



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



**IGP**

Instituto  
Geofísico  
del Perú

# **ACTIVIDAD ERUPTIVA RECIENTE DEL VOLCÁN SABANCAYA: DE LA CALMA APARENTE A LA REACTIVACIÓN EXPLOSIVA DE SEPTIEMBRE DE 2025**

Informe Técnico n.º 027-2025/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima-Perú  
Octubre, 2025

# CRÉDITOS

Miguel Ángel Espichán Mariñas  
**Ministro del Ambiente**

Hernando Tavera  
**Jefe institucional del IGP**

Juan Carlos Gómez  
**Director de la Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida del IGP**

Actividad eruptiva reciente del volcán Sabancaya: de la calma aparente a la reactivación explosiva de septiembre de 2025  
**Informe técnico**

Riky Centeno  
Roger Machacca  
Katherine Vargas  
Yovana Alvarez  
Rosa Anccasi  
Yanet Antayhua  
John Cruz  
David Valdivia  
Lady Quispe  
Jhendary Baca  
Ivonne Lazarte  
Marco Rivera

## **Autores**

Hernando Tavera  
Jorge Concha  
**Edición de contenido**

Jorge Concha  
**Diseño y diagramación**

Este informe ha sido elaborado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP)  
Calle Badajoz 169, Mayorazgo, Ate, Lima  
Teléfono: +5113172300

Accede libremente al Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) para descargar este informe:  
<https://repositorio.igp.gob.pe/>



**REGEN**

Lima, octubre de 2025

**Programa Presupuestal 068**  
REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS  
POR DESASTRES

ESTUDIOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

**Actividad**  
Generación de información y monitoreo de peligro volcánico

# ACTIVIDAD ERUPTIVA RECIENTE DEL VOLCÁN SABANCAYA: DE LA CALMA APARENTE A LA REACTIVACIÓN EXPLOSIVA DE SEPTIEMBRE DE 2025



Lima, Perú  
Octubre de 2025

# RESUMEN

Entre septiembre de 2024 y septiembre de 2025, la actividad eruptiva del volcán Sabancaya evidenció una transición, desde una fase de disminución progresiva de la actividad hacia un evento explosivo violento que tuvo lugar el 13 de septiembre de 2025. Durante la mayor parte del periodo de análisis (septiembre de 2024 a julio de 2025), se observó el descenso sostenido de actividad sísmica, el cese de las emisiones de ceniza (a fines de enero de 2025), deformación mínima del edificio volcánico ( $0.2 \pm 0.4$  cm/año), emisiones reducidas de dióxido de azufre (con un promedio de 129 toneladas diarias) y ausencia de anomalías térmicas significativas entre febrero y junio de 2025. Sin embargo, el 13 de septiembre de 2025, el volcán registró la explosión más energética desde el inicio de su actual periodo eruptivo en 2016, con una energía sísmica estimada en 380 Megajoules (MJ) y una columna eruptiva que superó los 5000 metros sobre la cima del volcán. El evento generó flujos piroclásticos incandescentes que descendieron por las laderas hasta una distancia de 700 metros, proyectiles balísticos con alcances de hasta 2.3 kilómetros y una dispersión de ceniza superior a 50 kilómetros, en dirección oeste, sur y sureste. La explosión destruyó parcialmente el domo de lava, originando una cavidad de aproximadamente 105 metros de profundidad. Previo a dicho evento, los parámetros de monitoreo permanecieron estables, con excepción de un ligero incremento en la ocurrencia de sismos de tipo tornillo (44 eventos en agosto de 2025, de los 121 registrados en total durante el último año), lo que ha sido asociado a un proceso de presurización interna previo a la explosión.

Finalmente, el análisis conjunto de todos los datos permite sugerir tres escenarios sobre la evolución futura del volcán Sabancaya: una actividad explosiva moderada acompañada por la formación de un nuevo domo de lava; una fase de relativa estabilidad caracterizada por actividad fumarólica sostenida; o una intensificación de los episodios explosivos, lo que implicaría un incremento significativo del riesgo eruptivo.

# CONTENIDO

<b>5</b>	<b>Resumen</b>
<b>9</b>	<b>Introducción</b>
<b>10</b>	<b>Red de monitoreo multiparamétrico</b>
<b>10</b>	Red sísmica
<b>10</b>	Sistema de monitoreo de deformación GNSS
<b>10</b>	Sistema de monitoreo visual
<b>10</b>	Sistema de monitoreo geoquímico
<b>12</b>	<b>Análisis de parámetros de monitoreo</b>
<b>12</b>	Sismicidad volcánica
<b>16</b>	Deformación del terreno
<b>19</b>	Emisiones de dióxido de azufre
<b>20</b>	Anomalías térmicas satelitales
<b>20</b>	Caracterización de emisiones volcánicas
<b>22</b>	<b>Análisis de la explosión del 13 de septiembre de 2025</b>
<b>22</b>	Caracterización sísmica y energética
<b>22</b>	Altura y dispersión de la columna eruptiva
<b>23</b>	Eyección de bloques balísticos
<b>23</b>	Características del flujo piroclástico
<b>24</b>	Inspección del cráter volcánico
<b>26</b>	<b>Interpretación de los resultados</b>
<b>26</b>	Periodo de actividad explosiva moderada a leve
<b>26</b>	Evento explosivo del 13 de septiembre de 2025
<b>27</b>	Modelo conceptual del drástico incremento de actividad
<b>27</b>	Implicaciones para la evaluación de riesgos

<b>28</b>	<b>Pronóstico y escenarios futuros</b>
<b>28</b>	Estado actual del sistema volcánico
<b>28</b>	Escenarios probables
<b>30</b>	<b>Conclusiones</b>
<b>31</b>	<b>Recomendaciones</b>
<b>32</b>	<b>Referencias</b>





Foto IGP 

Imagen del cráter del volcán Sabancaya, tomada mediante sobrevuelo de dron en octubre de 2025.



# 1. Introducción .....●

El volcán Sabancaya ( $15^{\circ}47'S$ ,  $71^{\circ}51'O$ ; 5960 m s. n. m.) se ubica en la provincia de Caylloma, región Arequipa, aproximadamente a 70 km al noroeste de la ciudad de Arequipa y a menos de 20 km al sur del valle del Colca. Es considerado el segundo volcán más activo del sur del Perú y forma parte del complejo volcánico Ampato-Sabancaya, situado en la Zona Volcánica Central de los Andes, donde la corteza continental alcanza un espesor excepcional de 65–70 km (Beck et al., 1996).

La actividad eruptiva actual del Sabancaya comenzó en noviembre de 2016, caracterizándose por explosiones de tipo vulcaniana y episodios intermitentes de extrusión de domos de lava (Machacca et al., 2023). Los principales peligros asociados incluyen la caída de ceniza, los flujos piroclásticos, los lahares y las emisiones de gases volcánicos. Las cenizas han afectado áreas ubicadas hasta 30 km a la redonda, impactando la salud pública, así como a la agricultura y ganadería locales (Del Carpio et al., 2022).

Entre agosto de 2023 y agosto de 2024, la actividad explosiva fue moderada y sostenida, acompañada por fluctuaciones en los parámetros geofísicos monitoreados, incluyendo episodios de temblor volcánico y un acelerado crecimiento del domo de lava en el cráter (Centeno et al., 2024). Durante ese mismo periodo, se registraron enjambres de sismos de tipo volcano-tectónico distales, especialmente a partir de mayo de 2023.

A partir de septiembre de 2024, se evidenció una reducción progresiva y sostenida en todos los parámetros de monitoreo: la actividad explosiva disminuyó, las emisiones de ceniza cesaron a fines de enero de 2025, y la deformación volcánica alcanzó niveles mínimos. Durante gran parte de 2025, la actividad fue baja, con columnas de gases y cenizas que no superaron los 3000 m sobre la cima del volcán, lo que sugería una posible transición hacia una fase de reposo, en contraste con la actividad sostenida desde 2016.

Sin embargo, el 13 de septiembre de 2025, tras varios meses de relativa calma, el volcán Sabancaya registró una explosión energética significativa, la mayor desde 2016, con una columna eruptiva que superó los 5000 m de altura sobre la cima del volcán, con flujos piroclásticos incandescentes, proyectiles balísticos con alcance de hasta 2.3 km y dispersión de ceniza a más de

50 km. Este evento motivó la elevación del nivel de alerta volcánica de amarillo a naranja.

El presente informe ofrece un análisis detallado de la evolución eruptiva del volcán durante el periodo septiembre de 2024-septiembre de 2025, abarcando tanto la fase de transición hacia la calma aparente como la ocurrencia del evento explosivo. El monitoreo continuo de los parámetros sísmicos, geodésicos y geoquímicos resulta fundamental para comprender la dinámica interna del sistema magmático, identificar precursores de incremento de actividad y fortalecer la gestión del riesgo volcánico en el sur del Perú. Asimismo, la integración multiparamétrica de los datos de monitoreo permite una evaluación más completa de la evolución eruptiva, mejorando la capacidad predictiva y favoreciendo una comunicación efectiva con las autoridades y las comunidades locales.

## 2. Red de monitoreo multiparamétrico .....

La red de monitoreo multiparamétrico del volcán Sabancaya está compuesta por 11 estaciones geofísicas que proporcionan cobertura completa del área volcánica y sus alrededores (Figura 1). Esta infraestructura permite el monitoreo continuo y en tiempo real del comportamiento dinámico del volcán.

### 2.1 Red sísmica

La red sísmica del volcán Sabancaya está integrada por seis estaciones distribuidas estratégicamente en su entorno: cinco de banda ancha (sensibles en el rango de 30 a 120 segundos) y una de periodo corto (1 segundo). Las estaciones que integran la red son SAB1 (Sabancaya, periodo corto), ubicada aproximadamente a 3 km al sur del cráter; HLCA (Hualca Hualca), a 6 km al norte; MRCA (Muccurca), a 9 km al noroeste; CAJA (Cajamarcana), a 11 km al sureste; PATA (Patapampa), a 21 km al noreste; y CHVY (Chivay), situada a 41 km al noreste del volcán (Figura 1).

La estación SAB1, por su proximidad al cráter, constituye el punto de observación más sensible y proporciona información clave para la identificación y clasificación detallada de los diferentes tipos de eventos sísmicos asociados a la actividad volcánica.

### 2.2 Sistema de monitoreo de deformación GNSS

El monitoreo de la deformación del edificio volcánico se realiza mediante dos estaciones GNSS permanentes (Sistema Global de Navegación por Satélite). La estación HLCA se encuentra ubicada en la principal zona de deformación (inflación), previamente identificada por Boixart et al. (2020) y MacQueen et al. (2020), mientras que la estación SAB1 permite un seguimiento directo de posibles cambios en el flanco sur del volcán Sabancaya (Figura 1). Ambas emplean receptores Trimble de última generación (modelos NETR9 y Alloy), que registran variaciones milimétricas en la posición de los puntos de control.

Como complemento, durante campañas de campo se realiza la medición de nueve puntos de control GNSS temporales, lo que refuerza la red y proporciona una imagen más completa de la dinámica de deformación superficial en el entorno volcánico. Este sistema combinado permite caracterizar la evolución de procesos inflacionarios o deflacionarios relacionados con el ascenso de magma y evaluar de manera precisa los cambios en la estructura del Sabancaya.

### 2.3 Sistema de monitoreo visual

El volcán Sabancaya cuenta con un sistema de videovigilancia compuesto por cuatro cámaras que envían imágenes en tiempo casi real a los servidores del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL). Estas cámaras están instaladas en ubicaciones estratégicas para asegurar cobertura visual desde distintos flancos del volcán (Figura 1): CAJA, SBYA, HLCA y HUAY, siendo esta última situada en la quebrada de Huayuray para monitorear lahares. Los modelos instalados (CC5MPX, CCFC y Axis Q1798-LE) ofrecen alta resolución y transmisión estable, tanto de día como de noche, lo que permite seguir de forma continua y detallada la actividad superficial y posibles peligros asociados.

