Vigilada Mineducación

Distribución espacial de Corrientes de Densidad Piroclástica ante la eventual erupción del Volcán Paramillo de Santa Rosa.

Spatial distribution of Pyroclastic Density Currents in the event of an eruption of the Paramillo de Santa Rosa Volcano.

MARINELA SÁNCHEZ PINO

Proyecto de grado

Asesor

Milton Giovanny Obando Quintero

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE CIENCIAS

GEOLOGÍA

MEDELLÍN

2025

TABLA DE CONTENIDO

Lista de figuras 3
Lista de tablas 3
Resumen 4
Abstract 5
1. Introducción 6
2. Generalidades 7
2.1. Pregunta de investigación 7
2.2. Hipótesis 7
2.3. Objetivo general 7
2.4. Objetivos específicos 7
3. Zona de estudio 8
3.1. Localización 8
3.2. Población y vías de acceso 9
3.3. Climatología y uso del suelo 9
3.4. Hidrografía 9
3.5. Geomorfología 10
3.6. Geología regional 11
Unidades del basamento 12
Unidades del área distal 13
3.7. Evolución 15
3.8. Marco tectónico 20
3.9. Registros de actividad sísmica 21
4. Metodología 22
4.1. Revisión bibliográfica y cartográfica 22
4.2. Simulación de escenarios de distribución de CDP 22
5. Resultados 23
6. Discusión 26
7. Conclusiones y recomendaciones 28
Referencias bibliográficas 30
Anexos 33
Anexo 1. 33
Anexo 2. 33

Lista de figuras

Figura 1. Localización y relieve del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa -CVPSR-. 8

Figura 2. Geología regional del Volcán Paramillo de Santa Rosa. Tomado de: Pulgarín Álzate et al., (2017) 15

Figura 3. Historia evolutiva del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa -CVPSR-. Tomado de Pulgarín Álzate et al., 2017 17

Figura 4. Cronología de la distribución de las unidades litoestratigráficas del CVPSR Tomado de Pulgarín Álzate et al., 2017. 19

Figura 5. Fallas y lineamientos del área proximal del CVPSR. Tomado de Pulgarín Álzate et al., 2017. 21

Figura 6. Simulación de espesor de la pila de CDP del CVPSR.....25

Figura 7. Simulación de velocidades de la pila de CDP del CVPSR.....26

Lista de tablas

Tabla 1. Unidades geológicas regionales del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa. 12

Resumen

El Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa es un estratovolcán resultado de un vulcanismo principalmente andesítico a dacítico, de contenido medio en K_2O y afinidad calcoalcalina, ubicado en el departamento de Risaralda – Colombia. El CVPSR está conformado por dos edificios volcánicos mayores superpuestos y una estructura menor asociada a un domo tipo colada, producto de dos periodos eruptivos: el primero de 2.3 a 0.56 millones de años y el segundo de 0.56 millones de años hasta el holoceno; durante estos periodos se acumularon flujos de lava, corrientes de densidad piroclástica, avalanchas y flujo de escombros. Este volcán se clasifica como volcán activo en estado de reposo y sus máximos eventos eruptivos esperados son la generación de Corrientes de Densidad Piroclástica -CDP- concentradas y diluidas.

Con el fin de entender cómo se distribuiría una Corriente de Densidad Piroclástica concentrada ante una eventual erupción del Paramillo de Santa Rosa; se identificaron las características geológicas, geomorfológicas, topográficas, registros de actividad sísmica, la historia eruptiva del volcán y la distribución de los productos; para luego hacer uso del software TITAN 2D, que permite la simulación de un modelo de flujos granulares a partir de la selección de parámetros del material. Para el caso de estudio se evidencia que su distribución es uniforme por las laderas, presenta velocidades medias de 28 m/s y distancias aproximadas de 4 km.

Palabras clave: Titan 2D, simulación, flujo piroclástico, escenarios de distribución de CDP.

Abstract

The Paramillo de Santa Rosa Volcanic Complex - CVPSR - is a stratovolcano resulting from predominantly andesitic to dacitic volcanism, with medium K2O content and calc-alkaline affinity, located in the Risaralda department in Colombia. The CVPSR consists of two superimposed major volcanic edifices and a smaller structure associated with a lava dome, formed during two eruptive periods: the first from 2.3 to 0.56 million years ago, and the second from 0.56 million years ago to the Holocene; during these periods, lava flows, pyroclastic density currents, avalanches, and debris flows accumulated. This volcano is classified as active but in a state of repose, and its maximum expected eruptive events are the generation of concentrated and diluted Pyroclastic Density Currents (PDC).

To understand how a concentrated pyroclastic density current would be distributed in the event of an eruption of Paramillo de Santa Rosa, the geological, geomorphological, and topographical characteristics were identified, along with seismic activity records, the volcano's eruptive history, and the distribution of products. Then, the TITAN 2D software was used, which allows for the simulation of granular flow models based on the selection of appropriate parameters. For the case study, it is evident that its distribution is uniform along the slopes, presenting average speeds of 28 m/s and approximate distances of 4 km.

Keywords: Titan 2D, simulation, pyroclastic flow, PDC distribution scenarios.

1. Introducción

Los volcanes son manifestaciones superficiales de procesos térmicos internos, que emiten a la superficie productos sólidos, líquidos o gaseosos (Francis, 1993). Se clasifican según su tipo de actividad como efusivos, si predomina una emisión pacífica de magma y liberación lenta de gases; o explosiva, si predomina una emisión violenta de gases volcánicos y alta producción de material piroclástico. Las rocas piroclásticas son fragmentos de material sólido, ceniza y gas provenientes de vulcanismo que posteriormente se solidifican; sus altas temperaturas, velocidades y capacidad de sobrepasar barreras topográficas hace que se consideren altamente letales y destructivas. Estos productos volcánicos se pueden subdividir en caídas piroclásticas, movilizadas por el viento, y Corrientes de Densidad Piroclástica –CDP–, movilizadas por la gravedad (Penna, Cárdenas & Morales, 2016).

Los volcanes activos pueden representar una amenaza potencial para las comunidades que habitan cerca a los volcanes, es por esto que entidades como el Servicio Geológico Colombiano adelantan estudios y mediciones del nivel de actividad de estas estructuras. En el caso del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa –CVPSR– que hace parte del segmento norte de los volcanes colombianos, se evidencia que presenta actividad sísmica periódica, fumarolas, manantiales termales, por lo que se han identificado erupciones holocenas y estudios como el de Pulgarín (2019), que afirman que los máximos eventos eruptivos esperados, son la generación de CDP concentradas y diluidas asociadas a explosiones y colapsos de domos en la cima del volcán.

El CVPSR tuvo su evolución durante dos periodos eruptivos, que incluyen productos como flujos de lava y depósitos piroclásticos, seguidos por procesos poseruptivos que incluyen colapsos de flancos, avalanchas de escombros, lahares, procesos erosivos, modelado glaciar y retrabajo (Pulgarín, 2017). Debido a que el CVPSR se ha clasificado como volcán activo en estado de reposo y presenta evidencias de actividad interna, se identificaron características topográficas, geológicas y geomorfológicas de la historia eruptiva del volcán, se analizó la distribución y magnitudes de depósitos, y se compilaron datos de actividad sísmica con el fin de simular los escenarios de distribución de CDP concentrados ante una eventual erupción del Paramillo de Santa Rosa por medio del software TITAN 2D, que permitieron evidenciar su distribución uniforme por las laderas, velocidades medias de 28 m/s y distancias a un radio aproximado de 4 km.

2. Generalidades

2.1. Pregunta de investigación

¿Cómo se distribuirían espacialmente las Corrientes de Densidad Piroclástica ante una eventual erupción del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa, considerando las características topográficas actuales del terreno, el posible punto de origen del magma y la interacción del flujo con la superficie?

2.2. Hipótesis

La distribución espacial de Corrientes de Densidad Piroclástica ante una eventual erupción del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa se distribuirá en una zona limitada en la cima del volcán, en la parte más proximal; simulando el flujo en el software Titan 2D, de acuerdo con las características topográficas actuales del terreno, el posible punto de origen del magma, la interacción del flujo con la superficie y la historia eruptiva del Complejo Volcánico de acuerdo con los últimos depósitos registrados.

2.3. Objetivo general

Determinar la posible distribución espacial de las Corrientes de Densidad Piroclástica generadas en la zona de influencia del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa ante una eventual erupción, mediante simulaciones que consideren las características topográficas actuales del terreno, el posible punto de origen del magma y la interacción del flujo con la superficie.

2.4. Objetivos específicos

- Clasificar los datos de actividad sísmica medidos por la estación sismológica del SGC, con el fin de identificar la dinámica interna histórica registrada en el complejo volcánico y evaluar si es necesario cambiar el punto de origen de emisión del magma porque se presente alta actividad en otra zona del volcán.
- Describir los productos volcánicos emitidos por el volcán Paramillo de Santa Rosa durante su historia eruptiva a partir del estudio de geología y estratigrafía del complejo volcánico, realizado por el Servicio Geológico Colombiano.
- Simular escenarios de distribución de Corrientes de Densidad Piroclástica ante una eventual erupción del Volcán Paramillo de Santa Rosa por medio del uso del software Titan 2D.

3. Zona de estudio

3.1. Localización

El Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa se localiza en el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia, en el municipio de Santa Rosa de Cabal - departamento de Risaralda. Se encuentra, aproximadamente, a 8 kilómetros al sureste del casco urbano, en las coordenadas 4°47’15.98” N -75°27’54.89” W, a una elevación de 4600 msnm (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2019). El CVPSR hace parte del Parque Nacional Natural de Los Nevados –PNNN- que incluye el volcán Nevado del Ruíz, el volcán Nevado de Santa Isabel, el volcán Nevado del Tolima, y los Paramillos del Cisne, Santa Rosa y Quindío, a partir de la declaratoria del 30-04-1974 (Ministerio de Agricultura, 1974) por su relación espacial, temporal y genética en su evolución, que se convierte en eje articulador de conectividad biológica regional.

La zona de estudio comprende la zona de influencia del Volcán Paramillo de Santa Rosa, ubicado al este del municipio de Santa Rosa de Cabal (Figura 1), con una extensión total de 486 km^2 de la cual 20 km^2 hacen parte del área urbana a una altura de 1701 msnm. Según la Alcaldía Municipal (*Alcaldía de Santa Rosa de Cabal*, 2018) el municipio se divide en cinco comunas y cinco corregimientos: *1. El Español, 2. El Manzanillo, 3. Santa Barbara – Inspección Forestal los Nevados, 4. Sur – Cedralito – las Mangas, 5. La Capilla*; limita con los municipios de Villamaría, Chinchiná, Pereira y Dosquebradas; ubicado en el área de las planchas geológicas 224 – Pereira y 225 – Manizales, del Servicio Geológico Colombiano -SGC-.

