



**INFORME TÉCNICO EXTRAORDINARIO
VOLCÁN PURACÉ - CADENA VOLCÁNICA DE LOS COCONUCOS**

Popayán, febrero de 2023



**MINISTERIO DE MINAS Y
ENERGÍA**

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO ©

Julio Fierro Morales
Director General

John Makario Londoño
Director Técnico Geoamenazas

Jaime Raigosa Arango
Coordinador Técnico OVS Popayán

AUTORES

Cristian Camilo Santacoloma
Adriana Agudelo Restrepo
Andrés Hernando Narvárez Zúñiga
Carlos Alberto Ospina Caicedo
Diana Marcela Quintero García
Jesús David Cerón Bravo
Jorge Armando Alpala Aguilar
José Eduardo Gómez Daza
Julián Sánchez Vargas
Laura Camila Barrantes Diago
Luisa Fernanda Meza Maldonado
Nicolás Antonio Oliveras Mercado
Oscar Hernán Manzo Ortiz
Rosa Liliana Alpala Aguilar

Grupo de trabajo

Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán

Citación: Santacoloma et al., (2023). Informe técnico extraordinario volcán Puracé - cadena volcánica de Los Coconucos. Popayán:Servicio Geológico Colombiano.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN		4
1	SISMOLOGÍA	5
1.1	Localización de eventos sísmicos	6
2	DEFORMACIÓN	9
3	CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	12
4	GEOQUÍMICA	13
4.1	Gases difusos dióxido de carbono (CO_2) y radón (^{222}Rn)	13
4.2	Flujo de SO_2 en fumarola lateral	15
4.3	Cambios cualitativos en las muestras de gases en fumarola lateral	16
5	CONCLUSIÓN	17
6	ESCENARIOS	18

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Número de sismos registrados diariamente en el volcán Puracé entre el 1 de julio de 2018 y el 31 de julio de 2022.	5
Figura 2	Mapa de localizaciones de los eventos volcano-tectónicos (Tipo VT), entre el 1 de enero del 2021 al 31 de enero del 2023.	6
Figura 3	Mapas de localización de eventos sísmicos en la zona proximal a la CVLC.	7
Figura 4	Distribución de la magnitud local para los sismos asociados a fluidos localizados entre enero de 2021 y enero de 2023.	8
Figura 5	Serie temporal de la componente de altura de la estación GNSS COC2 del volcán Puracé.	9
Figura 6	Vectores resultantes de las componentes horizontales de la red GNSS del volcán Puracé.	10
Figura 7	Desplazamientos y serie temporal de interferometría.	11
Figura 8	Series temporales de la resultante de inclinación para los 3 inclinómetros que presentan los mayores cambios en la red de Inclinometría del volcán Puracé.	11
Figura 9	Arriba: Potencial eléctrico espontáneo en la componente tangencial de la estación Cocuy2 entre el 1 enero de 2021 y el 5 de febrero de 2023. Abajo: Diferencia de los valores QNTV entre los magnetómetros del volcán Puracé: Agua Blanca y Laguna para el mismo periodo de tiempo.	12
Figura 10	Superior: Estación de CO_2 Cráter, enero de 2022 a enero de 2023. Inferior: Correlación de ^{222}Rn y CO_2 en la estación Cráter.	13
Figura 11	Concentración de gas ^{222}Rn en estaciones lejanas.	14
Figura 12	Concentración de gas ^{222}Rn en estaciones cercanas.	15
Figura 13	Flujos máximos y promedio diario de SO_2 en las estaciones Vinagre y Vinagre 2.	15
Figura 14	Cambios en la coloración de los precipitados del campo fumarólico lateral del VP.	16

INTRODUCCIÓN

Las manifestaciones de la actividad volcánica observadas en la región del volcán Puracé-cadena volcánica de Los Coconucos (VP-CVLC) han venido presentando importantes cambios desde mediados del año 2021, los cuales se han podido caracterizar a partir de los datos obtenidos por las diferentes estaciones que conforman la red de monitoreo para esta estructura volcánica. Se han registrado aumentos tanto en la recurrencia de eventos sísmicos como en la distribución de las fuentes sísmicas, abarcando tanto la sismicidad asociada con procesos de fracturamiento de roca (sismos de tipo VT) como la relacionada con la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos (eventos tipo LP, BF y TR); adicionalmente, se ha observado una evolución en las características temporales de las formas de onda y los contenidos frecuenciales de las señales, el más relevante de ellos ocurrido el 29 de marzo de 2022, cuando se presentó una erupción menor de tipo freático en el cráter del volcán Curiquinga, lo que motivó el cambio de nivel de actividad volcánica a amarillo (Nivel III). Las variaciones mencionadas en la sismicidad han estado acompañadas de tres periodos de deformación del suelo que se han relacionado con un proceso inflacionario debajo de la CVLC que persiste hasta la fecha. Otra de las manifestaciones claras observadas durante los últimos años es el aumento en las emisiones de gases, principalmente el dióxido de carbono (CO_2) y el gas radón (^{222}Rn), los cuales muestran una relación temporal con el aumento en la sismicidad de fractura y fluidos a niveles superficiales debajo del cráter del volcán Puracé. La emisión de dióxido de azufre (SO_2) ha mostrado también un aumento durante el último año, y aunque es más discreto en comparación a los aumentos de CO_2 y gas radón, es evidente que durante los últimos meses se ha presentado un incremento en las emisiones de este gas, al compararse los valores calculados con los obtenidos en periodos anteriores. Del mismo modo, se han registrado cambios en los campos electromagnéticos consistentes con las variaciones anteriormente mencionadas.

En el presente informe técnico se describen los cambios más relevantes identificados desde el análisis de los datos de sismología, deformación del suelo, geoquímica y electromagnetismo que antecedieron el evento eruptivo del 29 de marzo de 2022, y la posterior evolución que desde estas técnicas de monitoreo se continúan evidenciando hasta la fecha, indicando que la inestabilidad del sistema volcánico permanece. Dada la compleja interacción que confluje en esta zona volcánica del país por la presencia de un sistema magmático-hidrotermal asociado a la CVLC y la actividad de las fallas y lineamientos que pueden facilitar la migración de fluidos hacia niveles más superficiales de esta estructura volcánica, se hace una evaluación multidisciplinaria para la construcción de los diferentes escenarios que se pueden esperar ante la persistente evolución de este proceso volcánico.