### 2.4 Sistema de monitoreo geoquímico

#### 2.4.1 Espectrómetros DOAS

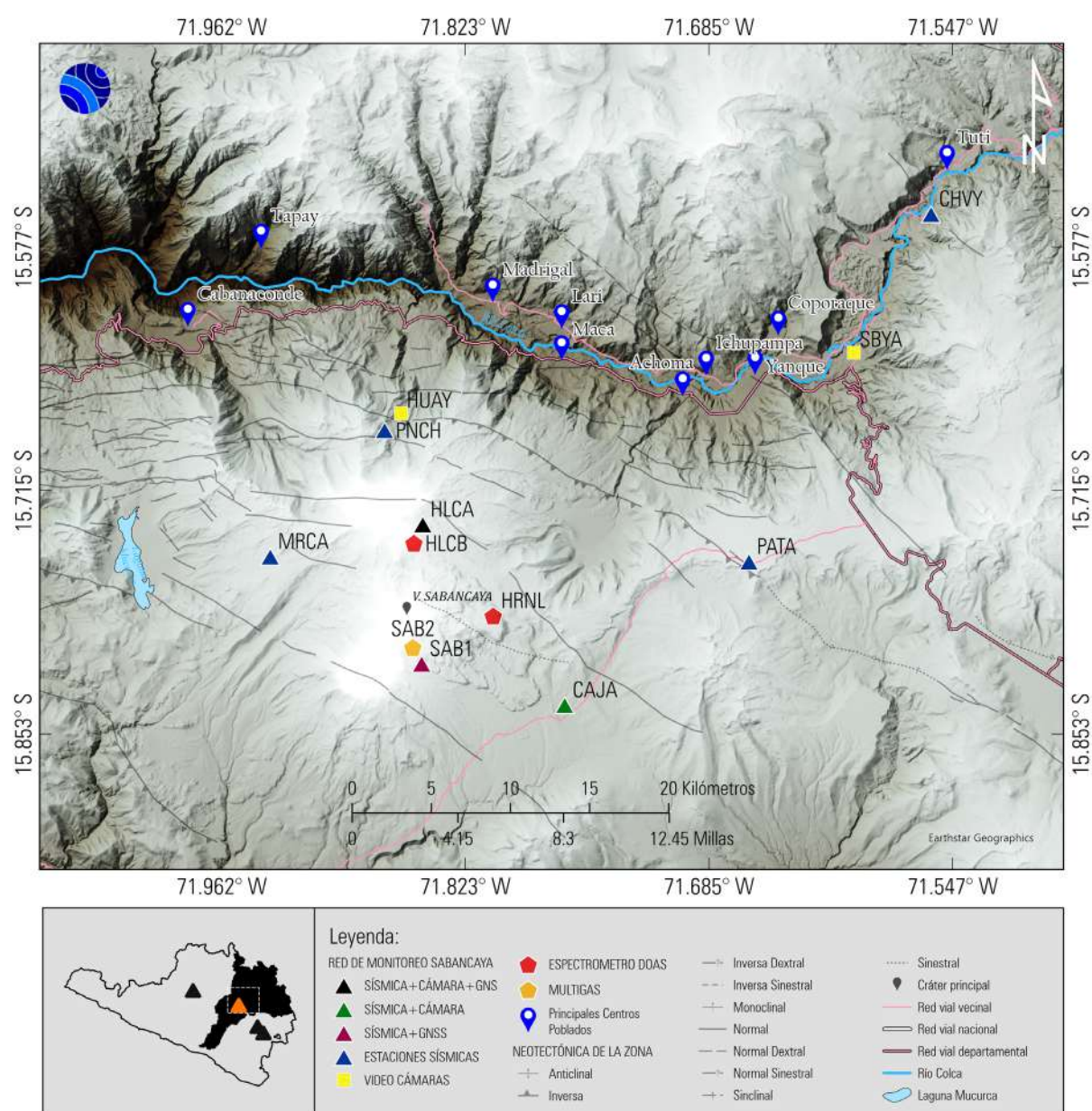
El sistema de monitoreo geoquímico del volcán Sabancaya cuenta con dos estaciones DOAS (Espectroscopía de Absorción Óptica Diferencial) que permiten medir la cantidad de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) presente en las plumas volcánicas. Estas estaciones están ubicadas cerca del volcán, una en la zona de Hualca Hualca (HLCA) y otra en el sector de Hornillos (HRNL) (Figura 1).

El equipo utilizado incluye espectrómetros Ocean Insight USB2000, con sensores Sony ILX511A, capaces de captar una amplia gama de longitudes de onda (240-400 nm) con alta resolución ( $\sim 0.65$  nm). El barrido del cielo se realiza mediante un espejo montado en un motor de pasos controlado por el software SpecScan, lo que permite escanear continuamente la pluma volcánica para medir las emisiones de  $\text{SO}_2$  de forma remota y automatizada.

## 2.4.2 Sistema MultiGAS

Asimismo, se cuenta con un equipo portátil denominado MultiGAS, ubicado en el flanco sur (SAB2, Figura 1), que mide en tiempo real las concentraciones de varios gases volcánicos importantes, como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), además de algunas condiciones ambientales.

Este sistema funciona aspirando continuamente aire del entorno y analizando su composición mediante sensores infrarrojos y electroquímicos calibrados, conectados a un registrador de datos que toma mediciones cada segundo. El equipo tiene una alta precisión, puede detectar variaciones pequeñas de  $\pm 2$  partes por millón (ppm) para  $\text{CO}_2$ ,  $\pm 1$  ppm para  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , y mide la temperatura con una precisión de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .



**Figura 1.** Mapa de ubicación de la red de monitoreo multiparamétrico del volcán Sabancaya. Se muestran las estaciones sísmicas con cámara y GNSS (triángulo negro), estaciones sísmicas con cámara (triángulos verdes), estaciones sísmicas con GNSS (triángulo violeta), estaciones sísmicas (triángulos azules), videocámaras (cuadrados amarillos), espectrómetros DOAS (pentágonos rojos), multiGAS (pentágono naranja) y los principales centros poblados (marcadores azules). La leyenda incluye elementos neotectónicos de la zona y la red vial. El recuadro inferior izquierdo muestra la ubicación de la provincia de Caylloma en el contexto regional de Arequipa.



### 3. Análisis de parámetros de monitoreo .....

En esta sección se presenta un análisis detallado de los datos del monitoreo multiparamétrico del volcán, que incluye sismicidad, deformación de la superficie, flujos de gas SO<sub>2</sub>, anomalías térmicas, caracterización de emisiones volcánicas y evaluación geológica *in situ*, correspondientes al periodo de septiembre de 2024 a septiembre de 2025.

#### 3.1 Sismicidad volcánica

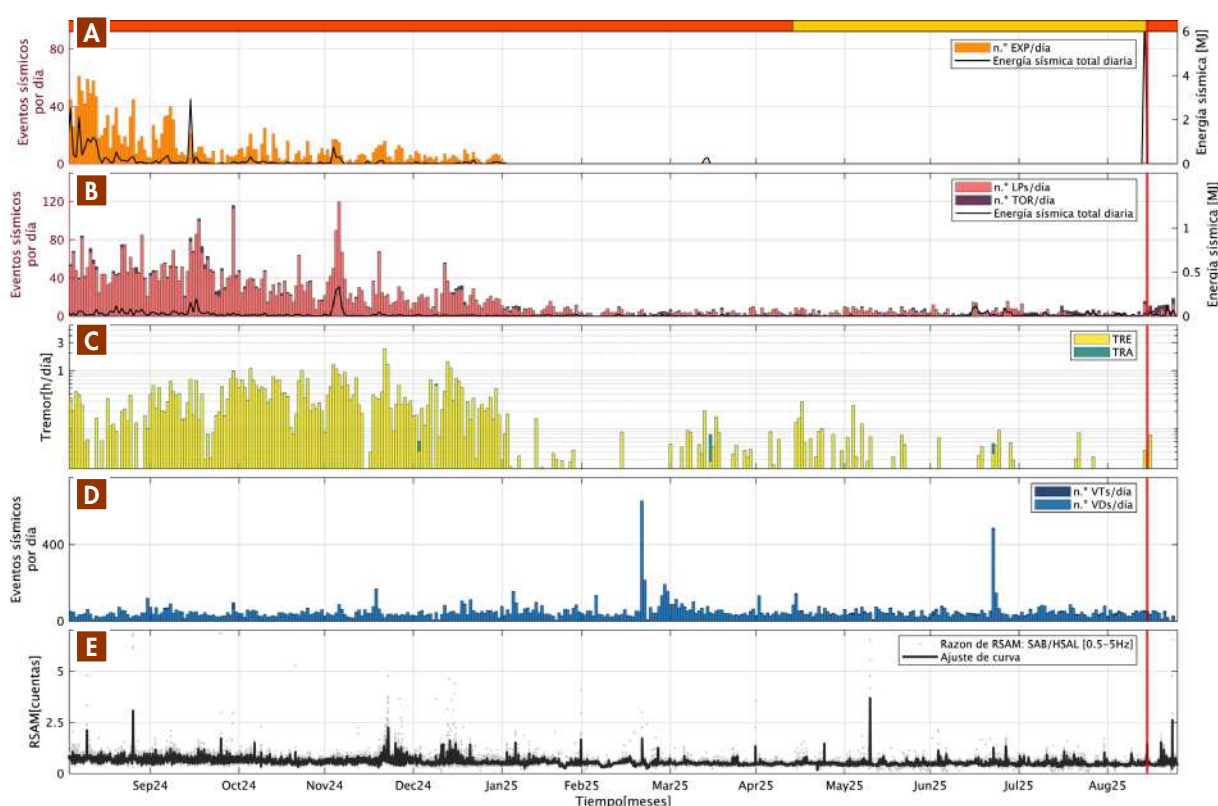
##### 3.1.1 Evolución temporal

La actividad sísmica del volcán Sabancaya mostró

una disminución progresiva y constante en todos los tipos de eventos desde septiembre de 2024 (Figura 2). Entre septiembre y diciembre de 2024, la actividad fue moderada, con una reducción gradual en la frecuencia y energía de los sismos. Las explosiones, que habían sido una constante desde 2016, disminuyeron notablemente, tanto en cantidad diaria como en energía liberada (Figura 2a).

Desde enero de 2025, todos los parámetros sísmicos disminuyeron significativamente. Los eventos de largo periodo (LP) y tornillo (TOR), relacionados con el movimiento de fluidos magmáticos, alcanzaron sus niveles más bajos en los primeros meses de 2025 (Figura 2b). La actividad de tremor, tanto espasmódico (TRE) como armónico (TRA), disminuyó drásticamente desde febrero y se mantuvo casi ausente durante el resto del año (Figura 2c).

Destaca el cese de las explosiones a finales de enero de 2025. La última emisión significativa de ceniza ocurrió el 14 de abril de 2025, lo que refleja un cambio importante en la dinámica eruptiva después de casi nueve años de actividad explosiva continua



**Figura 2.** Evolución temporal de la sismicidad del volcán Sabancaya de septiembre de 2024 a septiembre de 2025. a) Número diario de explosiones (barras naranjas) y energía sísmica total diaria (línea negra) en MJ. b) Eventos de largo periodo LP (barras rojas claras) y tornillo TOR (barras rojas oscuras) con energía sísmica total diaria (línea negra). c) Duración diaria de tremor espasmódico TRE (amarillo) y tremor armónico TRA (verde) en horas. d) Número diario de eventos volcano-tectónico distales VDs. e) Razón de RSAM entre las estaciones SAB/HSAL, filtrada en la banda de 0.5-5 Hz (puntos grises) y ajuste de curva (línea negra).

Los eventos volcano-tectónico distales (VDs) se presentaron en forma de enjambres esporádicos, con episodios relevantes en marzo y julio de 2025 (Figura 2d). Estos eventos, ubicados principalmente al norte y noreste del volcán, hasta 30 km del cráter, señalan redistribuciones de esfuerzos en el sistema volcánico-tectónico regional.

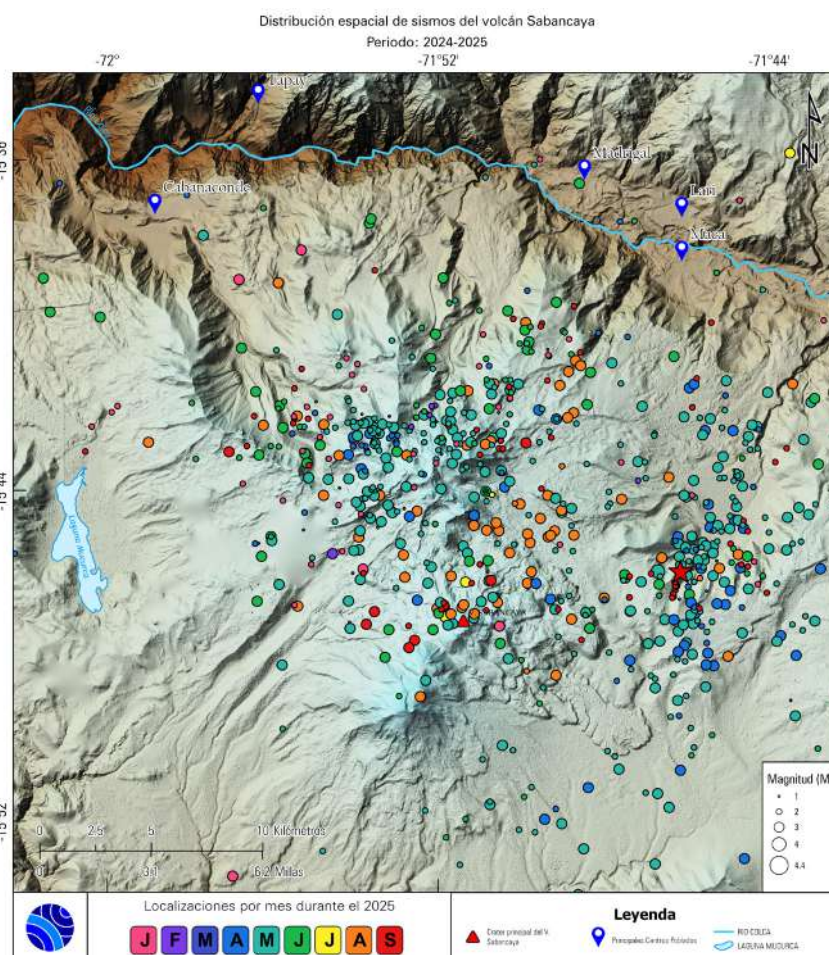
La curva RSAM, derivada de las estaciones SAB1 y HSAL, confirma esta tendencia a la baja con mínimos prolongados en 2025 (Figura 2e), lo que evidencia una reducción generalizada de la amplitud sísmica y la actividad volcánica.

