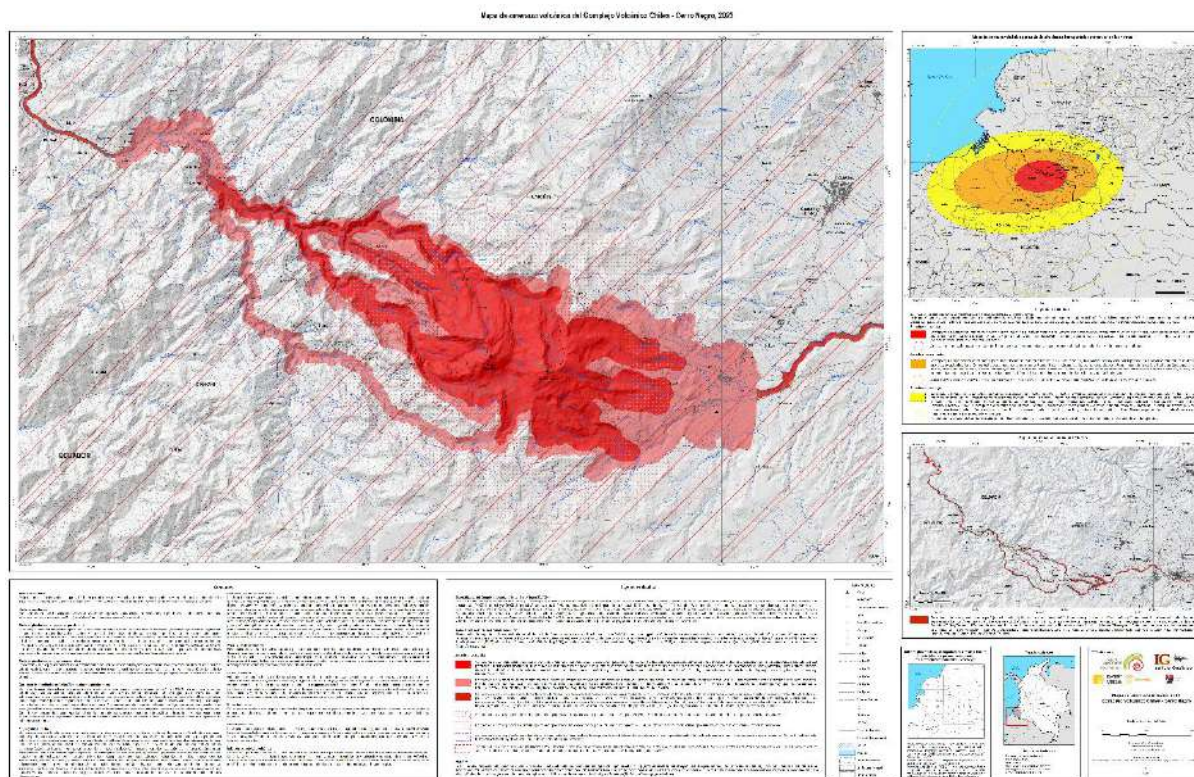


Figura 14. Mapa de amenaza volcánica del complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro

El marco principal (parte izquierda), del mapa de amenaza (figura 15), muestra la amenaza volcánica integrada y su respectiva leyenda. En la parte superior derecha, el marco presenta la zonificación de la amenaza por caída de piroclastos transportados por acción del viento y su respectiva leyenda (figura 16). En la parte inferior derecha, el marco presenta la amenaza por lahares y su respectiva leyenda (figura 17).

