

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7362

CARACTERÍSTICAS DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN SABANCAYA PERIODO ENERO 2022 – ENERO 2023

Departamento Arequipa
Provincia Caylloma
Distrito Achoma



FEBRERO
2023



PERÚ

Ministerio
de Energía y Minas



Informe Técnico N° A7362

CARACTERÍSTICAS DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN SABANCAYA PERIODO ENERO 2022 – ENERO 2023

Distrito Achoma, provincia Caylloma, departamento Arequipa.

Elaborado por la Dirección de
Geología Ambiental y Riesgo
Geológico del Ingemmet

Equipo de investigación:

Rafael Miranda Cruz
Rigoberto Aguilar Contreras
Nélida Manrique Llerena
Mayra Ortega Gonzales
Rosa Anccasi Figueroa
Saida Japura Paredes
Edu Taípe Maquerhua
Fredy Apaza Choquehuayta

Referencia bibliográfica

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2023). Características de la erupción del volcán Sabancaya periodo enero 2022 – enero 2023. Distrito Achoma, provincia Caylloma, departamento Arequipa: Ingemmet, Informe Técnico N° A7360, 27 p



Contenido

RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVO	5
3. GEOLOGÍA DEL VOLCÁN SABANCAYA	6
4. RED DE MONITOREO VOLCÁNICO	7
5. ACTIVIDAD VOLCÁNICA INTERNA.....	7
5.1. Procesos de Intrusión Magmática	8
5.1. Dinámica de Fluidos Volcánicos	10
6. ACTIVIDAD VOLCÁNICA SUPERFICIAL.....	13
6.1. Características de las Emisiones.....	13
6.2. Evolución Morfológica del Domo de Lava Pichqa	14
6.3. Deformación Volcánica	14
6.4. Química de Gases	16
6.5. Caída de Tefras	16
6.5.1. Análisis de Partículas Menores a 32 micras	17
6.5.2. Mapa de Isópacas.....	18
7. MAPA DE PELIGRO DEL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO - SABANCAYA	19
7.1. Mapa de Peligros por Caída de Cenizas	19
7.2. Mapa Proximal de Peligros Múltiples.....	20
7.2.1. La Zona de Alto Peligro (Rojo)	21
7.2.2. La Zona de Moderado Peligro (Naranja)	21
7.2.3. La Zona de Bajo Peligro (Amarillo)	21
7.3. Mapa Peligros por Lahar	22
8. ÍNDICE DE EXPLOSIVIDAD VOLCÁNICA (VEI) PARA EL PERIODO 2016 – 2022	23
CONCLUSIONES	24
RECOMENDACIONES	25
REFERENCIAS.....	26

RESUMEN

En noviembre del 2016, el volcán Sabancaya empezó un nuevo periodo eruptivo en su historia geológica iniciada hace aproximadamente 10,000 años. Al 06 de noviembre del 2022 se han cumplido seis (06) años de actividad explosiva y efusiva compleja, sin indicios de finalización de dicha actividad en el corto plazo. Los resultados de monitoreo advierten que el volcán continuará presentando explosiones que son un espectáculo, sin embargo, las mismas generan peligros para las poblaciones aledañas.

Con la actividad eruptiva en desarrollo, el volcán continúa emitiendo material fragmentado como bombas, lapilli y cenizas, además de gases volcánicos. Los resultados de monitoreo indican que las explosiones y emisiones son de baja intensidad. La afectación principal está relacionada a la emisión de cenizas volcánicas cuya dispersión está condicionada por la dirección del viento. Según los trabajos de campo y los registros de la red de cenizómetros, que permiten estimar la cantidad de ceniza dispersada se establece un rango de 5 km con un espesor aproximado de 1mm. En un periodo de 3 meses. El mapa de peligros volcánicos elaborado para este volcán, delimita las zonas propensas a ser afectadas (zonas de peligro), y es una herramienta que nos ayuda en el manejo de una crisis volcánica y el ordenamiento territorial. La información recolectada por más de 6 años por el OVI, respecto de la cantidad de ceniza acumulada, se han proyectado escenarios de peligro a través de múltiples análisis, datos de campo y basados en la magnitud de la actividad actual. Los resultados determinan que el rango de afectación por caída de ceniza de nivel moderado alcanza un radio de 5 km desde el cráter. A esta distancia el espesor máximo medido fue de 1 mm en un periodo de 3 meses, los peligros asociados a proyectiles balísticos y flujos piroclásticos alcanzan un rango máximo de 1.5 km; mientras que, las áreas mayores a 5 km son afectados por caída de cenizas muy leve de 0.5 a 0.1 mm de espesor.

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), a través de su Observatorio Vulcanológico (OVI) continúa monitoreando la actividad eruptiva del volcán Sabancaya, mediante una amplia red de equipos de adquisición de datos multiparamétricos. La recolección de datos de campo y en tiempo real tiene como objetivo principal el determinar la distancia máxima de afectación por peligros volcánicos del actual proceso eruptivo, considerando la naturaleza, su probabilidad de ocurrencia y evolución del proceso eruptivo. En ese sentido, el presente informe técnico pretende actualizar las distancias máximas de afectación basado en el comportamiento actual, el que indica que en los próximos días y semanas se mantendrá con explosiones moderadas, desgasificación magmática continua, ceniza y fragmentos de roca volcánica.

1. INTRODUCCIÓN

El estratovolcán Sabancaya (5980 m.s.n.m.), está ubicado aproximadamente a 20 km al sur del Cañón del Colca, en la provincia de Caylloma, región Arequipa (Figura 1). En este volcán se han identificado cinco erupciones históricas desde 1750 (Samaniego et al., 2016). El 06 de noviembre de 2016, inició un nuevo proceso eruptivo, el cual continúa hasta la actualidad. Esta erupción es de tipo vulcaniana y se caracteriza por presentar pequeñas a moderadas explosiones que han alcanzado hasta 5.5 km de altura sobre el cráter, emisiones constantes de gases, ceniza y ocasionalmente proyectiles balísticos. Asimismo, entre los años 2017 y 2022, se ha observado la formación y destrucción de cinco domos de lava en el interior del cráter.

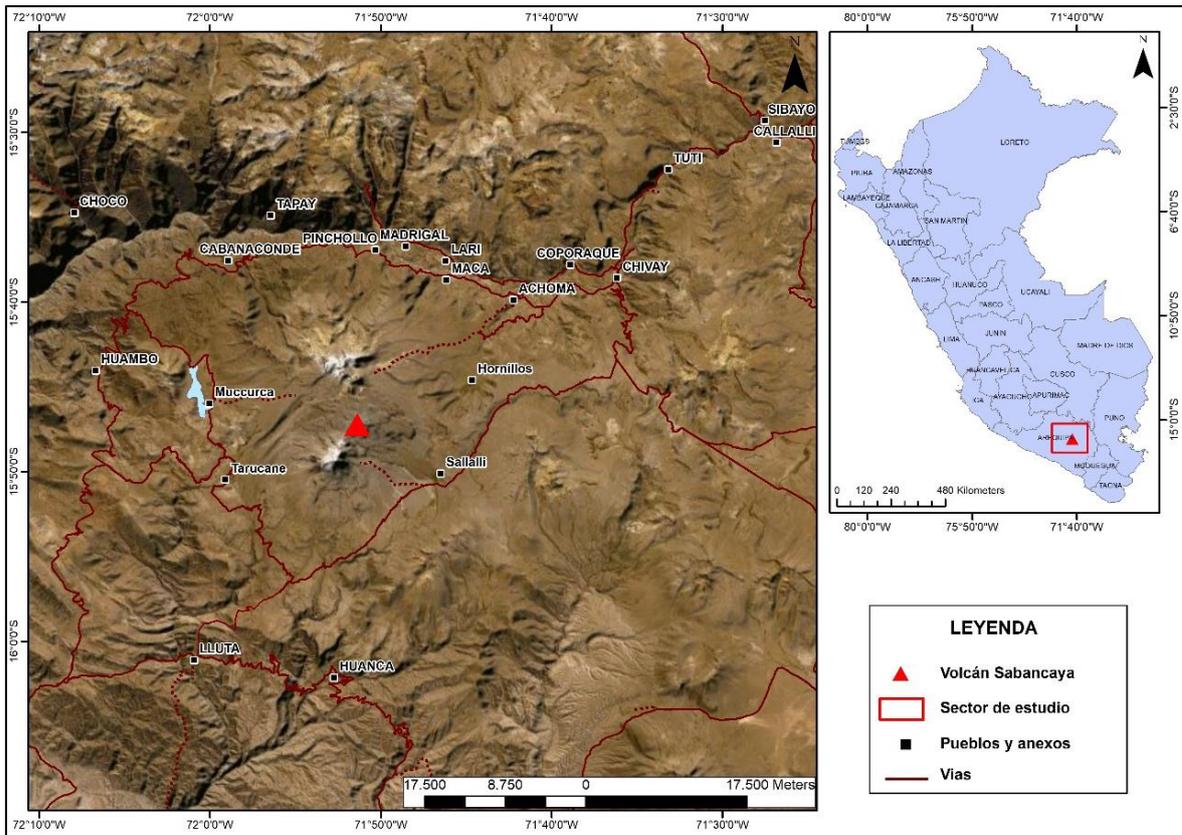


Figura 1. Ubicación del volcán Sabancaya.

2. OBJETIVOS

El presente informe tiene por objetivos:

- a) Evaluar el nivel de actividad volcánica en el Sabancaya para establecer y actualizar los límites máximos de acceso al volcán.
- b) Calcular el índice de explosividad volcánica (VEI) para todo el periodo de erupción volcánica: 2016-2023.

3. GEOLOGÍA DEL VOLCÁN SABANCAYA

El volcán Sabancaya es el más joven de los diez volcanes activos del sur del Perú, es de edad Holocénica, se ha formado en los últimos 10 mil años (Samaniego et al., 2016). Está conformado principalmente por secuencias de flujos de lava de composición andesítica y dacítica, con limitados depósitos piroclásticos (Mariño, 2012; Rivera et al., 2016).

La cumbre del volcán Sabancaya alcanza los 5,980 m.s.n.m. y el edificio volcánico activo cubre un área de 65 a 70 km². Dicho volcán está conformado por dos estrato-conos alineados en dirección suroeste-noreste (Figura 2), el más antiguo se sitúa en el extremo suroeste y en cuya cima se emplaza un domo de lava, mientras que, el cono más reciente se sitúa en el extremo noreste, donde se ubica el cráter activo.



Figura 2. Vista de los dos estratos cono y su alineación en dirección suroeste y noreste, imagen obtenida desde el flanco sur del volcán, en el cono activo se puede observar la emisión de una columna de cenizas volcánicas.

Durante esta erupción (2016 a la actualidad), los fragmentos balísticos y ceniza expulsada emitió diversos productos volcánicos, siendo una de las principales herramientas para comprender los procesos dinámicos profundos y superficiales que controlan una erupción y los posibles escenarios futuros que podrían desarrollarse en adelante. Para ello, estos fragmentos de roca y depósitos de caída piroclástica son recolectados por la red de medidores de ceniza (cenizómetros) y con ellas se realizan análisis de laboratorio que nos permite determinar su composición química, parámetros granulométricos y mineralógicos del magma. Con estos resultados podemos determinar el tipo de erupción y volumen de magma expulsado, por otro lado, también nos permite conocer y caracterizar su composición mineralógica y elementos potencialmente peligrosos para la salud humana, plantas y animales, estos componentes se encuentran en cada fragmento de roca o cenizas y su afectación se da en grandes áreas.