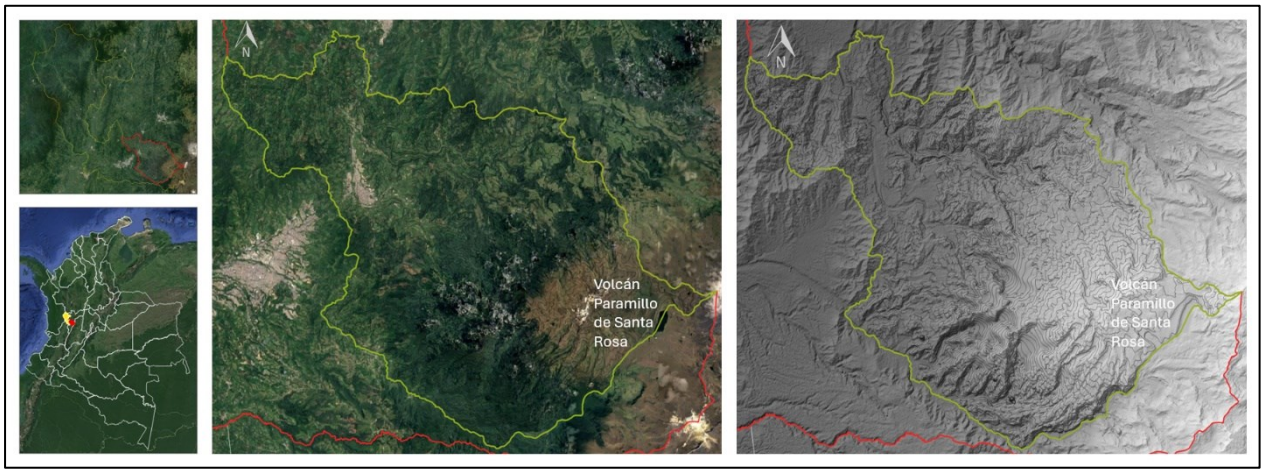

Figura 1. Localización y relieve del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa -CVPSR-.

(Límites de Santa Rosa de Cabal en amarillo, límites de Risaralda en rojo).

3.2. Población y vías de acceso

Santa Rosa de Cabal pertenece a la región del Eje cafetero, según las proyecciones del DANE, (2024) la población a 2024 es de 79960 habitantes. Las vías de acceso al municipio se dividen en: Nacionales, departamentales, locales, vías arterias y vías marginales paisajísticas (Giraldo L., González A., 2009).

3.3. Climatología y uso del suelo

Santa Rosa de Cabal presenta un clima templado de montaña, con temperatura media de 19 °C, una precipitación media anual de 2931mm y humedad relativa de entre el 70 y 80% (CARDER, 2012) los principales usos del suelo del municipio incluyen agricultura, ganadería, turismo, zona industrial, área urbana y residencial y conservación de cuencas hidrográficas y bosques (SisPT, s.f.).

3.4. Hidrografía

El Parque Natural Los Nevados al cual hace parte el Complejo Volcánico Santa Rosa de Cabal, además de abastecer de agua a más de 3 millones de habitantes de 38 municipios del Eje cafetero, cumple la función de sumidero de carbono y regulador del ciclo del agua para las agroindustrias de los valles de los ríos Magdalena y Cauca, dos de los más productivos del país. (*PNNLN*, 2024). Este complejo volcánico presenta un patrón de drenaje de radial a subparalelo; localmente subdendrítico, con tendencia de flujo hacia el NW (Pulgarín Álzate et al., 2017).

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017), las dos principales fuentes hídricas del municipio y afluentes del río Cauca son los ríos **Otún**, cuenca con área de 480 km^2 que abastece el acueducto urbano y recoge las corrientes de los flancos oriental, suroriental, sur y suroccidental de los ríos Barbo y San Juan, quebradas Volcanes y San José; y el río **Campoalegre**, cuenca con área de 440 km^2 que recoge las corrientes de los flancos norte y noroccidental de la quebrada los Pájaros-La Cristalina y los ríos Campoalegrito, San Ramón y San Eugenio.

Las cuencas de los ríos Quindío y La Vieja, aunque no nacen en la zona proximal del volcán, hacen parte del sistema de drenajes que delimitan los productos de la actividad volcánica generada por este. En la parte alta del volcán se destaca la Laguna de Otún que recoge las aguas provenientes de los cerros de Alsacia y los volcanes Paramillo de Santa Rosa, Santa Isabel y Paramillo del Quindío (Pulgarín Álzate et al., 2017). Además, el SGC, (2019) ha inventariado cinco fuentes termales (en el Anexo 1 se describen sus propiedades); cuatro al oeste, una al este.

3.5. Geomorfología

El Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa –CVPSR– es un estratovolcán o volcán compuesto, resultado de un vulcanismo andesítico a dacítico que ha tenido un comportamiento dinámico en el tiempo que produce un modelado del relieve de las cuencas determinado por el paleoclima Pleistoceno – Holoceno, allí se destacan profundos valles glaciares con bordes suavizados por morrenas, producto de la acción glaciar sobre el sector oriental (Pulgarín Álzate et al., 2017). De acuerdo con Robertson et al. (2002) existe una correlación entre la geoforma volcánica y la composición; las rocas andesíticas de viscosidad intermedia generan una actividad efusivo-explosiva que produce piroclastos y lavas y se correlacionan con estratovolcanes; las rocas dacíticas viscosas generan actividad intrusiva que propicia la formación de domos.

En el CVPSR se evidencian dos edificios volcánicos mayores (Pre-Paramillo de Santa Rosa y Paramillo de Santa Rosa) y una estructura menor asociada a un domo tipo colada (Pulgarín Álzate et al., 2017), formada "a partir de intrusiones superficiales de lavas viscosas en la estructura de los edificios volcánicos" (Robertson et al., 2002). La **base del volcán** tiene un perímetro de diámetro entre 17 y 20 km; en la zona más distal, las geoformas asociadas a las cuencas de los ríos Otún y Campoalegre están constituidas por depósitos que rellenaron estas cuencas generando relieves conformados por terrazas de pendientes entre 0° y 12°.

En la **zona media** se presentan morfologías con pendientes controladas por la litología y estructuras tectónicas, que varían desde relieves montañosos, con crestas, muy escarpados hasta un relieve montañoso, colinado, escarpado. En el sector sur, en la cuenca del rio Otún las pendientes varían entre 5° y 18° y se presenta el ápice del abanico de Quindío – Risaralda con relieve invertido, superficies planas y fuertes escarpes laterales de pendientes de hasta 80°; en el sector occidental se destacan fuertes pendientes de entre 30° a 60° asociadas al antiguo edificio volcánico (Pre-PSR), con fuerte disección que forma largas colinas. Se destacan una serie de cuchillas alargadas en dirección NW que corresponde a diques marginales, típicas de depósitos de avalanchas de escombros; las geoformas asociadas a depósitos de flujos de lava tienen pendientes ligeramente suavizadas, entre 0° y 18°. (Pulgarín Álzate et al., 2017).

La **zona proximal**, alcanza los 4602 msnm en la cima; está formada por domos asociados a depósitos de caída, glaciares y fluvioglaciares. Presenta morfologías con pendientes controladas por la litología y estructuras tectónicas, que varían desde relieves montañosos, con crestas, muy

escarpado hasta un relieve montañoso, colinado, escarpado. En el sector occidental se destacan fuertes pendientes de entre 30° a 60° asociadas al antiguo edificio volcánico (Pre-PSR) con fuerte disección que forma largas colinas; las geoformas asociadas a depósitos de flujos de lava tienen pendientes ligeramente suavizadas, entre 0° y 18°. (Pulgarín Álzate et al., 2017).

3.6. Geología regional

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017) como se muestra en la Figura *2*, las unidades geológicas sobre los cuales se depositan los productos volcánicos del CVPSR se dividen en unidades del basamento y del área distal. El **basamento del CVPSR** está conformado principalmente por rocas metamórficas del Complejo Cajamarca de bajo a medio grado de metamorfismo en las facies esquisto verde a anfibolita, que constituyen el núcleo de la Cordillera Central con edades paleozoicas y metamorfismo triásico; y rocas metavolcánicas - metasedimentarias del Complejo Quebradagrande, que consiste en una franja alargada y discontinua de edad albiana, limitada por los sistemas de fallas San Jerónimo (este) y Silvia-Pijao (oeste), suprayacidas por depósitos volcánicos (flujos de lava, depósitos volcanoclásticos) y depósitos glaciares.

En el **área distal del CVPSR**, cerca de los municipios de Santa Rosa de Cabal y Dosquebradas afloran rocas metamórficas paleozoicas-mesozoicas del Complejo Arquía; en los alrededores de Pereira y Santa Rosa de Cabal se encuentra rocas ígneas intrusivas de composición máfica del cretácico inferior asociadas genéticamente al Complejo Quebradagrande; al sur de Salento afloran rocas ígneas intrusivas de composición diorítica y edad cretácica del Complejo Ígneo del Río Navarco; al oeste del Complejo Arquía se encuentran rocas de origen oceánico del Cretácico Superior de la Formación Barroso; en cercanías de Santa Rosa de Cabal aflora la Formación Amagá; en la Serranía de Santa Bárbara afloran sedimentitas del Terciario de las formaciones Cinta de Piedra, La Paila y La Pobreza; también afloran rocas ígneas hipoabisales que corresponden a los pórfidos andesíticos de Pereira y La Virginia y a los pórfidos dacíticos de Salento y Santa Rosa; la mayoría de estas unidades están suprayacidas por depósitos volcanoclásticos secundarios y por depósitos de caídas piroclásticas, que constituyen el denominado Abanico de Quindío–Risaralda.

Tabla 1. Unidades geológicas regionales del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa.

UNIDADES GEOLÓGICAS DEL CVPSR	
DEL BASAMENTO	**DEL ÁREA DISTAL**
↗ Complejo Cajamarca (T-Pf) ↗ Complejo Quebradagrande (K1-VCm5) ↗ Depósitos volcánicos y glaciares (N2-vi, Q-vc, Q-vi, Qg) ↗ Depósitos de caída piroclástica (Qp)	↗ Complejo Arquía (K1-Mbg6) ↗ Stock Gábrico de Pereira–Stock Gabro-diorítico de Santa Rosa (T-Pm) ↗ Formación Barroso (K2-Vm7) ↗ Complejo Ígneo del Río Navarco (E2-Pi) ↗ Formación Amagá (e2-sc) ↗ Formación Cinta de Piedra (n1? n5?-VCc) ↗ Formación La Paila (E3-Sc) ↗ Formación La Pobreza (n6n7-Sc) ↗ Rocas hipoabisales (N1-Hi) ↗ Depósitos de origen volcánico y glaciar (Qv - Qg) ↗ Depósitos de caídas piroclásticas (Qp)

Unidades del basamento

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017), el **Complejo Cajamarca** se define como un conjunto de rocas metamórficas y diabásicas (Nelson, 1957) con cuatro grupos composicionales: pelítico, cuarzoso, calcáreo y máfico, de las facies esquisto verde y anfibolita (Feininger et al., 1972) conformada por esquistos sericíticos, esquistos actinolíticos y esquistos cloríticos, cuarcitas y mármoles, definida como litodemas metamórficos situados entre las Fallas San Jerónimo (oeste) y Otú-Pericos (este) (Maya & González, 1995; Maya, 2001). Con gran cantidad de eventos metamórficos superpuestos, a los que Gómezet al., (2015) asignaron una edad triásica en el Mapa Geológico de Colombia.