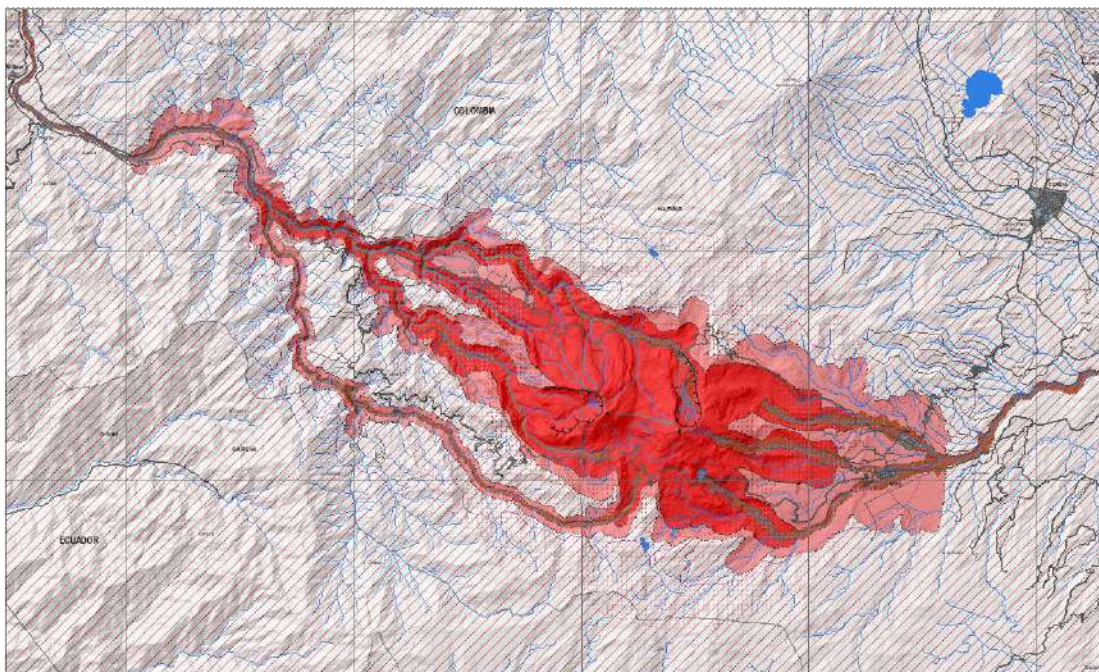




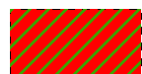
Figura 15. Recuadro principal del mapa de amenaza volcánica
La simbología con su respectiva leyenda se explica en el texto.

6.1. Leyenda explicativa de la amenaza del marco principal del mapa de amenaza del CVCCN

- Zona de amenaza alta

 Corresponde a la zona que sería afectada por corrientes de densidad piroclástica (flujos u oleadas piroclásticas) o flujos de lava, en caso de que ocurra una erupción pequeña a moderada (VEI 1 a 3), afectando las partes altas de los volcanes y los cauces de los ríos que nacen en los mismos. El límite de esta zona hacia el oriente se encuentra a 8 km por el río Chiles y Játiva, a menos de 1,5 km de las poblaciones de Chiles (Colombia) y Tufiño (Ecuador), medidos desde la cima del volcán Chiles. El límite hacia el noroccidente se encuentra a 13 km por el río Chilma y 19 km por el río San Juan medidos desde la cima del volcán Cerro Negro, afectando los poblados de San Felipe, Mayasquer, San Juan y San Luis en Colombia y Maldonado en Ecuador.

 Corresponde a la zona que podría ser afectada por corrientes de densidad piroclástica (flujos u oleadas piroclásticas), en caso de que ocurra una erupción grande (VEI ~ 4). El límite de esta zona se encuentra a 12 km al oriente del volcán Chiles, afectando las poblaciones de Chiles y Nazate (Colombia) y Tufiño (Ecuador) y 24 km al occidente del volcán Cerro Negro, afectando las poblaciones de San Felipe, Mayasquer, Tiuquer, San Juan y San Luis, Puemanví, San Francisco, La Unión, Guayabal y Limones (Colombia), Chilma, Laurel, Maldonado, Gualcambí, Guadual, Imbu y Utal (Ecuador).



Corresponde a la zona que sería afectada por flujos de lodo (<ITA>lahares</ITA>). Eventos con volumen de hasta 20 millones de m³ podrían avanzar 35 km al oriente y 50 km al noroccidente. Hacia el oriente, estos flujos avanzarían por los ríos Chiles, Játiva o Alumbre, Grande y Carchi-Guáitara, hasta 10 km aguas abajo del Puente Internacional Rumichaca. En su trayectoria se encuentran las poblaciones de Chiles en Colombia y Tufiño y Tulcán en el Ecuador. Hacia el noroccidente - occidente avanzarían por los ríos Blanco o Mayasquer, San Juan, Cainacán, Chilmá y de La Plata, pasando cerca a los poblados colombianos de El Tambo, San Felipe, Mayasquer, Tiuquer, San Juan, San Luis, Puemanvi, San Francisco, La Unión, Limones, San Antonio, Guayabal y Tallambí (Colombia) y Chilma, Laurel, Maldonado, Gualcambí, Guadual, Imbu, Utal, Puemaral, Pindical y El Chical (Ecuador).



Corresponde a la zona que podría ser afectada por caída de proyectiles balísticos en caso de que ocurra una erupción pequeña (VEI 1 - 3). El límite de esta zona se encuentra a aproximadamente a 5 km de los puntos de emisión de cada volcán.



Corresponde a la zona que podría ser afectada por caída de proyectiles balísticos en caso de que ocurra una erupción grande (VEI ~ 4). El límite de esta zona se encuentra a aproximadamente a 9 km de los puntos de emisión de cada volcán.



Corresponde a la zona que podría verse afectada por avalancha de escombros, producto del colapso de flanco del edificio volcánico, siendo un evento poco frecuente. El límite de esta zona se encuentra hacia el oriente a aproximadamente 11 km de la medida desde la cima del volcán Chiles y al occidente a 20 km desde la cima del volcán Cerro Negro.



Corresponde a la zona con acumulaciones mayores a 10 cm de ceniza y lapilli, según la tendencia predominante del viento en el área. Podría afectar zonas de los municipios de Cumbal, Cuaspud, Pupiales, Ipiales, Aldana, Guachuca, Potosí (Colombia) y poblaciones de las provincias de Carchi e Imbabura (Ecuador). El material acumulado en contacto con el agua lluvia puede ser removilizado y podría generar lahares.