4. RED DE MONITOREO VOLCÁNICO

El OVI cuenta con una moderna red de adquisición de datos multidisciplinario que monitorea los 365 días del año el volcán Sabancaya. Las estaciones están distribuidas alrededor del cráter del volcán y, están equipadas con sensores sísmicos, sensores de inclinación, cámaras ópticas e infrarrojo, sensores de gases volcánicos, receptores GNSS permanentes, colectores de cenizas, sensores de seguimiento de temperatura en fuentes termales y otros equipos de medición directa.

La distribución de la red de monitoreo del volcán se observa en la figura 3, la data y la información registrada por los sensores se transmite en tiempo real hacia las instalaciones del OVI, en la ciudad de Arequipa, en donde es procesada por especialistas usando software científico.

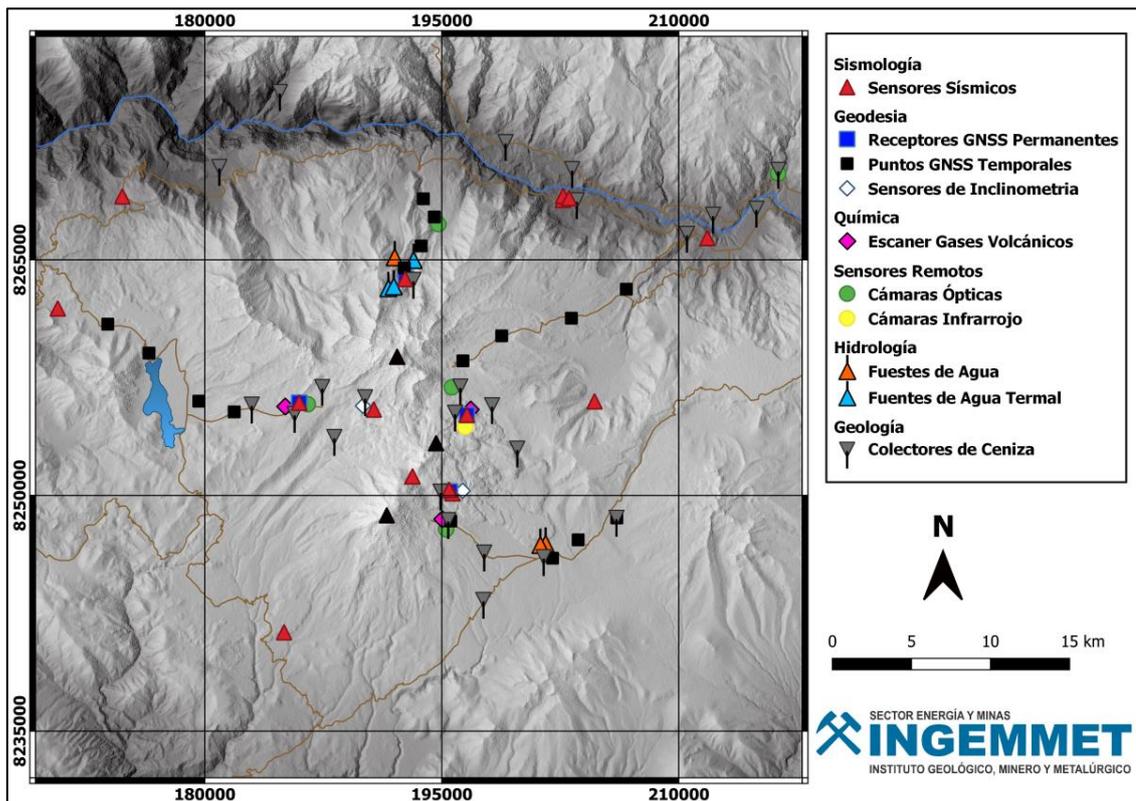


Figura 3. Mapa de distribución de la red de monitoreo y seguimiento multidisciplinario del volcán Sabancaya, en constante implementación.

5. ACTIVIDAD VOLCÁNICA INTERNA

La actividad interna del volcán Sabancaya se caracteriza principalmente por los procesos de movimiento de fluidos (magma y gases) y la presión que estos ejercen en la cámara magmática y los conductos activos haciendo que se fracturen. Estos procesos son evidenciados mediante la sismicidad asociada a intrusión magmática, migración del magma hacia la superficie y la expulsión de material magmático mediante las explosiones (entre 4 y 81 explosiones/día), estos procesos liberaron hasta 50 Mega Joules de energía (MJ), considerados niveles muy altos.

Por otro lado, la cámara magmática en expansión, ejerce presión en las estructuras tectónicas adyacentes provocando la reactivación de fallas geológicas.

5.1. Procesos de Intrusión Magmática

La Intrusión magmática es detectada por la sismicidad asociada a fracturamiento, en este caso los sismos Volcanotectónicos (VT), tanto proximales como distales; estos se localizaron principalmente al noreste, norte, y noroeste del volcán Sabancaya. La mayor actividad VT fue de tipo distal y se ubicaron sobre las fallas de Chachas - Cabanaconde, Solarpampa, Pungo - Hornillos, Hualca Hualca, Colihuire (Figura 4), fallas de tipo normal con orientaciones principalmente de este - oeste y noroeste - sureste (Benavente et al., 2017) y el lineamiento de Sepina. Estos sismos VT presentaron magnitudes locales (ML) entre 0.1 y 5.1.

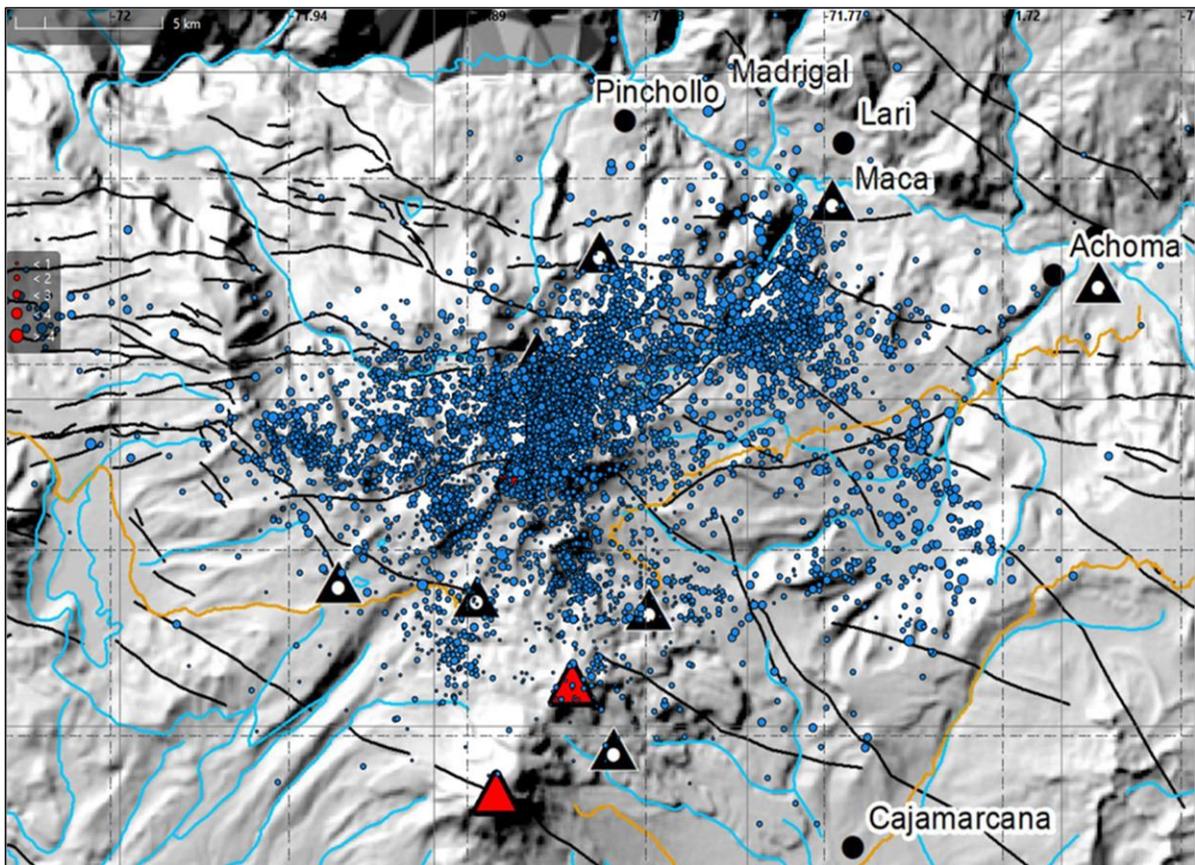


Figura 4. Sismicidad volcánico-tectónica (VT) registrada en el volcán Sabancaya durante el 2022.

Desde el año 2022 a la fecha se calculó 107 millones de metros cúbicos de volumen intruido de magma. Siendo el día 15 de marzo del 2022, día en la que se registró el aporte más importante de magma con 36 millones de metros cúbicos, producto de la ocurrencia de un enjambre de sismos VT (Figura 5), este aporte de magma repercutió en un incremento de la actividad explosiva del volcán (Figura 6).

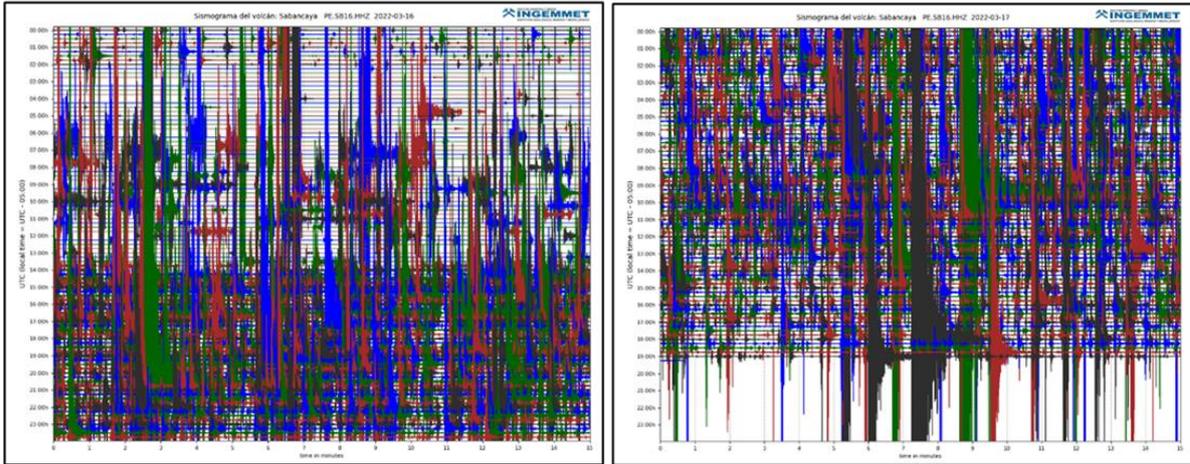


Figura 5. Sismograma de la estación SAB16 (componente vertical) del enjambre de sismos VT, correspondiente al día 15 de marzo del 2022 en el volcán Sabancaya.