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017) el **Complejo Quebradagrande** constituye una franja alargada y discontinua de rocas metavolcánicas y metasedimentarias de edad albiana (Gómez et al., 1995) extendida en el flanco occidental de la cordillera central (Maya & González, 1995), formado por lodolitas negras, cherts, arenitas, conglomerados, brechas, rocas piroclásticas, basaltos, andesitas y localmente ultramafitas y grabros, con diferentes predominios en sector oriental y occidental. Sus ambientes de depositación varían desde fluviales, costeros, deltaicos de grano grueso, de plataforma, de talud, de abanicos submarinos hasta marinos abiertos (Rodríguez & Rojas, 1985; Gómez et al., 1995).

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017) los **Depósitos volcánicos y glaciares** corresponden a depósitos de flujos de lava, volcanoclásticos primarios (flujos piroclásticos y de lava o caídas piroclásticas) o secundarios (lahares o depósitos resedimentados) y glaciares; todos asociados a este Complejo volcánico. Los **Depósitos de caída piroclástica** son generados por actividad de los volcanes Cerro Bravo, Nevado del Tolima, Nevado del Ruiz durante el holoceno.

Unidades del área distal

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017) el **Complejo Arquía** es una unidad de metamorfitas de alta presión de edad cretácica (Mosquera, 1978; Toussaint, 1993), formada por anfibolitas granatíferas, esquistos verdes y negros originados a partir de cabalgamiento de corteza oceánica y un metamorfismo barroviano (Restrepo & Toussaint, 1976); a esta unidad litodémica se le incluyen múltiples unidades que se extiende hasta el Ecuador, limitado por las fallas Cauca-Almaguer y Silvia-Pijao (Maya & González, 1995), y una mezcla tectónica de bloques de orígenes de corteza oceánica, zona de subducción, rocas sedimentarias marinas, entre otras (Moreno & Pardo, 2002). Su edad ha variado según los diferentes autores que lo han estudiado entre cretácico temprano, cretácico medio, triásico y paleozoico.

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017) el **Stock Gábrico de Pereira – Stock Gabro - diorítico de Santa Rosa** es equivalente a la unidad de Rocas Máficas de Pereira – Santa Rosa, cuerpos ígneos de composición que va desde gabro hasta diorita, asociados a los segmentos del Sistema de Fallas de Romeral en el flanco occidental de la Cordillera Central, antes descrito por Mosquera, (1978) de composición diorítica a gabroide, de grano fino a grueso, foliada hacia los bordes por metamorfismo dinámico de edad cretácica temprana (Toussaint, (1996) y triásica (González, 2010).

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017) la **Formación Barroso** está compuesta por rocas volcánicas lávicas, volcanoclásticas y subvolcánicas como basaltos, espilitas, lavas almohadilladas intercaladas, tobas, brechas y aglomerados generadas en ambiente de arco volcánico sobre corteza oceánica (González, 1993). De edad albiana-cretácica superior (Toussaint & Restrepo, 1978) o santoniana-maestrichtiana (Etayo et al., 1982; Nivia et al., 1996).

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017) el **Complejo Ígneo del Río Navarco** corresponde a una serie de cuerpos intrusivos de poca extensión que afloran al sur de Salento, para la cual no se reporta edad, pero por correlación estratigráfica se postula el cretácico superior – terciario, de composición cuarzodiorítica (McCourt et al., 1984), diorita a tonalita (González & Núñez, 1991), que intruyen rocas metamórficas del Complejo Quebradagrande.

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017) la **Formación Amagá** está conformada por tres miembros: Peñitas (conglomerático en la base, de hasta de 100 m de espesor); Sabaletas (arenitas, lutitas y carbones, de hasta 350 m) y Fredonia (arenitas, lutitas y estratos delgados de carbón, de más de 1000 m); de edad del oligoceno superior (Van der Hammen, 1958).

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017) la **Formación Cinta de Piedra** corresponde a una sucesión areniscas y arcillolitas interestratificadas con horizontes de conglomerados, núcleo de la Serranía de Santa Bárbara, de edad oligoceno superior (Van der Hammen, 1958), con contactos fallados con las Formaciones La Paila y La Pobreza. La **Formación La Paila** se conforma por intercalaciones de conglomerados y tobas dacíticas, acumuladas de procesos sedimentarios-volcánicos en dos unidades: inferior (tobas dacíticas, de hasta 200 m) y superior (secuencia clástica, esencialmente conglomerática de entre 400 y 600 m) (Nelson, 1957), de edad mioceno inferior (Van der Hammen, 1958). La **Formación La Pobreza** corresponde a una sucesión de conglomerados y arenitas de edad mioceno superior–plioceno (McCourt et al., 1984)

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017) las **Rocas hipoabisales** son pequeños cuerpos no mayores a 10 km^2 del mioceno, emplazando esquistos del Complejo Arquía; que afloran cerca a las poblaciones de Pereira y La Virginia (composición andesítica); y de Salento (composición dacítica) (Caballero & Zapata, 1984). Los **Depósitos de origen volcánico y glaciar** corresponden al conjunto de depósitos volcanoclásticos secundarios que constituyen el denominado Abanico de Quindío-Risaralda. Los **Depósitos de caídas piroclásticas** cubren de manera uniforme la topografía de rocas del basamento y depósitos volcanoclásticos secundarios que en el sector corresponde al casco urbano de Santa Rosa de Cabal.

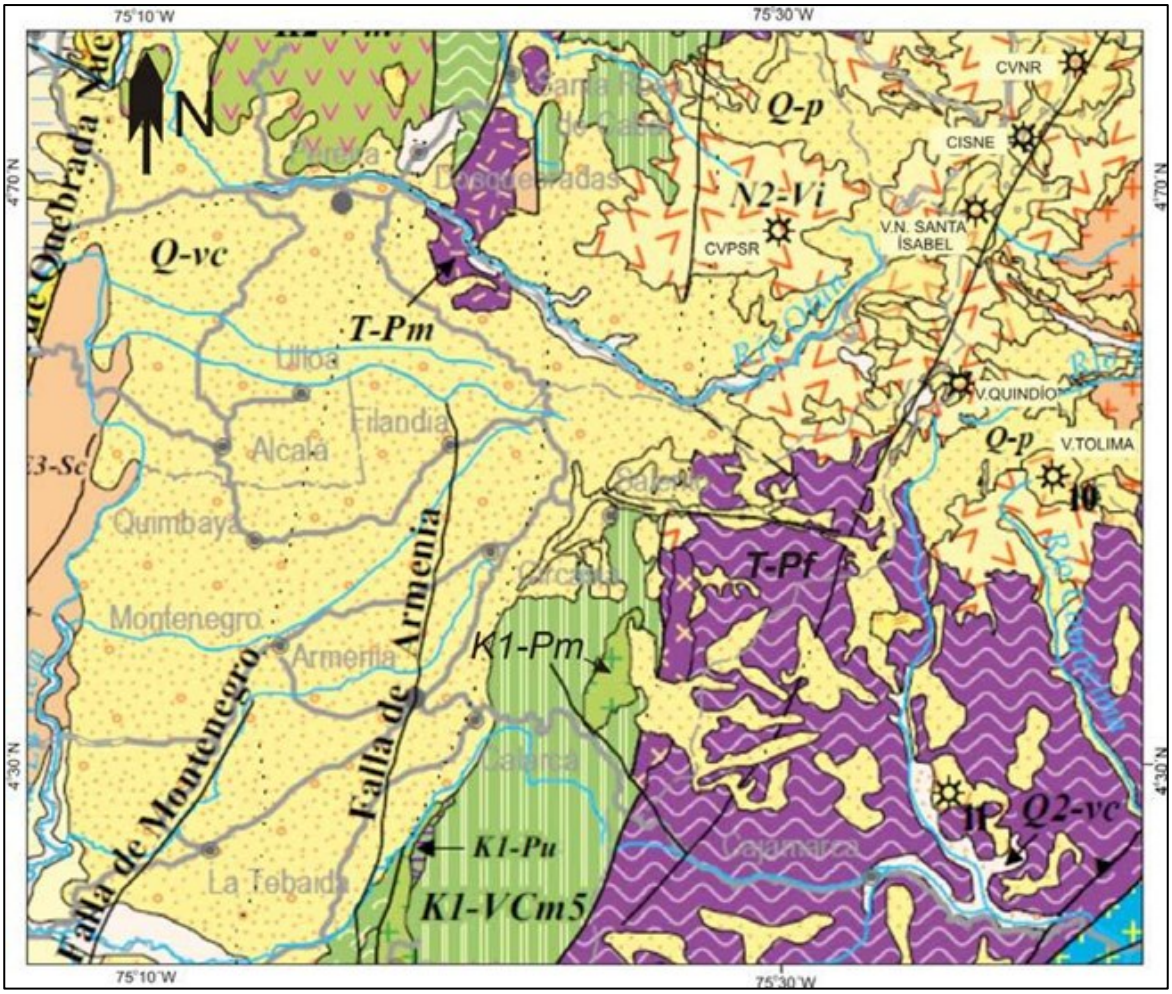

Figura 2. Geología regional del Volcán Paramillo de Santa Rosa. Tomado de: Pulgarín Álzate et al., (2017)

3.7. Evolución

De acuerdo con Pulgarín et al. (2019), el Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa -CVPSR- es un volcán resultado de un vulcanismo principalmente andesítico a dacítico, con contenido medio en K_2O y afinidad calcoalcalina asociado a zonas de subducción. En esta estructura volcánica se identificaron 26 unidades litoestratigráficas, de las cuales cuatro fueron generadas por 3 fuentes volcánicas externas, 6 inconformidades estratigráficas de diferente orden que evidencian su dinámica constructiva y destructiva e intervalos de no depositación, erosión y retrabajo de tipo glaciar y marcan límites entre las 6 épocas (Figura 3) que hacen parte de los dos periodos eruptivos en los cuales se desarrollaron: un edificio volcánico, Pre-Paramillo de Santa Rosa –PrePSR– entre los 2.3 a 0.57 Ma; y el segundo edificio volcánico, Paramillo de Santa Rosa –PSR– entre 0.57 Ma al holoceno y además de un litosoma externo (Cerros Alsacia-Arenero).

LITOSOMA PRE-PSR aflora discontinuamente al O, NO y SO de la zona proximal del complejo y se ubica sobre la discordancia de primer orden (U), de extensión regional, que marca el límite entre el basamento cristalino y los productos volcánicos del CVPSR.

Periodo 1 - Época 1: Época eruptiva en la que se desarrolló la **Formación Tarapacá**, compuesta por flujos de lava andesítica y dacítica que se extienden hacia el NO y el O hasta 20km, cubriendo alrededor de 30km^2, un espesor máximo de 200m, de edad 2.3 ± 0.1 Ma (K/Ar) que se asocia a un volcanismo efusivo.