No obstante, en agosto de 2025, hubo un incremento en la sismicidad de tipo tornillo, con un promedio diario de 7 eventos y una duración total de 12 minutos por día. De los 121 eventos tornillo registrados hasta septiembre de 2025, 44 ocurrieron en agosto, lo que representa el 36 %

del total anual, siendo el mes con mayor actividad de este tipo. Este aumento pudo ser un precursor de la reactivación explosiva ocurrida el 13 de septiembre (Figura 2b).

### 3.1.2 Distribución espacial de la sismicidad

El mapa de sismicidad del volcán Sabancaya para el año 2025 (Figura 3) muestra una actividad sísmica persistente en las inmediaciones del volcán, con variaciones en el tiempo y el espacio que se representan por colores según el mes. Entre enero y marzo de 2025 (colores rosa, morado y azul), los sismos estuvieron dispersos en un radio de 15 km alrededor del cráter, con el predominio de eventos superficiales a moderadamente profundos con magnitudes menores a M3.0.



**Figura 3.** Distribución espacial de la sismicidad en los alrededores del volcán Sabancaya durante el periodo enero-septiembre de 2025. Los círculos de colores representan la localización de los sismos según el mes de ocurrencia durante el año 2025: enero (J, rosa), febrero (F, morado), marzo (M, azul), abril (A, celeste), mayo (M, verde), junio (J, verde claro), julio (J, amarillo), agosto (A, naranja) y septiembre (S, rojo). El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud del evento sísmico (M1.0 a M4.4). La estrella roja indica el sismo más significativo del periodo (M4.4) ocurrido el 20 de marzo de 2025 al sur de Maca. El triángulo rojo señala la ubicación del cráter principal del volcán Sabancaya.



El evento sísmico más significativo ocurrió el 20 de marzo de 2025, a las 20:04, hora local (marcado con estrella roja en la Figura 3), ubicado a 14 km de profundidad al sur de Maca, con magnitud M4.4 e intensidad V en la escala Mercalli Modificada, siendo el mayor registrado en 2025.

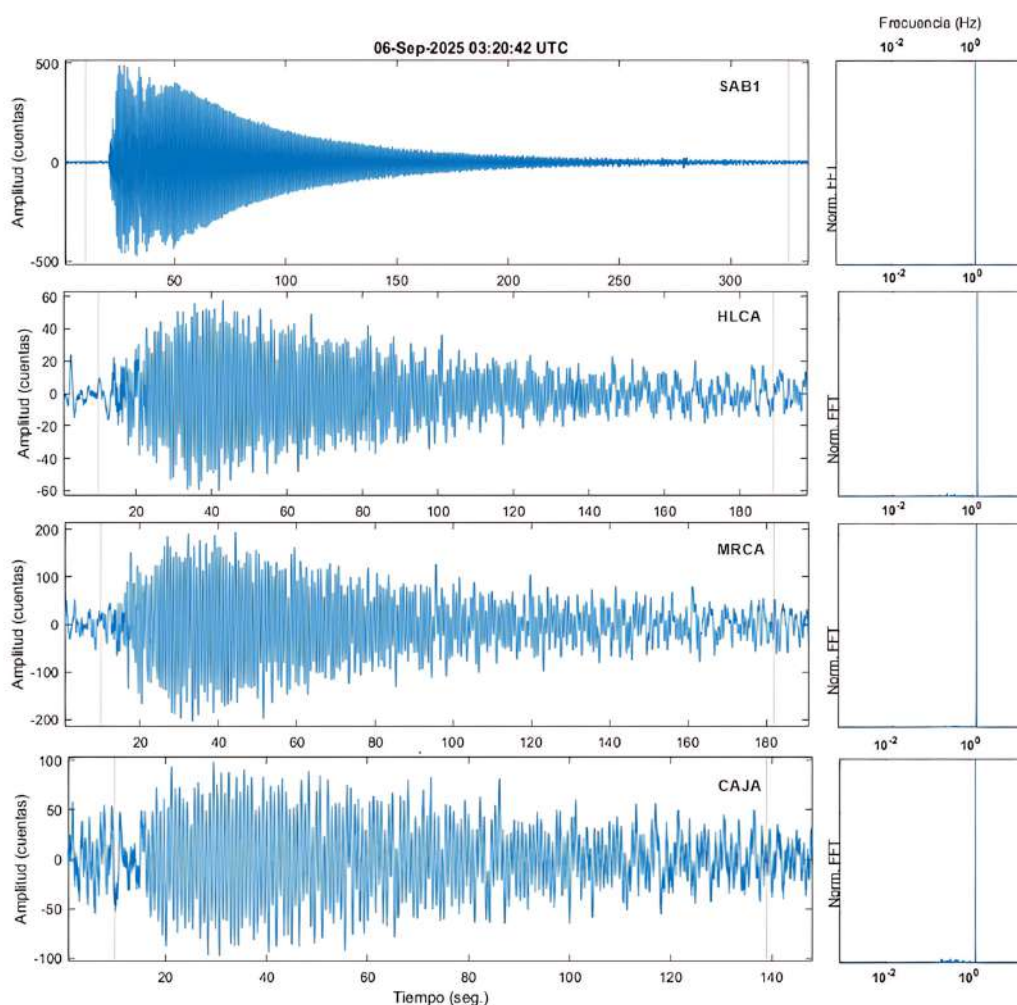
Entre abril y mayo (colores celeste y verde), se observó una concentración de enjambres sísmicos en los sectores norte y noreste del volcán, probablemente asociados a redistribuciones de esfuerzos y cambios en la presurización magmática en niveles más profundos. Durante junio-agosto (tonos verde, amarillo y naranja), se redujo el número total de eventos, aunque con una dispersión sostenida, y en agosto se detectó un aumento en la concentración sísmica en el flanco norte, lo cual coincidió con el incremento de sismos de tipo tornillo.

En septiembre (color rojo), previo a la explosión del 13 de septiembre, se registraron múltiples

eventos de tipo volcano-tectónico, principalmente en la zona próxima al cráter. La distribución espacial y temporal de la sismicidad evidenció una dinámica compleja con actividades distales y cercanas, sin patrones claros de progresión antes de la reactivación explosiva.

### 3.1.3 Sismicidad de tipo tornillo

Este tipo de eventos están asociados a una excitación impulsiva que genera una resonancia dentro del conducto volcánico, cuya naturaleza depende de la ubicación de la presión transitoria y de las condiciones de contorno de la grieta (Alpala et al., 2018). Estos sismos se han observado con mayor claridad en la estación SAB1. Se distinguen por presentar una frecuencia dominante entre 0.9 Hz y 1.7 Hz. Cabe destacar que la frecuencia de estos eventos no ha variado en el resto de las estaciones (Figura 4).



**Figura 4.** Evento de tipo Tornillo registrado en las estaciones SAB1, HLCA, MRCA y CAJA, a las 03:20 UTC del 6 de septiembre de 2024, en el volcán Sabancaya. Derecha: forma de onda; izquierda: espectro de frecuencias.

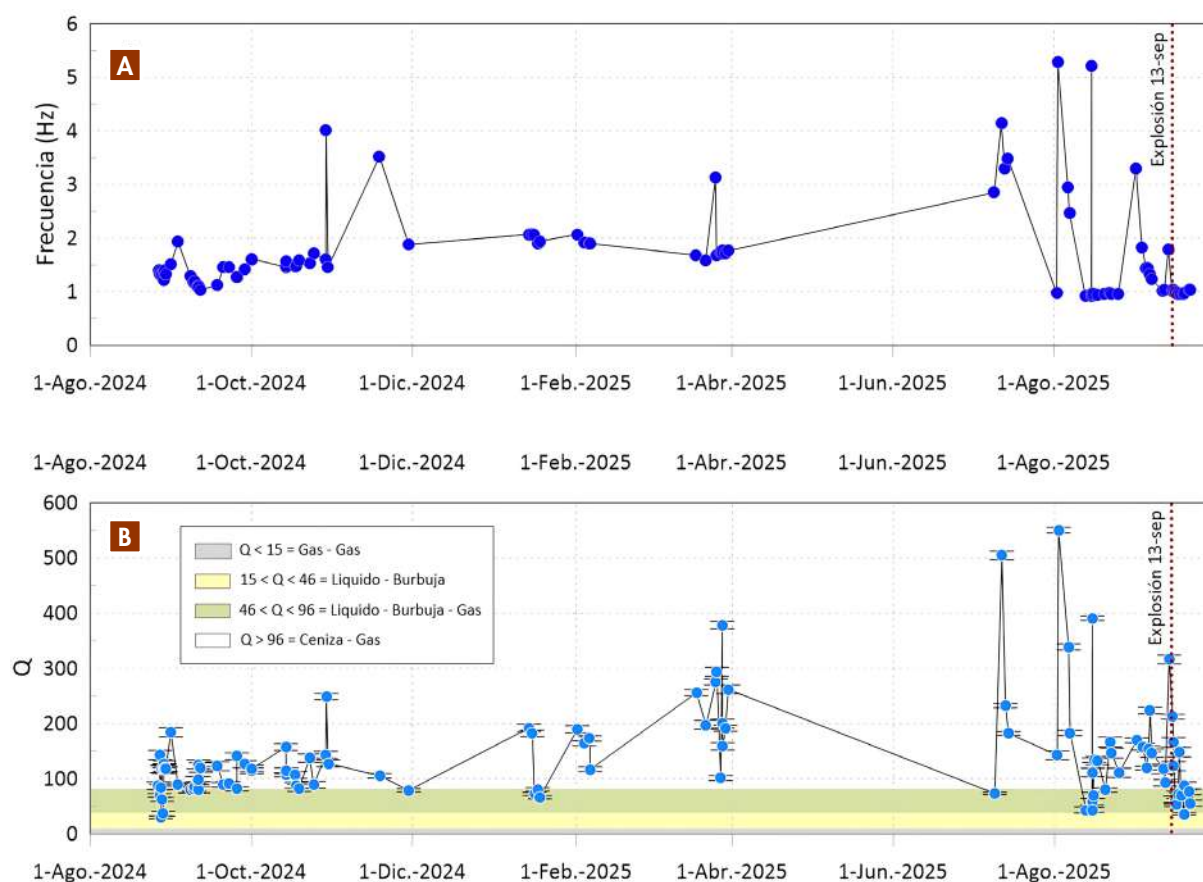
Para la caracterización de este tipo de evento se empleó el procedimiento de análisis espectral denominado "Sompi" (Kumazawa et al., 1990), mediante el cual se estima el factor de calidad ( $Q_r$ ) del resonador y la frecuencia compleja ( $F_c$ ). La evolución temporal de estos dos parámetros permite identificar cambios e interpretar la fuente que los origina.

La Figura 5 muestra la evolución temporal de la frecuencia ( $f$ ) y el factor de calidad ( $Q$ ) entre agosto de 2024 y septiembre de 2025, distinguiéndose tres periodos bien diferenciados:

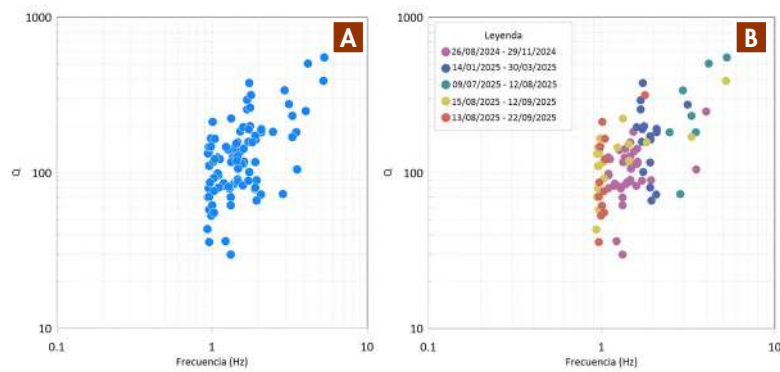
- El primer periodo (agosto-septiembre de 2024) se caracterizó por valores bajos en la frecuencia ( $f < 2$  Hz) y el factor de calidad ( $Q < 200$ ).
- El segundo periodo inició el 29 de septiembre de 2024, con un incremento significativo que se extendió hasta mediados de agosto de 2025. La frecuencia estimada alcanzó valores máximos de 5.2 Hz, mientras que el factor de calidad osciló entre 60 y 550.

- En el tercer periodo (posterior al 15 de agosto de 2025), ambos parámetros mostraron una notable disminución, registrándose frecuencias alrededor de 1 Hz y valores de  $Q$  con un promedio de 120.

En la Figura 6 se representa la evolución del factor de calidad ( $Q$ ) en función de la frecuencia ( $f$ ). En la Figura 6a se identifican dos grupos de eventos diferenciados por su frecuencia y factor de calidad ( $Q$ ). Los eventos de menor frecuencia (0.93-2.0 Hz) presentan valores de  $Q$  entre 29 y 378, mientras que los de mayor frecuencia (2.47-5.2 Hz) muestran valores de  $Q$  moderadamente superiores, en el rango de 73 a 550. Por otro lado, en la Figura 6b se observa una relativa migración de los valores de  $f$  y  $Q$  en el tiempo. De agosto de 2024 a marzo de 2025, y de agosto a septiembre de 2025, se evidencia una disminución de los valores de  $Q$  y  $f$ , lo cual puede ser indicativo de cambios en la dimensión de la fuente o variación en el fluido que genera la resonancia.