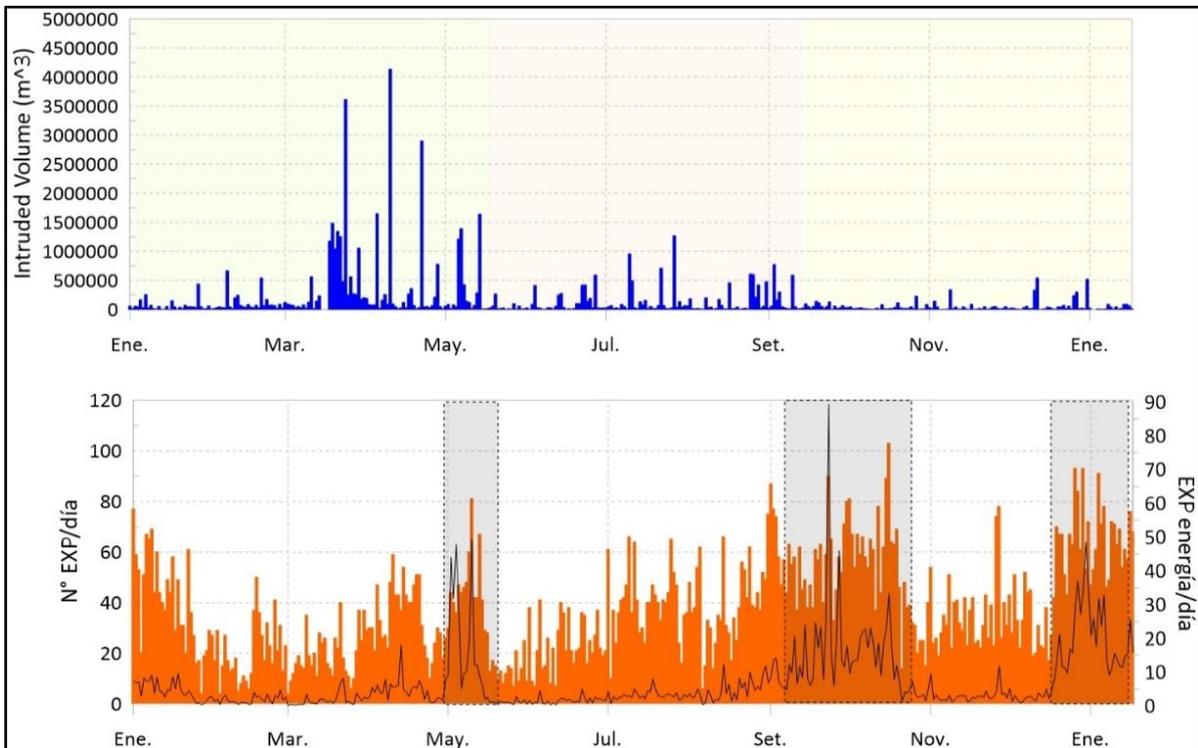


Figura 6. Superior: Volumen intruido calculado a lo largo del año 2022 a la fecha; Inferior: Actividad explosiva (barras anaranjadas = número de explosiones por día, línea negra = energía diaria de las explosiones en MJ).

Posterior al registro del último enjambre de sismos VT, se observó un evidente descenso continuo de volumen intruido de magma (Figura 7), en este periodo no se observó una relación entre el volumen intruido y la actividad explosiva. Lo descrito anteriormente indicaría que el incremento de la actividad explosiva observada durante los últimos meses del 2022, sea producto de los aportes de magma entre 2020 – 2021, periodo dentro el cual se registraron importantes enjambres de sismos VT (Figura 8).

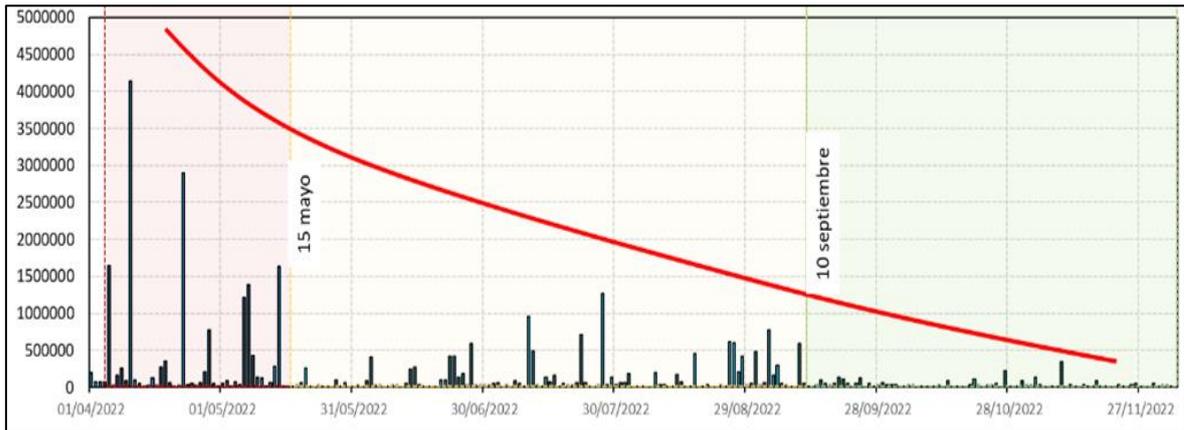


Figura 7. Volumen intruido calculado desde abril del 2022 hasta noviembre del 2022, se ha observado un volumen máximo de 4 millones de m³ y un mínimo de 0.01 millones m³.

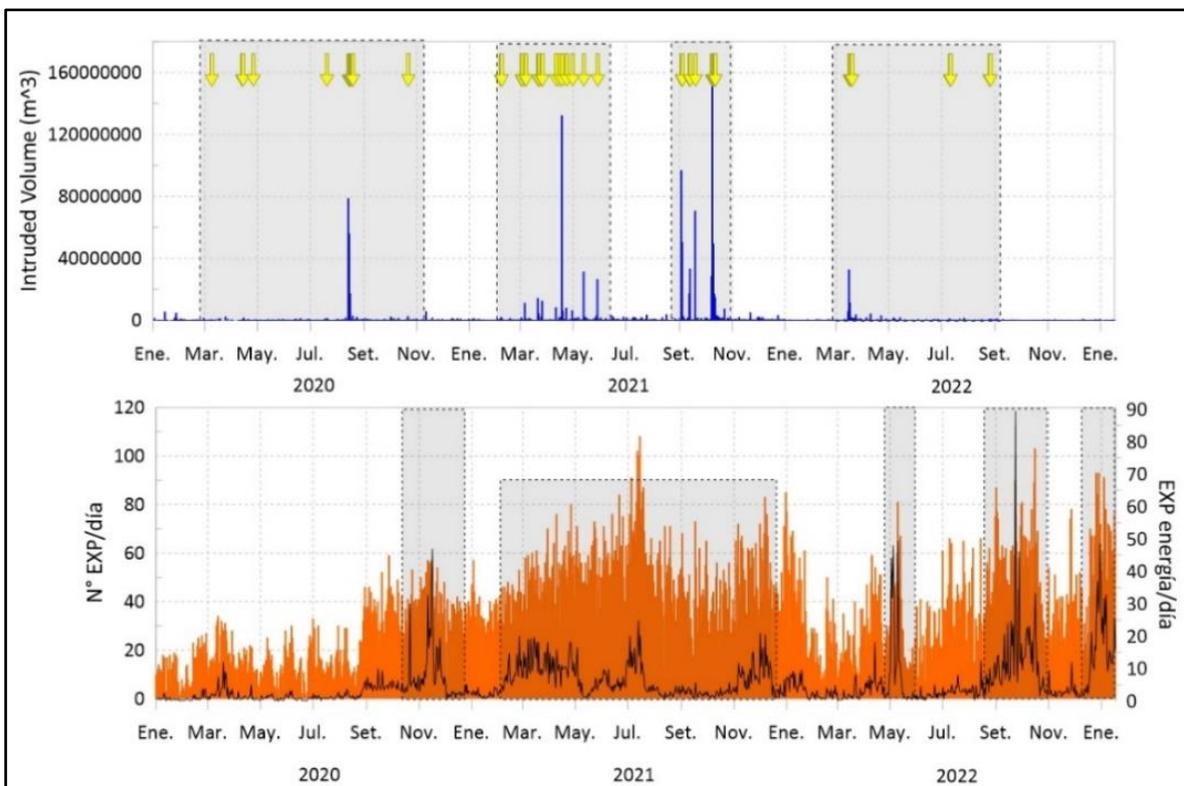


Figura 8. Superior: Volumen Intruido calculado desde el año 2020 hasta la fecha (Flechas amarillas indican enjambres de sismos VT); Inferior: Actividad explosiva (barras anaranjadas = número de explosiones por día, línea negra = energía diaria de las explosiones en MJ).

5.1. Dinámica de Fluidos Volcánicos

Durante el año 2022 y enero de 2023, la sismicidad asociada al movimiento de fluidos que migran por los conductos volcánicos, fue representada por sismos de tipo LP (Largo Periodo), explosiones y tremor volcánico. Esta sismicidad analizada a partir de su energía sísmica liberada, ha mostrado tener una relación con periodos de incremento y disminución en la actividad volcánica. En la figura 9, se ilustran dichos periodos donde la energía diaria aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor máximo de 30 MJ, niveles considerados muy altos dentro de la actividad sísmica por movimiento de fluidos.

A este tipo de sismicidad, además se le realizó el análisis temporal de la variación de intervalo de tiempo entre los dos eventos que conforman los eventos acoplados (par de sismos separados por algunos segundos o incluso minutos) a fin de identificar su relación con los periodos de aumento y descenso en la actividad del volcán Sabancaya y procesos asociados. La Figura 10, muestra la evolución del intervalo de tiempo P2 – P1 (P1: tiempo de inicio de la primera señal sísmica y P2: tiempo de inicio de la segunda señal sísmica) y claramente se pueden identificar tres periodo donde se observa un descenso marcado en el intervalo de tiempo con un consecuente incremento en la energía sísmica liberada por las explosiones y anomalías térmicas registradas por el sistema MIROVA, estos periodos coinciden con el incremento en la sismicidad asociada a la dinámica de fluidos al interior del volcán.

De estos parámetros evaluados en la sismicidad por fluidos (intervalo de tiempo P2 – P1 y energía sísmica liberada), se pueden identificar tres fases asociados a la formación de domos de lava: (1) Ascenso del magma, (2) Incremento de la actividad explosiva / crecimiento de un domo y (3) Disminución de la actividad explosiva / destrucción de la cúpula (domo de lava).

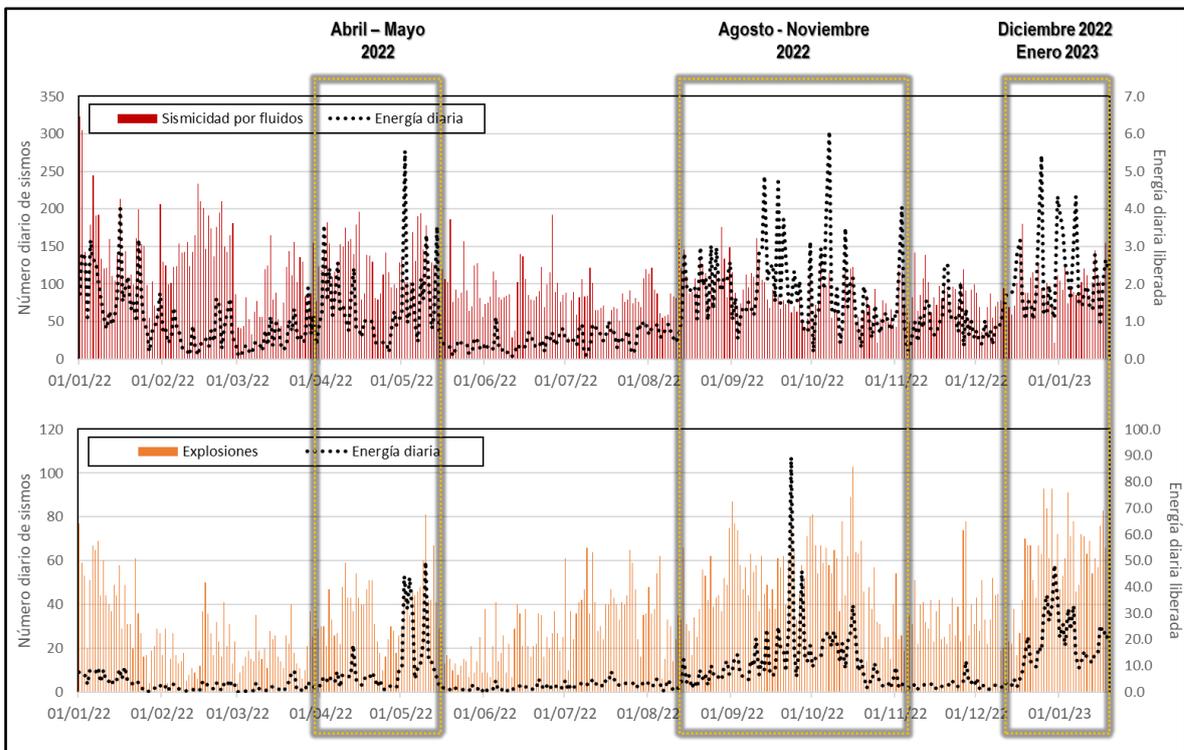


Figura 9. Evolución de la sismicidad asociada a la dinámica de fluidos volcánicos en el volcán Sabancaya, 2022 – 2023.