6.2. Leyenda explicativa de la zonificación de la amenaza por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos

La delimitación de las zonas potencialmente afectadas por caídas de ceniza y lapilli fue realizada usando el modelo numérico de advección-difusión Tephra2 (Bonadonna *et al.*, 2005). Se representa en el mapa el escenario con una columna de 18 km de altura sobre el complejo volcánico. La distribución de las caídas piroclásticas sigue la tendencia predominante de los vientos en el área con dirección oriente – occidente. La figura 16 muestra la zonificación de la amenaza por caída de piroclastos (ceniza y *lapilli*) transportados por el viento.

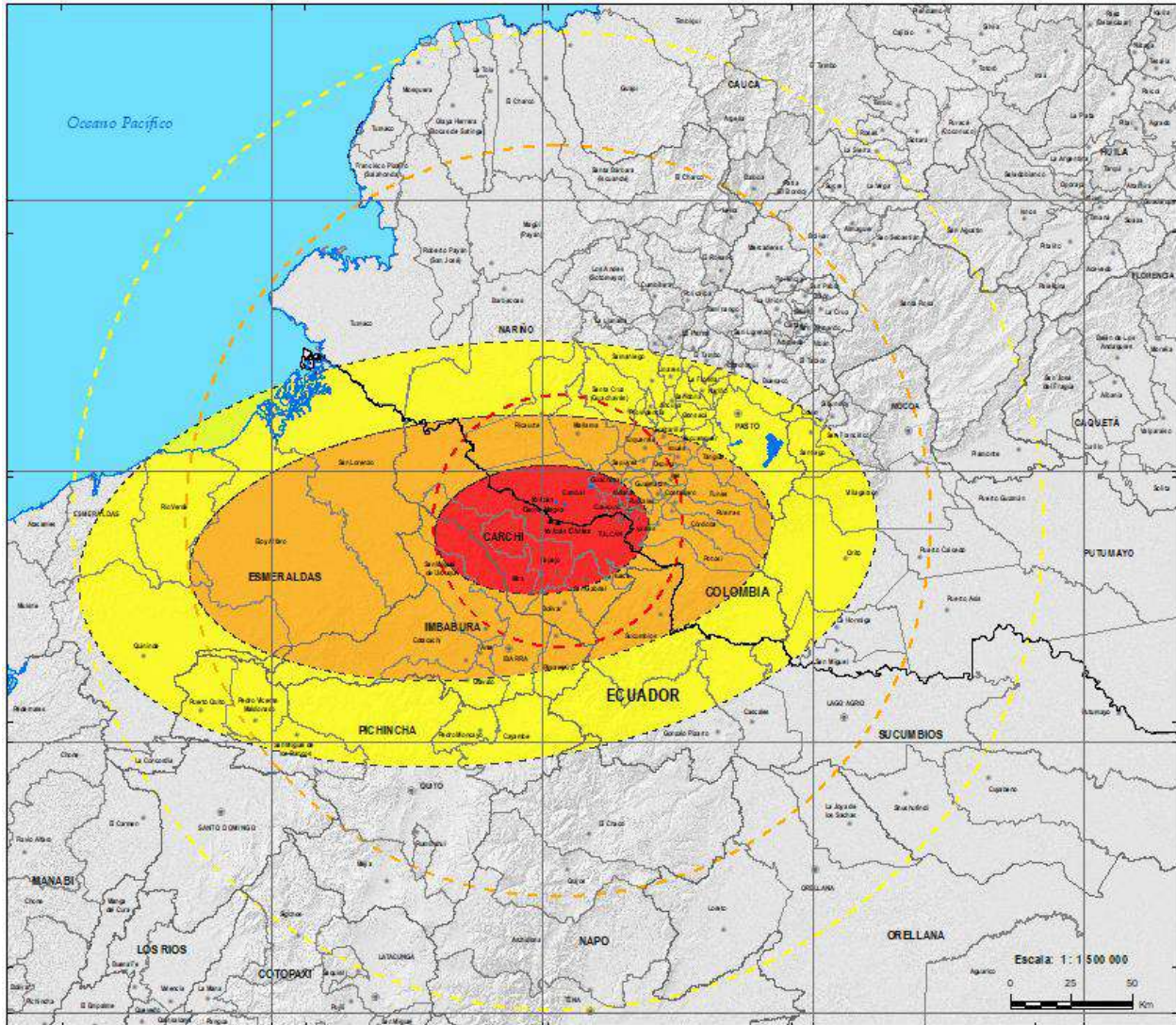



Figura 16. Zonificación de la amenaza por caída de piroclastos transportados por la acción de los vientos. La simbología con su respectiva leyenda se describe en el texto.