**Figura 5.** Variación temporal de (a)  $f$  y (b)  $Q$  en eventos de tipo tornillo en el volcán Sabancaya, durante el periodo agosto de 2024 y septiembre de 2025.



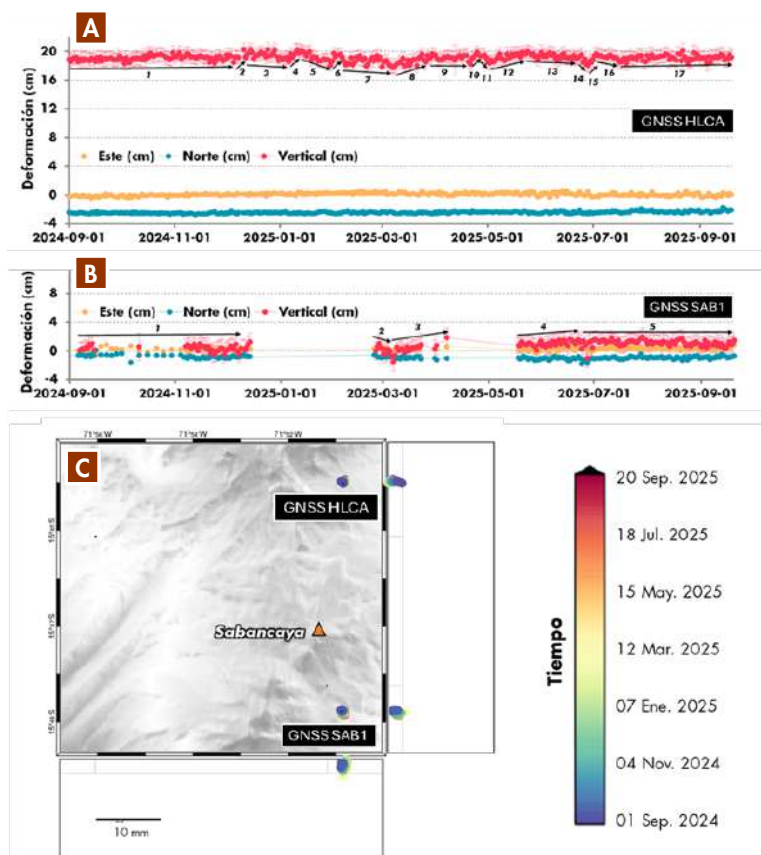
**Figura 6.** a) Relación de  $f$  vs.  $Q$  en sismos de tipo tornillo detectados en el volcán Sabancaya. Ambos ejes están graficados en escala logarítmica. b) Variación temporal de la relación  $F_c$  vs.  $Q_r$ . Nótese los diferentes grupos de eventos sísmicos de tipo tornillo.

## 3.2 Deformación del terreno

### 3.2.1 Datos GNSS

Durante el periodo de estudio, la estación GNSS HLCA registró variaciones mínimas en la deformación del edificio volcánico, con una tasa de inflación vertical de  $0.2 \pm 0.4$  cm/año. Este

valor contrasta con las tasas sostenidas registradas en años previos, en los que se alcanzaron hasta 3–5 cm/año (Vargas et al., 2023), así como con la disminución a 1.5 cm/año observada entre agosto de 2023 y agosto de 2024 (Centeno et al., 2024). Los desplazamientos horizontales también fueron reducidos, evidenciándose movimientos próximos a  $0.3 \pm 0.1$  cm/año hacia el este y  $0.1 \pm 0.1$  cm/año hacia el norte (Figura 7a).



**Figura 7.** a) Series de tiempo de deformación registradas en las estaciones GNSS HLCA y b) SAB1, para las componentes este (puntos amarillos), norte (puntos celestes) y vertical (puntos rojos) registradas entre septiembre de 2024 y septiembre de 2025. Las flechas indican periodos de incremento o disminución de la deformación en la componente vertical. b) Mapa del desplazamiento relativo de ambas estaciones GNSS a lo largo del tiempo, generado en sistema web WebObs (<https://ipgp.github.io/webobs/>).



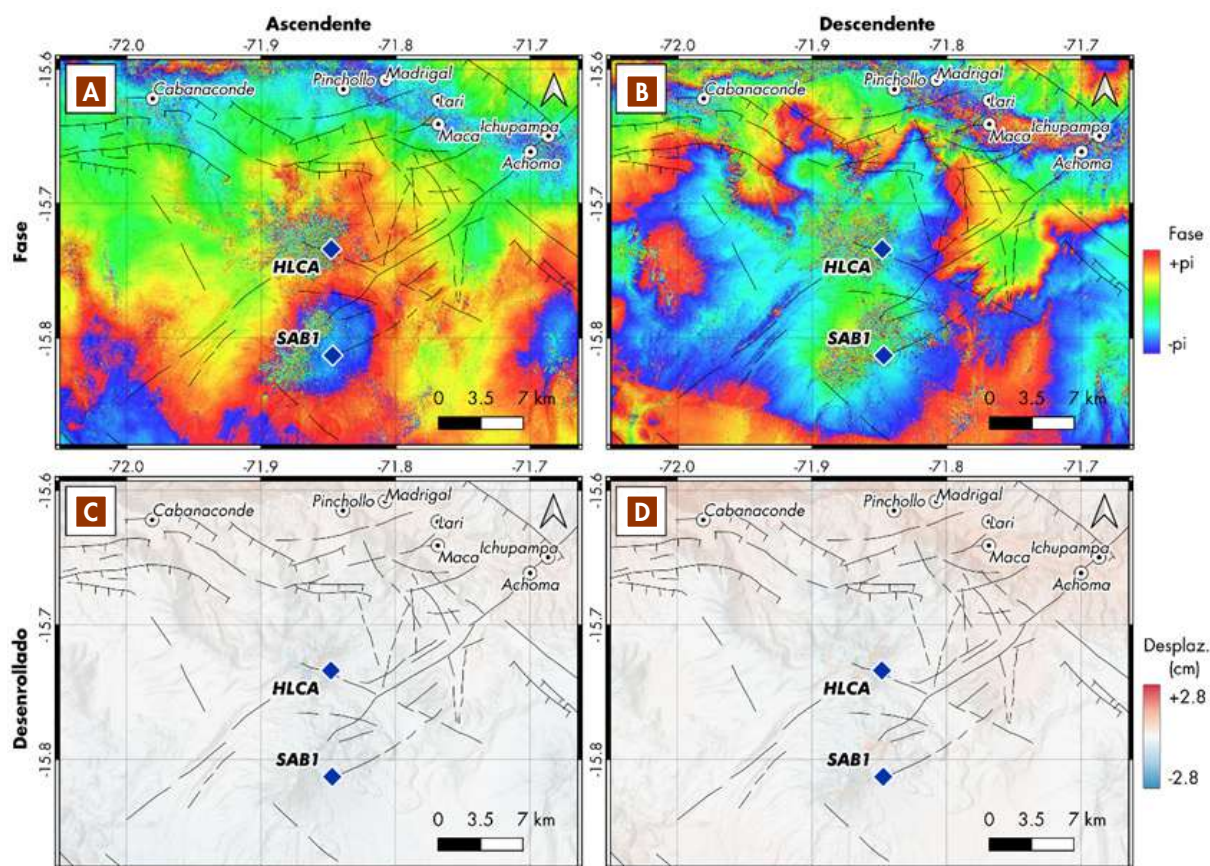
Por su parte, la estación SAB1 mostró desplazamientos verticales igualmente marginales ( $0.1 \pm 0.5$  cm/año) y componentes horizontales de  $0.2 \pm 0.2$  cm/año hacia el este y  $0.2 \pm 0.2$  cm/año hacia el sur (Figura 7b). El análisis del desplazamiento relativo entre HLCA y SAB1 confirma que los cambios tanto verticales como horizontales fueron, en términos generales, muy reducidos (Figura 7c).

Entre septiembre de 2024 y la primera quincena de enero de 2025, se observó un comportamiento estable de la deformación, con episodios breves de inflación indicados en las flechas 1 a 4 en la Figura 7a y la flecha 1 en la Figura 7b. Entre febrero y abril de 2025, se registró un ligero hundimiento que, posteriormente, retomó la tendencia inicial (flechas 5 a 11 en Figura 7a y 2 y 3 en Figura 7b). Finalmente, en mayo de 2025 se presentó un episodio más prolongado de inflación (flecha 12 en Figura 7a), seguido por variaciones menores alternadas de hundimiento e inflación que no modificaron significativamente la tendencia general (flechas 13 a 17 en Figura 7a y, 4 y 5 en Figura 7b).

### 3.2.2 Interferometría diferencial (DInSAR)

Analizando los interferogramas obtenidos de la órbita ascendente (9 de septiembre de 2024-16 de septiembre de 2025) y descendente (8 de septiembre de 2024-21 de septiembre de 2025) (Figuras 8a y b), se observan variaciones mínimas de desplazamiento en el entorno del volcán Sabancaya. A diferencia de años anteriores, la anomalía de deformación previamente detectada, asociada a una cámara magmática profunda ubicada a unos 13 km de profundidad al norte del edificio volcánico, ya no es evidente. En su lugar, únicamente se observan franjas concéntricas vinculadas principalmente con la topografía del terreno y no con desplazamientos significativos de la superficie.

El desenrollado de la fase interferométrica (Figuras 8c y d) confirma esta observación, mostrando que los desplazamientos en la zona son mínimos y se encuentran dentro del rango de ruido esperado para este tipo de mediciones. Esta interpretación



**Figura 8.** a) Interferograma en órbita ascendente de la zona del volcán Sabancaya, generado a partir de imágenes adquiridas el 9 de septiembre de 2024 y el 16 de septiembre de 2025. b) Interferograma en órbita descendente obtenido con imágenes de radar del 8 de septiembre de 2024 y el 21 de septiembre de 2025. c) y d) Desenrollado de los interferogramas a) y b), respectivamente, para expresar el desplazamiento. Los rombos azules indican la ubicación de las estaciones GNSS.

es consistente con los registros de las estaciones GNSS HLCA y SAB1, que muestran movimientos verticales inferiores a 0.2 cm/año. En conjunto, los resultados sugieren una aparente estabilidad del sistema volcánico durante el periodo analizado, sin indicios de un incremento significativo de presión en el reservorio magmático profundo.

### 3.2.3 Análisis de imágenes de radar TerraSAR-X

El análisis de la intensidad de imágenes de radar permite identificar cambios en la morfología del

cráter del volcán Sabancaya, ya que la emisión de pulsos electromagnéticos del radar tiene la capacidad de penetrar nubes y columnas eruptivas. Las imágenes de alta resolución TerraSAR-X utilizadas en este estudio fueron proporcionadas por el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) en el marco del proyecto «CEOS Volcano Demonstrator».

A partir de la metodología propuesta por Coppola et al. (2022), durante el periodo noviembre de 2024 a septiembre de 2025, se estimaron variaciones en la profundidad del cráter del volcán Sabancaya mediante el análisis de la silueta de las sombras en dichas imágenes (Figura 9). En este