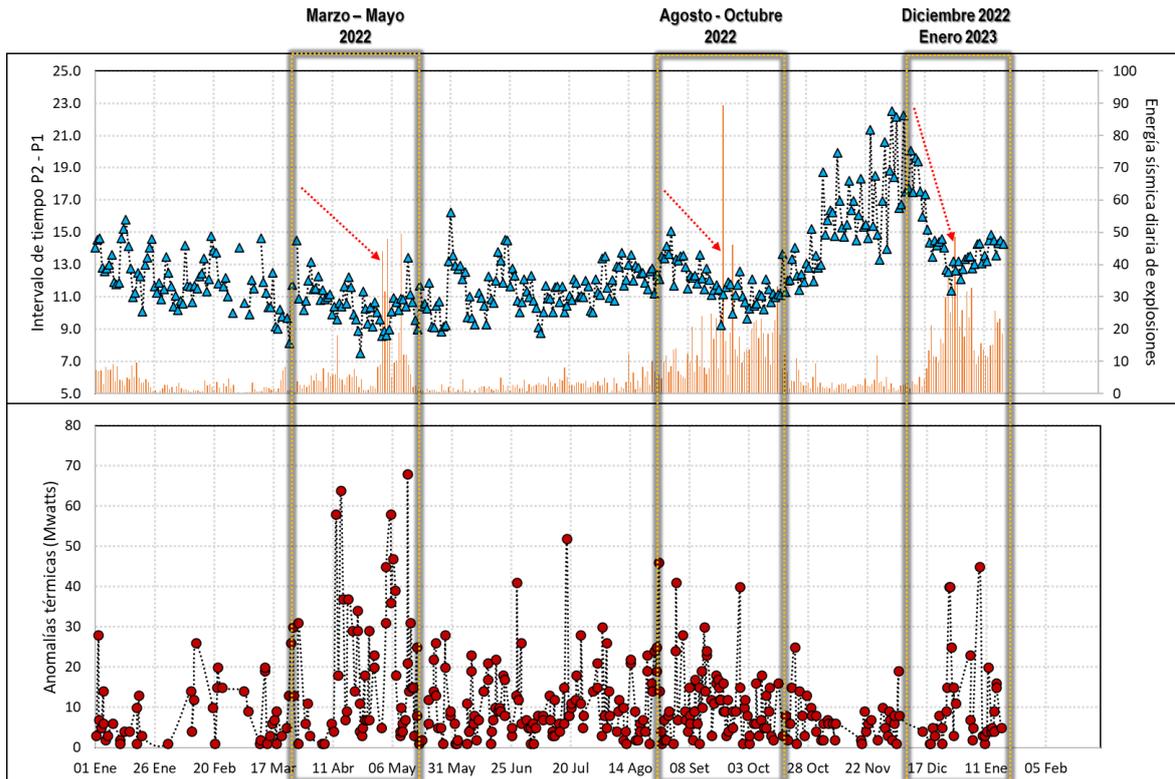


Figura 10. Evolución del intervalo de tiempo P2 – P1 de eventos acoplados, energía diaria liberada por las señales sísmicas asociadas a las explosiones volcánicas y anomalías térmicas (MIROVA).

En la Figura 11, se muestra cómo ha evolucionado anualmente la energía sísmica liberada por la sismicidad asociada a la dinámica de fluidos que migran por los conductos volcánicos y claramente se puede apreciar que, desde que inició el proceso eruptivo del volcán Sabancaya (noviembre 2016) a la fecha, el comportamiento de este parámetro ha presentado una ligera tendencia a disminuir, sugiriendo que al no registrarse importantes procesos de intrusión magmática (enjambres de sismicidad distal) desde la cámara principal, esto se vería reflejado en menor tasa de migración de fluidos magmáticos hacia zonas superficiales y que los incrementos en la energía de la sismicidad por fluidos que se observaron a manera de pulsos, probablemente se asociarían a procesos de intrusiones anteriores a la última ocurrencia de enjambres de sismicidad VT distal.

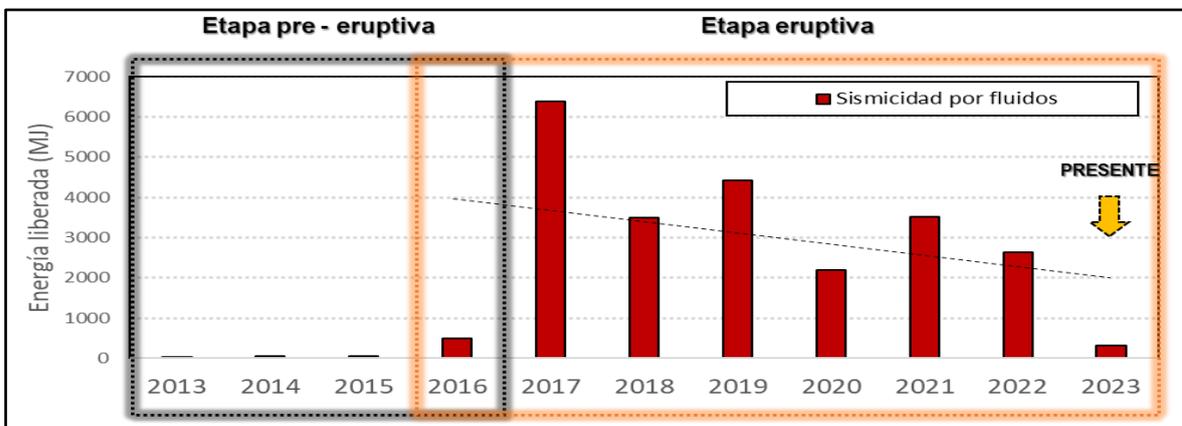


Figura 11. Evolución de la energía sísmica anual liberada por la sismicidad asociada a la dinámica de fluidos, periodo 2013 – 2023 (obsérvese la línea de tendencia).

6. ACTIVIDAD VOLCÁNICA SUPERFICIAL

6.1. Características de las Emisiones

Durante el 2022, el volcán Sabancaya ha presentado emisiones de manera continua, caracterizada por emisiones de alta densidad de color gris oscuro, así como emisiones blanquecinas y gris claras. Así mismo, se han registrado emisiones de gases magmáticos caracterizadas por ser azulinas y emisiones de material hidrotermalizados los cuales se evidencian en las emisiones rojizas.

Las alturas de las emisiones alcanzaron alturas que oscilan entre 200 y 3800 metros sobre el cráter (m.s.n.c.) tal como se puede ver en las imágenes de la figura 12. En promedio se registraron 20 eventos por día, siendo el máximo de 80 eventos por día ocurrido en los meses de abril y mayo. La Figura 13 ilustra las alturas diarias máximas alcanzadas durante el año 2022 y enero de 2023, así como color de las emisiones. Estas características se mantuvieron por encima del valor promedio de las emisiones registradas.



Figura 12. Imágenes representativas de las explosiones del volcán Sabancaya.

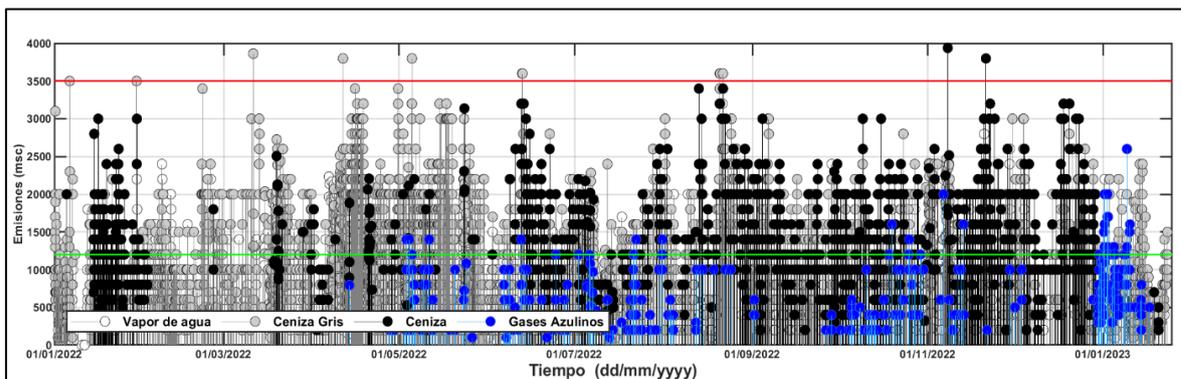


Figura 13. Máximas alturas alcanzadas durante el año 2022 y enero de 2023.

6.2. Evolución Morfológica del Domo de Lava Pichqa

Según el análisis de las imágenes PlanetScope, el 04 de enero no se visualizaba un domo en el interior del cráter, a partir del 27 de abril se observó un cuerpo de lava en la parte norte del cráter al cual se le denominó Pichqa (cinco en lengua quechua), el 20 de mayo se visualiza el domo con mayor claridad presentando una textura rocosa, el área de este domo fue incrementándose hasta el mes de agosto de 2022, para posteriormente disminuir entre el 22 y 28 de agosto, lo que indicaba un breve periodo de destrucción. A partir del 01 de septiembre se observó un crecimiento del domo debido a un nuevo pulso de magma el cual se observa el 18 de septiembre. Posteriormente, se visualiza que la destrucción del domo fue desde el 19 de octubre, así también se observó zonas hidrotermalizadas en el cráter de color amarillento.