- Zona de amenaza alta

 Corresponde a la zona con acumulaciones mayores a 10 cm (mayor a 100 kg/m²) de ceniza y lapilli, dispersándose en la dirección predominante de los vientos en el área, extendiéndose hasta 51 km. Podría afectar zonas de los municipios de Cumbal, Cuaspud, Pupiales, Ipiales, Aldana, Guachucal, Potosí (Colombia) y poblaciones de las provincias de Carchi e Imbabura (Ecuador). En esta zona pueden ocurrir colapsos de techos, destrucción total de la vegetación.

 Zona expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones mayores a 10 cm, cubriendo la zona potencialmente afectada con tendencia de viento diferente de la principal.

- Zona de amenaza media



Corresponde a la zona afectada principalmente por caída de piroclastos con acumulaciones entre 1 y 10 cm (entre 10 y 100 kg/m²) de ceniza y lapilli, dispersándose en la dirección predominante de los vientos en el área, extendiéndose hasta 153 km. Podría afectar zonas de los municipios de Cumbal, Ricaurte, Mallama, Santacruz, Túquerres, Sapuyes, Ospina, Imués, Guaitarilla, Iles, Gualmatán, Contadero, Funes, Tangua, Puerres, Yacuanquer, Pasto, Córdoba, Guachucal, Aldana, Pupiales, Ipiales, Potosí, Barbacoas (Colombia) y poblaciones de las provincias de Carchi, Imbabura Esmeraldas y Sucumbíos (Ecuador). En esta zona pueden ocurrir pérdidas totales de cosechas, muerte de ganado, daños parciales a infraestructuras, contaminación de fuentes y reservorios de agua.



Zona expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones entre 1 cm y menor a 10 cm, cubriendo la zona potencialmente afectada con tendencia de viento diferente de la principal.

- Zona de amenaza baja



Corresponde a la zona afectada principalmente por caída de piroclastos con acumulaciones entre 0,5 mm y 1 cm (entre 0,5 y 10 kg/m²) de ceniza y lapilli, dispersándose en la dirección predominante de los vientos en el área, extendiéndose hasta 200 km. Podría afectar zonas de los municipios de Tumaco, Barbacoas, Ricaurte, Mallama, Santacruz (Guachavés), Samaniego, Túquerres, Providencia, Ancuya, Guaitarilla, Consacá, Sandoná, La Florida, Linares, El Tambo, Nariño, Chachagüí, Buesaco, Pasto, Tangua, Yacuanquer, Funes, Puerres, Córdoba, Potosí e Ipiales en el departamento de Nariño y Santiago, Colón, Sibundoy, San Francisco, Villagarzón, Orito y La Hormiga en el departamento del Putumayo (Colombia) y poblaciones de las provincias de Sucumbíos, Pichincha, Imbabura y Esmeraldas (Ecuador). En esta zona se puede producir cierre de aeropuertos, daños a aeronaves y afectación de rutas aéreas, daños a líneas de transmisión y centrales eléctricas, daños a cultivos. Con caídas persistentes se puede afectar la salud humana, especialmente las vías respiratorias y los ojos.



Zona expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones entre 0,5 mm y menor a 1 cm, cubriendo el área potencialmente afectada con tendencia de viento diferente de la principal.

6.3. Leyenda explicativa de la amenaza por lahares

La amenaza alta por flujos de lodo volcánico (lahares) es representada en la figura 17 con polígonos de color rojo achurados por líneas inclinadas verdes.

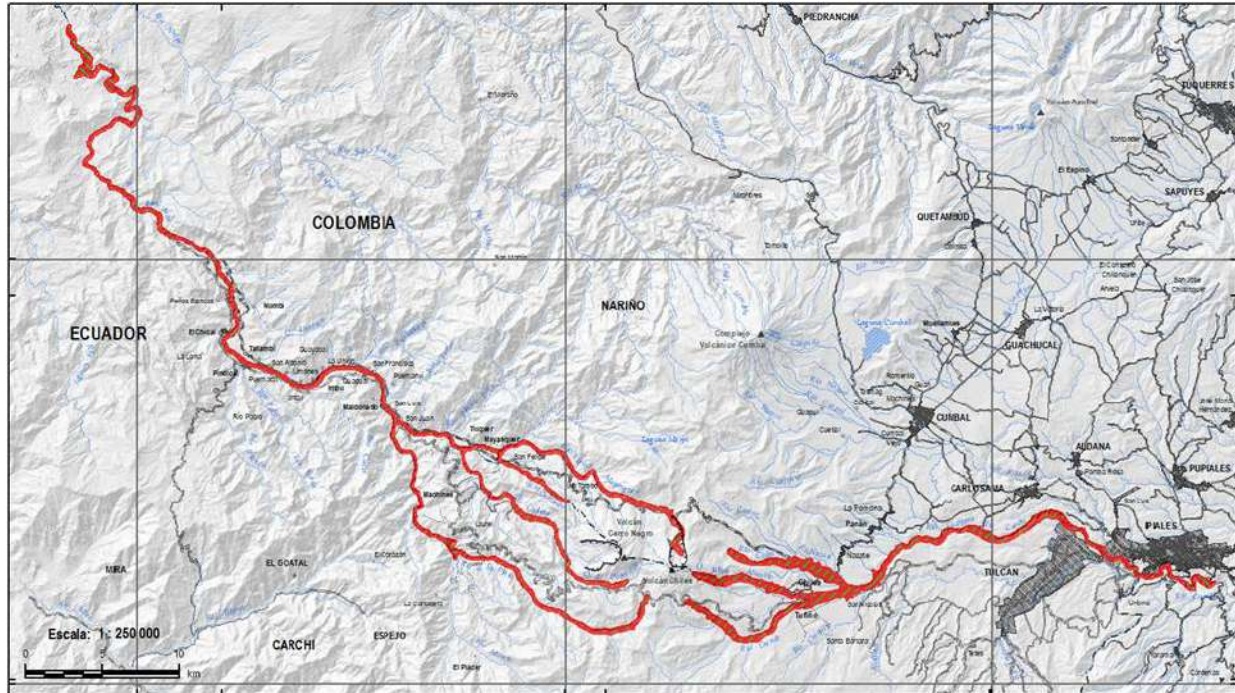
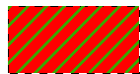