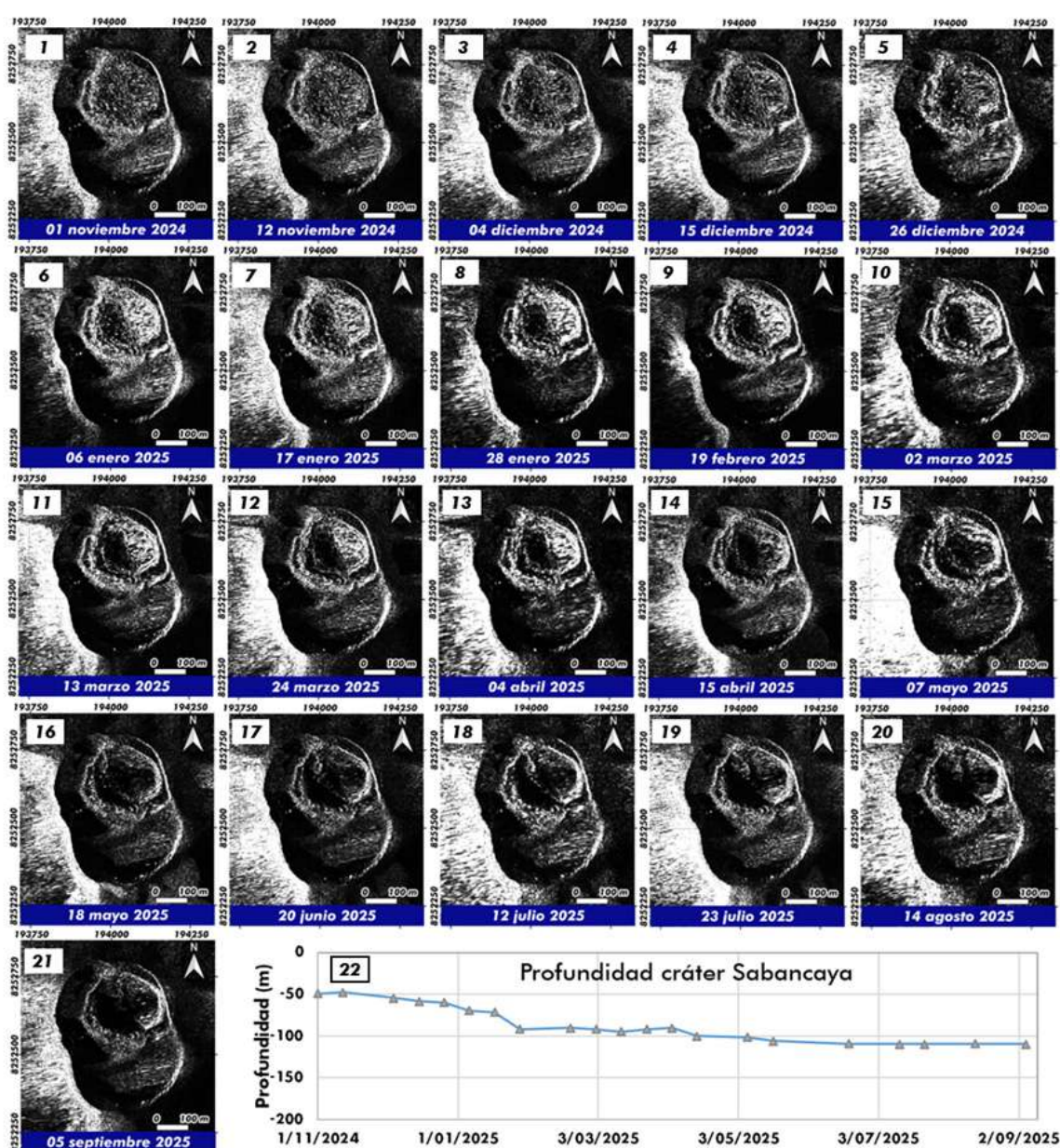


Figura 9. Secuencia de imágenes de radar TerraSAR-X de noviembre de 2024 a septiembre de 2025.



caso, la profundidad corresponde a la distancia entre el borde superior del cráter y la superficie del domo de lava en su interior. Este valor se expresa como negativo porque se mide en relación con el borde más alto del cráter, considerado como el nivel de referencia (cota cero).

En julio de 2024, la profundidad del cráter se estimaba en  $-52$  m con respecto a su borde superior (Centeno et al., 2024). Para noviembre de 2024, la profundidad se mantenía en aproximadamente  $-47$  m, con el domo ocupando un área cercana a  $54\,000\text{ m}^2$  (Figura 9, escenas 1 y 2).

En diciembre de 2024 se registró un hundimiento del domo de alrededor de  $10$  m (Figura 9, escenas 3 a 5). Este proceso continuó y se intensificó entre el 6 de enero y el 4 de abril de 2025, cuando apareció una cicatriz en forma de depresión central, indicativa de la destrucción parcial del domo. En esta etapa, se conservaron aún las paredes laterales, alcanzándose una profundidad promedio de  $-90$  m (Figura 9, escenas 6 a 13).

Entre el 15 de abril y el 5 de septiembre de 2025, la cavidad en el interior del domo se hizo aún más evidente, dejando únicamente una delgada estructura en las paredes del borde. En este periodo, la profundidad alcanzó valores entre  $-100$  m y  $-110$  m (Figura 9, escenas 14 a 21).

### 3.3 Emisiones de dióxido de azufre

Durante el periodo de estudio, se monitoreo la masa promedio del gas  $\text{SO}_2$  emitido por el volcán Sabancaya mediante dos fuentes complementarias: datos satelitales del sistema MOUNTS (MONitoring UNresT from Space; Valade et al., 2019) y mediciones *in situ* con dos espectrómetros DOAS (Espectroscopía de Absorción Óptica Diferencial) que transmiten datos por telemetría (Figura 1).

#### 3.3.1 Datos satelitales

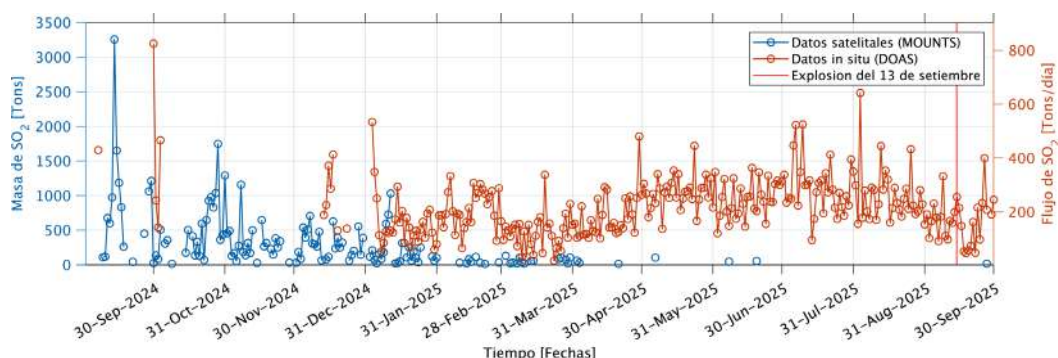
Durante el periodo de análisis, la masa promedio de emisiones de  $\text{SO}_2$  del volcán Sabancaya fue de  $156$  toneladas diarias, lo que representa una disminución notable respecto a años previos (Figura 10). En 2024, se registraron episodios destacados de desgasificación, con picos máximos entre septiembre y noviembre, con valores diarios que superaron las  $3000$  toneladas en fechas específicas (7, 8, 9, 23 y 24 de septiembre). En octubre y noviembre también se registraron emisiones significativas, aunque de menor magnitud.

En 2025, la desgasificación continuó en descenso, tanto en frecuencia como en magnitud, con el pico máximo del año el 11 de enero, con  $1032$  toneladas. Le siguieron eventos moderados el 3 y 9 de enero, 6 y 9 de julio, y 3 de agosto, con emisiones entre  $500$  y  $650$  toneladas diarias. Este comportamiento indica una tendencia a la reducción sostenida de emisiones de  $\text{SO}_2$ , correspondiente a una disminución en la actividad volcánica.

#### 3.3.2 Datos DOAS

Los registros obtenidos con espectrómetros DOAS corroboran el patrón observado en datos satelitales (Figura 10). Durante 2024, especialmente entre septiembre y noviembre, se registraron episodios de intensa desgasificación de gases magmáticos profundos, caracterizados por pulsos de alta frecuencia y magnitud, propios de una fase de actividad volcánica moderada con liberación significativa de volúmenes gaseosos en intervalos cortos.

En contraste, en 2025 los datos DOAS evidencian



**Figura 10.** Flujos de gas dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) para el periodo septiembre de 2024 a septiembre de 2025 (Fuente: sistema "MOUNTS", datos DOAS).

una reducción clara en la magnitud y frecuencia de los eventos de desgasificación. Esta disminución indica un menor aporte de gases magmáticos a niveles superficiales, coincidiendo con una relativa estabilidad del sistema volcánico.

Esta evolución en las emisiones de  $\text{SO}_2$  es coherente con la disminución general de actividad eruptiva observada con otros parámetros de monitoreo. No obstante, la persistencia de flujos moderados en 2025 sugiere que el sistema magmático permanecía activo, aunque en una fase de menor intensidad.

### 3.4 Anomalías térmicas satelitales

Las anomalías térmicas detectadas en el volcán Sabancaya mediante sistemas satelitales, específicamente con los sensores MIROVA (MODIS y VIIRS) y FIRMS (Sistema de Información sobre Incendios de la NASA), evidencian una variabilidad significativa en intensidad y frecuencia a lo largo del periodo analizado (Figura 11). La potencia de radiación térmica (FRP, por sus siglas en inglés) mostró una disminución progresiva durante los meses, con un pico máximo de 8.7 MW registrado en septiembre de 2024, asociado a la persistencia de la emisión de material caliente en el cráter, coherente con la actividad eruptiva vigente en ese periodo.

Posteriormente, entre noviembre de 2024 y enero de 2025, las anomalías térmicas se presentaron de forma esporádica y con valores inferiores. Entre enero y septiembre de 2025, las anomalías térmicas fueron intermitentes y menores a 1 MW, indicativas de ausencia de actividad

superficial relevante, alineándose con el periodo documentado de menor actividad volcánica mediante otros parámetros. En julio y agosto de 2025, se registraron anomalías térmicas de baja intensidad ( $<1$  MW) que reflejaron la presencia de material volcánico remanente en la superficie.

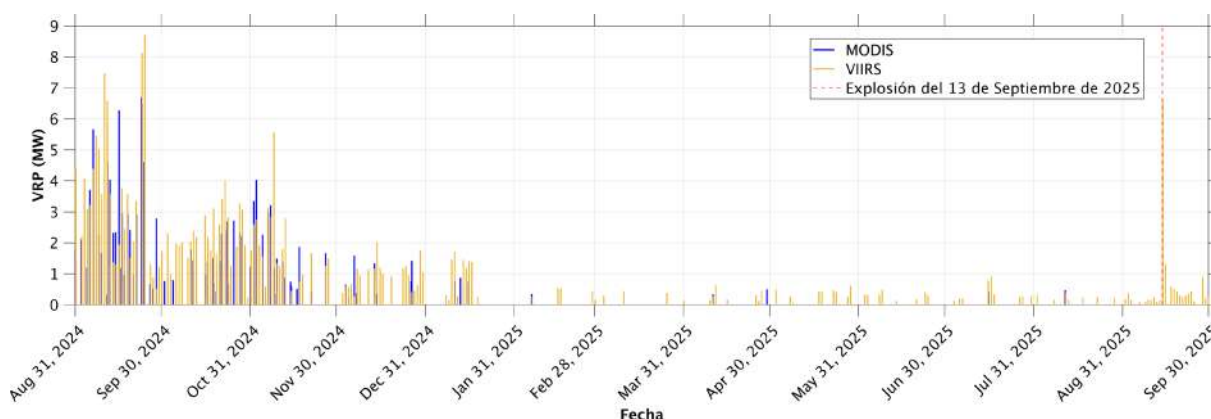
El día posterior a la explosión del 13 de septiembre de 2025, se observó un incremento térmico significativo, con un pico de 6.6 MW, coincidente con el emplazamiento de flujos piroclásticos incandescentes en los flancos del volcán. Esta evolución térmica evidencia una correlación directa con la dinámica eruptiva, marcando la transición entre una fase de actividad moderada en 2024, un periodo de baja actividad en 2025 y la reactivación explosiva de septiembre.

### 3.5 Caracterización de emisiones volcánicas

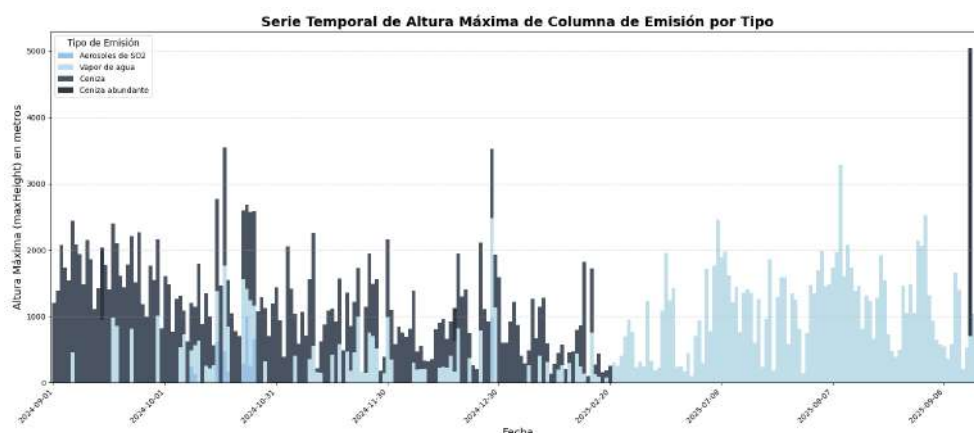
Durante el periodo de análisis, la actividad explosiva del volcán Sabancaya se caracterizó por emisiones volcánicas variables en composición, altura e intensidad, registradas mediante el monitoreo visual (Figura 1).

#### 3.5.1 Tipos de emisiones y evolución temporal

Las emisiones volcánicas del volcán Sabancaya se clasificaron en cuatro categorías, según su composición y densidad: aerosoles de  $\text{SO}_2$  (color celeste claro), vapor de agua (color celeste), ceniza (color gris claro) y ceniza abundante (color gris oscuro).



**Figura 11.** Serie de tiempo de las anomalías térmicas detectadas por los sistemas MIROVA y NASA FIRMS en el volcán Sabancaya, durante el periodo septiembre de 2024 a septiembre de 2025.



**Figura 12.** Serie temporal de altura máxima de columnas de emisiones del volcán Sabancaya, según su composición: aerosoles de  $\text{SO}_2$  (celeste claro), vapor de agua (celeste), ceniza (gris oscuro) y ceniza abundante (gris muy oscuro), durante el periodo septiembre de 2024- septiembre de 2025.

Durante septiembre y octubre de 2024, se presentó una actividad eruptiva moderada, con emisiones frecuentes de ceniza y ceniza abundante, con alturas de hasta 3500 m sobre el nivel del cráter. Estas emisiones densas, representadas en la Figura 12 con tonalidades gris oscuro, reflejaron una fase de actividad explosiva sostenida con eventos que alternaban pulsos de ceniza moderada y episodios de relativa intensidad.