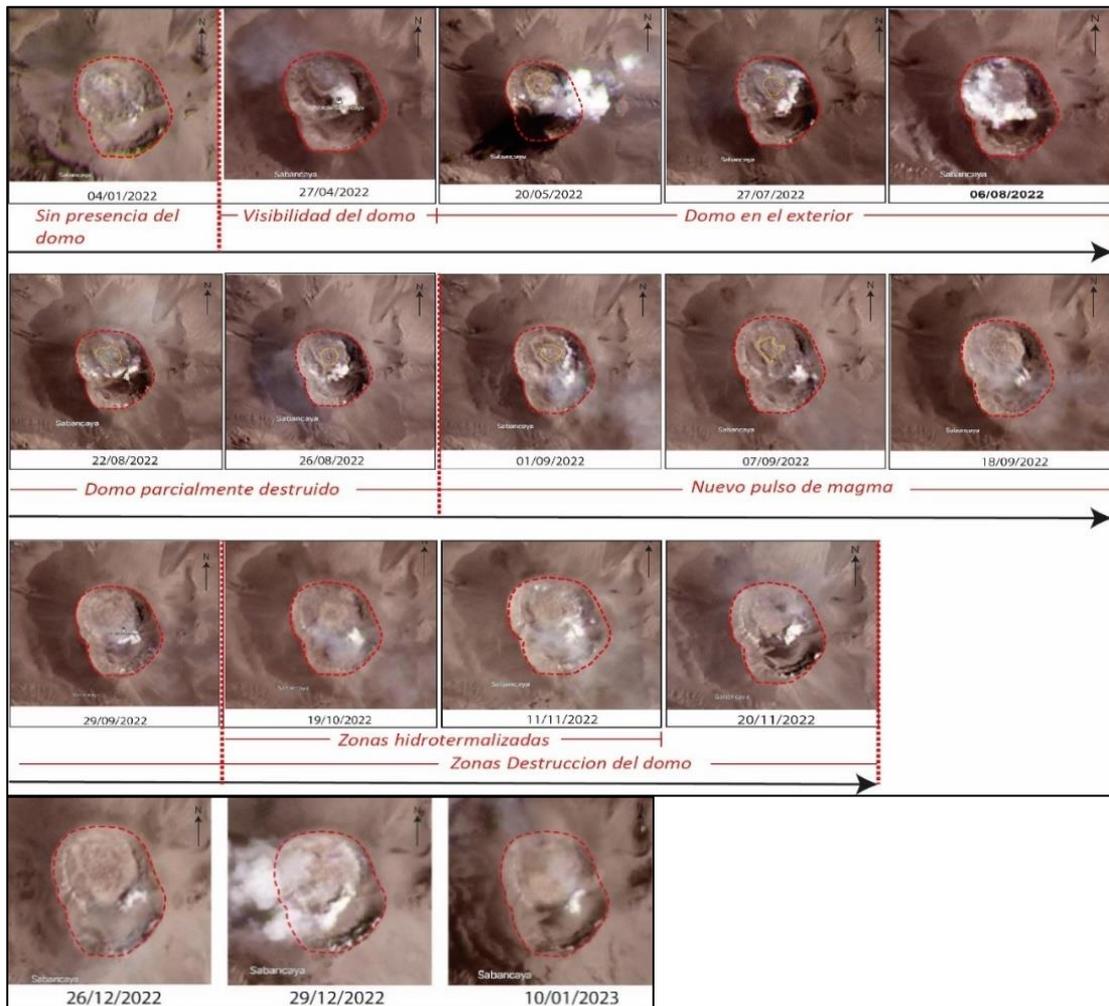


Figura 14. Serie de imágenes PlanetScope que indica la formación, crecimiento y destrucción del quinto domo (Pichqa) durante el 2022 al 2023.

6.3. Deformación Volcánica

Los registros de monitoreo de deformación muestran que se continúa registrando un proceso de expansión en la cámara principal situada entre 12 – 15 km de profundidad y a 8 km al norte del volcán Sabancaya (Boixart et al., 2020), esto debido a una continua intrusión magmática desde regiones mucho más profundas, esta expansión se observa en superficie a razón de 3.8

cm/año, de acuerdo a los registros geodésicos (Figura 15). No se ha observado hasta la fecha disminución en esta tasa de inflación, este comportamiento sugiere que el proceso eruptivo actual continuará con la misma intensidad durante los próximos meses.

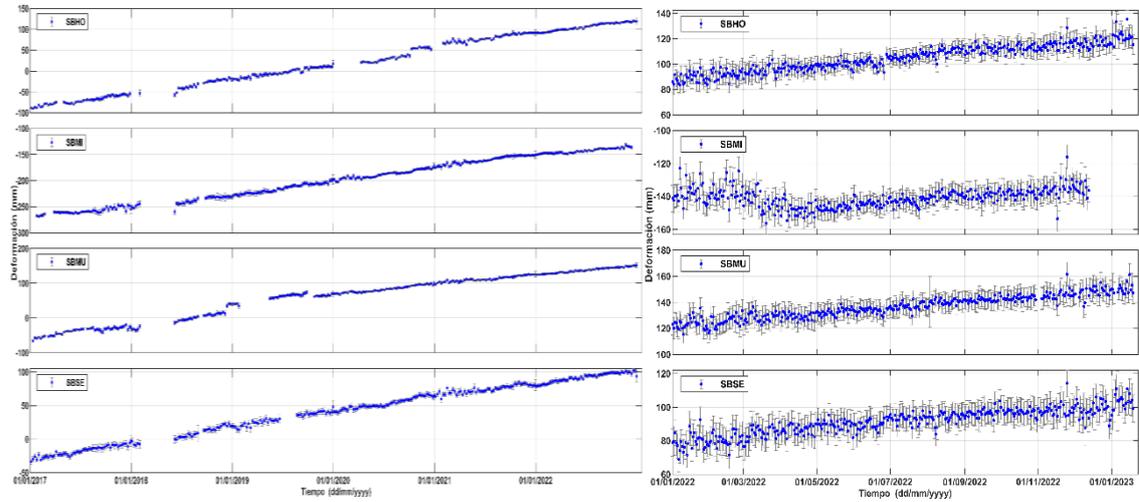


Figura 15. Serie temporal de 4 estaciones GNSS permanentes desde el año 2014. Se observa una sostenida la tasa de deformación volcánica (levantamiento del suelo volcánico).

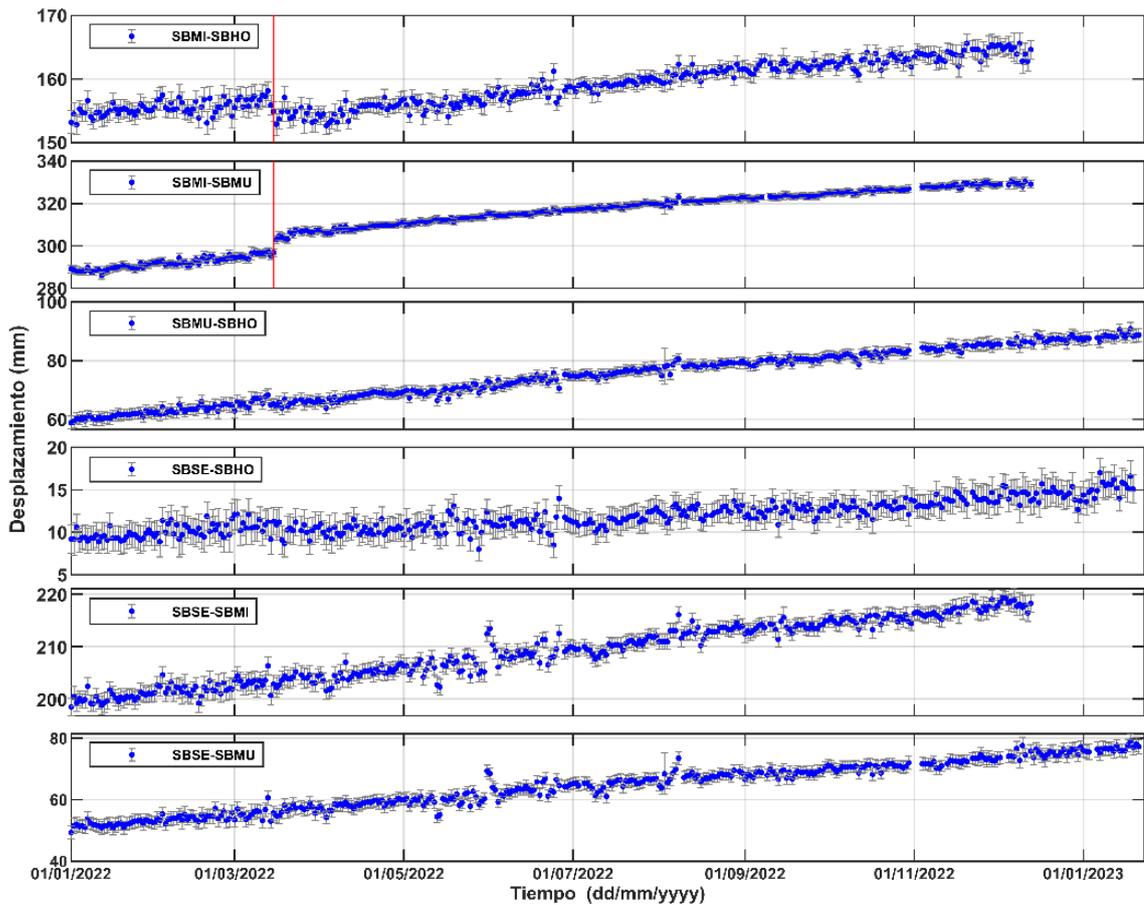


Figura 16. Serie temporal de línea base durante el periodo del 2022. En las series de tiempo de la línea base de la estación GNSS SBMI – SBHO y SBMI y SBMU se observa una discontinuidad (líneas rojas verticales) en las la serie asociado al sismo del 15 de marzo del 2022.

Se calculó también series temporales de línea base (distancia entre par de estaciones), los cuales pueden evidenciar procesos de deformación con fuentes más superficiales. Estas series temporales muestran que durante el año 2022 se continúa registrando procesos de expansión y contracción cerca al edificio volcánico (Figura 16), la cual está asociado a la llegada del magma a conductos superficiales cerca al cráter ejerciendo presión dentro de estas.

6.4. Química de Gases

Durante el año 2022, se registró una continua desgasificación de dióxido de azufre (SO₂), el promedio diario de flujo de SO₂ se mantuvo por debajo de las 3000 toneladas/día hasta el mes de marzo. Posteriormente, se observó un incremento sostenido del flujo de SO₂ producto de un nuevo aporte de magma hacia la superficie, que posteriormente se evidenciaría con la presencia de un nuevo domo de lava en el cráter del volcán.

A partir de 12 de octubre se detecta un nuevo incremento de los valores de SO₂ con valores máximos de 9800 toneladas/día iniciando el proceso de destrucción del quinto domo de lava, los valores de desgasificación se mantuvieron hasta diciembre del 2022. En el 2023 se registró un valor puntual de SO₂ de 8700 toneladas/día que indicaría nuevos aportes de magma a la superficie, sugiriendo así, la continuidad del actual proceso eruptivo (Figura 17).

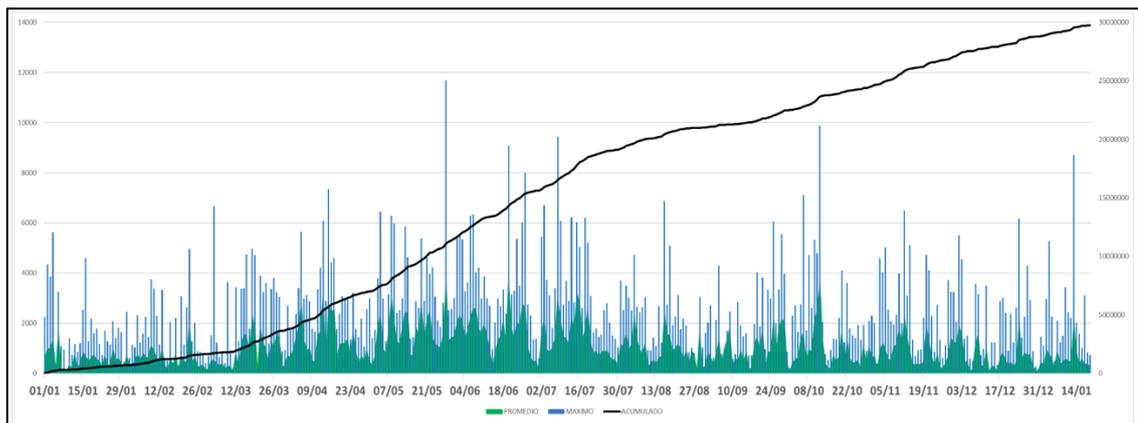


Figura 17: Mediciones de los flujos promedios, máximos diarios y flujo acumulado de dióxido de azufre SO₂ registrado con la red de escáner DOAS en el volcán Sabancaya

6.5. Caída de Tefras

Consiste en monitorear la caída de tefra (bloques de lava, lapilli y ceniza) en los alrededores del volcán Sabancaya, para ello se utilizan colectores especiales denominados *Cenizómetros*, que forman parte de la red de cenizómetros instalados en diferentes sectores del volcán (noreste, noroeste, oeste, suroeste y sur) y poblados situados en un radio de 34 km con respecto al cráter del volcán. Las muestras recolectadas por estos equipos se someten a análisis granulométrico, petrográfico, geoquímico y mineralógico, con el fin de determinar las características de la actividad y los mecanismos eruptivos implicados.