Figura 17. Amenaza alta por flujos de lodo volcánico (lahares)



Corresponde a la zona que sería afectada por flujos de lodo (lahares). Eventos con volumen de hasta 20 millones de m^3 podrían avanzar 35 km al oriente y 50 km al noroccidente. Hacia el oriente, estos flujos avanzarían por los ríos Chiles, Játiva o Alumbre, Grande y Carchi-Guaitara, hasta 10 km aguas abajo del Puente Internacional Rumichaca. En su trayectoria se encuentran las poblaciones de Chiles en Colombia y Tufiño y Tulcán en el Ecuador. Hacia el noroccidente - occidente avanzarían por los ríos Blanco o Mayasquer, San Juan, Cainacán, Chilmá y de La Plata, pasando cerca a los poblados colombianos de El Tambo, San Felipe, Mayasquer, Tiuquer, San Juan, San Luis, Puemanvi, San Francisco, La Unión, Limones, San Antonio, Guayabal y Tallambí (Colombia) y Chilma, Laurel, Maldonado, Gualcambí, Guadual, Imbu, Utal, Puemaral, Pindical y El Chical (Ecuador).

Conclusiones y recomendaciones

El Complejo Volcánico Chiles Cerro Negro presenta actividad y ha mostrado signos de inestabilidad desde el 2013, con incremento importante en su actividad sísmica, deformación en sus edificios volcánicos y cambios en sus fuentes termales. Este complejo volcánico cuenta con una vigilancia permanente por parte del SGC (Colombia) y el IG-EPN (Ecuador).

Los volcanes que forman el complejo presentan colapsos parciales de sus edificios, en el volcán Cerro Negro este colapso ocurrió hace 6000 años y en Chiles posiblemente entre 10 000 y 15 000 AP. La evaluación de la amenaza del CVCCN se basa en el conocimiento que se tiene sobre su actividad pasada considerando, por el momento, las partes altas de los anfiteatros de los volcanes Chiles y Cerro Negro como centro de emisión de erupciones futuras. En caso de detectarse otro centro de emisión, el mapa de amenaza debe modificarse.

Los datos disponibles y el conocimiento que se tiene de los procesos eruptivos del CVCCN, muestran periodos de reposo de varios miles de años y su actividad eruptiva ha sido principalmente de tipo efusivo, donde se han generado flujos de lava de composición andesítica basáltica hasta riolítica. Un importante flujo piroclástico se asocia al volcán Cerro Negro y adicionalmente, actividad de tipo freática a freatomagmática ha sido identificada hacia el sur del volcán Chiles en el sector de Lagunas Verdes, sitio en el cual podría también haberse concentrado la actividad en tiempos históricos.

El tipo de erupciones que podrían presentarse en el complejo serían principalmente de carácter efusivo, sin embargo, el grado evolutivo y la presencia de flujos piroclásticos hacen considerar, en un futuro, la posibilidad de ocurrencia de actividad de tipo explosivo, la cual también se podría generar por el emplazamiento y destrucción de domos en los anfiteatros. La caída de piroclastos podría estar asociadas a la actividad explosiva, así como eventos de tipo freático a freatomagmático.

Las áreas que pueden ser afectadas por la mayoría de los fenómenos volcánicos fueron delimitadas mediante simulaciones computacionales, tomando como parámetros de entrada las características de los depósitos asociados a la actividad del CVCCN encontrados en campo.

Las zonas de las amenazas alta, media y baja, mostradas en el mapa, son el resultado de la superposición de las áreas que pueden ser afectadas por los diferentes fenómenos volcánicos, teniendo en cuenta su daño potencial. Los límites entre las zonas de amenaza, designadas con líneas discontinuas, indican una transición de las características de los fenómenos y, por lo tanto, de la amenaza. En ningún caso representan límites tajantes o absolutos entre una y otra zona de amenaza.