1 SISMOLOGÍA

El volcán Puracé–CVLC cuenta con una red operativa de 14 estaciones sismológicas cuya distribución cubre todos los flancos del volcán, de las cuales 11 son de banda ancha y tres de corto periodo. A partir del registro de esta red se ha podido establecer una línea base que se ha caracterizado por presentar un predominio de sismos relacionados con la dinámica de fluidos en los conductos volcánicos sobre la sismicidad asociada con fracturamiento de rocas, los cuales evidencian actividad continua del sistema hidrotermal asociado a esta cadena volcánica.

La actividad sísmica del volcán Puracé y la CVLC ha presentado un aumento paulatino en los últimos 10 años (figura 1); este comportamiento cambió a un aumento notorio en la ocurrencia de eventos de fractura entre el 23 y 28 de marzo de 2022. Esta sismicidad se ubicó preferencialmente bajo los centros eruptivos PicoCollo y Curiquinga y evolucionó rápidamente el 29 de marzo, cuando se alcanzaron los máximos valores para la zona de influencia del volcán Puracé, asociados a una erupción freática en el cráter del volcán Curiquinga, caracterizada por una alta recurrencia de eventos tipo VT, apertura de dos grietas en superficie de aproximadamente 50 m de largo cada una, una emisión pequeña de ceniza, desgasificación de SO_2 y deformación de la superficie.

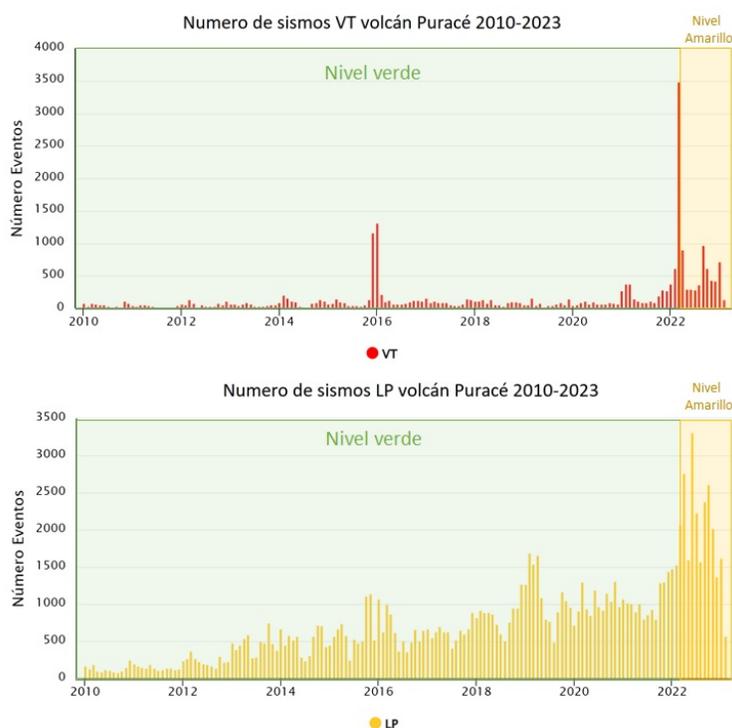


Figura 1: Número de sismos registrados diariamente en el volcán Puracé entre el 1 de julio de 2018 y el 31 de julio de 2022.

Desde marzo de 2022 hasta la fecha, la actividad sísmica ha permanecido por encima de los niveles establecidos como línea base de comportamiento para la CVLC. Se continúan observando variaciones importantes en el registro sísmico en el que se vienen presentando continuos incrementos en los eventos relacionados con la dinámica de fluidos.

1.1 Localización de eventos sísmicos

En la zona de influencia del volcán Puracé y la CVLC se han identificado varias fuentes sísmicas tanto en zonas distales como bajo la CVLC. En la figura 2 se observa que en 2021 la sismicidad de fractura se localizó principalmente en zonas distales mientras que en 2022 y 2023 los eventos se localizaron preferencialmente en zonas proximales a la CVLC.

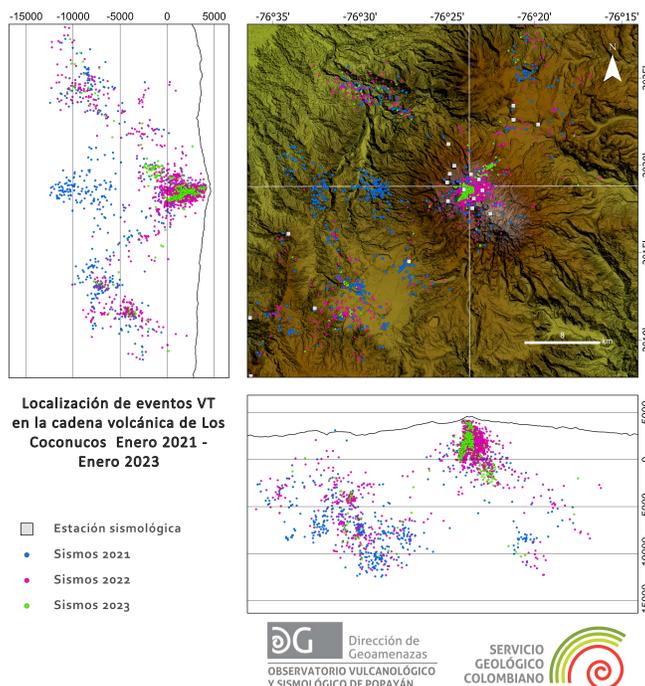


Figura 2: Mapa de localizaciones de los eventos volcano-tectónicos (Tipo VT), entre el 1 de enero del 2021 al 31 de enero del 2023. La escala de color va de acuerdo con el registro o evolución temporal de los sismos por año.

