



REPORTE TÉCNICO ESPECIAL

# Investigación y Monitoreo de **Volcanes Activos en el Sur del Perú**

# Créditos

**Ministra del Ambiente**  
Fabiola Muñoz

**Presidente ejecutivo IGP**  
Hernando Tavera

**Director científico IGP**  
Danny Scipión

**Director IGP-Sede Arequipa**  
Héctor Palza

**Contenido**  
Instituto Geofísico del Perú

**Edición**  
Marco Rivera  
Jorge Concha

**Fotografía**  
Instituto Geofísico del Perú

**Diseño y Diagramación**  
Jorge Concha

**Fotografía de portada**  
Volcán Sabancaya: actividad explosiva con expulsión de ceniza a través de dos cráteres activos

Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo, IV Etapa, Ate, Lima, Perú  
Central telefónica: (+ 51 1) 317 2300

cenvul@igp.gob.pe  
www.igp.gob.pe

Impreso por:  
INVERSIONES IAKOB S.A.C.  
Teléfono: (+51 1) 296 3911  
Dirección: Av. Iquitos 1481, La Victoria

Lima, diciembre de 2019

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú:  
2019-18346

Tiraje: 1000 ejemplares

*Prohibida su reproducción total o parcial sin autorización previa y escrita del Instituto Geofísico del Perú*

# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>PRESENTACIÓN</b>  | <b>4</b>  |
| <b>VOLCANES DEL PERÚ</b>   | <b>6</b>  |
| <b>CENTRO VULCANOLÓGICO NACIONAL (CENVUL)</b>  | <b>8</b>  |
| • ¿Qué es?   | 9         |
| • ¿Cuáles son sus funciones?   | 9         |
| • Volcanes monitoreados  | 10        |
| • Métodos de monitoreo   | 10        |
| • Productos  | 14        |
| • Gestión del conocimiento   | 15        |
| <b>INVESTIGACIÓN</b>   | <b>16</b> |
| • Aportes del monitoreo geofísico en el manejo de crisis del volcán Ubinas: actividad eruptiva 2019                              | 17        |
| • Nuevas intrusiones de magma en el volcán Sabancaya en 2019 y aparición de un domo de lava en el cráter                         | 21        |
| • Cambios morfológicos a partir de levantamiento aerofotogramétrico en el volcán Ubinas, proceso eruptivo 2019                   | 25        |
| • Evaluación y análisis de las señales sísmicas observadas durante el periodo 2018-2019 en el complejo volcánico nevado Coropuna | 29        |
| <b>MONITOREO</b>   | <b>33</b> |
| • Volcán Sabancaya   | 34        |
| • Volcán Ubinas  | 39        |
| • Volcán Misti   | 44        |
| • Volcán Ticsani   | 46        |
| • Volcán Coropuna  | 48        |
| • Volcán Chachani  | 50        |
| • Volcán Yucamane  | 52        |
| • Volcán Tutupaca  | 54        |
| • Volcán Sara Sara   | 56        |
| • Volcán Huaynaputina  | 58        |
| • Volcán Casiri  | 60        |
| • Volcán Cerro Auqui huato   | 62        |

# Presentación



Dr. Hernando Tavera  
Presidente ejecutivo  
Instituto Geofísico del Perú (IGP)

En el Perú, la actividad volcánica está concentrada en la región sur y compromete a las regiones de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna con la presencia de alrededor de 16 volcanes activos y potencialmente activos que representan un riesgo para cerca de más de 3 millones de personas.

De estos volcanes, el Sabancaya, ubicado en la región Arequipa, presentó en el año 1990 un nuevo proceso eruptivo, convirtiéndose así en el primer volcán en el país que el Instituto Geofísico del Perú (IGP), con el apoyo del Estado, monitoreó a través de una red sísmica compuesta por cuatro estaciones que transmitían sus datos a la sede del IGP en el distrito de Cayma, oficina que actualmente ocupa como parte de un convenio firmado con la Autoridad Autónoma de Majes (AUTODEMA).