El área más afectada, en caso de una erupción volcánica futura, serían los sectores N y W del complejo, y en caso de generación de flujos piroclásticos y flujos de lodos (lahares), las poblaciones de Chiles (Colombia), Tufiño (Ecuador) y las poblaciones asentadas en los valles de los ríos y quebradas que nacen en el volcán.

Erupciones futuras del CVCCN, en que se generen caída de piroclastos afectarían extensas áreas alrededor del complejo, depositando un mayor espesor y fragmentos más grandes alrededor de los focos de emisión. Aunque la dirección predominante de los vientos en la zona es WSW, la distribución final de los piroclastos de caída dependerá de la altura de la columna eruptiva y dirección de los vientos en el momento de la erupción. Áreas diferentes a las delimitadas en la dirección principal de los vientos, se

indican en el mapa de amenaza, con un círculo de líneas discontinuas que designan las zonas de amenaza alta, media y baja por este fenómeno.

Adicionalmente, sismos volcánicos de magnitudes > 4 hasta 5,9 se han presentado en esta etapa de reactivación y se pueden seguir presentando con la posibilidad de causar daños a la infraestructura en la zona cercana a los epicentros.

Se recomienda tener en cuenta el mapa de amenaza para fines de preparación de planes de contingencia, como base para el manejo y ordenamiento territorial, educación a la comunidad, así como para estudios de gestión del riesgo.

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

Se recomienda a autoridades y comunidades mantenerse continuamente informados acerca de la actividad del volcán, mediante la consulta a la información publicada por el SGC en su página web (<http://www.sgc.gov.co>).

Referencias

- Arteaga, J. B. (1910). *Apuntamientos sobre Mayasquer y Cumbal*. Imprenta departamental. Pasto.
- Baxter, P. (1990). Medical effects of volcanic eruptions: 1. Main causes of death and injury. *Bulletin of Volcanology*, 52, 532-544. <https://doi.org/10.1007/BF00301534>
- Baxter, P. J. y Gresham, A. (1997). Deaths and injuries in the eruption of Galeras Volcano, Colombia, 14 January 1993. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77, 325 – 338. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00103-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00103-5)
- Beverage, J. P. y Culbertson, J. H. (1964). Hyperconcentrations of suspended sediment. Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., *J. Hydraul. Div.*, 90, 117–128.
- Baxter, P. J., Neri, A. y Todesco, M. (1998). Physical modelling and human survival in pyroclastic flows. *Natural Hazards*, 17, 163-176. <https://doi.org/10.1023/A:1008031004183>
- Blong, R. J. (1984) *Volcanic hazards: a sourcebook on the effects of eruptions*. Academic Press, London.
- Bocanegra, L. C. y Sánchez, J. J. (2017). Mapa de fallas de los volcanes Chiles-Cerro Negro (Nariño) a partir de minería de datos y confirmación de campo. *Boletín de Geología*, 39(3), 71-86.
- Bonadonna, C., Connor, C. B., Houghton, B. F., Connor, L., Byrne, M., Laing, A. y Hincks, T. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersion: hazard assessment of a multi-phase eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 110. <https://doi.org/10.1029/2003JB002896>
- Cepeda, H. (2009). *Escenarios eruptivos*. Ingeominas, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales. Informe interno.
- Congreso de Colombia. (2012). *Ley 1523 de 2012 (abril 24 de 2012)*. Diario Oficial 48411. República de Colombia – Gobierno Nacional. Bogotá, D. C.
- Connor, L., Connor, C., Meliksetian, K. y I., Savov. (2012). Probabilistic approach to modeling lava flow inundation: a lava flow hazard assessment for a nuclear facility in Armenia. *Journal of Applied Volcanology*, 1(3), 1-19. <https://doi.org/10.1186/2191-5040-1-3>
- Cortés, G. P. y Calvache, M. L. (1996). *Geología de los volcanes Chiles y Cerro Negro*. Informe interno. San Juan de Pasto: Ingeominas.
- Cortés, G. P. y Calvache, M. L. (1997). *Informe sobre la evaluación de la amenaza volcánica del Chiles y Cerro Negro. Mapas de amenaza. Primera versión*. Pasto: Ingeominas.
- Courtland, L. (2015). *Get_Wind. Herramienta de extracción de datos de viento de NCEP-DOE Reanalysis 2, asociada a la herramienta en línea VHUB Tephra2*. <https://vhub.org/resources/tephra2>.
- Coviello, M. F. (2000). *Estudio para la evaluación del Entorno del Proyecto Geotermico Binacional Tufiño – Chiles – Cerro Negro*. Proyecto Olade – Cepal – GTZ.
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda*. Bogotá, D. C. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-2018>
- Dufek, J., Esposti O. T. y Roche, O. (2015). Pyroclastic Density Currents: Processes and Models. En Haraldur Sigurdsson (editor), *The Encyclopedia of Volcanoes*. (Second edition, pp. 617-629). Elsevier Inc. USA.
- Fisher, R. V. (1997). *Hazards Volcanic Events*. <http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>
- FINCIC (Fundación para la Investigación Científica y Desarrollo Cultural de Nariño). (1996). *Informe Final de los precedentes históricos del Volcán Chiles y Cerro Negro*. Pasto.
- García, Y. K. y Sánchez, J. J. (2019). Contribuciones geológicas al modelo conceptual geotérmico en la región de los volcanes Chiles - Cerro Negro (Colombia-Ecuador). *Boletín de Geología*, 41(1), 151-171. DOI: 10.18273/revbol.v41n1-2019008
- ICEL (Instituto Colombiano de Energía Eléctrica). (1983). *Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro, Fase I Estudio de Prefactibilidad*. Bogotá, D. C.: Ministerio de Minas y Energía.
- INECEL (Instituto Ecuatoriano de Electrificación), Geotérmica Italiana SRL y Olade (Organización