El principal producto emitido por el volcán es la ceniza volcánica, durante el 2022 el acumulado de cenizas presentaron espesores menores o igual a 0.1 mm en un radio entre 22 – 37 km

respecto al cráter, mientras que, en los cenizómetros proximales (distribuidos en un rango de 4 – 6 km) ubicados en los 4 flancos del volcán, se registraron espesores de ceniza entre 0.2 – 1.4 mm. Los registros de recopilación de la acumulación de caída de cenizas en sector norte y noroeste registraron entre 0.1 – 1.5 mm en un rango de 5 y 18 km. Específicamente en el sector sur, este y suroeste, a una distancia de entre 3 a 17 km del volcán, se registraron espesores de 0.1 a 0.55 mm.

En la Figura 18. Se muestran los espesores de ceniza registrados por la red de cenizómetros distribuidos en un rango entre 3 a 30 km del cráter, se diferencian por periodos de recolección desde el año 2018 al año 2022 (P-1, P-2, P-3, P-4, P-5 y P-6). Los resultados muestran que, en un rango de 5 km, la caída de ceniza supera el 1 mm de espesor en los 5 periodos, en un rango de 10 km se han registrado espesores de ceniza que superan el 1 mm, en los periodos P-1 al P-5. Mientras en distancias mayores a 15 km, se han registrado caídas de cenizas que no superan 0.1 mm. De acuerdo a estos resultados se puede ver que los pueblos del valle del Colca son afectados con caída de cenizas leve. Mientras que, la mayor cantidad de ceniza se registran en un rango de 4 – 6 km del cráter.

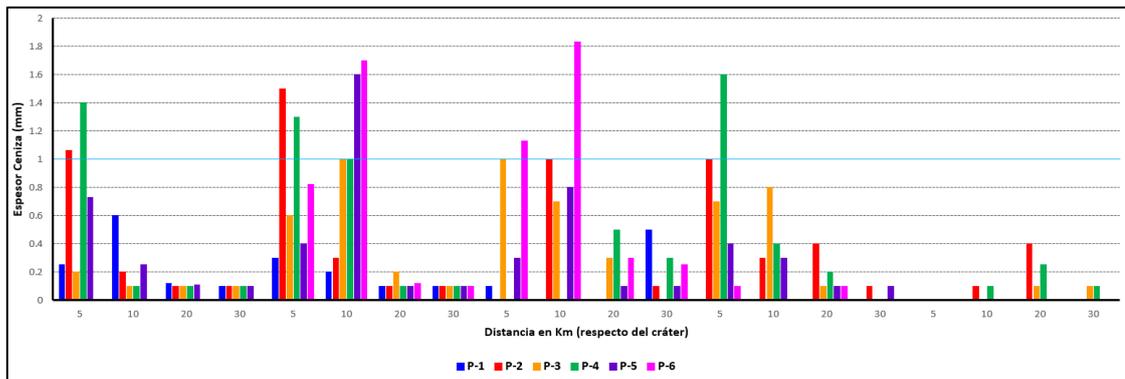


Figura 18. Histograma que representan la tasa de acumulación de caída de cenizas, registrados en un ámbito de 30 km, respecto al cráter del volcán, evaluado para un periodo de 5 años (2018 – 2022).

6.5.1. Análisis de Partículas Menores a 32 micras

La ceniza fina puede llegar a viajar a grandes distancias y ser perjudiciales para la salud a largo plazo, llegando afectar al sistema respiratorio, ojos y piel. Por esta razón se analiza el porcentaje de partículas menores a 32 micras.

En el 2016 se tiene un porcentaje mayor de partículas menores a 32 micras que alcanzaron hasta un 70 % de la muestra total. En el año 2017, entre los meses de enero y junio el porcentaje de finos se encuentra entre los 13 a 52 % del total acumulado, durante los meses de junio a agosto los porcentajes disminuyeron con valores entre 0.3 a 18 %, en cuanto al porcentaje de partículas finas en los poblados alcanzó un valor de 9 %. Durante el año 2018 el porcentaje de partículas finas disminuyó, mientras que en el mes de abril el porcentaje estuvo entre 3 a 13 % y en los meses de abril a mayo se encontró entre 0.3 a 8 %, el promedio de porcentaje de finos en los poblados fue de 6%. En el 2019, en los meses de junio a agosto los porcentajes estuvieron entre 0.06 a 18 %, mientras que en los meses de septiembre a diciembre el porcentaje aumentó hasta 66 %, a su vez el promedio de fino recolectados en los principales poblados alcanzó un valor de 16 %. Durante el 2020, en los meses de enero a septiembre el porcentaje de finos osciló entre 0.6 a 46 %, en los meses de octubre a septiembre se observó una disminución con valores

entre 4 y 25%, el porcentaje de fino en los poblados tuvo un promedio de 9 %. En el año 2021, en los meses de enero a agosto el porcentaje de finos alcanzó un valor de 45 %, mientras que en los poblados el porcentaje de partículas finas alcanzó un 13 %. En el 2022 se alcanzó un porcentaje de 44 % de partículas finas durante el mes de febrero.

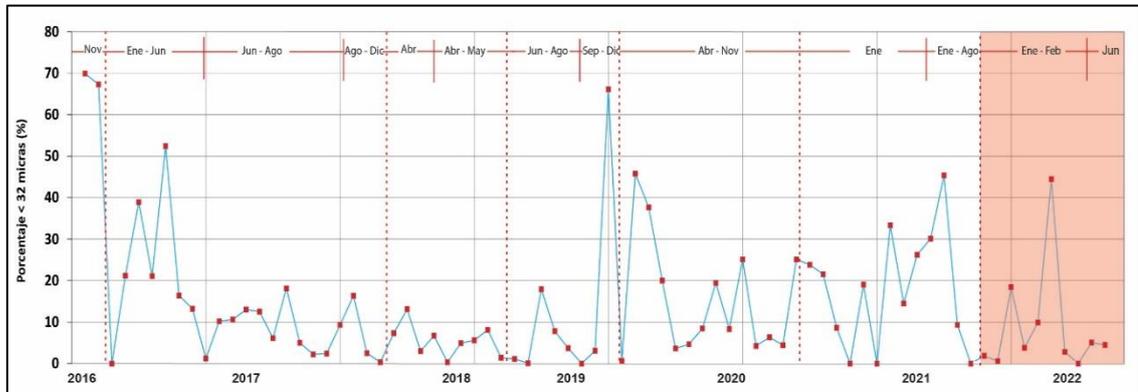


Figura 19. Porcentaje de partículas menores a 32 micras recopilados por la red de cenizómetros del volcán Sabancaya desde el año 2019 a 2022.

6.5.2. Mapa de Isópacas

Para el periodo entre diciembre de 2021 y octubre y 2022, se elaboró en base a 83 puntos de medición de acumulación de ceniza, mapas de Isópacas. Se observa que la isópaca de mayor espesor (9 mm) abarcó un área de 11.78 km² y la isópaca de menor espesor (0.1 mm) abarcó un área de 3153.44 km², dentro de esta última área se encuentran los poblados de Huambo, Lluta, Cabanaconde, Tapay, Chivay y Yanque (Tabla 01 y Figura 20).

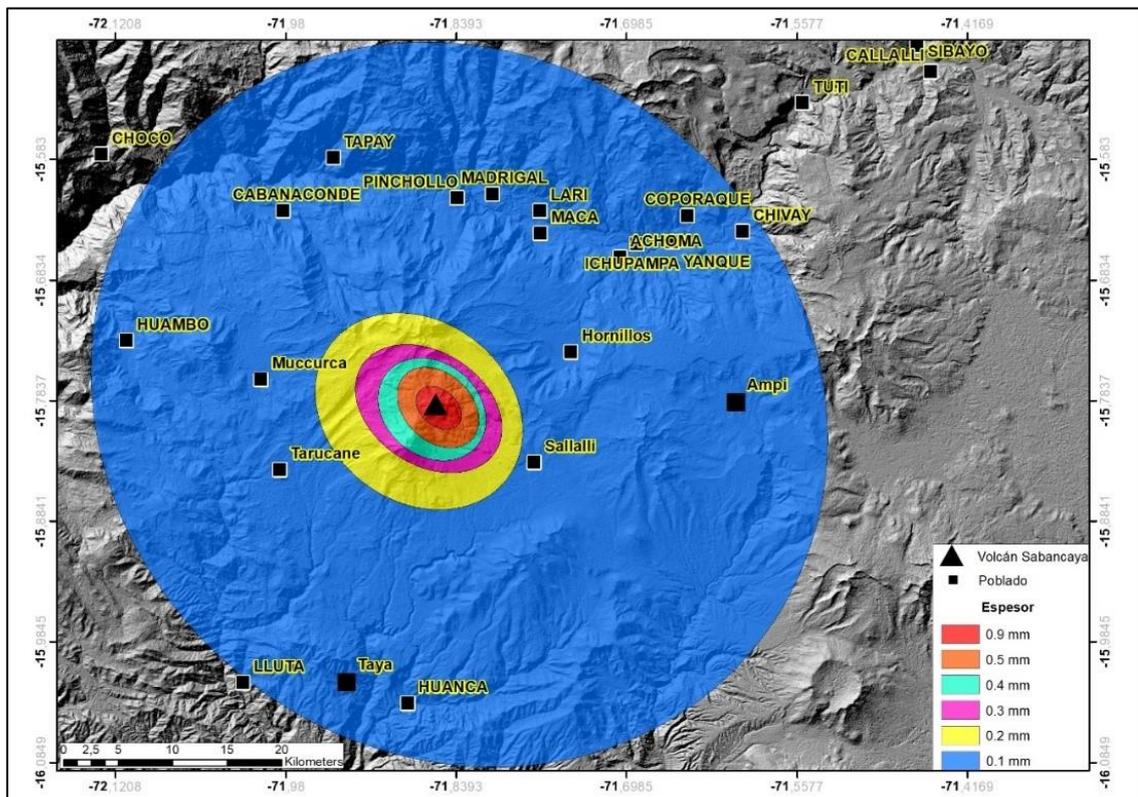


Figura 20. Mapa de isópacas para el periodo diciembre 2021 a octubre 2022.

Tabla 01. Área abarcada por las isópacas.

ISOPACA (mm)	ÁREA (Km ²)
0.9 +	11.78
0.5	28.38
0.4	29.10
0.3	45.62
0.2	141.87
0.1	3153.44

7. MAPA DE PELIGRO DEL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO - SABANCA YA

Un mapa de peligros volcánicos es información cartográfica donde se muestra el grado de peligrosidad volcánica de las áreas adyacentes a un determinado volcán. En estos mapas se representan las zonas que pueden ser afectadas por uno o varios fenómenos volcánicos potencialmente destructivos, en caso de una erupción de determinadas características, definidos previamente como escenarios generadores de peligros (Consejo de Defensa Suramericano, 2015). Los mapas de peligros son elaborados para ser utilizados en la planificación del crecimiento urbano, para planificar obras de infraestructura, para ser utilizado durante la gestión de una crisis volcánica, etc.

Para determinar la distancia mínima a la cual se puede acercarse la población para un tipo de erupción vulcaniana con las características que presenta el Sabancaya actualmente, se tomará como base la zonificación de peligros del mapa proximal de alto peligro, y si la actividad incrementa se debe considerar los escenarios de moderado y bajo peligro según corresponda.