Posteriormente, volcanes como el Misti en Arequipa (2005), además del Ubinas (2006) y Ticsani (2014) en Moquegua, fueron intervenidos mediante la instalación de redes sísmicas y múltiples proyectos de investigación geofísica que permitieron al IGP comprender el historial y dinámica de sus recurrentes procesos eruptivos. El conocimiento de la actividad volcánica se vio reforzado con la formación de un gran número de jóvenes profesionales que poco a poco fueron ganando experiencia y fortaleciendo su formación académica a través de estudios de maestría y doctorado realizados en nuestro país y en el extranjero. Hoy, son ellos los que guían y lideran la investigación vulcanológica en el Perú.

Este notable esfuerzo realizado por el Instituto Geofísico del Perú fue reconocido por el Estado peruano, asignándole al IGP un presupuesto de aproximadamente 18 millones de soles para concretizar el proyecto de «Mejoramiento y Ampliación del Sistema de Alerta Volcánica en el Sur del Perú», el cual ha permitido expandir sofisticadas redes de monitoreo geofísico en 12 de los 16 volcanes activos y potencialmente activos del país. Este proyecto se logró cumplir satisfactoriamente en 2019, concluyendo con la creación del Centro Vulcanológico Nacional

(CENVUL), servicio oficial del Estado peruano que se ha consolidado hoy en día como el mayor aporte del IGP para la población del sur del Perú.

Diariamente, se registran grandes cantidades de datos geofísicos que permiten al IGP comprender el desarrollo de los procesos eruptivos de los volcanes Ubinas y Sabancaya, así como iniciar nuevas investigaciones para conocer mejor el comportamiento dinámico de los volcanes Misti, Ticsani, Coropuna, Chachani, Yucamane, Tutupaca, Sara Sara, Huaynaputina, Casiri y Cerro Auqui huato. El conocimiento obtenido a la fecha, además de lo que se espera aprender, será una importante contribución del IGP en el campo de la vulcanología.

Dos mil diecinueve ha sido un año de importantes logros y retos. Así, el CENVUL cumplió su más importante labor a través del pronóstico y monitoreo del proceso eruptivo del volcán Ubinas, generando reportes, alertas y boletines cuya información fue imprescindible para la toma de decisiones por parte de las instituciones conformantes del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), además de las autoridades locales y regionales. Esta notable acción fue reconocida por el presidente de la república en su discurso de la nación del 28 de julio de 2019.

Con respecto al volcán Sabancaya, el monitoreo permanente que viene realizando el CENVUL permitió cuantificar en 2019 el crecimiento progresivo de un domo de lava en su cráter, además de la elaboración de tres escenarios eruptivos con la posible formación de flujos piroclásticos en el caso de uno de ellos. Esta valiosa información ya fue comunicada y coordinada con las instituciones de respuesta a fin de tomar acciones que permitan proteger a la población del valle del Colca.