Analizando de forma detallada la evolución reciente de la sismicidad proximal a la CVLC se observa que desde el mes de octubre del año 2021 la actividad de fluidos se ubicó bajo el cráter del volcán Puracé, a profundidades menores a 1 *km* (figura 3a). De marzo a abril de 2022, se registró una intensa actividad de fractura, ubicada bajo los centros eruptivos de Picocollo y Curiquinga, a profundidades entre 1.5 y 4 *km* (ver figura 3b). Entre los meses de mayo y agosto del 2022 la actividad sísmica de fractura mantuvo sus características hipocentrales bajo el cráter de Picocollo, mientras que la sismicidad de fluidos presentó un aumento de recurrencia y un cambio en sus localizaciones hipocentrales, localizándose a lo largo de todo el flanco suroccidental de la CVLC a profundidades que variaron entre 3 y 6 *km*, con tendencia a ser más profundos hacia el sureste (ver figura 3c).

A partir de septiembre de 2022 y hasta la fecha se ha presentado una actividad sísmica de fractura distribuida de forma lineal, que atraviesa el cráter del volcán Puracé en dirección NE-SO, perpendicular al eje de la cadena, sector que corresponde al trazo de la falla Moras Este. Dichos eventos tienen una profundidad de hasta 8 *km* hacia el NE del volcán Puracé, con tendencia a ser más profundos a medida que se alejan del mismo, hacia el SO las pro-

fundidades varían entre 3 y 5 *km*. La sismicidad de fluidos durante este periodo se ubica bajo el cráter del volcán Puracé, predominantemente, mientras que la fuente ubicada hacia el flanco SO, entre los volcanes Picollo y Quintín, ha disminuido en número de ocurrencia (ver figura 3d).

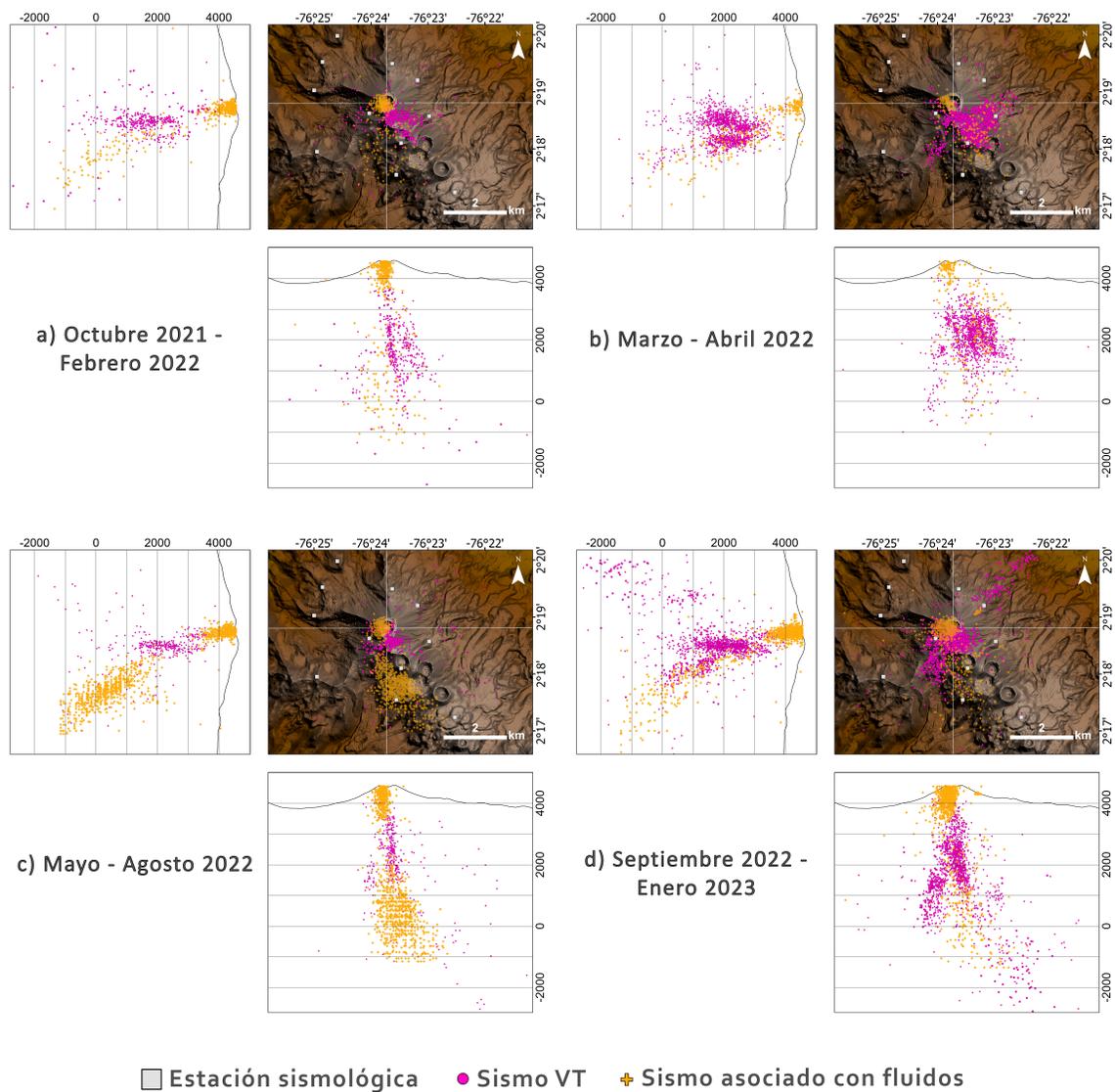


Figura 3: Mapas de localización de eventos sísmicos en la zona proximal a la CVLC entre octubre de 2021 y enero de 2023.

La figura 4 muestra la distribución de las magnitudes para los eventos asociados a fluidos (tipo LP y sismos de frecuencias dominantes menores a 1.5 Hz, denominados BF) localizados entre el 1 de enero de 2021 y el 31 de enero de 2023. En ella se puede observar cómo el valor promedio de las magnitudes de los sismos en el volcán Puracé aumentó gradualmente entre mayo y septiembre de 2022; a partir de esa fecha se observa un incremento notorio de sismos LP, muchos de ellos de baja magnitud. Por su parte, los sismos tipo BF se registraron principalmente durante junio de 2022.