Entre noviembre de 2024 y enero de 2025, se observó una transición gradual hacia emisiones dominadas por vapor de agua y aerosoles de  $\text{SO}_2$ , con columnas que oscilaron entre 500 m y 2000 m. La frecuencia e intensidad de las emisiones de ceniza disminuyeron progresivamente, con la última emisión significativa registrada el 14 de abril de 2025, de aproximadamente 1000 m de altura.

Desde febrero de 2025, el volcán cesó prácticamente sus emisiones de ceniza, con emisiones principalmente de vapor de agua y aerosoles de  $\text{SO}_2$ , que alcanzaron hasta 1000 m de altura, lo que indica un aparente estado de reposo volcánico. Durante este periodo se registraron emisiones leves de gases volcánicos sin contenido particulado significativo.

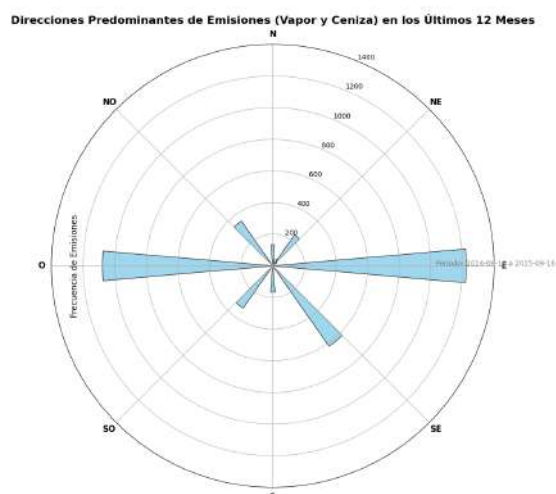
En septiembre de 2025, coincidiendo con la reactivación explosiva del día 13, se registró una columna eruptiva compuesta por ceniza abundante y material piroclástico que superó los 5000 m de altura sobre la cima del volcán.

### 3.5.2 Dispersión de emisiones volcánicas

El análisis de la dirección predominante de las

emisiones volcánicas en los últimos 12 meses revela una dispersión dominada por vientos del oeste-suroeste (Figura 13). La rosa de vientos indica que las emisiones de vapor de agua y ceniza se dispersaron preferentemente hacia el este y este-sureste, impactando principalmente áreas de estancia y pastoreo.

Esta dirección de dispersión se mantuvo constante durante el periodo de estudio del presente informe, con variaciones estacionales en la intensidad del viento. Las localidades situadas al este y sureste del volcán fueron las más afectadas por la caída de ceniza, especialmente durante la actividad explosiva registrada entre septiembre de 2024 y enero de 2025.

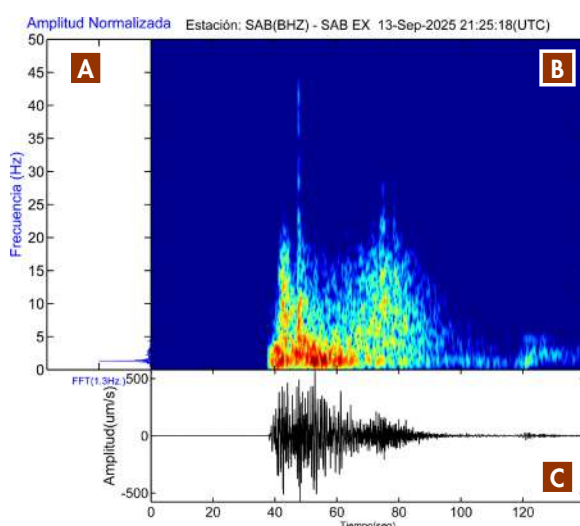


**Figura 13.** Rosa de vientos que muestra las direcciones predominantes de dispersión de emisiones volcánicas (vapor de agua y ceniza) del volcán Sabancaya, durante el periodo septiembre de 2024-septiembre de 2025. La dirección este-sureste fue la predominante, afectando principalmente zonas de estancia y de pastoreo.

## 4. Análisis de la explosión del 13 de septiembre de 2025.

### 4.1 Caracterización sísmica y energética

La explosión del 13 de septiembre de 2025 fue registrada por las seis estaciones sísmicas de la red de monitoreo del Sabancaya. La primera onda de choque se detectó a las 21:25:17 UTC en la estación SAB1. El análisis de la señal sísmica (Figura 14) revela una duración de 81 segundos, frecuencia predominante de 1.33 Hz y energía sísmica de 380 MJ.



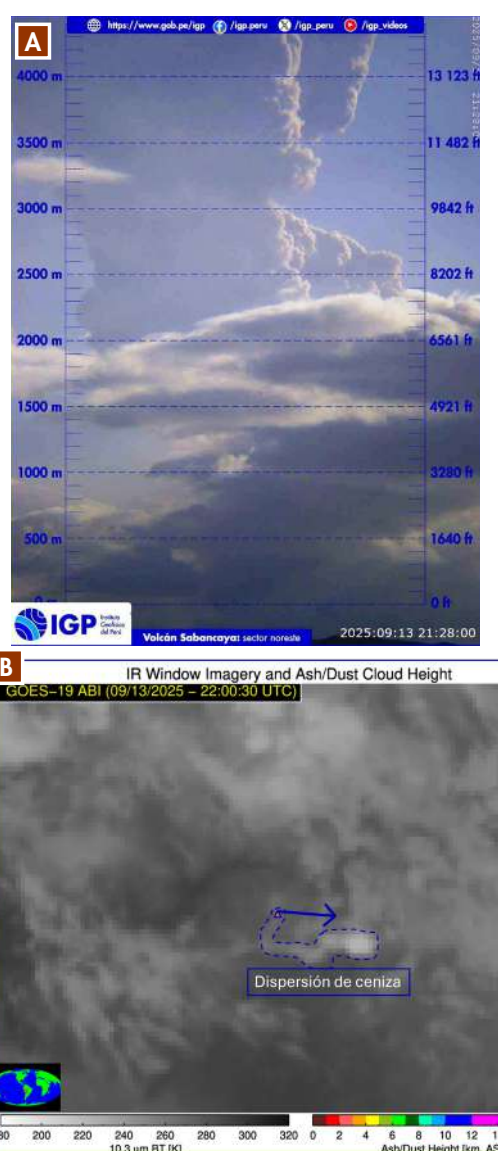
**Figura 14.** Análisis sísmico de la explosión del 13 de septiembre de 2025: (a) espectro de frecuencias, (b) espectrograma que muestra la evolución temporal de las frecuencias y (c) señal sísmica registrada en la estación SAB1.

Para contextualizar este valor, Machacca et al. (2023) establecieron que la energía sísmica diaria de las explosiones en el Sabancaya, en el periodo noviembre de 2016 a 2022, fluctuó típicamente entre 0.01 y 90 MJ. Sin embargo, el valor de 90 MJ corresponde a la energía diaria acumulada de múltiples explosiones durante el periodo de mayor actividad en 2019, no a un evento individual. La explosión del 13 de septiembre, con 380 MJ, representa 4.2 veces la energía diaria máxima concentrada en un solo evento, constituyendo el evento explosivo más

energético registrado durante todo el proceso eruptivo iniciado en 2016.

### 4.2 Altura y dispersión de la columna eruptiva

La explosión generó una columna eruptiva que alcanzó más de 5000 m de altura sobre el nivel del cráter (Figura 15a), convirtiéndose en una de las más importantes del actual proceso eruptivo. La imagen capturada por la cámara SBYA, a las 21:28 UTC, muestra claramente la magnitud del evento y la densidad de la columna eruptiva.



**Figura 15.** Columna eruptiva del 13 de septiembre de 2025: (a) imagen capturada por la cámara SBYA, a las 21:28 UTC, en la que se aprecia la columna de más de 5 km de altura. (b) Imagen del satélite GOES-19 (Banda 10.3  $\mu\text{m}$ ) donde se aprecia la dispersión de ceniza hacia sectores oeste, sur y sureste.



La dispersión de ceniza y gases se dirigió principalmente hacia los sectores oeste, sur y sureste, alcanzando distancias superiores a 50 km desde el cráter (Figura 15b). Las imágenes del satélite GOES-19 (Banda 10.3  $\mu\text{m}$ ) confirman la extensión regional del impacto, con afectación de comunidades y áreas de pastoreo en un radio considerablemente mayor al observado en eventos explosivos previos.

### 4.3 Eyección de bloques balísticos

La explosión generó la eyección de bloques balísticos que cayeron en el flanco sureste del volcán, a distancias de entre 2.0 y 2.3 km desde el cráter. Los bloques más grandes presentaron dimensiones de hasta 90 cm de diámetro, y generaron cráteres de impacto con dimensiones de hasta 3.6 m de ancho, 3.5 m de largo y 1.20 m de profundidad (Figura 16a).

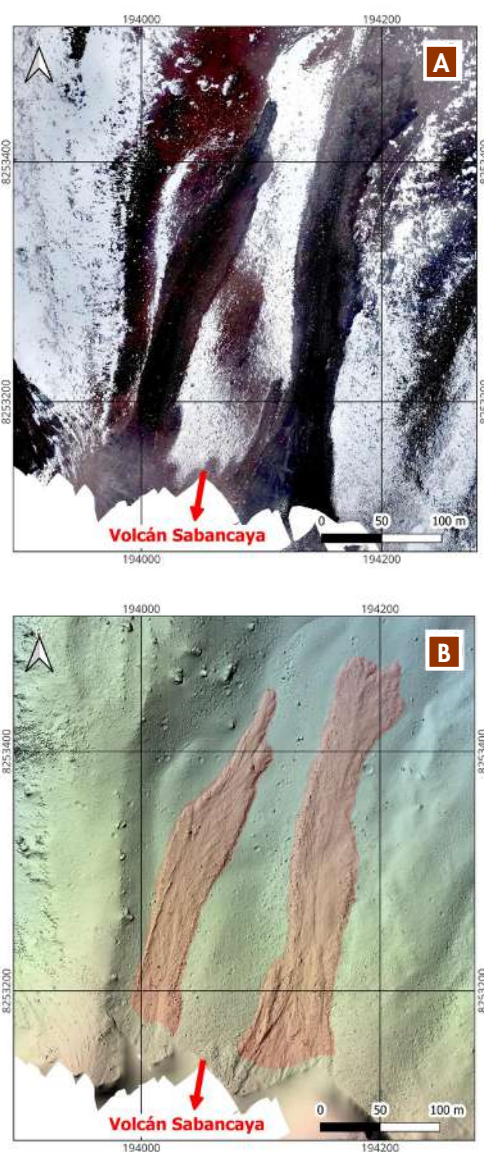


**Figura 16.** Bloques balísticos eyectados durante la explosión del 13 de septiembre de 2025: (a) bloque de hasta 0.90 m de diámetro que generó un cráter de impacto de 3.6 m de diámetro, localizado a 2.1 km al sureste del cráter; (b) cráter de impacto de 1.6 m de diámetro, a 2 km del cráter, en el flanco sureste.

La evaluación *in situ* de estos impactos permitió estimar la energía balística del evento y confirmar el carácter explosivo violento de la explosión. Los bloques balísticos de menor tamaño generaron cráteres de hasta 1.6 m de diámetro a distancias de 2 km (Figura 16b), evidenciando la dispersión radial de material piroclástico en múltiples direcciones.

### 4.4 Características del flujo piroclástico

#### 4.4.1 Fotogrametría con drones



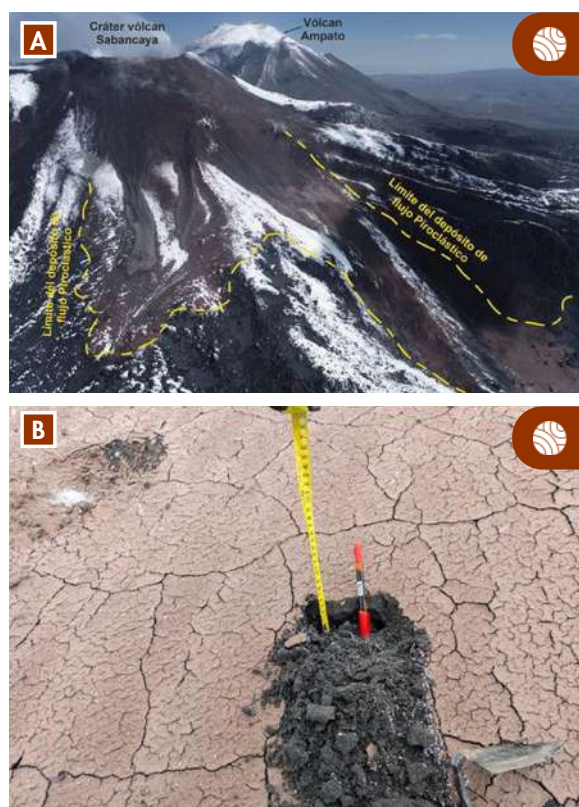
**Figura 17.** Reconstrucción digital de los flujos piroclásticos mediante fotogrametría con drones: (a) ortomosaico con resolución de 3.6 cm que muestra los depósitos al norte del cráter, y (b) modelo digital de elevación con resolución de 7.5 cm.