Periodo 1 - Época 2: Época de erupciones sucesivas separadas por tiempos de reposo en la que se desarrolló la **Formación Zarzal** (~0.79 a 2.05Ma), compuesta por depósitos interestratificados de capas de areniscas, limolitas, arcillolitas y conglomerados volcánicos polimíticos; y la **Formación Samaria**, compuesta por CDP concentradas de espesor variable entre 5 y 100m, masiva, pobremente ordenada, matrizsoportada de grano fino a medio, con bloques de andesita angulosos a subredondeados; contienen pómez y lapilli incrustados en una matriz vitreo cristalina, cubiertos localmente por depósitos de lahar; esta unidad se encuentra fuertemente disectada y afectada por procesos erosivos en los sectores O y SO.

LITOSOMA PSR – Desarrollado sobre una disconformidad de segundo orden, asociada a un hiato estratigráfico prolongado que incluye el edificio volcánico actual. **Periodo 2 - Época 1:** Época que presenta cambio del estilo eruptivo del sistema volcánico que cubrió el antiguo foco del edificio *PRE-PSR*, pasando a un comportamiento explosivo, en el cual se emplazaron lavas andesíticas y dacíticas de la **Formación La Sierra** de edades entre 460.3 a 568.1 Ma y hasta 200m de espesor; estratigráficamente seguida por procesos post-eruptivos que formaron depósitos epiclásticos, avalanchas de escombros y lahares del Abanico de Quindío – Risaralda de la **Formación Cedral–Ceilán**, de espesor medio de 50m.

Periodo 2 - Época 2: Época eruptiva desarrollada sobre una disconformidad volcanotectónica de tercer orden, asociada a una época efusiva inicia y colapsos de flancos S-SW y O del CVPSR, sobre la cual se desarrolló la **Formación Las Águilas**, compuesta por flujos de lava de hasta 100m de espesor, de edad 260.3 ± 5.7 Ma; seguida por procesos post-eruptivos que dieron lugar a la **Formación Campoalegre**, compuesta por depósitos de avalancha de escombros en el O y NO de edad > 48398 ± 1772 años; correlacionados con la **Formación Santa Rosa**, compuesta por depósitos de lahar de edad > 40 000 años.

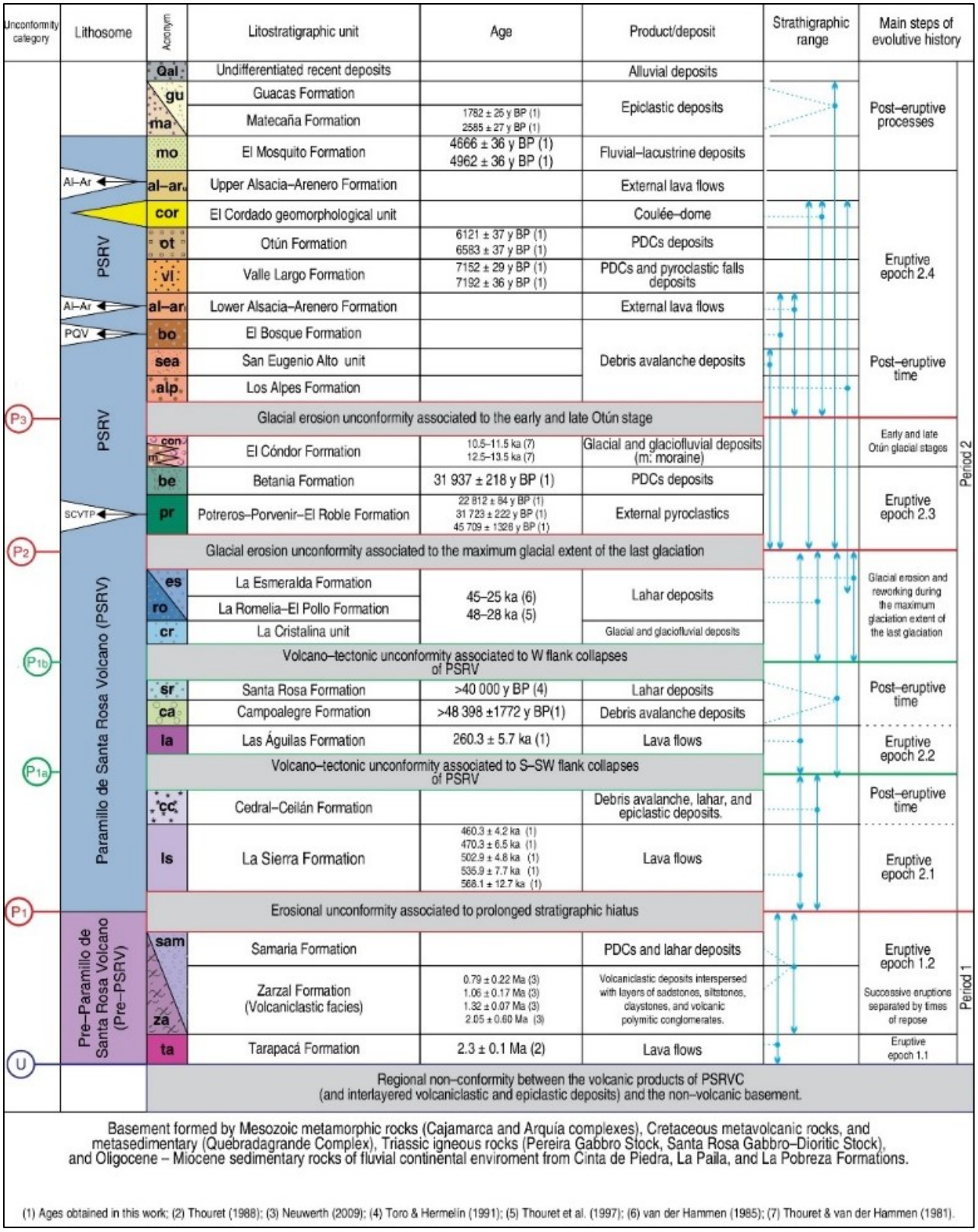

Figura 3. Historia evolutiva del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa -CVPSR-. Tomado de Pulgarín Álzate et al., 2017

Periodo 2 - Época 3: Época eruptiva desarrollada sobre una disconformidad de segundo orden, asociada a la máxima extensión glacial de la última glaciación, sobre la cual se depositaron productos piroclásticos externos de la **Formación Potreros-Porvenir-El Roble***, de espesor de hasta 20m. En la zona proximal de la cuenca del río Campo Alegrito afloran CDP de la **Formación Betania** de edades de 31937 años (^{14}C), masivos, matrizsoportados, pobremente ordenados, moderadamente soldados, con diversos grados de meteorización, compuesto por pómez de tamaño lapilli, fragmentos líticos volcánicos accesorio, que en zonas pasa gradualmente a depósitos de lahar. Luego, etapas glaciares tempranas y tardías de la **Formación El Cóndor**, compuesta por morrenas de depósitos glaciares y fluvioglaciares.

Periodo 2 - Época 4: Época compuesta por una parte post eruptiva formada por depósitos de avalancha de escombros asociada a otros centros eruptivos de la **Formación Los Alpes**, **Unidad San Eugenio Alto** y **Formación El Bosque*** y los flujos de lava externos de la **Formación Alsacia-Arenero Inferior***. De edades entre 7192 a 7152 años, aflora al E y NE La **Formación Valle Largo,** un CDP concentrado, masivo, monolitológico, pobremente clasificado y matrízsoportado, de espesor mayor a 1m, dominado por fragmentos angulares de lava porfídica embebidos en una matriz de ceniza liticocristalina; y un CDP diluido de espesor de 2m, formado por capas y láminas finas de tobas lapilli moderada a bien clasificada, compuesto por fragmentos líticos angulosos de lavas porfíricas y lapilli pumiceo incrustado en una matriz de ceniza fina a gruesa, cubiertos por una caídas piroclásticas y un paleosuelo; sobre esta se encuentra una capa de máximo de 60 cm de CDP diluido de la **Formación Otún** con edades entre 6583 y 6121 años (^{14}C) que aflora al E del volcán, conformado por láminas matrizsoportadas, bien seleccionadas, compuestas por cenizas con cristales, pumita y fragmentos de carbón.

La **Unidad geomorfológica El Cordado** está compuesta por un domo tipo colada emplazado al NO del volcán, de dimensiones 540 x 300 m y 150 m de espesor; seguida por flujos de lava externos de la **Formación Alsacia-Arenero Superior***. Los procesos post-eruptivos dieron lugar a los depósitos fluvio-lacustres que corresponden a de la **Formación El Mosquito** de edades entre 4962 a 4666 años; depósitos epiclásticos de la **Formación Matecaña** de edades entre 2585 a 1782 años y la **Formación Guacas**, donde se intercan depósitos de caída piroclástica y un paleosuelo con edades de 1782 ± 25 años; finalmente, en superficie se encuentran **depósitos aluviales recientes** (Figura 4).

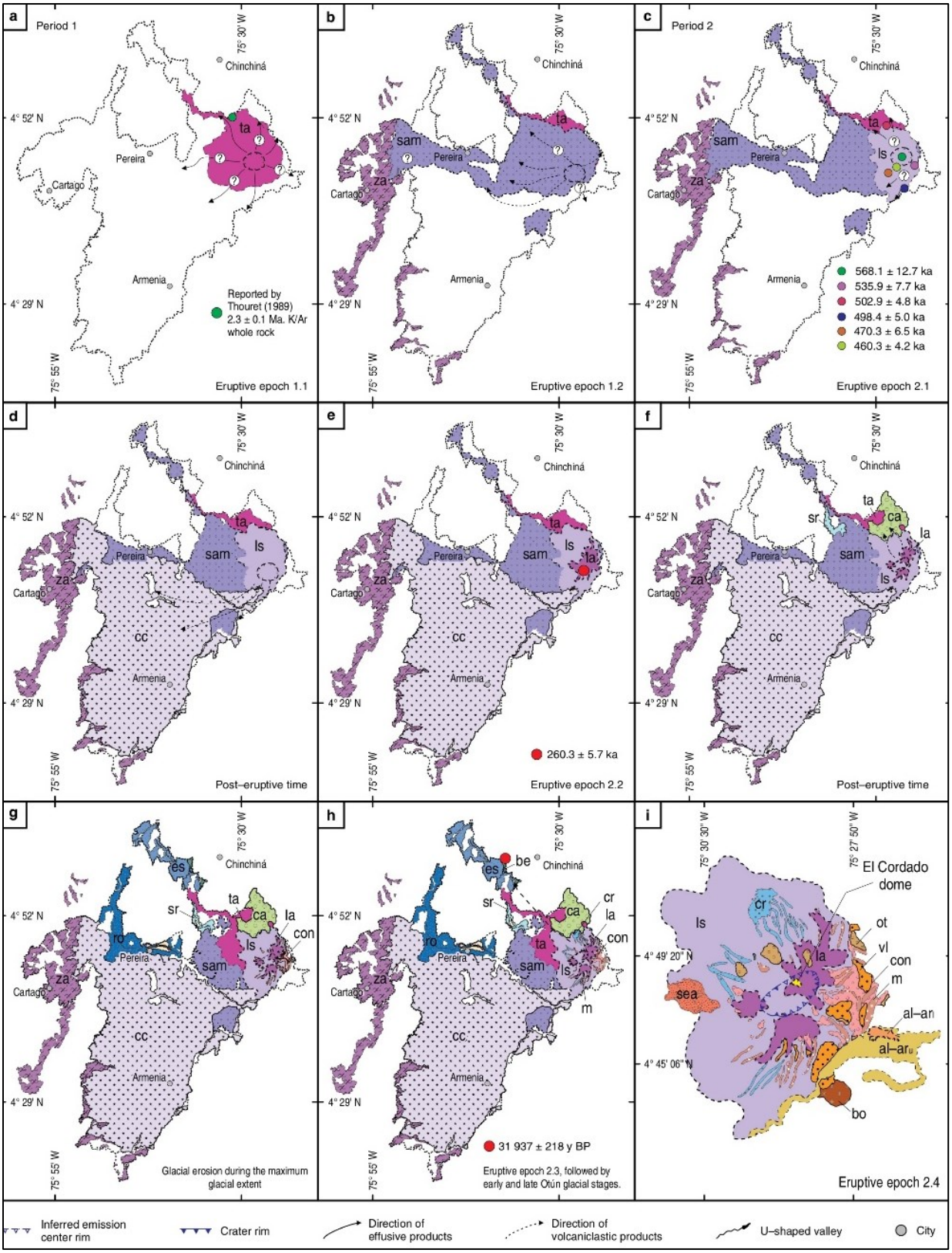

Figura 4. Cronología de la distribución de las unidades litoestratigráficas del CVPSR Tomado de Pulgarín Álzate et al., 2017.