Para explicar la naturaleza de los mapas de peligro proximal se describe los tres mapas de peligros para el caso del volcán Sabancaya:

7.1. Mapa de Peligros por Caída de Cenizas

Durante el ascenso del magma ocurren varios procesos físicos antes de su llegada a la superficie. Estos procesos generan la nucleación y formación de burbujas de gas que se separan de la fase sólida. Cuando el magma se encuentra cerca de la superficie, las burbujas serán de mayor tamaño hasta explotar, causando así la fragmentación. Así, durante una erupción explosiva, el magma se romperá en fragmentos de diversos tamaños (bloques, lapilli y ceniza) que serán expulsados de forma violenta hacia la atmósfera. Estos fragmentos se dispersarán alrededor del cráter dependiendo de su tamaño. El transporte del material fino está condicionado por la velocidad y la dirección del viento, en función de su peso, tamaño y, forma.

La caída de ceniza es el peligro más común y extendido en el volcán Sabancaya (Figura 21), es así que en una superficie de 3,153 km² fueron cubiertas por capas de cenizas con espesor de al menos 0.1 mm, durante el año 2022 y un área de 12 km² (áreas próximas al volcán) fueron cubiertos por espesores de ceniza de al menos 0.9 mm.

En el Sabancaya, el procedimiento para determinar el peligro por caída de ceniza sigue las siguientes recomendaciones:

- Información de la actividad eruptiva histórica del volcán, determinándose el índice de explosividad volcánica (VEI, por su sigla en inglés).
- Se determina la dirección del viento y su velocidad con datos de la NOAA y de la estación meteorológica Huayraray situado en el flanco norte del Sabancaya.
- Para representar las probables áreas afectadas por diferentes magnitudes de erupción del Sabancaya, se tiene una red de colectores de ceniza (cenizómetros) que miden el espesor de la caída de ceniza en diferentes flancos del volcán.
- En un sistema SIG se unen todos los puntos del mismo valor (isópacas) y se determina las áreas de mayor afectación por caída de ceniza.
- Para delimitar los niveles de peligro, muy alto, moderado, bajo y su grado de afectación, se toman en cuenta los datos de los cenizómetros de un año, por ejemplo, durante el 2022 en un rango de 5 km respecto al cráter, el colector midió hasta 1.6 mm de espesor de ceniza.

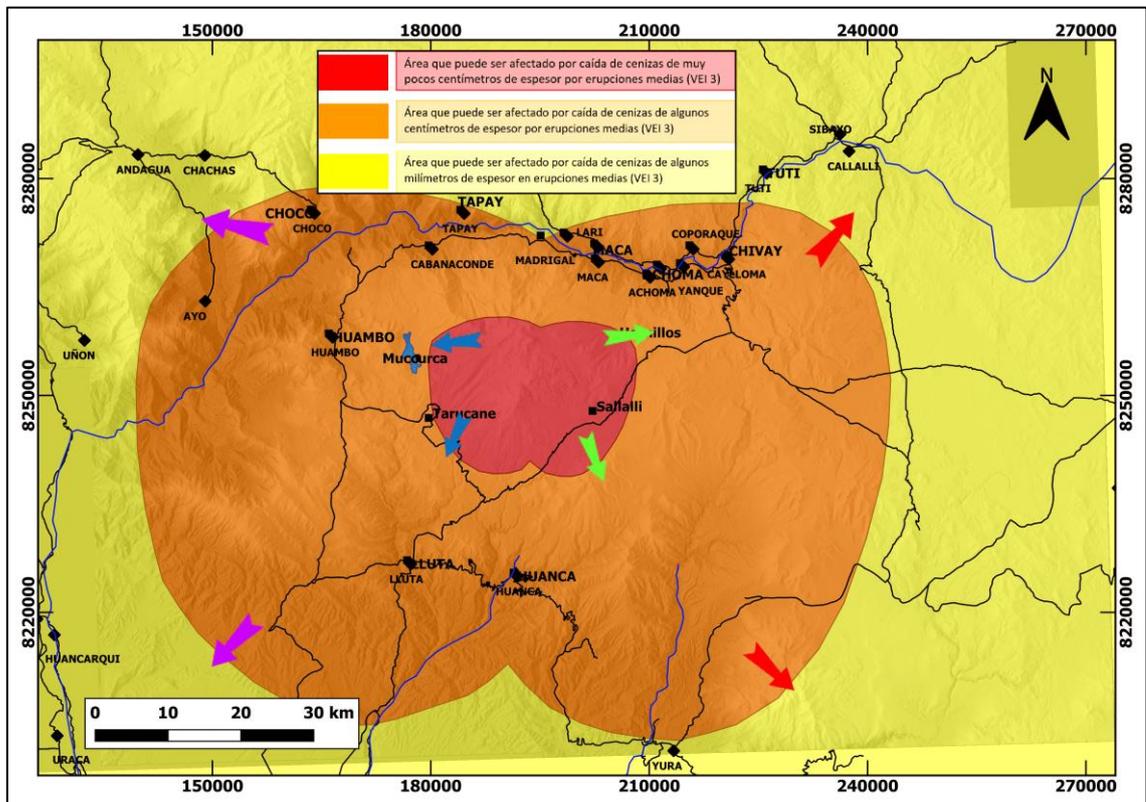


Figura 21. Mapa de peligros por caída de cenizas y pómez, elaborado para el volcán Sabancaya (Tomado del Boletín C 61 INGEMMET).

7.2. Mapa Proximal de Peligros Múltiples

La zonificación de peligros del mapa proximal se realizó para peligros múltiples, es decir: para el emplazamiento de flujos piroclásticos, compuesto por la mezcla de cenizas, fragmentos de rocas y gases de altas temperaturas (300 C° a 800 C°) que se desplazan con velocidades de 100 a 300 m/s; flujos de lava; corrientes de roca fundida expulsadas por el cráter o fracturas en los flancos del volcán y; lahares que descienden por las quebradas del volcán.

7.2.1. La Zona de Alto Peligro (Rojo)

Esta zona se delimitó principalmente para el alcance de corrientes de densidad piroclástica de volumen pequeño, generados durante erupciones leves con IEV 1-2 (Escenario 1: erupción vulcaniana). Los límites de las corrientes de densidad piroclástica se encuentran entre 1 - 4 km de distancia del cráter. Las mayores distancias están entre 3 y 4 km del cráter y se encuentran en los flancos sureste, este y noreste, mientras que las menores distancias (1 - 2 km del cráter) están hacia los flancos suroeste y este del Sabancaya. (Figura 22).

7.2.2. La Zona de Moderado Peligro (Naranja)

Se delimitó en función a las corrientes de densidad piroclástica que se encuentra entre 5 y 6 km en los flancos sureste, este y noreste del Sabancaya; entre 3 y 5 km en los flancos noreste y norte; y menos de 2 km en el flanco sur y sureste. Los límites de la zona de moderado peligro también coinciden con los máximos alcances de algunos flujos de lava emitidos por el volcán Sabancaya, que se encuentran alrededor de 6 km de distancia desde su punto de emisión. Por otro lado, el alcance máximo de proyectiles balísticos se encuentra dentro de un radio menor a 5 km.

7.2.3. La Zona de Bajo Peligro (Amarillo)

Los límites se encuentran entre 9 y 12 km en los flancos suroeste, oeste, sur, sureste, este y noreste del volcán Ampato; y menos de 7 km en el sector norte. El menor alcance en la zona norte se debe a la presencia del Hualca Hualca, que forma una barrera topográfica.

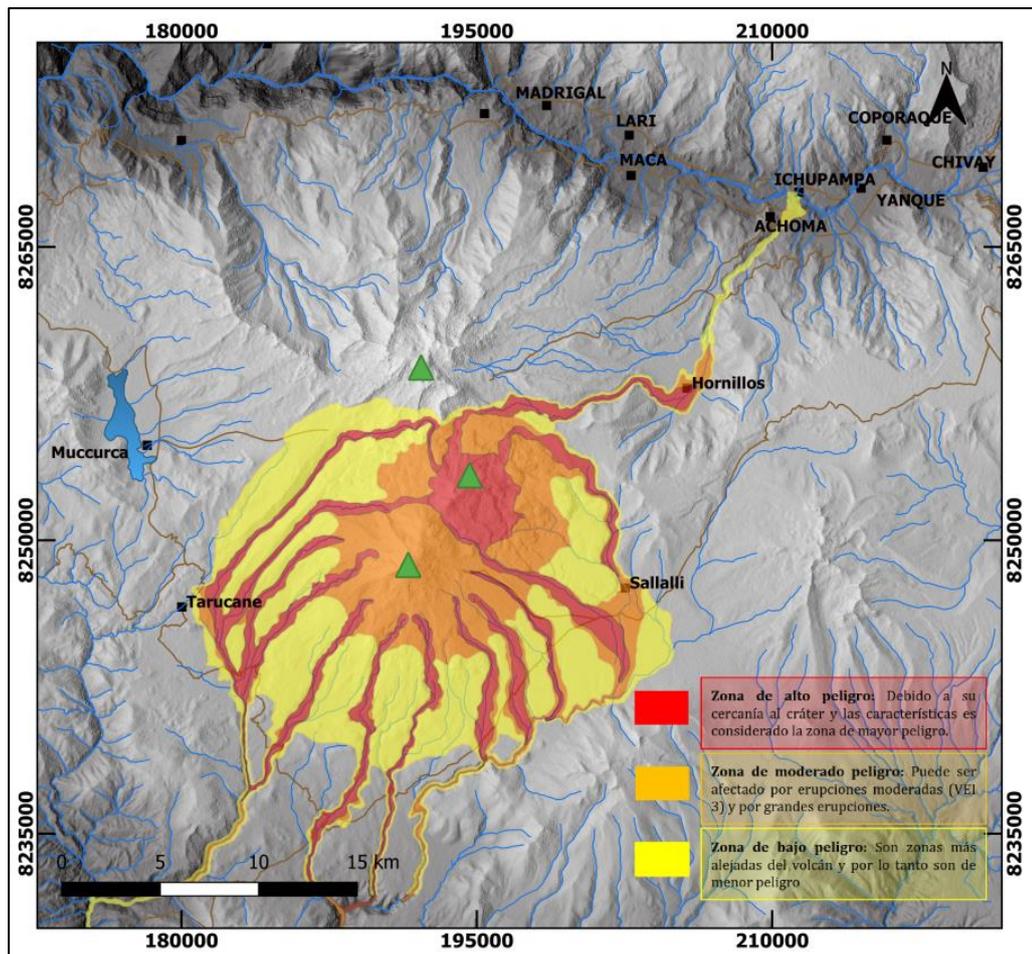


Figura 22. Mapa de peligros múltiples del Sabancaya

7.3. Mapa Peligros por Lahar

Debido a que las erupciones explosivas del complejo volcánico han emplazado depósitos piroclásticos en zonas proximales y distales, las principales quebradas que descienden por los flancos del volcán podrían verse afectadas por la presencia de lahares. En los alrededores del volcán Sabancaya se encuentran las quebradas Mollebaya, Colihui, Sallali, Sahuancaya-Pujro Huayjo. En los alrededores del volcán Ampato se localizan Jaruma-Cabana-Pujio, Colquemarca-Tungapujio-Baylillas, Collo-Chacramayo, Vizcachane y Cabadillayoc y en los alrededores del Hualca Hualca se encuentran las quebradas Pungo-Hualca Hualca, Huayurau, Japo y Huancané. Estas quebradas fueron identificadas como zonas de alto peligro frente a los lahares, por lo que, se recomienda evitar el tránsito por estas zonas, principalmente en temporadas de lluvias.