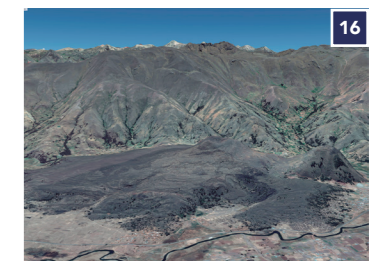
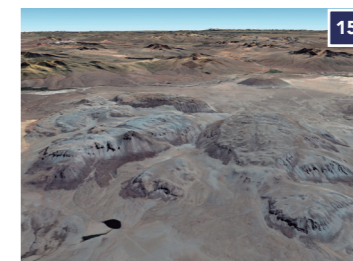
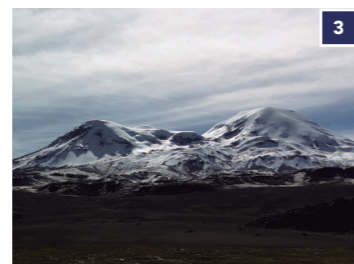
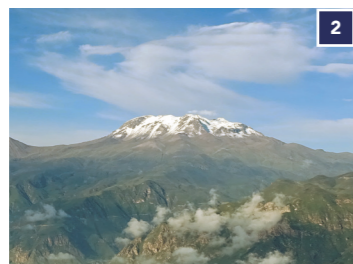
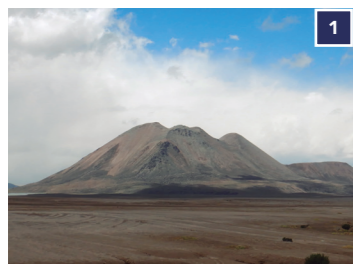
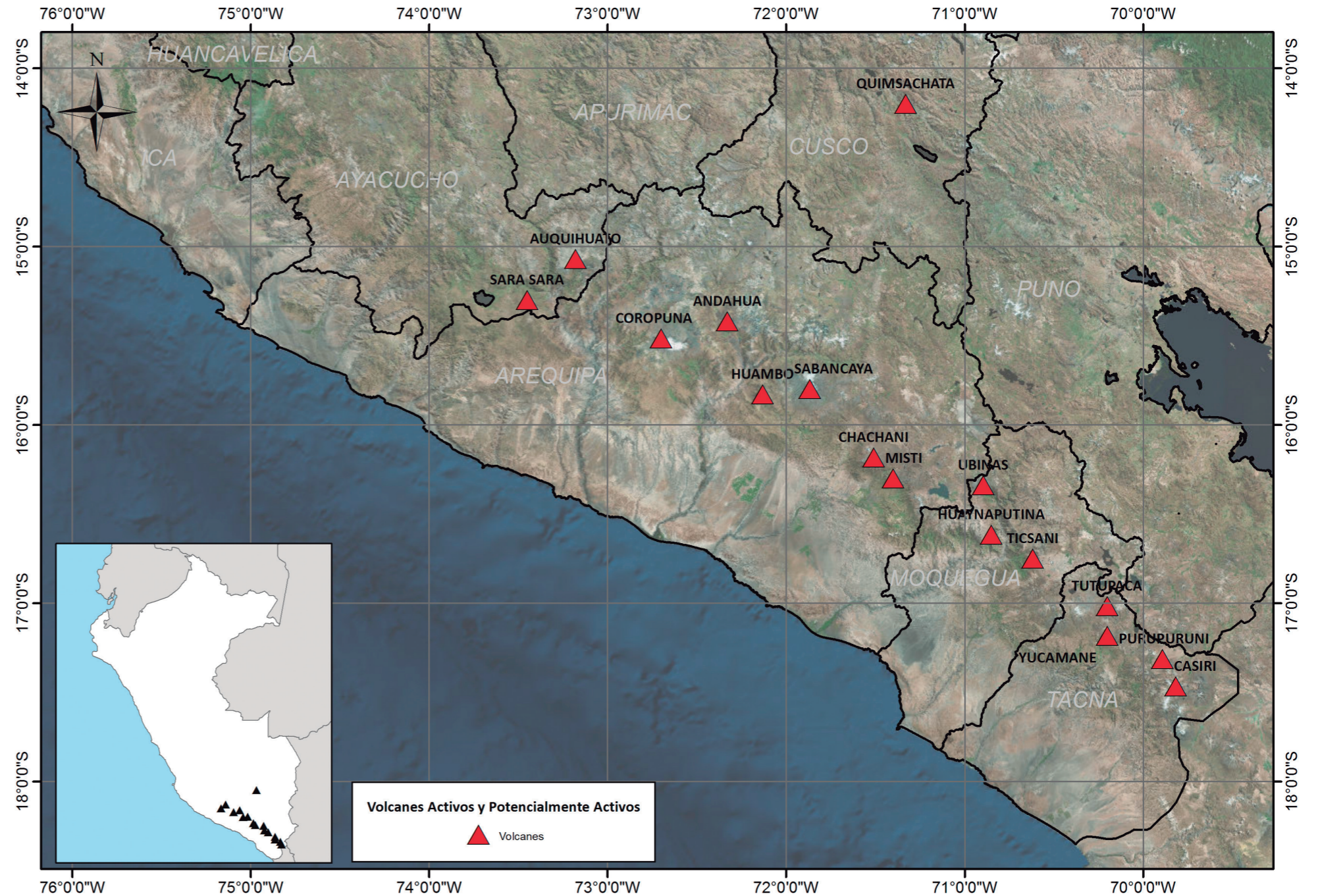
Ser la institución responsable de las investigaciones y monitoreo de los principales peligros geofísicos en nuestro país, es un privilegio que el Instituto Geofísico del Perú asume con el único compromiso de seguir haciendo «Ciencia para protegernos, Ciencia para avanzar».