3.8. Marco tectónico

De acuerdo con Pulgarín Álzate et al., (2017), el marco tectónico obedece a la relación entre las placas de Suramérica, Caribe y Nazca, y las microplacas de Coiba y Panamá. El CVPSR se ubica en una zona de esfuerzos transpresivos, influenciado por el Sistema de Fallas Palestina, con tendencia NE-SO, en el que se incluye el lineamiento Armenia – Honda que a su vez se une a la Falla de Santa Rosa que cumplen un rol esencial en la generación de espacios para el ascenso de magma, de gran importancia en el vulcanismo actual por la concentración de fuentes termales, sismos (Bohórquez et al., 2005), la generación de una alta tasa de actividad volcánica (López, 2014) y el control de la parte alta de la cuenca del río Otún; evidenciándose en estas rocas un régimen frágil, con un patrón de fracturamiento de dirección preferencial hacia el NE (Pulgarín Álzate et al., 2017).

El vulcanismo también está influenciado por el Sistema de Fallas Cauca-Romeral, de tendencia N-S que ha generado espacios de depositación a lo largo del valle del río Cauca y se han rellenado con los diferentes productos volcanoclásticos y epiclásticos; se asocia con las Fallas Silvia-Pijao, Manizales - Aranzazu y San Jerónimo, que en conjunto afectan al basamento metamórfico; generó la formación de la cuenca Chinchiná - Santa Rosa; desplazó los cauces de la quebrada La Cristalina y los ríos Otún, San Eugenio, San Ramón y Campoalegrito y afecta depósitos de flujos de lava, CDP y avalanchas de escombros de la parte occidental del CVPSR.

En la intersección de la Falla Manizales-Aranzazu con los Sistemas de fallas NO-SE y NE-SO ocurren las fuentes termales de Santa Rosa de Cabal, San Vicente y La Cristalina (Pulgarín Álzate et al., 2017). Los Sistemas de fallas de tendencia NO-SE y E-O corresponden a una serie de fallas y lineamientos que controlan tramos de los cauces de los ríos Campoalegre, San Ramón, Campoalegrito, San Eugenio, y de la quebrada La Cristalina que por su carácter transcurrente y distensivo han permitido el ascenso de magma (CHEC, 1983).

Las principales estructuras que enmarcan el CVPSR son las mismas que se intersectan en el edificio volcánico (Figura 5): la estructura con tendencia N120°, la Falla Aranzazu – Manizales y la Falla Totarito – Otún – Pereira (Thouret, 1989).

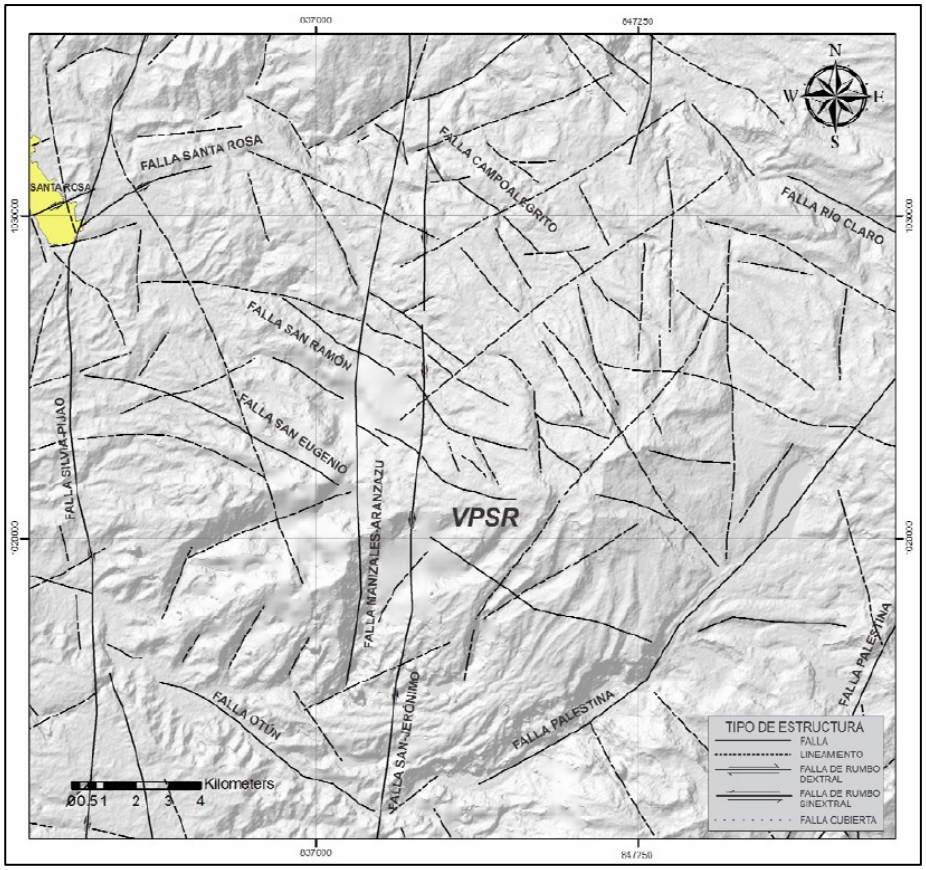

Figura 5. Fallas y lineamientos del área proximal del CVPSR. Tomado de Pulgarín Álzate et al., 2017.

3.9. Registros de actividad sísmica

El seguimiento del nivel de actividad volcánica del Paramillo de Santa Rosa iniciado en noviembre de 2013 (tabla de datos en el Anexo 2) registra casi en su totalidad niveles de alerta verde, que indica que es un volcán con cambios menores sin superar el umbral base de los parámetros monitoreados como sismicidad, deformación de la superficie volcánica, geoquímica, actividad superficial como desgasificación pasiva en el cráter, fumarolas y fuentes termales. Para este nivel de actividad el SGC (2025) recomienda iniciar planes de educación y comunitarios de emergencia, identificar rutas de evacuación y puntos de encuentro conforme al mapa de amenazas y participar en simulacros.

La localización de los sismos con respecto a la estructura volcánica indica que el 38.27% se registró en el norte; el 28.4% en el noreste; el 22.84% en el noroeste; el 4.32% en el este; el 1.85% en el sur; el 1.85% en el sureste; el 1.85% en el suroeste y el 0.62% en el oeste. La magnitud de los sismos se encuentra por debajo de 2 en la escala de Richter en el 85% de los registros a profundidades que varían entre 1.1 y 12.2 km.

4. Metodología

La metodología se dividió en dos fases detalladas a continuación:

4.1. Revisión bibliográfica y cartográfica

A partir de la revisión de recursos de la página web del SGC y el informe técnico de *Geología y estratigrafía del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa*, se identificaron características como geología regional, evolución del volcán, geomorfología e hidrografía; el marco tectónico para identificar zonas de debilidad en la estructura y posteriormente, se revisaron los boletines de actividad sísmica del Segmento Norte de Colombia, emitidos mensualmente por el SGC a partir de noviembre de 2013, para identificar zonas con mayor actividad interna a partir de los registros de la localización de los sismos con respecto a la estructura volcánica, magnitud, profundidad y nivel de alerta registrado durante cada mes.

4.2. Simulación de escenarios de distribución de CDP

Para la simulación de escenarios de distribución de Corrientes de Densidad Piroclástica -CDP- ante una eventual erupción del VPSR, se utilizó el software Titan 2D. Este software permite simular flujos granulares "secos" como flujos piroclásticos, avalanchas de escombros y deslizamientos de tierra (Geophysical Mass Flow Group [GMFG], 2010) a partir de un Modelo de Elevación Digital y la definición de una serie de parámetro. Para esta simulación se siguieron los siguientes pasos:

Lo primero es obtener un DEM de alta resolución, que para el caso de estudio se usó uno con pixeles de 12.5m del periodo 2010 - 2011 con sistema de coordenadas UTM zona 18N del ALOS PALSAR (https://search.asf.alaska.edu), un radar de apertura sintética del Satélite Avanzado de Observación Terrestre del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska Fairbanks.

Segundo, a este DEM se le hizo un procesamiento de datos ráster con el software QGis (*QGIS, 2020, v3.16*), se usó la herramienta *'fill'* para rellenar puntos bajos y así mejorar la continuidad y coherencia del flujo por la pendiente; y un mapa de sombras del relieve con la herramienta 'hillshade' que permite mejorar la visualización de elevación del terreno.

Tercero, en el software Titan 2D (*Titan2D 4.2.0*) se cargó la imagen DEM obtenida y se definieron los parámetros que se usarían para cada simulación a partir de las instrucciones del Manual de usuario (TITAN2D User Guide, 2007) y Murcia et. al, (2010).

5. Resultados

La simulación de distribución de CDP se realizó en el software de código abierto de la universidad de Buffalo, Titan 2D versión 4.2.0, el cual utiliza la resolución de ecuaciones Navier-Stokes para flujos granulares impulsados por la gravedad, que son sensibles a cambios topográficos como rupturas de pendientes, obstáculos o desviaciones de quebradas; reproduciendo eventos a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) y así, zonificar el área de dispersión, velocidades y espesores del flujo según los límites de inundación por flujos sobre el terreno natural (Capra et al., 2011).

Este software ha sido usado para la simulación de CDP en volcanes como el Volcán Arenal - Costa Rica, el Volcán Taranaki - Nueva Zelanda, el Volcán Colima – México, el Volcán El Chichón - México, el Volcán Cerro Machín – Colombia, el Volcán Soufrière Hills - isla de Montserrat, el Volcán Tungurahua - Ecuador y el Volcán Merapi – Indonesia; además de la simulación de avalanchas de escombros y lahares en otros volcanes del mundo (Yun et al., 2013).