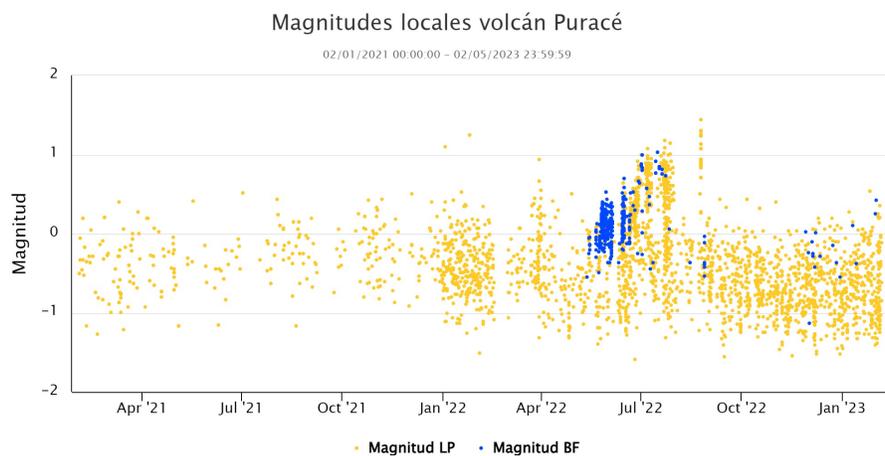


Figura 4: Distribución de la magnitud local para los sismos asociados a fluidos localizados entre enero de 2021 y enero de 2023.

2 DEFORMACIÓN

El volcán Puracé cuenta con una red geodésica conformada por 13 estaciones GNSS permanentes, cinco inclinómetros electrónicos y también se hace monitoreo satelital mediante interferometría diferencial (DInSAR).

La red GNSS de monitoreo en deformación ha permitido detectar hasta el momento tres periodos de deformación en el volcán Puracé (figura 5). El primer período corresponde a una deformación lenta presentada entre el 6 de noviembre de 2021 y el 27 de marzo de 2022. En este período los máximos desplazamientos se presentaron preferencialmente en las componentes horizontales (norte y este), alcanzando desplazamientos de hasta 7 *mm*. El segundo período corresponde a una deformación súbita presentada entre el 28 y el 30 de marzo de 2022, asociada al proceso eruptivo, ocurrido el 29 de marzo de 2022. En este período las componentes horizontales de las estaciones que se encuentran localizadas en la parte alta de los volcanes Puracé, Piocollo y Curiquinga registraron desplazamientos de hasta 62 *mm*, y las componentes verticales (altura) desplazamientos de hasta 25 *mm*. Finalmente, el tercer período corresponde a una deformación lenta presentada entre el 31 de marzo de 2022 hasta la actualidad (febrero 2023), alcanzando desplazamientos en las componentes horizontales de hasta 12 *mm* y de 15 *mm* en las componentes verticales.

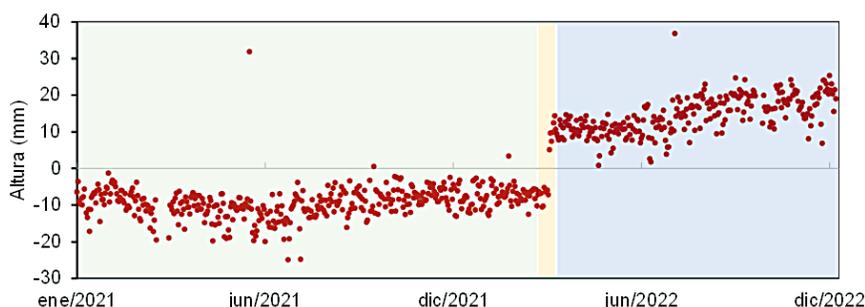


Figura 5: Serie temporal de la componente de altura de la estación GNSS COC2 del volcán Puracé. Los sombreados verde, naranja y azul indican los tres periodos de deformación. Se incluye esta serie temporal como representativa de la red GNSS de monitoreo.

En la figura 6 se muestran los vectores resultantes de las componentes horizontales para los tres periodos descritos anteriormente. El modelamiento de los datos de desplazamiento para cada uno de estos períodos indica una fuente de deformación localizada bajo los volcanes Puracé, Piocollo y Curiquinga, a las siguientes profundidades: a 5 *km* para el primer periodo, a 2 *km* para el segundo periodo y a 7 *km* para el último periodo.

Mediante interferometría diferencial (DInSAR) y la técnica SBAS, empleando imágenes de radar de los satélites Sentinel 1A y 1B desde enero de 2021 a enero de 2023 se realizaron más de 55 interferogramas, logrando obtener una serie temporal y el cálculo de los desplazamientos acumulados para este periodo. Los resultados se muestran en la figura 7 y evidencian principalmente dos periodos de deformación: el primero, comprendido entre el 28 y el 30 de marzo de 2022, alcanzó desplazamientos en la dirección de vista del satélite (LOS por sus siglas en inglés) de hasta 4 *cm*; y el segundo, entre el 31 de marzo de 2022 y 13 de enero de 2023, acumulando hasta el momento desplazamientos en la dirección de LOS de aproximadamente 1 *cm*. Estos episodios de deformación son coherentes con la deformación registrada por la red GNSS.