# Volcanes del Perú

En el país, existen 16 volcanes activos y potencialmente activos (De Silva & Francis, 1991; Siebert et al., 2011; Smithsonian Institution, Global Volcanism Program) y todos ellos están distribuidos al sur del Perú, en las regiones de Ayacucho, Arequipa, Moquegua, Tacna y Cusco. Estos son:

1. Cerro Auqui huato
2. Sara Sara
3. Coropuna
4. Andahua
5. Huambo
6. Sabancaya
7. Chachani
8. Misti
9. Ubinas
10. Huaynaputina
11. Ticsani
12. Tutupaca
13. Yucamane
14. Casiri
15. Cerros Purupuruni
16. Quimsachata



# CENVUL



Monitoreo, procesamiento y generación de información desde el Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL) en Arequipa.



## 1.- ¿QUÉ ES?

El Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL) es el servicio oficial del Estado peruano implementado y administrado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), el cual registra, analiza e interpreta los datos sismovolcánicos, geodésicos, geoquímicos y de cámaras de video que provienen en tiempo real de las estaciones de monitoreo instaladas en 12 volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano: Sara Sara, Cerro Auquihuato, Coropuna, Sabancaya, Misti, Chachani, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucamane y Casiri.

La vigilancia volcánica en el Perú inició en 1990 con el monitoreo del proceso eruptivo del volcán Sabancaya. Desde entonces, el IGP ha formado profesionales en vulcanología que hoy en día, en virtud de su extensa trayectoria profesional, trabajan en el CENVUL a fin de elaborar pronósticos de erupción volcánica certeros y de alta confiabilidad.

La implementación de este servicio ha sido posible gracias a la confianza y respaldo del Estado peruano, el cual otorgó al IGP un presupuesto de aproximadamente 18 millones de soles para expandir las redes de monitoreo e iniciar la vigilancia de los volcanes de mayor riesgo para la población del sur del país.

## 2.- ¿CUÁLES SON SUS FUNCIONES?

- Monitorear el comportamiento dinámico de los volcanes activos del Perú usando datos provenientes de la Red Geofísica de Volcanes operada por el IGP.
- Analizar y procesar en tiempo real los datos geofísicos provenientes de la Red Geofísica de Volcanes instalada sobre los volcanes activos del país.
- Utilizar la información geofísica generada para

emitir reportes, boletines y alertas sobre el comportamiento dinámico de los volcanes del Perú.

- Utilizar la información geofísica generada para emitir reportes, boletines y alertas sobre el inicio de procesos eruptivos de cualquiera de los volcanes del Perú y sobre los peligros previsible en un área específica.
- Utilizar la información geofísica generada para emitir alertas de descenso de lahares o flujos de barro desde el volcán, indicando el flanco por el cual discurren y las áreas urbanas posiblemente afectadas.
- Utilizar la información geofísica para advertir sobre el proceso eruptivo de un volcán de tipo explosivo con la emisión de cenizas. Se indicará la dirección de dispersión del material y las posibles áreas urbanas afectadas.
- Coordinar con las instituciones integrantes del SINAGERD para la emisión y recepción de reportes, boletines y, de ser el caso, las alertas volcánicas.
- Prestar asesoramiento técnico-científico sobre el comportamiento dinámico de los volcanes a las instituciones y autoridades integrantes del SINAGERD.
- Apoyar a las instituciones integrantes del SINAGERD en actividades de capacitación en temas vulcanológicos.
- Elaboración de informes técnicos-científicos para la difusión de las investigaciones que se realizan usando la información generada en el CENVUL.
- Emitir informes mensuales a la Alta Dirección del IGP sobre las incidencias del servicio que brinda el CENVUL.
- Generar bases de datos geofísicos para ser utilizado por los programas de investigación del IGP en Ciencias de la Tierra.
- Elaborar informes especiales a solicitud de las instituciones integrantes del SINAGERD sobre el comportamiento dinámico de volcanes.
- Otras funciones que se le asigne para el cumplimiento de sus fines.