Se simularon escenarios de distribución de CDP concentrado por escenarios de colapsos de domos los cuales mostraron una dispersión muy baja y colapsos de columna eruptiva como la evaluada en este trabajo. Se definió la relación H/L a partir de la revisión de la cota en la que se encuentra la mayor distancia alcanzada por depósitos de CDP anteriores y la diferencia de altura para una determinada columna eruptiva además del punto de origen del magma que se tomó como referencia el punto del emplazamiento del domo.

Los parámetros usados en la simulación presentada para el caso de colapso de columna eruptivas tienen valores de 1000 en el tiempo de simulación en segundos y # de pasos computacionales; para el ángulo de fricción interno que hace referencia a la estabilidad de los granos entre ellos se usó un valor de 34° que es lo recomendado por el SGC y es el valor con el cual ellos simulan; el ángulo de fricción basal para CDP concentrados se usaron valores entre 16 y 20, pero esta simulación tiene un valor de 18°, el espesor de la pila fue de 500m, velocidades iniciales de 100 m/s y un espesor mínimo del depósito final de 1 aunque autores afirmar que una pila de 4 m ya alcanza el reposo.

Para las simulaciones realizadas se asumieron escenarios de colapso de domos y colapso de columna eruptiva, los cuales son modelados a partir de las leyes de Coulomb (Manual de usuario, 2007). Las coordenadas de origen del flujo usadas en la simulación se determinaron por la intersección de fallas que dio lugar al emplazamiento del domo de tendencia NO-SE y E-O que controlan el cauce de muchos ríos y permite el ascenso de magma, con coordenadas planas UTM zona 18N X=448496.73, Y= 528498.11.

Para la simulación presentada en la figura 6, se seleccionaron los parámetros de acuerdo con lo indicado por el manual de usuario de TITAN2D (2007) y la información de erupciones previas del volcán según la relación de H/L. El ángulo de fricción interno es un parámetro físico que se relaciona con la evolución del flujo y representa la interacción entre las partículas; para este parámetro, Murcia et al. (2010) sugieren un valor constante de 34°. Ángulo de fricción basal corresponde a la pendiente mínima sobre la cual un material granular comienza a moverse desde su posición estática, para pendientes con vegetación se sugieren valores entre 12 y 37°, los valores mayores corresponden a un material con mayor contenido de sólidos; en este caso se eligió un valor de 18°.

El espesor final mínimo de los depósitos fue de 1 m, ya que el volumen simulado es relativamente pequeño. El tiempo máximo de simulación y el número máximo de pasos se determinó de acuerdo con la velocidad final promedio, teniendo en cuenta que las velocidades inferiores a 4 m/s se acercan al reposo; estos valores fueron de 1000 pasos y 1000 segundos. Los parámetros de simulación de la pila fueron los siguientes: Tipo de pila cilíndrica, espesor inicial máximo de 500 m, extensión de 700 m, ángulo de orientación de 0°, velocidad inicial de 0 m/s y dirección inicial de 0°. Para los valores del flujo en los cuales se encuentran tasa de extrusión, el tiempo activo inicial, tiempo activo final, ángulo de orientación, velocidad inicial, etc. quedan a criterio del investigador ya que no existen estudios directos sobre los valores a utilizar.

La figura 6 muestra los tiempos de simulación crítica del espesor de la pila, que permite ver el avance del comportamiento del flujo, el cual en el punto de salida del material alcanza una altura máxima aproximada de 178 m de elevación y se dispersa por los flancos en promedio con una misma altura comportándose de manera uniforme.

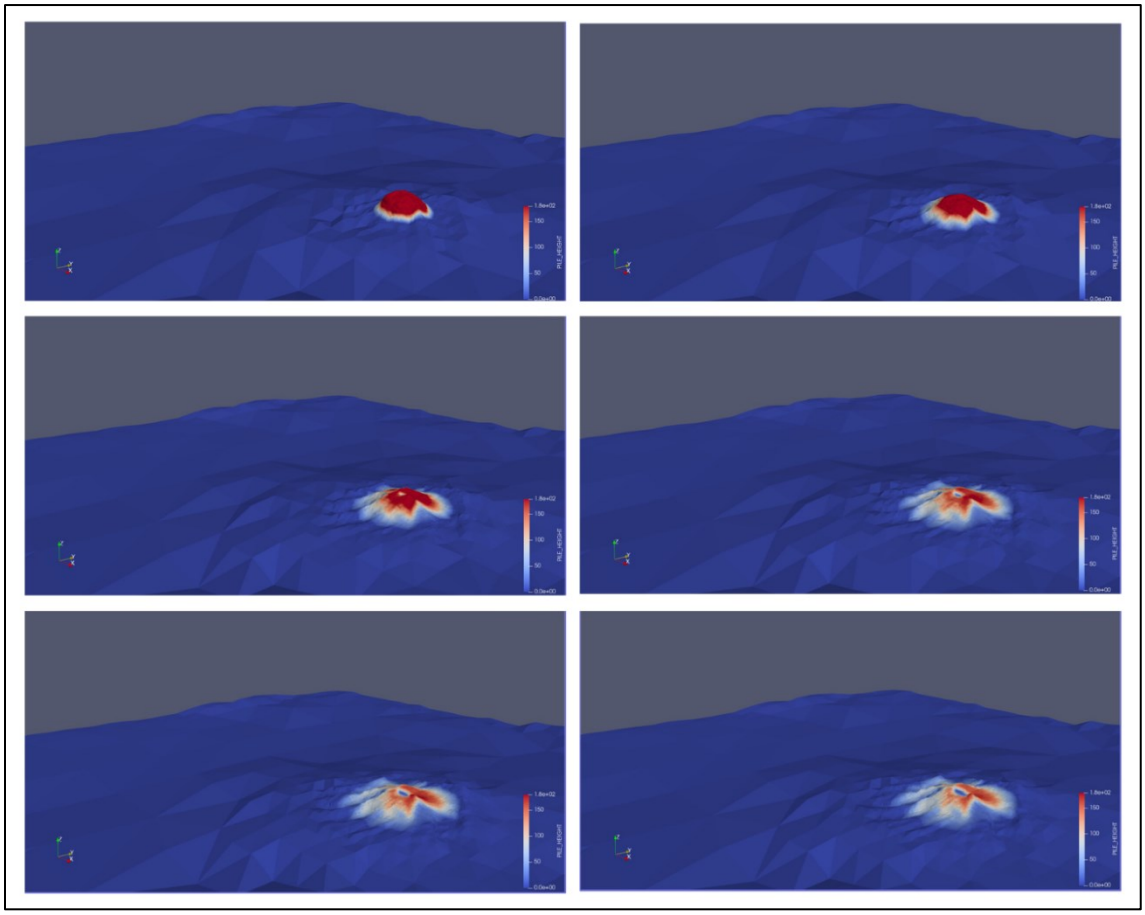

Figura 6. Simulación de espesor de la pila de CDP del CVPSR

La figura 7 muestra los tiempos de simulación crítica de velocidad que permite ver el comportamiento del flujo, se obtuvieron velocidades máximas de aproximadamente 300 m/s y tras avanzar alcanza el reposo muestra una velocidad promedio de 28,368 m/s.

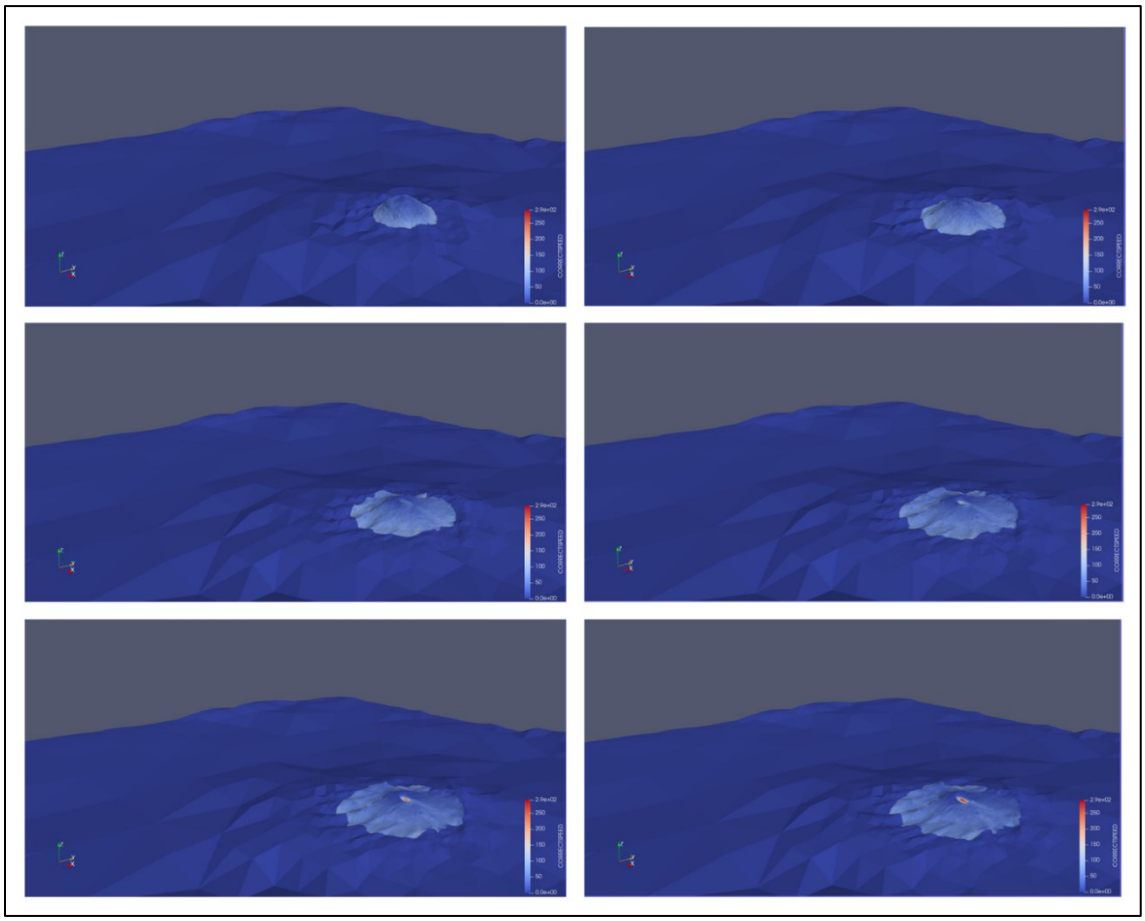

Figura 7. Simulación de velocidades de la pila de CDP del CVPSR.

6. Discusión

La clasificación los datos de actividad sísmica medidos por la estación sismológica del SGC, con el fin de identificar la dinámica interna histórica registrada en el complejo volcánico muestra que las zonas sísmica con mayor actividad se encuentra al N, NE y NO; sin embargo, no se concentran en una sola zona, a una profundidad específica, ni discrimina el tipo de sismos registrados, por lo cual el punto de emisión del magma se definió con la intersección de fallas que permitió el emplazamiento del domo El Cordado, ya que se tuvo en cuenta las zonas de debilidad por donde ya hubo ascenso de magma.