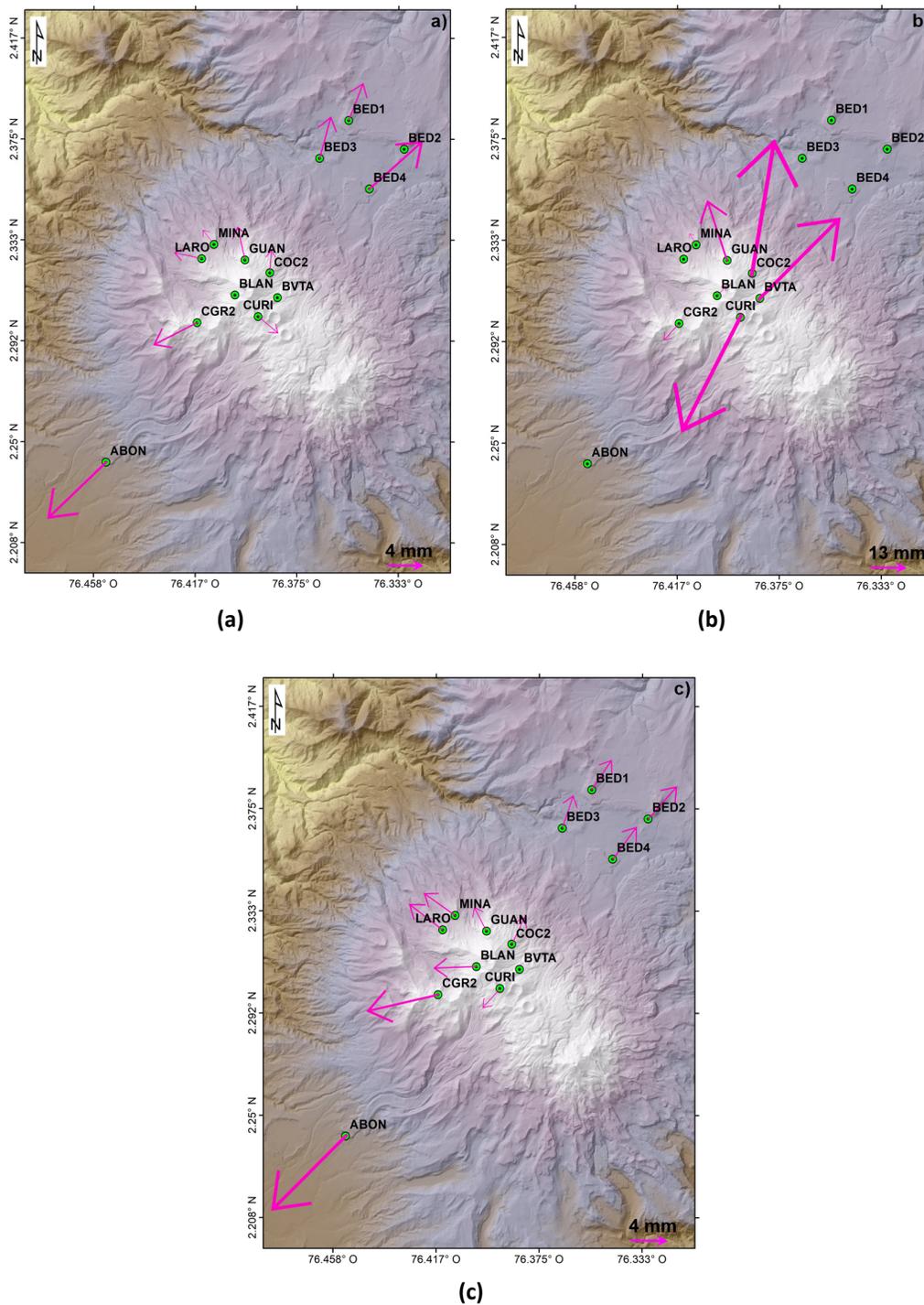


Figura 6: Vectores resultantes de las componentes horizontales de la red GNSS del volcán Puracé. a) Vectores resultantes para el periodo 6/nov/2021 a 27/mar/2022. b) Vectores resultantes para el periodo 28/mar/2021 a 30/mar/2022. c) Vectores resultantes para el periodo 31/mar/2022 a 18/ene/2023. Los vectores horizontales de deformación indican un proceso inflacionario que se está presentando debajo de la CVLC. Nótese que los vectores en cada figura están a diferente escala.

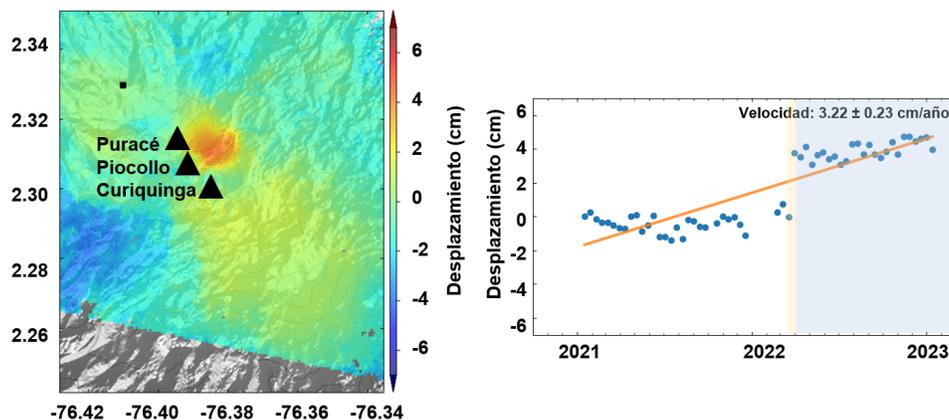


Figura 7: Desplazamientos y serie temporal de interferometría. Izquierda: desplazamientos acumulados obtenidos con DInSAR para el periodo 01/ene/2021 a 13/ene/2023. Derecha: serie temporal DInSAR-SBAS para el periodo 01/ene/2021 a 13/ene/2023.

La red de Inclínometría del volcán Puracé ha detectado dos de los procesos deformativos descritos anteriormente. En la figura 8 se presenta la serie temporal de la resultante de inclinación para los tres sensores que muestran los mayores cambios en el periodo evaluado. Los resultados muestran que, durante el periodo del 28 al 30 de marzo de 2022 se alcanzaron cambios en la resultante de inclinación de hasta $20 \mu rad$; posterior a esa fecha y hasta la actualidad, los sensores no han evidenciado un proceso deformativo claro; sin embargo, los cambios acumulados en la resultante de inclinación alcanzan los $10 \mu rad$.