- Latinoamericana de Energía). (1982). *Aprovechamiento de los Recursos Geotérmicos de la zona de Tufiño, Ecuador Septentrional*. Informe geo-vulcanológico.
- Iverson, R. M., Schilling, S. P. y Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of lahar hazard zones downstream from volcanoes. *Geological Society of America Bulletin*, 110, 972-984.
- Kilburn, C. R. (2015). Chapter 55 - Lava flow hazards and modeling. En Haraldur Sigurdsson (editor), *The Encyclopedia of Volcanoes*. (Second edition, pp. 957-969). Academic press. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00055-9>
- Malin, M. C. y Sheridan, M. F. (1982). Computer assisted mapping of pyroclastic Surges. *Science*, 217(4560), 637-640. Doi:10.1126/science.217.4560.637
- Monsalve, M. L. y Laverde, C. A. (2016). Contribución al registro de actividad de los volcanes Chiles y Cerro Negro (frontera colombo - ecuatoriana). *Boletín de Geología*, 38(4), 61 - 78. <https://doi.org/10.18273/revbol.v38n4-2016004>
- Mastin, L. G. (2001). *A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions*. Open - File Report 01 - 45. U.S. Geological Survey. Vancouver, WA. <https://pubs.usgs.gov/of/2001/0045/>
- Oikawa, T., Yoshimoto, M., Nakada, S., Maeno Komori, J., Shimano, T., Takeshita, Y., Ishizuka, Y. y Ishimine, Y. (2016). Reconstruction of the 2014 eruption sequence of Ontake Volcano from recorded images and interviews. *Earth, Planets and Space* 68(79). <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0458-5>
- Olade (Organización Latinoamericana de Energía). (1987). *Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro*. Informe final.
- Patra, A., Bauer, A., Nichita, C., Pitman, E. B., Sheridan, M. F., Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Namikawa, L. y Renschler, C. (2005). Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 1 - 21. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.06.014>
- Pérez, F. (1862). *Jeografía Física i Política de los Estados Unidos de Colombia*. Imprenta de la Nación. Bogotá, D. C. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8931>
- Páez, L. V. y Sánchez, J. J. (2022). *Caracterización geomecánica de los macizos rocosos accesibles del Volcán Chiles (Nariño) y parámetros de resistencia del macizo rocoso*. Conferencia en XV Semana técnica de Geología, Ingeniería Geológica y Geociencias, Barranquilla.
- Rodríguez, D. y Córdoba, G. (2018). Evaluación del riesgo por lahares del complejo volcánico Chiles-Cerro Negro. En J. C. Thouret, *Hazard and risk mapping – The Arequipa– El Misti case and other threatened cities* (1ª ed., pp. 87-92). Presses Universitaires Blaise Pascal, Territoires.
- Santamaría, S., Telenchaná, E., Bernard, B., Hidalgo, S., Beate, B., Córdoba, M. y Narváez, D. (2017). Registro de erupciones ocurridas en los Andes del Norte durante el Holoceno: Nuevos resultados obtenidos en la turbera de Potrerillos, Complejo Volcánico Chiles-Cerro Negro. *Revista Politécnica*, 39(2), 7 – 16. https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/884
- Schilling, S. P. (1998). *Laharz: Gis programs for automated mapping of lahar inundations hazard zones*. Open-File Report 98-638. US Geological Survey. Vancouver, WA.
- Self, S. (2006). The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 364, 2073-2097. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1814>
- Seropian, G., Schipper, C. I., Harmon, L. J., Smithies, S. L. y Kennedy, B. M. (2021). A century of ongoing silicic volcanism at Cordón Caulle, Chile: New constraints on the magmatic system involved in the 1921–1922, 1960 and 2011–2012 eruptions. Elsevier Science. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 420(107406), 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107406>
- SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2023 - 2013). *Reportes de la actividad superficial y eruptiva entre los años 2013 a 2023*. Observatorio Vulcanológico y Sismológico del Pasto.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano) y IG-EPN (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional).