Mediante sobrevuelo con dron y técnicas fotogramétricas se logró reconstruir digitalmente el área afectada por los flujos piroclásticos. Así, se generó un ortomosaico con resolución de 3.6 cm (Figura 17a) y un modelo digital de elevación con resolución espacial de 7.5 cm (Figura 17b). Estas imágenes de alta resolución permitieron caracterizar con precisión la morfología, extensión y distribución del material depositado.

Los flujos piroclásticos se extendieron hacia el flanco norte del volcán, con un ancho máximo de 53 m en su parte más densa, con espesores entre 2 m y 4 m. El análisis del modelo digital de elevación permitió estimar un volumen total de material depositado de aproximadamente 15 000 m<sup>3</sup>.

#### 4.4.2 Evaluación de campo



**Figura 18.** Depósitos de flujos piroclásticos en el flanco norte del volcán Sabancaya: (a) vista general del depósito de bloques y ceniza con alcance de 670-700 m desde el cráter; y (b) detalle de la capa de ceniza fina de color rojizo, con espesor de aproximadamente 2 mm.

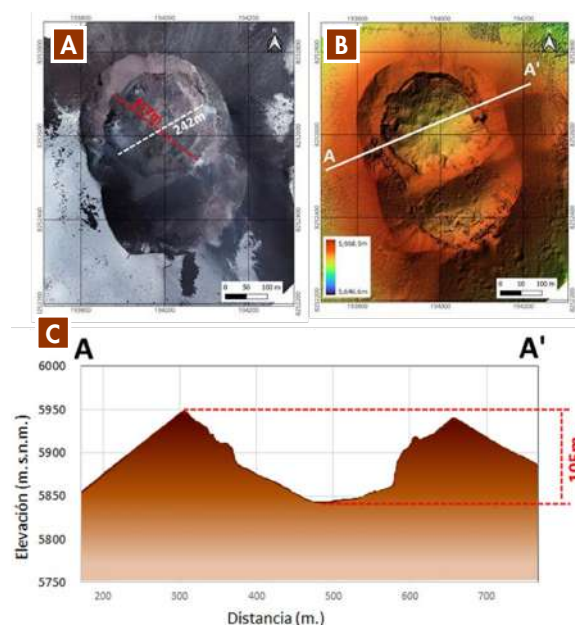
La inspección *in situ* en el flanco norte del volcán Sabancaya confirmó la presencia de un flujo piroclástico compuesto por bloques y ceniza que

alcanzó distancias entre 670 m y 700 m desde el cráter (Figura 18a). El depósito tiene un ancho máximo de aproximadamente 500 m y espesores variables entre 2 m y 4 m.

Adicionalmente, se identificó una capa fina de ceniza de color rojizo con espesor de aproximadamente 2 mm (Figura 18b), interpretada como producto de la fase final de la emisión explosiva. Las mediciones de temperatura realizadas con una cámara térmica registraron valores entre 50 °C y 65 °C en la superficie del depósito, con algunos bloques que alcanzaron hasta 100 °C, evidencia que el material mantenía temperatura residual significativa al cabo de cinco días después del evento.

#### 4.5 Inspección del cráter volcánico

El sobrevuelo de dron sobre el cráter del Sabancaya, posterior al evento (16 de septiembre de 2025), permitió obtener un ortomosaico con resolución de 10.8 cm (Figura 19a) y un modelo digital de elevación con resolución de 21.6 cm (Figura 19b). Las imágenes revelan cambios morfológicos significativos en comparación con observaciones previas.



**Figura 19.** Morfología del cráter del volcán Sabancaya posterior al evento del 13 de septiembre de 2025: (a) ortomosaico con resolución de 10.8 cm que muestra el cráter interno de 242-257 m de diámetro. (b) Modelo digital de elevación con resolución de 21.6 cm. (c) Perfil topográfico que evidencia la profundidad de 105 m respecto al borde más elevado del cráter.

La característica más notable es la ausencia del domo de lava que había sido observado hasta julio de 2024, lo cual evidencia su destrucción casi total durante el evento explosivo del 13 de septiembre. El cráter interno presenta dimensiones entre 242 m y 257 m de diámetro (Figura 19a), con una profundidad de 105 m respecto al borde más elevado del cráter (Figura 19c). Esta configuración morfológica indica que la explosión arrancó casi todo el material de domo que ocupaba el conducto superior, generando una cavidad de dimensiones considerables.

## 5. Interpretación de los resultados .....

Durante el periodo de análisis, la actividad del volcán Sabancaya representa un caso excepcional de transición volcánica, caracterizado por una prolongada fase de disminución de actividad seguida por una reactivación explosiva abrupta y violenta. El análisis de los resultados obtenidos servirá para comprender la dinámica compleja de este sistema volcánico y sus implicaciones para la evaluación de riesgos.

### 5.1 Periodo de actividad explosiva moderada a leve

La disminución sostenida de todos los parámetros de monitoreo, desde septiembre de 2024 hasta agosto de 2025, indica cambios significativos en la dinámica del sistema magmático del volcán Sabancaya. La reducción de la actividad explosiva culminó con el cese total de las emisiones de ceniza a finales de enero de 2025, lo que sugiere una disminución importante en el aporte de magma al sistema superficial o una alteración en la eficiencia del proceso de desgasificación (Sparks, 2003).

Las estaciones GNSS registraron deformación prácticamente nula ( $0.2 \pm 0.4$  cm/año), en contraste con tasas de inflación de 3-5 cm/año en años anteriores (Vargas et al., 2023), lo que indica un cese o reducción drástica en la inyección de magma en el reservorio superficial, consistente con un sistema en proceso de equilibrio o despresurización gradual (Dzurisin, 2007).

Las imágenes radar TerraSAR-X mostraron ciclos de crecimiento y destrucción del domo de lava. Entre diciembre de 2023 y marzo de 2024, ocurrió un crecimiento de aproximadamente 11 m, seguido por una fase de destrucción entre abril y mayo de 2024 (Centeno et al., 2024), típico de sistemas volcánicos con fluctuaciones en la extrusión de magma viscoso en respuesta a cambios en la presión interna (Voight et al., 1999; Coppola et al., 2022).

Las emisiones de  $\text{SO}_2$  promediaron 129 ton/día, inferiores a periodos anteriores. La reducción en magnitud y frecuencia de desgasificación durante 2025 sugiere menor aporte de magma y gases, aunque el sistema permaneció activo con menor intensidad.

Las anomalías térmicas en el cráter siguieron un patrón similar, con mayor presencia en septiembre-octubre de 2024 (hasta 8.7 MW), para luego disminuir a valores esporádicos y menores a 1 MW desde enero de 2025, reflejando la presencia o ausencia de material caliente en superficie y correlacionándose con los ciclos del domo (Wright et al., 2015).

Un aumento en la sismicidad de tipo tornillo en agosto de 2025, con 44 de 121 eventos anuales concentrados en ese mes, fue el único precursor claro de la reactivación explosiva del 13 de septiembre. Estos sismos, asociados a resonancias en conductos volcánicos por fluidos a alta presión (Chouet, 1996; Kumagai y Chouet, 2000), mostraron tres fases espectrales: bajas frecuencias y Q moderados en agosto-septiembre de 2024; aumento de frecuencia y Q alto hasta agosto de 2025; y disminución posterior a agosto de 2025. Esto sugiere cambios en geometría de conductos o propiedades del fluido magmático, interpretados como señales de presurización vinculadas a inyección magmática o liberación de gases en niveles someros (Kumagai et al., 2002).

### 5.2 Evento explosivo del 13 de septiembre de 2025

La explosión del 13 de septiembre de 2025 representa el evento más energético del proceso eruptivo actual del volcán Sabancaya, iniciado en 2016. Con una energía sísmica de 380 MJ, supera en 4.2 veces la mayor energía diaria histórica acumulada (90 MJ en 2019, Machacca et al., 2023), constituyéndose como un evento excepcional.

Este evento generó una columna eruptiva de gases y ceniza que superó los 5000 m sobre el nivel del cráter, a la vez que produjo flujos piroclásticos incandescentes que alcanzaron entre 670 m y 700 m desde el cráter, evidencia de su carácter violento. La dispersión de cenizas afectó zonas al oeste, sur y sureste del volcán, alcanzando más de 50 km, la mayor distancia documentada desde 2016.

Adicionalmente, se registró la expulsión de bloques balísticos de menos de 90 cm de diámetro hasta 2.3 km del cráter, generando cráteres de impacto de 3.6 m de diámetro en el suelo. Esto confirma la naturaleza altamente explosiva del evento, la cual requiere presiones de fragmentación extremadamente altas en los conductos volcánicos (Taddeucci et al., 2017).

Los flujos piroclásticos consistieron en una mezcla de bloques y ceniza, con un volumen estimado en 15 000 m<sup>3</sup>, típicos de desintegración explosiva de domos de lava (Calder et al., 2015). Mediciones térmicas realizadas cinco días después mostraron temperaturas superficiales de 50-65 °C y hasta 100 °C en algunos bloques, lo que revela un material volcánico remanente con significativo contenido térmico.

La inspección posterior reveló la destrucción casi total del domo de lava que ocupaba el conducto superior y el cráter hasta julio de 2024. La profundidad de la cavidad creada alcanzó los 105 m respecto al borde más alto del cráter, lo que demuestra la evacuación masiva de material del domo y del conducto subyacente, característica de explosiones vulcanianas de alta energía (Morrissey & Mastin, 2000).

### 5.3 Modelo conceptual del drástico incremento de actividad

La integración de todos los datos de monitoreo permite proponer un modelo conceptual del súbito incremento de actividad del Sabancaya durante un periodo de aparente calma. Durante el periodo de leve actividad volcánica (febrero-agosto de 2025), el sistema volcánico experimentó una estabilidad interna. La ausencia de actividad superficial no significaba que el sistema magmático estuviera inactivo, sino que atravesaba por cambios en la parte somera del conducto (Segall, 2010).

El aumento de sismos de tipo tornillo en agosto de 2025, junto con el ligero incremento de anomalías térmicas, indica que semanas previas a la explosión comenzó un proceso de presurización del sistema magmático superficial. Este proceso podría haberse originado por (1) la inyección de nuevo magma desde niveles más profundos, (2) la acumulación de gases debido a la obstrucción del conducto por el domo, (3) infiltración de agua en el sistema magmático e hidrotermal, o (4) una combinación de los factores antes mencionados (Sparks, 2003; Pallister et al., 2013).

La explosión del 13 de septiembre destruyó el domo presente en el cráter del Sabancaya y evacuó el conducto superior, lo que sugiere que se alcanzó un punto crítico de presión que superó la resistencia mecánica del tapón formado por el domo de lava. Este comportamiento es típico de volcanes andesíticos, donde la alta viscosidad del magma facilita la acumulación de presión hasta alcanzar niveles de fragmentación catastrófica (Dingwell, 1996).

### 5.4 Implicaciones para la evaluación de riesgos

Este caso muestra que los periodos prolongados de aparente calma en volcanes andesíticos no indican necesariamente una disminución del peligro por actividad volcánica. Al contrario, estas fases de reposo pueden representar periodos de acumulación de presión que culminan en eventos explosivos de gran magnitud (Newhall & Hoblitt, 2002).

La identificación retrospectiva de señales precursoras, como el incremento de sismos de tipo tornillo y las anomalías térmicas moderadas, destaca la importancia del monitoreo continuo, incluso durante periodos de baja actividad. La capacidad de detectar e interpretar correctamente estas señales sutiles de reactivación resulta crucial para emitir alertas oportunas (Tilling, 2008; White & McCausland, 2016).

La comparación con el periodo 2016-2024, durante el cual presentó explosiones moderadas frecuentes y formación continua de domos (Centeno et al., 2023, 2024), revela un cambio significativo en el estilo eruptivo del Sabancaya. El evento del 13 de septiembre marca una transición hacia un comportamiento más explosivo, lo que tiene importantes implicaciones para la evaluación de escenarios eruptivos futuros y la planificación de la gestión de riesgos.

## 6. Pronóstico y escenarios futuros

La evaluación de escenarios eruptivos futuros para el volcán Sabancaya se basa en el análisis integrado de datos multiparamétricos recopilados entre septiembre de 2024 y septiembre de 2025, con especial atención al evento explosivo ocurrido el 13 de septiembre y las características de la fase eruptiva actual.

### 6.1 Estado actual del sistema volcánico

Tras el evento explosivo del 13 de septiembre de 2025, el cráter del volcán Sabancaya presenta una configuración morfológica muy distinta a la observada en años anteriores. La evacuación de gran parte del domo de lava y del material del conducto superior ha creado una cavidad de 105 m de profundidad desde el borde más elevado del cráter, con un diámetro de 242-257 m.

Esta nueva morfología implica un conducto abierto que facilita la desgasificación del sistema magmático, reduce la resistencia mecánica al ascenso de magma o gases, y permite la posible formación de un nuevo domo de lava, si las condiciones de presurización, tipo de magma y tasa de extrusión son favorables. Por ello, la elevación del nivel de alerta de amarillo a naranja reconoce que el volcán ha experimentado un incremento en su actividad eruptiva y mantiene el potencial de generar eventos explosivos adicionales de magnitud similar o superior al menos en el corto o mediano plazo.