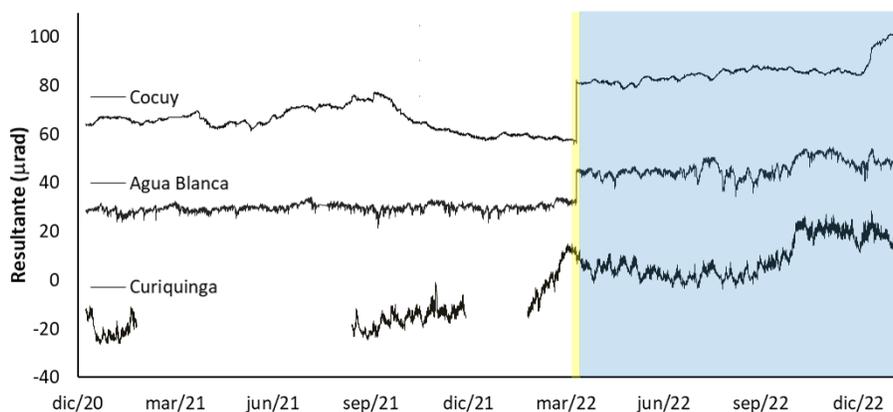


Figura 8: Series temporales de la resultante de inclinación para los 3 inclinómetros que presentan los mayores cambios en la red de Inclínometría del volcán Puracé, entre el 1 de enero de 2021 y el 31 de enero de 2023. Se resalta en color amarillo el período 28/mar/2021 a 30/mar/2022 y en color azul el período 31/mar/2022 a 31/ene/2023.

3 CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

En el volcán Puracé se realiza el monitoreo del Potencial Eléctrico Espontáneo (PEE) y del campo magnético local, utilizando la estación de PEE Cocuy2 y los magnetómetros de Laguna (lgmg) y AguaBlanca (ablmg), equipos instalados a menos de 1.7 km del cráter del volcán Puracé. Del registro de estos equipos, presentado en la figura 9, ha sido posible detectar anomalías en estos campos indicando cambios en el comportamiento interno del volcán. A grandes rasgos, se resaltan los siguientes periodos de tiempo:

- 2021 julio a octubre 5: Se evidencia una anomalía en PEE de $\approx -10mV$ que retorna a su nivel base. Por su parte, hay un cambio en el campo magnético local.
- 2022 marzo a julio 13: Anomalía que se presenta días antes de la erupción del 29 de marzo.
- 2022 diciembre a la fecha (5 de febrero de 2023).

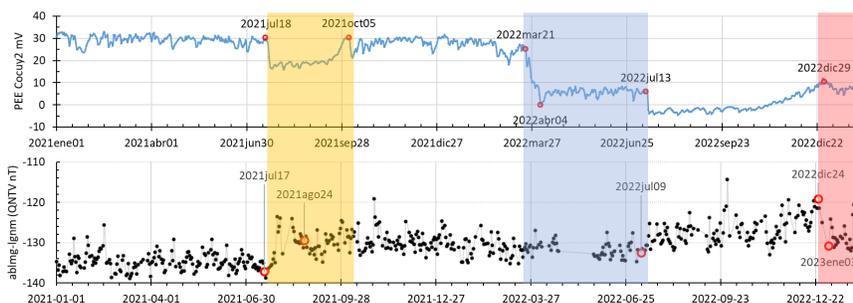


Figura 9: Arriba: Potencial eléctrico espontáneo en la componente tangencial de la estación Cocuy2 entre el 1 enero de 2021 y el 5 de febrero de 2023. Abajo: Diferencia de los valores QNTV entre los magnetómetros del volcán Puracé: Agua Blanca y Laguna para el mismo periodo de tiempo.

4 GEOQUÍMICA

La CVLC cuenta con una red geoquímica conformada por 15 puntos de muestreo para fuentes termales, dos estaciones permanentes SCANDOAS para la medición de flujo de dióxido de azufre (SO_2), cuatro estaciones permanente para la medición de concentración de dióxido de carbono (CO_2) y cinco para gas radón (^{222}Rn). Para el monitoreo de temperatura en campo fumarólico se tienen tres termocuplas, además se realizan muestreos *in situ* de CO_2 con cámara de acumulación de flujo y moviDOAS.

4.1 Gases difusos dióxido de carbono (CO_2) y radón (^{222}Rn)

Con las redes para medir CO_2 y ^{222}Rn se lleva un monitoreo en tiempo real para el volcán Puracé desde el año 2014. Durante los últimos meses se han detectado aumentos en la concentración de ambos gases en superficie, tanto en zonas distales del norte y nororiente de la CVLC, como en la parte alta del volcán (estación Cráter), en la cual se observa un incremento de la concentración desde inicios de enero de 2023 hasta la fecha, llegando hasta el máximo de capacidad de detección del sensor de CO_2 (10 000 ppm). Este incremento se correlaciona con aumentos en la concentración de ^{222}Rn en la zona del cráter (figura 10).

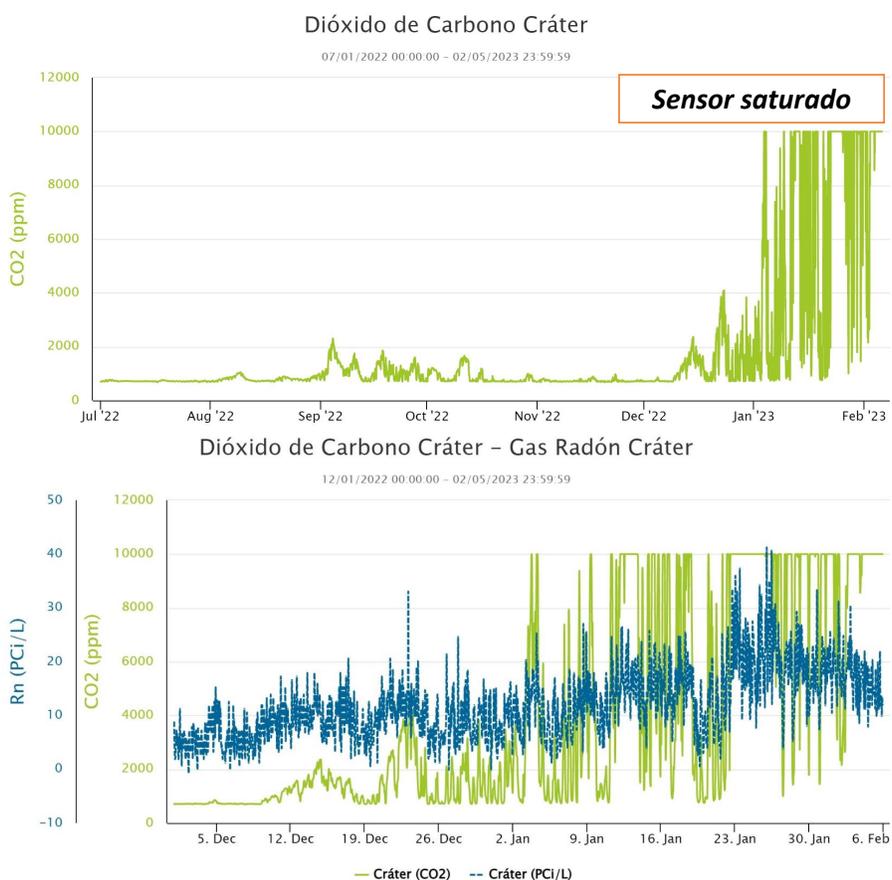


Figura 10: Superior: Estación de CO_2 Cráter, enero de 2022 a enero de 2023. Inferior: Correlación de ^{222}Rn y CO_2 en la estación Cráter.