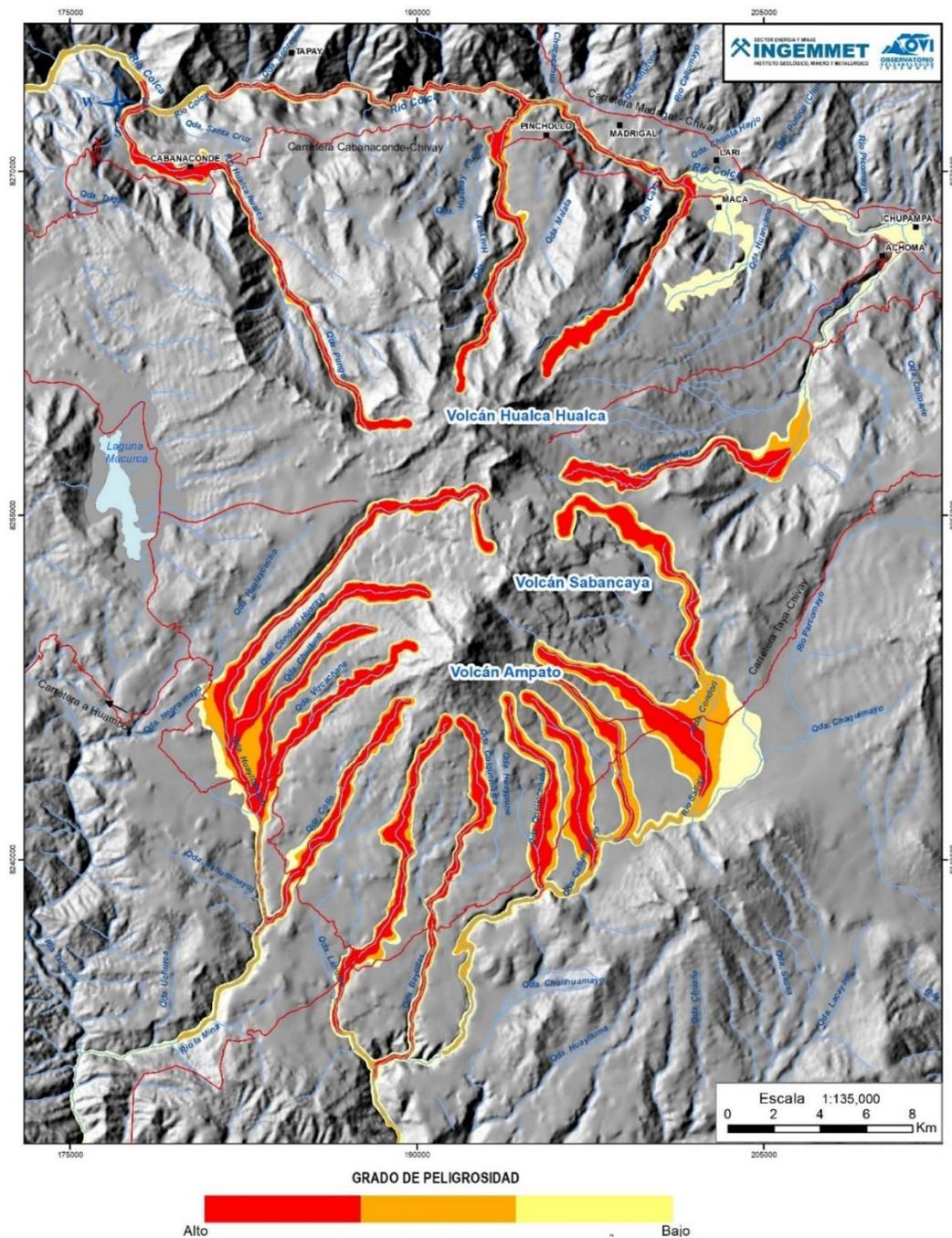


Figura 23. Mapa de peligros por Lahares (tomado de Rivera et al. 2016)

8. ÍNDICE DE EXPLOSIVIDAD VOLCÁNICA (VEI) PARA EL PERIODO 2016 – 2022

El Índice de Explosividad Volcánica (VEI, por sus siglas en inglés) es un indicador general del carácter explosivo de una erupción. Según Newhall y Self (1982), se refiere a una estimación compuesta de la magnitud y/o intensidad y/o potencial destructivo, entre otras características de una erupción, dependiendo de la información disponible. Las erupciones pueden ser catalogadas con un VEI en una escala de 0 a 8.

Los trabajos de campo y la información recolectada con la red de colectores (cenizómetros) han permitido conocer los espesores de los depósitos y elaborar los mapas de isópacas (líneas que unen puntos con un mismo espesor). Para el cálculo de volumen se ha empleado el método de Pyle (1989) modificado por Fierstein and Nathenson (1992), el cual está basada en la integración de segmentos lineales, donde el espesor del depósito disminuye exponencialmente respecto la distancia de la fuente. La representación gráfica resultante es el espesor de una isópaca (T) en función de la raíz cuadrada del área de la misma, que se muestra mediante uno o varios segmentos de línea recta, el cual está dado por la siguiente ecuación (1).

$$T=T_0\exp(-kA^{1/2})\dots\dots\dots(1)$$

Dónde: A es el área del contorno de la isópaca

T₀ es el espesor máximo extrapolado

K: es la pendiente de la recta.

Pyle (1989) integró la ecuación (1) para calcular el volumen asumiendo la forma elíptica de la isópaca, mientras que Fierstein and Nathenson (1992) mejoraron el método haciéndola independiente a la forma de la isópaca. El volumen está dado por la formula (2).

$$V=2T_0/K2\dots\dots\dots(2)$$

Donde V: volumen, T₀: espesor máximo extrapolado y K: pendiente de la recta.

La información obtenida a partir de la red de cenizómetros y el volumen estimado por Coppola et al. (2020) se estima un volumen acumulado del material de 0.043 – 0.103 km³ para el periodo 2016 – 2022.

La altura de las columnas eruptivas ha alcanzado un máximo de 5.5 km sobre el nivel del cráter. Estas columnas eruptivas han sido generadas por explosiones cortas y recurrentes que han variado en el tiempo, caracterizando así un comportamiento cíclico al periodo eruptivo actual. Además, se ha evidenciado el emplazamiento y destrucción de domos anidados en el cráter del volcán, caracterizando un comportamiento explosivo y efusivo complejo de la actividad eruptiva.

Esta información ha permitido clasificar a la actual erupción del volcán Sabancaya como una erupción de tipo “Vulcaniana” de larga duración, con un **Índice de Explosividad Volcánica (VEI) de 3** (Según el criterio de estimación de VEI propuesto por Newhall & Self, 1982).

CONCLUSIONES

1. Durante el 2022 y enero 2023, el volcán Sabancaya ha presentado escenarios de actividad moderada y alta, caracterizada por explosiones y/o emisiones continuas de gases, vapor de agua y ceniza, expulsión de material incandescente, balísticos y caída de rocas. La altura más alta alcanzada fue de 3800 m.s.c., registrado en los meses de marzo, mayo y noviembre.
2. Se han identificado tres etapas durante este periodo de análisis (de enero de 2022 a enero de 2023); la primera etapa se caracteriza por el incremento en la sismicidad asociada al ascenso de magma hacia zonas superficiales; la segunda etapa es la formación del domo de lava “Pichqa” y; la tercera etapa el incremento de la actividad explosiva que está asociada a la destrucción parcial del domo de lava.
3. Desde que inició el proceso eruptivo del volcán Sabancaya (noviembre 2016) a la fecha, la evolución anual de la energía sísmica liberada por la sismicidad por fluidos ha presentado una clara tendencia a disminuir.
4. Se continúa observando un proceso de inflación a razón de 3.8 cm/año, relacionado al incremento de volumen en la cámara magmática profunda (ubicado entre 12 y 15 km). Por lo tanto, el proceso eruptivo actual del Sabancaya continuara con la misma tendencia.
5. La ceniza volcánica es el principal peligro volcánico que afecta a las poblaciones asentadas cerca al volcán, es así que se la evidenciado que la mayor afectación por ceniza volcánica sucede hasta los 5 km alrededor del volcán Sabancaya, siendo menos el efecto a una mayor distancia y está condicionada a la dirección y velocidad del viento.
6. Durante el periodo diciembre 2021 a octubre 2022, los anexos Sallali, Ampí, Tarucane, Mocca, Cuñirca y Hornillos fueron cubierta por 0.1 mm de espesor de ceniza al igual que los poblados de Achoma, Lari, Maca, Madrigal, Pinchollo, Ichupampa, Muccurca, Huanca, Yanque, Chivay, Coporaque, Tapay, Cabanaconde, Huambo y Lluta, las que se encuentran en un rango de distancia de entre 5 y 30 km.
7. Según el mapa de peligros múltiples del Sabancaya la zona de alto peligro por ocurrencia de corrientes de densidad piroclástica, flujos de lava viscosos y caída de balísticos se encuentra entre 1 a 4 km de distancia del cráter.
8. El actual proceso eruptivo del volcán Sabancaya es clasificado como tipo Vulcaniano de larga duración, con un **VEI=3**.

RECOMENDACIONES

1. Mantener el nivel de alerta en NARANJA.
2. No acercarse a menos de 5 km de distancia del cráter del volcán, es una zona de muy alto peligro.
3. En caso de ocurrencia de lluvias evitar las quebradas identificadas como susceptibles a la ocurrencia de lahares, ver mapa de peligros por lahares.
4. Informarse permanentemente acerca de la situación actual del volcán Sabancaya a través de los reportes vulcanológicos que emite el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet.
5. Estar atentos ante la emisión de avisos por ocurrencia de peligros volcánicos que emite el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet.



Ing. Rafael Miranda Cruz
C.I.P. 159754



Ing. LIONEL V. FIDEL SMOLL
Director
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
INGEMMET

REFERENCIAS

- Benavente, C., Delgado, G., García, B., Aguirre, E. & Audin, L. (2017) - Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa. INGEMMET, Boletín, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica 64, 370 p., 1 mapa.
- Consejo de Defensa Sudamericano. (2015). ATLAS SURAMERICANO de mapas de riesgo de desastres causados por fenómenos naturales. Dirección Ejecutiva de la Delegación Peruana ante el CDS-UNASUR. 418 p-.
- Coppola, D., Valade, S., Masias, P. et al. Shallow magma convection evidenced by excess degassing and thermal radiation during the dome-forming Sabancaya eruption (2012–2020). *Bull Volcanol.* 84, 16 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01523-1>
- Boixart, G., Cruz, L. F., Miranda Cruz, R., Euillades, P. A., Euillades, L. D., & Battaglia, M. (2020). Source model for Sabancaya volcano constrained by DInSAR and GNSS surface deformation observation. *Remote Sensing*, 12(11), 1852.
- Fierstein, J., Nathenson, M. Another look at the calculation of fallout tephra volumes. *Bull Volcanol* 54, 156–167 (1992). <https://doi.org/10.1007/BF00278005>
- Newhall, Christopher G.; Self, Stephen (1982). The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87(C2), 1231–. doi:10.1029/jc087ic02p01231
- Pyle, D.M. The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits. *Bull Volcanol* 51, 1–15 (1989). <https://doi.org/10.1007/BF01086757>
- Mariño J., Samaniego P., Rivera M., Delgado R. (2012). Mapa de peligros del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya (Arequipa). Congreso peruano de Geología, Lima. 23-26 septiembre 2012.
- Rivera Porras, M. A., Mariño Salazar, J., Samaniego Eguiguren, P., Delgado Ramos, R., & Manrique Llerena, N. (2016). Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya, Arequipa [Boletín C 61].
- Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., Delgado, R., Valderrama, P. (2016). The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 323, p. 110-128.