La actividad más extensa registrada por el volcán ocurrió durante el primer periodo, durante la conformación del Pre-PSR, luego presentó un cambio de tipo de actividad volcánica de efusiva a explosiva entre el periodo uno y dos, que podría indicar que en un principio los magmas podrían tener una fuente más profunda, ser más pobres en volátiles y

tras su residencia en la cámara magmática se dio un proceso de asimilación cortical, que también cambió la composición del magma de andesítico a dacítico. Los sistemas de falla asociados han sido propicios para el ascenso de magma. El CVPSR una estructura altamente meteorizada, con procesos posteruptivos muy marcados especialmente en la parte proximal.

De acuerdo con Pulgarín et al. (2019), los máximos eventos eruptivos esperados para este Complejo son la generación de Corrientes de Densidad Piroclástica, que según la historia eruptiva del Volcán Paramillo de Santa Rosa, se encuentran en la Formación Samaria, una CDP concentrada con espesor variable entre 0.7 y 100 m que alcanza unos 45 km de distancia del centro eruptivo; en la Formación Betania, una CDP ubicada en la zona proximal y media que alcanza unos 23 km de distancia del centro eruptivo; en la Formación Valle Largo compuesta por CDP de 1 a 2 m que alcanza unos 6 km de distancia del centro eruptivo; y en la Formación Otún, un CDP de alrededor de 60 cm que alcanza unos 5.5 km de distancia del centro eruptivo.

Llevada a cabo la simulación de las Corrientes de Densidad Piroclásticas -CDP- ante la eventual erupción del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa mediante el software Titan 2D, se tuvo en cuenta las características topográficas del terreno obtenidas con el DEM de resolución de 12.5m y su corrección en QGis, el posible punto de origen del magma asociado la intersección de fallas que dio lugar al emplazamiento del domo de la Unidad Geomorfológica El Cordado, la interacción del flujo con la superficie con la determinación del ángulo de fricción basal, y la historia eruptiva del Complejo Volcánico que muestran que la explosividad no es tan alta y podría ser indicativo de columnas de erupción no muy altas y poco sostenidas como las que ocurren en erupciones vulcanianas, por lo que el área de afectación de una eventual erupción se limitó a la zona proximal.

Los depósitos de CDP del Paramillo de Santa Rosa simulados; permiten observar que una nueva CDP tendrá una distribución uniforme en todos los flancos siguiendo la topografía modelada por el paleoclima Pleistoceno-Holoceno que incluye geoformas asociadas a la pérdida de masa glaciar, y esto permite la dispersión de corrientes en la zona más proximal con respecto al centro de emisión, a aproximadamente 4 km a la redonda. La dispersión de la CDP no fue tan alta a pesar de haber cambiado los parámetros entre los escenarios de colapso de colapso de domos y colapso de columna eruptiva modificando la velocidad inicial.

Se observa que los mayores espesores de la pila se obtienen cercanos a la fuente y a medida que se aleja de esta disminuye, que los mayores valores espesores de la pila tras la erupción tienen valores de 180m y un espesor medio de 50m; sin embargo, el espesor final que se espera que alcance la CDP es 10 veces menor, tras su desgasificación y compactación; la distribución del flujo alcanza velocidades máximas cercanas a los 300 m/s, acordes con los valores esperados para una CDP típica. Las velocidades altas en el centro del punto de eyección al final de la simulación se pueden asociar a que el material que cae no experimenta desaceleración con respecto al terreno que es lo que simula el programa.

7. Conclusiones y recomendaciones

Con el fin de representar los escenarios de distribución de las Corrientes de densidad Piroclástica ante una eventual erupción del volcán Paramillo de Santa Rosa, se realizó una búsqueda de la historia eruptiva, comportamiento actual y el software diseñado para la simulación de estos escenarios, se evaluaron sus patrones y propiedades para utilizar los valores más adecuados en la simulación a partir del cálculo de ecuaciones que permiten observar que la distribución del CDP está limitada a la zona más proximal.

En este trabajo se identificaron las características geológicas, geomorfológicas, topográficas, marco tectónico, registros de actividad sísmica, la distribución de material y la historia eruptiva del volcán durante cada uno de los dos periodos evolutivos, donde se evidencia un cambio de tipo de actividad volcánica de efusivo a explosivo y cambios en la composición de los magmas.

A pesar de que la mayor parte de los sismos con respecto a la estructura volcánica registrados en los boletines de actividad sísmica del SGC se localizan al norte, noreste y noreste, las coordenadas elegidas como punto de inicio del flujo siguen siendo la intersección de las fallas NO-SE y E-O donde se emplazó el domo.

El software TITAN 2D permite la simulación de escenarios de distribución de Corrientes de Densidad Piroclástica ante una eventual erupción del Volcán, los flujos se movilizan en todas las direcciones, presenta velocidades máximas de 300m/s, y distancias aproximadas de 4 km. De acuerdo con estas simulaciones, es posible observar que, siguiendo las tendencias eruptivas recientes, el área de afectación de una eventual erupción será limitada a la zona proximal, tienen un comportamiento poco móvil, de acuerdo con los parámetros que

se pueden obtener a partir de la información geológica de los depósitos, dado que en los últimos eventos la tendencia es a que la distribución sea restringida a la parte proximal del edificio volcánico.

Se recomienda el levantamiento de información adicional como mapas de isópacas e isópletas en los depósitos piroclásticos de caída, pues con esta información se pueden establecer otros parámetros como los son las alturas de las columnas de erupción y por ende la energía y volumen de material emitido con lo cual se pueden construir modelos mucho más precisos.

Ya que es posible acceder a estudios, medición de registros sísmicos y demás información sobre el comportamiento de múltiples volcanes en el país y simular la distribución de flujos con este software de código abierto. Se recomienda estrechar vínculos entre el SGC y las universidades para fortalecer el conocimiento del territorio, que genera una mejor gestión del riesgo y se contribuye a la generación de planes de emergencia y mitigación apropiados.

Referencias bibliográficas

Alcaldía de Santa Rosa de Cabal. (2018). *Santarosadecabal-Risaralda.gov.co. https://www.santarosadecabal-risaralda.gov.co/municipio/nuestro-municipio*

Bohórquez, O., Monsalve, M. L., Velandia, F., Gil-Cruz, F., y Mora, H. 2005. Determinación del Marco Tectónico Regional para la Cadena Volcánica más Septentrional de la Cordillera Central de Colombia. Boletín de Geología, UIS, 27 (44): 55-79.

Boletines-Comunicados - Todos los documentos. (2025). *Sgc.gov.co. https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Forms/AllItems.aspx#InplviewHash5ac6ff66-a39b-467c-9d61-512693e6c058=FolderCTID%3D0x012001. Accedido 2025-02-13*

CARDER. 2012. *Agenda ambiental municipal, municipio de Santa Rosa de Cabal, Risaralda. Pereira. 156 p.*

DANE. (2024). *DANE - Proyecciones de población. Dane.gov.co. https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion.*

Francis P. (1993). *Volcanoes. A Planetary Perspective. Oxford: Clarendon Press. ISBN 0 19 854033 7. Geological Magazine, 131(3), 425–425. doi:10.1017/S0016756800011225*

García, A., Murcia, H., Cortés, G & Laverde, C. (2011). *Simulación de flujos piróclasticos en el volcán galeras con el código titan2d. Departamento de Geociencias.*

Geophysical Mass Flow Group (2010). *Titan2D -Geophysical Mass-Flow Simulation Software User Guide. https://theghub.org/resources/4057/download/Titan2D_User_Guide.pdf*

Geoquímica. (2019). *Sgc.gov.co. https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanParamilloSantaRosa/Paginas/geoQuimica.aspx*

Giraldo L, González A. (2009). *Procesos y estrategias de gerencia ambiental del Plan Básico de Ordenamiento Territorial Santa Rosa de Cabal, Risaralda. https://core.ac.uk/download/pdf/71395602.pdf*

Glosario de términos volcánicos. (n.d.). *https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/VLC-Glosario-Terminos-Volcanicos.pdf*

Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska Fairbanks. https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA

López, C., (2014). Modelo sismo-tectónico esquemático de los principales sistemas de fallas en el sector del volcán Nevado del Ruiz y su relación con el sistema volcánico. https://catalogo.ucaldas.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=49111

Ministerio de Agricultura. (1974). *Resolución ejecutiva 148 del 30 de abril de 1974*. Colombia.

Open-Source Geospatial Foundation (2020). *QGIS (3.16.6)* [Software].

Parque Nacional Natural Los Nevados. (2024). *Parques Nacionales Naturales de Colombia. https://www.parquesnacionales.gov.co/nuestros-parques/pnn-los-nevados/*

Penna, J., Cárdenas, E., Morales, L. (2016). *Descripción de herramientas computacionales aplicadas para analizar el riesgo ocasionado por flujos piroclásticos. Academia y Virtualidad, 6(1), 62–74. https://doi.org/10.18359/ravi.1925*

Pulgarín–Alzate, B.A., Tamayo–Alzate, M., Correa–Tamayo, A.M., Ceballos–Hernández, J.A., Cruz–Toro, Y.P. & Méndez–Fajury, R. (2020). *Stratigraphy and geological evolution of the Paramillo de Santa Rosa Volcanic Complex and its Pleistocene to Holocene eruptive history. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, p. 197–226. Bogotá. https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.05*

Robertson, K. G., Flórez Lage, A., & Ceballos, J. L. (2002). Geomorfología volcánica, actividad reciente y clasificación en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 11(1-2), 37-76. https://doi.org/10.11144/Javeriana.cgeo11-12.gvac

SGC. (2025). *Actividad volcánica del Segmento Norte de Colombia*. https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_Informativo_No_3000_enero_2025.pdf

SGC. (2019). *Colombia cambia su esquema de medición de la actividad volcánica. Sgc.gov.co. https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Colombia-cambia-su-esquema-de-medicion-de-la-actividad-volcanica.aspx*

SGC. (2019). *Generalidades Sgc.gov.co.* https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanParamilloSantaRosa/Paginas/generalidades-volcan-paramillo-santa-rosa.aspx

SGC. (n.d). *sgc.gov.co.* https://saeprod.sgc.gov.co/detallevolcan/24

SisPT. (s.f.). *Ficha de Caracterización Supramunicipal, nodo Pereira Introducción. Retrieved Agosto 5, 2024, from https://terridata.blob.core.windows.net/fichas-supramunicipales/Ficha_71.pdf*

Titan2D -Geophysical Mass-Flow Simulation Software User Guide. (n.d.). *https://theghub.org/resources/4057/download/Titan2D_User_Guide.pdf*

Volcán Paramillo de Santa Rosa. (s. f.). *Servicio Geológico Colombiano. Recuperado 22 de julio de 2024, de https://www.sgc.gov.co/detallevolcan/24/*

Weather Spark. (2024). *El clima en Santa Rosa de Cabal, el tiempo por mes, temperatura promedio (Colombia). Weatherspark.com. https://es.weatherspark.com/y/22424/Clima-promedio-en-Santa-Rosa-de-Cabal-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Humidity*

Anexos

Anexo 1. Caracterización de las fuentes termales del CVPSR. Modificado de SGC, (2019).