Las estaciones de gas ^{222}Rn han evidenciado aumentos sostenidos en las concentraciones

desde el segundo semestre de 2022, especialmente las ubicadas en zonas distales al edificio volcánico: San Juan y Piñuelas, ubicadas al norte y nororiente de la CVLC (ver figura 11).

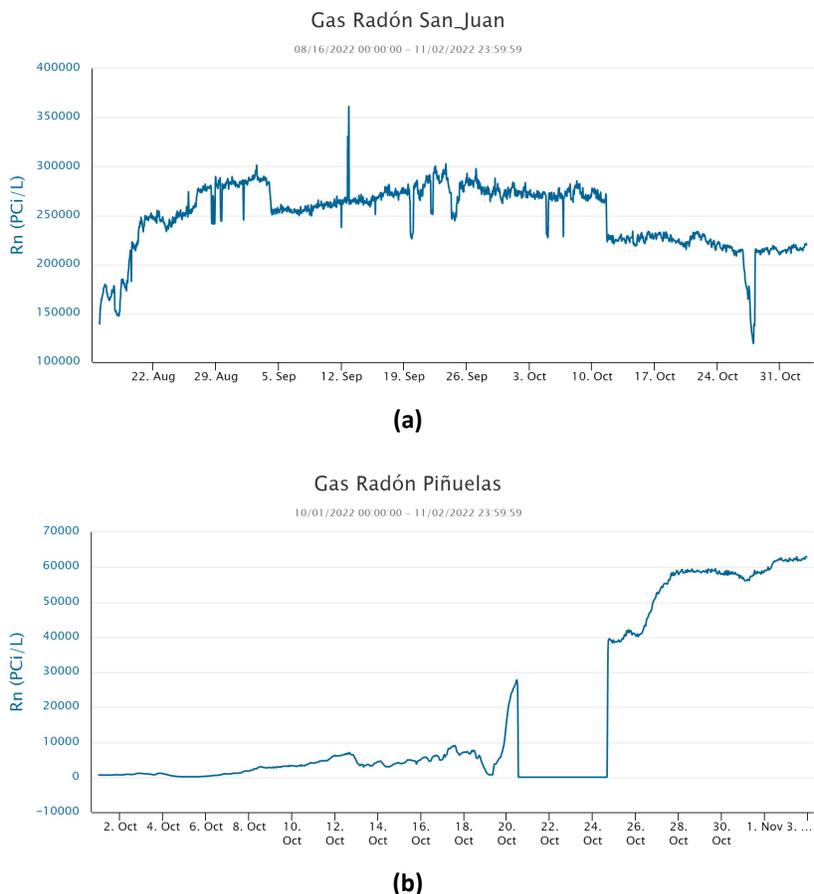


Figura 11: Concentración de gas ^{222}Rn en estaciones lejanas del edificio volcánico del VP.

Al inicio de 2023 las estaciones ubicadas en zonas cercanas al cráter comenzaron a registrar cambios graduales y sostenidos (ver figura 12).

Para corroborar los valores de alta desgasificación se realizaron muestreos de flujo de CO_2 con cámara de acumulación durante el segundo semestre de 2022, las cuales evidenciaron anomalías en Piñuelas y San Juan, con valores que alcanzaron los umbrales máximos de detección del sensor.

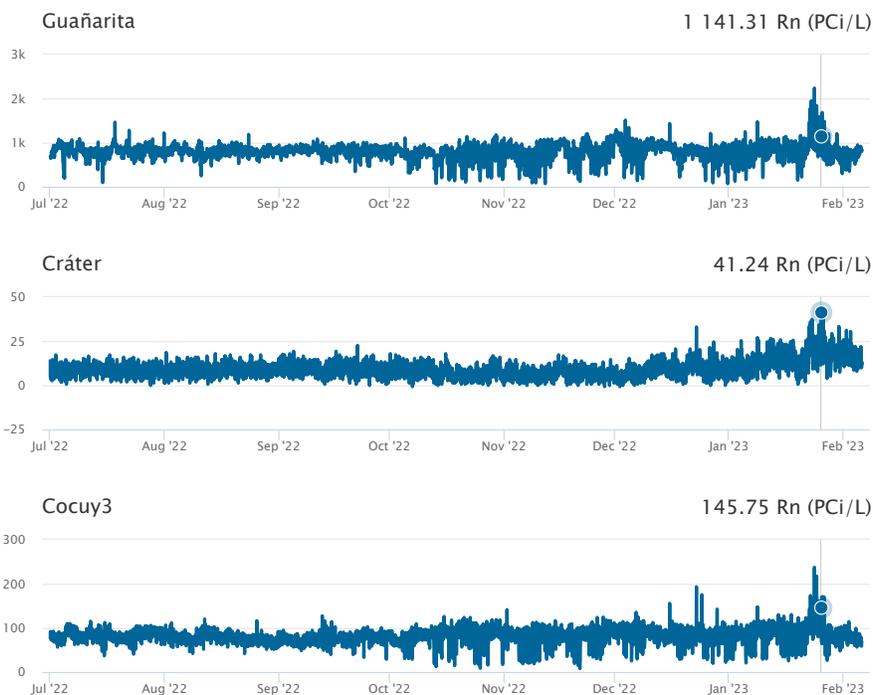


Figura 12: Concentración de gas ^{222}Rn en estaciones cercanas del edificio volcánico del VP.