- (2014a). *Mapa de Amenaza Volcánica del Volcán Chiles, segunda versión*. <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanChiles/Paginas/mapa-de-amenaza.aspx>
- SGC (Servicio Geológico Colombiano) y IG-EPN (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional). (2014b). *Mapa de Amenaza Volcánica del Volcán Cerro Negro, segunda versión*. <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanCerroNegro/Paginas/Mapa-de-amenaza.aspx>
- Sierra, D. (2015). *Determinación del estado de esfuerzos tectónicos en la zona del Complejo volcánico Chiles Cerro Negro* (Tesis de grado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. <http://bibdigital.e pn.edu.ec/handle/15000/10638>
- Smithsonian Institution (2014). *Global Volcanism Program*. Recuperado de: <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=351110>
- Telenchana, E. R. (2017). *Estudio Geovulcanológico del Volcán Chiles- Provincia del Carchi*. (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Telenchana, E. R., Bernard, B., Hidalgo, S. y Beate, B. (2017). *Modelo Evolutivo del Volcán Chiles*. VIII Jornadas en Ciencias de la Tierra. Departamento de Geología de la Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- Torres, R. (1982). *Estudio de las tobas azufradas del volcán Nevado del Chiles*. (Tesis de geología). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/3399>
- Tsunematsu, K., Ishimine, Y., Kaneko, T., Yoshimoto, M., Fujii, T y Yamaoka, K. (2016). Estimation of ballistic block landing energy during 2014 Mount Ontake eruption. *Earth, planets and space*, 68(88). <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0463-8>
- Vallance, J. W. y Iverson, R. M. (2015). Lahars and their deposits. En Haraldur Sigurdsson (editor), *The Encyclopedia of Volcanoes*. (Second edition, pp. 649 - 664). Academic press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00037-7>
- Van Wyk de Vries, B. y Davies, T. (2015). Chapter 38 Landslides, Debris Avalanches, and Volcanic Gravitational Deformation. En Haraldur Sigurdsson (editor), *The Encyclopedia of Volcanoes*. (Second edition, pp. 665 - 685). Academic press. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00038-9>
- Velásquez M. y Parra, E. (2002). *Geología de las planchas 447 - Ipiales y 447 BIS – Tallambí, Departamento de Nariño. Memoria Explicativa, Escala 1:100 000*. Bogotá, D. C.: Ingeominas.
- Villavicencio, M. (1858). *Geografía de la República de Ecuador*. Consultado el 20 de enero de 2016. <https://archive.org/details/geografiadelare00villgoog>
- Wilson, L. (1972) Explosive volcanic eruptions-II. The atmospheric trajectories of pyroclasts. *Geophysical Journal International*, 30(4),381–392. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb05822.x>
- Wilson, C. y Houghton, B. (2000). Pyroclastic transport and deposition. En Haraldur Sigurdsson (editor), *The Encyclopedia of Volcanoes*. (Second edition, pp. 545 - 554). Academic Press.

Índice de figuras

Figura 1. Localización del CVCCN	8
Figura 2. Mapa geológico del Complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro	12
Fuente: tomando como referencia los trabajos realizados por Cortés y Calvache (1996)	12
Figura 3. Área que podría ser afectada por avalancha de escombros	19
Figura 4. Área que podría ser afectada por corrientes de densidad piroclástica	20
Figura 5. Área que podría ser afectada por flujos de lodo volcánico (lahares)	22
Figura 6. Zonificación de la amenaza por caídas de piroclastos (ceniza y <i>lapilli</i>) transportados por el viento	23
Figura 7. Área que podría ser afectada por caídas de piroclastos por proyección balística (bloques y bombas volcánicas)	24
Figura 8. Área que podría ser afectada por flujos de lava	25
Figura 9. Localización de estaciones telemétricas (sismómetros, inclinómetros y GNSS) y sitios de muestreo en fuentes termales para la vigilancia volcánica del CVCCN	30
Figura 10. Evolución de la red de estaciones telemétricas del CVCCN entre 2013 – 2023	30
Figura 11. Ocurrencia diaria de sismos en el CVCCN desde noviembre de 2013 a agosto 9 de 2023	31
Figura 12. Localización de fuentes o zonas sísmicas del CVCCN para el periodo comprendido entre 2013 y 2023	33
Figura 13. Localización de fuentes o zonas sísmicas del CVCCN para el periodo comprendido entre el 2019 – 2023, para eventos con magnitud mayor a 2	33
Figura 14. Mapa de amenaza volcánica del complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro	35
Figura 15. Recuadro principal del mapa de amenaza volcánica	36
Figura 16. Zonificación de la amenaza por caída de piroclastos transportados por la acción de los vientos	38
Figura 17. Amenaza alta por flujos de lodo volcánico (lahares)	40

Índice de tablas

Tabla 1. Unidades eruptivas del volcán Chiles	14
Tabla 2. Unidades Eruptivas del volcán Cerro Negro	15
Tabla 3. Registro del número de sismos del CVCCN desde el año 2013 hasta julio de 2023	32
Tabla 4. Sismos sentidos con magnitud relevante en la zona de influencia del CVCCN entre 2013 y 2023	32