### 6.2 Escenarios probables

#### 6.2.1 Actividad explosiva moderada con formación de domo

Este escenario contempla la continuación de actividad explosiva leve a moderada, similar al patrón observado entre 2016 y 2024. En ese contexto, se esperarían explosiones vulcanianas con Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 1 a 2, que generarían columnas eruptivas de hasta 3000 m de altura sobre el nivel del cráter. El ascenso de magma a la superficie y formación

de un nuevo domo de lava en el cráter sería una característica central de este escenario. Las tasas de crecimiento, inicialmente lentas, podrían acelerarse al aumentar según el aporte de magma. Este proceso vendría acompañado de emisiones persistentes de gases volcánicos (flujos de  $\text{SO}_2$  entre 500 y 2000 toneladas diarias) y una deformación moderada del edificio volcánico (1-3 centímetros anuales) asociada a la presurización del sistema.

Los precursores esperados incluirían el incremento gradual en la frecuencia de sismos de tipo largo periodo y explosiones, el aumento de emisiones de  $\text{SO}_2$ , la inflación del edificio volcánico y la aparición de anomalías térmicas en el cráter. La duración estimada de este escenario se extendería varios meses, representando una fase prolongada de actividad sostenida.

Los peligros asociados abarcarían la caída de ceniza en comunidades cercanas, la caída de proyectiles balísticos en un radio de 3 a 5 km del cráter, flujos piroclásticos de pequeño volumen por colapso parcial del nuevo domo (alcances menores a 1 km), las emisiones de gases volcánicos potencialmente tóxicos en áreas proximales y lahares secundarios durante la temporada de lluvias.

#### 6.2.2 Periodo de relativa calma con actividad fumarólica

Se caracterizaría por una disminución gradual de la actividad explosiva en las semanas posteriores, con transición hacia actividad principalmente fumarólica. Las emisiones de  $\text{SO}_2$  oscilarían entre 100 y 500 toneladas diarias, mientras que la deformación del edificio volcánico sería mínima o inexistente. La actividad sísmica disminuiría notablemente, predominando eventos de tipo largo periodo ocasionales y sismos de tipo volcano-tectónico distales. La ausencia de formación de domo, o un crecimiento muy lento del mismo, caracterizaría este periodo de calma relativa. Sin embargo, este escenario no debe interpretarse como el fin de la actividad eruptiva actual, sino como parte de su evolución temporal.

Los precursores que indicarían la transición hacia una mayor actividad explosiva incluirían un aumento de sismos de tipo largo periodo, incluido los tornillos, similar a lo observado en agosto de 2025, la aparición de anomalías térmicas, cambios en las tasas o composición de emisiones gaseosas, y el inicio de inflación en las estaciones



GNSS. La duración estimada de este escenario sería de varios meses.

Los peligros asociados se limitarían principalmente a emisiones de gases que podría impactar en áreas cercanas, con posibilidad de esporádicas explosiones con emisión de ceniza y gases.

### 6.2.3 Intensificación de la actividad explosiva

Este escenario, aunque poco probable, contempla el inicio de una fase de mayor actividad explosiva, probablemente vinculada a una nueva y mayor inyección de magma desde niveles profundos. Se caracterizaría por explosiones vulcanianas de mayor intensidad que generarían columnas eruptivas de gases y cenizas recurrentes superiores a los 5000 m de altura.

En dicho escenario pueden generarse flujos piroclásticos incandescentes que pueden alcanzar hasta 3 km o 4 km de distancia del cráter, representando un peligro significativo para áreas cercanas. Asimismo, puede ocurrir la eyección de bloques balísticos incandescentes que podrían llegar a distancias de 3-5 km del cráter, mientras que la caída de ceniza afectaría áreas en un radio de 30-50 km alrededor del volcán.

Los precursores esperados incluirían un aumento sostenido y notable en la actividad sísmica, con más de 50 explosiones diarias, aparición de tremor armónico continuo, rápida inflación del edificio volcánico (se aceleraría a más de 5 centímetros por año) y un incremento significativo en las emisiones de  $\text{SO}_2$  que excederían las 3000 toneladas diarias. Este escenario podría extenderse desde semanas hasta meses de intensa actividad continua.

## Conclusiones .....

- El volcán Sabancaya, en el periodo septiembre de 2024 al 12 de septiembre de 2025, presentó una prolongada disminución de su actividad seguida por una reactivación explosiva violenta, ocurrida el 13 de septiembre de 2025. Desde septiembre de 2024, la actividad sísmica mostró una reducción progresiva, con cese de explosiones a finales de enero de 2025. Asimismo, se detectó una deformación prácticamente nula, leve actividad fumarólica, emisiones reducidas de SO<sub>2</sub> y ausencia de anomalías térmicas que contrastaron con la subsecuente reactivación violenta ocurrida el 13 de septiembre de 2025. La más importante señal precursora de la explosión del 13 de septiembre fue el incremento de sismos de tipo tornillo detectado en agosto de 2025, cuando 44 de los 121 eventos anuales ocurrieron en ese mes.
- La explosión del 13 de septiembre representa el evento más energético del actual proceso eruptivo que inició en 2016, con una energía sísmica de 380 MJ, la que supera 4.2 veces la energía diaria máxima histórica acumulada. Este evento generó una columna eruptiva de gases y cenizas que superó los 5000 m de altura sobre la cima del volcán. Asimismo, generó flujos piroclásticos que recorrieron hasta 670-700 m de distancia del cráter, la eyección de proyectiles balísticos que alcanzaron hasta 2.3 km de distancia y la dispersión de ceniza que alcanzó a más de 50 km de distancia, destruyendo casi completamente el domo de lava y creando una cavidad en el cráter de 105 m de profundidad.
- El aumento de sismos de tipo tornillo en agosto de 2025, junto con el ligero incremento de anomalías térmicas detectado semanas previas a la explosión, estaría ligada a un proceso de presurización del sistema magmático originado por (1) la inyección de nuevo magma desde niveles más profundos, (2) la acumulación de gases debido a la obstrucción del conducto por el domo, (3) la infiltración de agua en el sistema magmático e hidrotermal, o (4) una combinación de los factores antes mencionados.
- El análisis integrado de los parámetros geofísicos revela un cambio potencial en

el estilo eruptivo del Sabancaya, pasando de actividad volcánica leve hacia un comportamiento con capacidad para generar explosiones significativamente más energéticas, con implicaciones fundamentales para la evaluación de escenarios futuros y gestión de riesgos volcánicos en la región.

## Recomendaciones .....●

- Mantenerse informado sobre el estado de actividad del volcán Sabancaya mediante las alertas, reportes y boletines oficiales emitidos por el Instituto Geofísico del Perú, y comprender el significado de los niveles de alerta volcánica, particularmente que la alerta naranja actual indica erupción en curso, con explosiones frecuentes y la emisión de ceniza y proyectiles balísticos.
- Revisar y actualizar los planes de contingencia para comunidades dentro de 10 km del volcán, considerando los tres escenarios probables identificados.



# Referencias .....

- Alpala, R., Londoño, J. M., Torres, R., & Cadena, Ó. (2018). Análisis de posibles fuentes generadoras de eventos sísmicos tipo “tornillo” en el volcán Puracé, Colombia. *Boletín Geológico*, 44, 57–73. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.44.2018.34>
- Beck, S. L., Zandt, G., Myers, S. C., Wallace, T. C., Silver, P. G., & Drake, L. (1996). Crustal-thickness variations in the central Andes. *Geology*, 24(5), 407–410.
- 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. <https://doi.org/10.3390/rs12111852>
- Calder, E. S., Lavallée, Y., Kendrick, J. E., & Bernstein, M. (2015). Lava dome eruptions. In H. Sigurdsson (Ed.), *The encyclopedia of volcanoes* (2nd ed., pp. 343–362). Academic Press.
- Centeno, R., Vargas, K., Lazarte, I., Anccasi, R., Baca, J., & Valdivia, D. (2023). *Evolución y análisis integral de la actividad eruptiva del volcán Sabancaya (mayo 2022 – julio 2023)*. Instituto Geofísico del Perú.
- Centeno, R., Vargas, K., Álvarez, Y., Anccasi, R., Baca, J., Soto, E., Quispe, L., & Valdivia, D. (2024). *Evolución y análisis integral de la actividad eruptiva del volcán Sabancaya (agosto 2023 – mayo 2024)*. Instituto Geofísico del Perú.
- Chouet, B. A. (1996). Long-period volcano seismicity: Its source and use in eruption forecasting. *Nature*, 380(6572), 309–316.
- Coppola, D., Laiolo, M., Piscopo, D., & Cigolini, C. (2022). Rheological control on the radiant density of active lava flows and domes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 249, 39–48.
- Del Carpio, J. A., Rivera, M., Torres, J., Tavera, H., & Puma, N. (2022). *Evaluación del peligro volcánico en Perú: Una herramienta para la gestión del riesgo de desastres*. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5276>
- Dingwell, D. B. (1996). Volcanic dilemma: Flow or blow? *Science*, 273(5278), 1054–1055.
- Dzurisin, D. (2007). *Volcano deformation: Geodetic monitoring techniques*. Springer-Praxis.
- Kumagai, H., & Chouet, B. A. (2000). Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids. *Journal of Geophysical Research*, 105(B11), 25493–25512.
- Kumagai, H., Chouet, B. A., & Dawson, P. B. (2002). Source process of a long-period event at Kilauea Volcano, Hawaii. *Geophysical Journal International*, 161(1), 243–254.
- Kumazawa, M., Imanishi, Y., Fukao, Y., Furumoto, M., & Yamamoto, A. (1990). A theory of spectral analysis based on the characteristic property of a linear dynamic system. *Geophysical Journal International*, 101(3), 613–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05574.x>
- Machacca, R., Lesage, P., Tavera, H., Pesicek, J. D., Caudron, C., Torres, J. L., Puma, N., Vargas, K., Lazarte, I., Rivera, M., & Burgisser, A. (2023). The 2013–2020 seismic activity at Sabancaya Volcano (Peru): Long-lasting unrest and eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 435, Article 107767. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107767>
- MacQueen, P., Delgado, F., Reath, K., Pritchard, M. E., Bagnardi, M., Milillo, P., Lundgren, P., Macedo, O., Aguilar, V., Ortega, M., Anccasi, R., Lazarte Zerpa, I. A., & Miranda, R. (2020). Volcano-tectonic interactions at Sabancaya Volcano, Peru: Eruptions, magmatic inflation, moderate earthquakes, and fault creep. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(5). <https://doi.org/10.1029/2019JB019281>
- Morrissey, M. M., & Mastin, L. G. (2000). Vulcanian eruptions. In H. Sigurdsson (Ed.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 463–475). Academic Press.
- Newhall, C. G., & Hoblitt, R. P. (2002). Constructing event trees for volcanic crises. *Bulletin of Volcanology*, 64(1), 3–20.
- Pallister, J. S., Schneider, D. J., Griswold, J. P., Keeler, R. H., Burton, W. C., Noyles, C., Newhall, C. G., & Ratdomopurbo, A. (2013). Merapi 2010 eruption—Chronology and extrusion rates monitored with satellite radar and used in eruption forecasting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261, 144–152.
- Segall, P. (2010). *Earthquake and volcano deformation*. Princeton University Press.

- Sparks, R. S. J. (2003). Forecasting volcanic eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(1–2), 1–15.
- Taddeucci, J., Edmonds, M., Houghton, B., James, M. R., & Vergnolle, S. (2017). Hawaiian and Strombolian eruptions. In H. Sigurdsson (Ed.), *The encyclopedia of volcanoes* (2nd ed., pp. 485–503). Academic Press.
- Tilling, R. I. (2008). The critical role of volcano monitoring in risk reduction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(3), 367–373.
- Valade, S., Ley, A., Massimetti, F., D'Hondt, O., Laiolo, M., Coppola, D., Loibl, D., Hellwich, O., & Walter, T. R. (2019). Towards global volcano monitoring using multisensor Sentinel missions and artificial intelligence: The MOUNTS monitoring system. *Remote Sensing*, 11(13), 1528.
- Vargas Alva, K., Villegas Lanza, J. C., Centeno Quico, R., & Cruz Igme, J. (2023, August). *Deformación en el entorno del volcán Sabancaya y caracterización de la fuente a partir del modelado con datos GNSS y DInSAR del periodo 2014–2021*. Instituto Geofísico del Perú.
- Voight, B., Constantine, E. K., Siswowidjono, S., & Torley, R. (1999). Historical eruptions of Merapi Volcano, Central Java, Indonesia, 1768–1998. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100(1–4), 69–138.
- White, R. A., & McCausland, W. A. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 309, 139–155.
- Wright, R., Blackett, M., & Hill-Butler, C. (2015). Some observations regarding the thermal flux from Earth's erupting volcanoes for the period of 2000 to 2014. *Geophysical Research Letters*, 42(2), 282–289. <https://doi.org/10.1002/2014GL061997>

# Información clave para ti

Puedes consultar, descargar y compartir desde el Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) los diferentes **reportes**, **boletines** e **informes** que genera el IGP.

**RECUERDA:** La Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) se fundamenta en la investigación científica. El IGP es una entidad líder en la generación de conocimiento científico en el país.



**REGEN**



Sede central del Instituto Geofísico del Perú (IGP)