4.2 Flujo de SO_2 en fumarola lateral

Las estaciones ScanDOAS Vinagre y Vinagre 2 comenzaron a registrar variaciones graduales en su línea base, que son más evidentes desde el segundo semestre de 2022 hasta la fecha (figura 13).

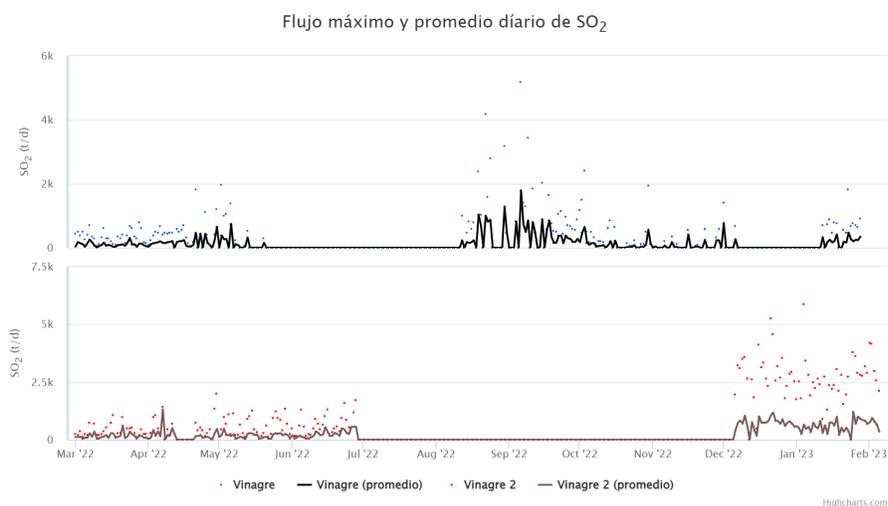


Figura 13: Flujos máximos y promedio diario de SO_2 en las estaciones Vinagre y Vinagre 2. Periodo marzo de 2022 a febrero 2023.

4.3 Cambios cualitativos en las muestras de gases en fumarola lateral

En los muestreos realizados en la fumarola lateral del volcán Puracé en el segundo semestre del año 2021 se comenzaron a notar alteraciones, específicamente en la coloración de los precipitados; estos cambios se dieron entre agosto de 2021 y abril de 2022, a diferencia de los realizados de mayo a noviembre de 2022 cuando las muestras se presentaron incoloras (figura 14). Los análisis de las muestras en laboratorio mostraron un aumento en sulfuros de hierro (FeS), indicativos de actividad en sistemas hidrotermales en el periodo agosto 2021 a abril de 2022.



Figura 14: Cambios en la coloración de los precipitados del campo fumarólico lateral del VP. Periodos de observación del cambio, agosto de 2021 a abril de 2022 y mayo a noviembre de 2022.

5 CONCLUSIÓN

De acuerdo con los parámetros derivados del monitoreo volcánico, se evidencia una evolución en la actividad de la CVLC caracterizada por:

- La actividad sísmica del VP-CVLC ha mostrado variaciones importantes desde el primer trimestre de 2022, y al momento de emisión del presente boletín extraordinario se continúa evidenciando una alta dinámica en las fuentes sísmicas identificadas para esta estructura volcánica, localizadas principalmente bajo los cráteres de los volcanes Puracé y Picoallo. La evolución en profundidad y distribución epicentral de los sismos asociados con procesos de fractura y dinámica de fluidos, indica una interacción compleja entre los sistemas magmático-hidrotermal del VP-CVLC con las estructuras regionales presentes en este sector, como la falla Moras y el lineamiento Coconucos.
- Los incrementos en los valores de concentración de las especies gaseosas CO_2 y ^{222}Rn indican un aumento de la actividad hidrotermal a niveles superficiales, lo cual es consistente con el aumento y la localización de los eventos sísmicos de fractura y de fluidos.
- La red de monitoreo en deformación del volcán Puracé muestra principalmente tres episodios de deformación, los cuales indican un proceso inflacionario debajo de la CVLC. El último episodio de deformación detectado se mantiene hasta la actualidad.
- Se han detectado anomalías en los campos electromagnéticos posiblemente asociados con el proceso eruptivo ocurrido en marzo de 2022 y la actividad volcánica posterior a ella.

6 ESCENARIOS

Es importante indicar que los escenarios, así como su orden de probabilidad de ocurrencia, pueden verse modificados en función de los cambios que se observen en los parámetros geofísicos y físicoquímicos. En función de su probabilidad de ocurrencia se consideran los siguientes escenarios:

- Teniendo en cuenta que actualmente se presentan eventos sísmicos a niveles superficiales, valores altos de emisión de CO_2 , ^{222}Rn y aumentos de SO_2 , propios de la excitación del sistema hidrotermal, se puede prever la posible ocurrencia de erupciones freáticas menores.

Dado que en la actualidad se continúa presentando un proceso deformativo inflacionario localizado aproximadamente a 7 *km* de profundidad, bajo los cráteres de los volcanes Puracé, Picoello y Curiquinga, que sugiere una intrusión de un cuerpo magmático (roca fundida y gases disueltos), se puede esperar la ocurrencia de escenarios como:

- Liberación de gases disueltos que migren a la superficie, acompañados de enjambres sísmicos de fractura y fluidos, mayor desgasificación de SO_2 y CO_2 , deformaciones a niveles más superficiales y erupciones freáticas, como lo ocurrido en marzo de 2022.
- Ascenso del cuerpo magmático a niveles más superficiales interactuando con el sistema hidrotermal, evidenciado por la ocurrencia de enjambres de sismos VT, LP, VLP, HB y TR; deformación profunda y superficial, mayor desgasificación de SO_2 , cambios de parámetros físicoquímicos, cambios en la caracterización química de las especies en fuentes termales y fumarolas, el cual puede evolucionar a erupciones freatomagmáticas y magmáticas.
- No se descarta la posibilidad del regreso a los valores de línea base de comportamiento en los diferentes parámetros de monitoreo volcánico.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) – *Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán*, continúa atento a la evolución del fenómeno volcánico e informará de manera oportuna los cambios que se puedan presentar.