	FUENTE TERMAL				
	Los Helechos	**El Cráter**	**La Roca**	**San Vicente**	**El Bosque**
Coordenadas	4°50.25' N 75°32.35' O	4°50.19' N 75°32.34' O	4° 45,10' N 75° 28,08' O	4°50.29' N 75°32.21' O	4°44.75' N 75°27.14' O
Altitud (msnm) Temperatura (° C)	2243 63	2198 58	2220 56	2113 84	3957 22
pH	6.5	6.2	6.5	6.7	4.2
Clasificación general	Aguas neutras bicarbonatadas - sódicas	Aguas neutras bicarbonatadas - sódicas	Aguas neutras bicarbonatadas - sódicas	Aguas neutras cloruradas	Aguas ácidas sulfatadas - cálcicas
Caudal	1.4 L/s	1.9 L/s	1.9 L/s	7.8 L/s	7.8 L/s
Conductividad eléctrica	2.4 mS/cm (20 ºC)	2.2 mS/cm (20 ºC)	2.0 mS/cm (20 ºC)	3.9 mS/cm (20 ºC)	1.1 mS/cm (20 ºC)
Clasificación: Cl^--$SO4^{2-}$-HCO_3^- Na^+-K^+-Mg^{2+} STD	Aguas bicarbonato-cloruradas Aguas inmaduras Aguas salobres	Aguas bicarbonato-cloruradas Aguas inmaduras Aguas salobres	Aguas bicarbonato-cloruradas Aguas inmaduras Aguas salobres	Aguas cloruradas Aguas inmaduras Aguas salobres	Aguas sulfatadas Aguas inmaduras Aguas diluidas

Anexo 2. Datos de sismicidad del Complejo Volcánico Paramillo de Santa Rosa, reportados por el SGC entre noviembre de 2013 y enero de 2025.

Boletín No	Fecha	Nivel de Alerta	Profundidad (km)	Magnitud mayor (M_L)	Localización con respecto a la estructura volcánica
3000	Enero 2025		3 a 9	1.7	Nororiente y noroccidente
2999	Diciembre 2024		1 a 8	menores a 1	Norte, nororiental, noroccidental y sursuroccidental
2998	Noviembre 2024		3 a 6	menores a 1	Oriental y noroccidental
2997	Octubre 2024		3 a 8	1.5	Oriental, nororiental, norte, noroccidental y sur
2996	Septiembre 2024		> 9	menores a 1	Noroccidental y nororiental
2995	Agosto-2024		4 a 9	menores a 1	Norte y occidente
2994	Julio-2024		3 a 9	menores a 1	Todos los flancos a menos de 8 km
2993	Junio-2024		3 a 8	menores a 1	Nororiente y noroccidente
2992	Mayo-2024		6 a 7	menores a 1	Oriental
2991	Abril-2024		2 a 9	1.8	Norte y noroccidental
2990	Marzo-2024		2 a 7	menores a 1	Noroccidental
2989	Febrero-2024		2 a 7	menores a 1	Norte
2988	Enero-2024		6	1.8	Nororiente
2987	Diciembre-2023		?	?	?
2986	Noviembre-2023		3 a 7	menores a 1	Norte
2985	Octubre-2023		2 a 9	menores a 1	Noroccidente
2984	Septiembre-2023		3 a 9	menores a 1	Noroccidente y suroccidente
2983	Agosto-2023		2 a 3	menores a 1	Noroccidente
2982	Julio-2023		3 a 6	1.3	Noroccidente
2981	Junio-2023		2 a 7	?	Norte
2980	Mayo-2023		3 a 11	3.1	Nororiente y noroccidente
2979	Abril-2023		3.5 a 8.9	1.3	Norte y noroccidente
2978	Marzo-2023		2.1 a 7	0.9	Noroccidente
2977	Febrero-2023		1.8 a 9.2	0.5	Norte
2976	Enero-2023		3.7 a 8.5	0.7	Nororiente
2975	Diciembre-2022		3.5 a 6.8	0.7	Noroccidente
2974	Noviembre-2022		3 a 10.8	1.4	Suroccidente
2973	Octubre-2022		3.4 a 10.3	0.4	Noroccidente
2972	Septiembre-2022		2.4 a 12.2	0.7	Noroccidente
2971	Agosto-2022		4 a 8	2.1	Noroccidente
2970	Julio-2022		3.5 a 9.6	0.5	Noroccidente
2969	Junio-2022		2.5 a 9.3	1.7	Noroccidente
2968	Mayo-2022		3 a 8.4	0.3	-
2967	Abril-2022		3.5 a 11.1	0.8	Nororiente y norte
2966	Marzo-2022		6.9	0.9	Noroccidente
2965	Febrero-2022		6.4	0.8	Noroccidente
2964	Enero-2022		5.7	1.2	Norte

2963	Diciembre-2021		7.4	0.5	Noroccidente
2962	Noviembre-2021		6.3	0.5	Norte
2961	Octubre-2021		5.7	0.7	Oriente y nororiente
2960	Septiembre-2021		8	1.7	Nororiente
2959	Agosto-2021		4.9	1.3	Nororiente
2958	Julio-2021		7.2	1.6	Norte
2957	Junio-2021		7.8	1.4	Noroccidente
2956	Mayo-2021		6.2	1.6	Nororiente
2955	Abril-2021		3.3 a 8.7	1.5	Norte
2954	Marzo-2021		4.5 a 10.3	1	Norte y noroccidente
2953	Febrero-2021		3.3	1.4	Nororiente
2952	Enero-2021		6.4	1.8	Suroriente
2951	Diciembre-2020		5.5	1	Norte
2950	Noviembre-2020		3.7 a 4	1.1	Norte y nororiente
2949	Octubre-2020		3.6	1.7	Noroccidente
2948	Septiembre-2020		4.6	1.1	Nororiente
2947	Agosto-2020		5	0.9	Norte
2946	Julio-2020		4.47	1.5	Nororiente
2945	Junio-2020		?	?	?
2944	Mayo-2020		3.7 a 8.2	0.8	Norte y nororiente
2943	Abril-2020		5.2	0.5	Nororiente
2942	Marzo-2020		7.3	1.5	Norte
2941	Febrero-2020		7	1.8	Norte
2940	Enero-2020		6.5	0.8	Norte
2939	Diciembre-2019		7	2	Norte
2938	Noviembre-2019		7.5	2.1	Norte
2937	Octubre-2019		2.8	0.2	Sur
2936	Septiembre-2019		2.5	0.6	Noroccidente
2935	Agosto-2019		8	1.2	Norte
2934	Julio-2019		8	0.4	Norte
2933	Junio-2019		7.5	0.5	Norte
2932	Mayo-2019		3.4 a 6.2	2.1	Norte
2931	Abril-2019		?	?	?
2930	Marzo-2019		3.7 a 5.9	0.3	Norte
2921	Febrero-2019		?	?	?
2920	Enero-2019		?	?	?
2919	Diciembre-2018		?	?	?
2918	Noviembre-2018		5.4	0.8	Nororiental
2917	Octubre-2018		?	?	?
2916	Septiembre-2018		6.1	0.1	Norte
2915	Agosto-2018		4.8	1.7	Norte
2914	Julio-2018		6.2	0.3	Norte
2913	Junio-2018		5.2 a 5.4	0.5	Norte
2912	Mayo-2018		2.4 a 8.6	0.2	Norte y noroccidente
2911	Abril-2018		6 a 8.1	0.8	Norte
2910	Marzo-2018		6.2 a 6.8	0.8	Nororiente
2909	Febrero-2018		4.7 a 9.8	0.8	Norte y oriente
2908	Enero-2018		3.5 a 9	1.9	Nororiente
2907	Diciembre-2017		3.7 a 9.1	1	Nororiental y oriental
2906	Noviembre-2017		?	?	?
2905	Octubre-2017		3 a 8	0.6	Norte
2904	Septiembre-2017		5.6 a 10.1	0.1	Norte
2903	Agosto-2017		6.2 a 9.6	0.3	Oriente y nororiente
2902	Julio-2017		7 a 9.4	0.7	Norte
2901	Junio-2017		3.8 a 6.5	0.9	Nororiente y suroriente
2900	Mayo-2017		7.8 a 9.5	0.3	Norte
2899	Abril-2017		3.4 a 10.1	1.4	Norte
2898	Marzo-2017		1.1 a 9	1.4	Nororiente
2897	Febrero-2017		3	0.4	Nororiente
2896	Enero-2017		5 a 8.4	1	Norte y nororiente
2895	Diciembre-2016		3.3 a 8.5	1.2	Norte y noroccidente e interior de la estructura volcánica
2894	Noviembre-2016		5.8 a 8.5	1.1	Norte y noroccidente
2893	Octubre-2016		5.7 a 8.7	0.3	Norte
2892	Septiembre-2016		5 a 10	1.1	Norte
2891	Agosto-2016		3.6 a 7.5	2	Noroccidente y norte
2890	Julio-2016		3.7 a 7.9	1	Noorccidente y norte
2889	Junio-2016		3.1 a 8.1	0.8	Noroccidente y norte
2888	Mayo-2016		?	?	?
2887	Abril-2016		2.4 a 7	2.2	Nororiental y norte
2886	Marzo-2016		3.6 a 8.4	0.3	Noroccidente y sur

2885	Febrero-2016		3.4 a 8.2	2.7	Norte
2884	Enero-2016		2.85 a 8.63	0.8	Nororiente y al rededor del edificio volcánico
2883	Diciembre-2015		3.46 a 6.45	0.7	Nororiente y noroccidente
2882	Noviembre-2015		6.7 a 7.9	0.8	Nororiente
2881	Octubre-2015		3.4 a 7.2	1.1	Edificio volcánico
2880	Septiembre-2015		2 a 6.2	1.3	Nororiente y noroccidente
2879	Agosto-2015		5 a 7.4	1.1	Norte
2878	Julio-2015		3.9 y 7.4	1.4	Norte
2877	Junio-2015		2.7 a 7.6	1.7	Norte y noroccidente
2876	Mayo-2015		3.5 a 7	0.5	Norte y sur
2875	Abril-2015		3.5 a 9	1.4	Norte
2874	Marzo-2015		3.4 a 8	0.5	Norte y en cercanías del edificio volcánico
2873	Febrero-2015		3.5 a 7	2	Norte y nororiente
2872	Enero-2015		3 a 7	0.4	Norte y nororiente
2871	Diciembre-2014		3 a 7.5	0.4	Nororiente
2870	Noviembre-2014		3.6 a 7.5	0.5	Nororiente
2869	Octubre-2014		3.5 a 7.6	1.2	Nororiente y norte
2868	Septiembre-2014		3.5 a 7	0.4	Nororiente
2867	Agosto-2014		3 a 10	0.5	Norte y nororiente
2866	Julio-2014		4.6 a 8	0.8	Nororiente y norte
2865	Junio-2014		3.9	0.1	Nororiente
2864	Mayo-2014		2 a 8	0.8	Nororiente
2863	Abril-2014		2 a 12	0.7	Nororiente
2862	Marzo-2014		3 a 9	1.5	Nororiente
2861	Febrero-2014		3 a 12	2.8	Nororiente
2860	Enero-2014		*		
2859	Diciembre-2013		*		
2858	Noviembre-2013		*		

* Sin actividad sísmica
? Sin datos disponibles