### 3.- VOLCANES MONITOREADOS

Actualmente, el Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL) realiza la vigilancia permanente e ininterrumpida respecto al comportamiento dinámico de 12 volcanes activos y potencialmente activos del país, localizados en las regiones de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna.

|                        |  |
|------------------------|--|
| <b>Región Ayacucho</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cerro Auquihuato</li> <li>• Sara Sara</li> </ul>                              |
| <b>Región Arequipa</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coropuna</li> <li>• Sabancaya</li> <li>• Chachani</li> <li>• Misti</li> </ul> |
| <b>Región Moquegua</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ubinas</li> <li>• Ticsani</li> <li>• Huaynaputina</li> </ul>                  |
| <b>Región Tacna</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tutupaca</li> <li>• Yucamane</li> <li>• Casiri</li> </ul>                     |

### 4.- MÉTODOS DE MONITOREO

La mejor manera de percibir y evaluar el estado de actividad y riesgo asociado a un volcán es a través de la observación y vigilancia sistemática mediante diversos métodos instrumentales y visuales. Si estos se aplican en forma anticipada en las fases previas a un proceso eruptivo, es posible, en la gran mayoría de los casos, detectar oportunamente un cambio cualitativo y cuantitativo de la actividad que pudiese generar una erupción volcánica. A continuación, se detallan los métodos de monitoreo volcánico aplicados por el IGP.

#### Sismología

El estudio de la sismicidad en ambientes volcánicos es vital, ya que es uno de los precursores de erupciones volcánicas más frecuentes y evidentes observados en todo el mundo. Por tanto, el monitoreo sísmico es la principal técnica de monitoreo empleada por el CENVUL, la cual ha permitido pronosticar exitosamente recientes erupciones de los volcanes Ubinas (2013-2017, 2019-presente) y Sabancaya (2016 al presente). El sistema de monitoreo empleando este método es capaz de localizar y caracterizar con precisión los eventos sísmicos en ambientes volcánicos y poder emitir alertas oportunas. Para obtener información precisa, las redes sísmicas cuentan como mínimo con tres estaciones sísmicas, las cuales están instaladas

a menos de 10 km de los cráteres de los volcanes vigilados.

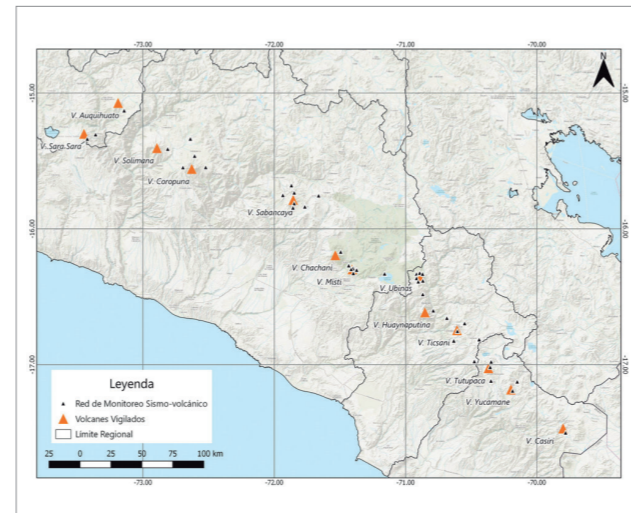


Figura 1.- Mapa de la red sísmica desplegada por el IGP para el monitoreo de los volcanes activos del sur del Perú.

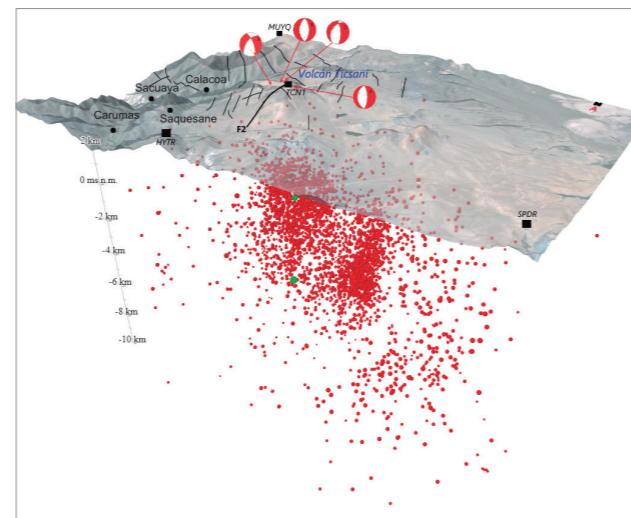


Figura 2.- Sismicidad de fractura (puntos rojos) y sismos Híbridos (círculos verdes) localizados debajo del volcán Ticsani entre mayo de 2014 y abril de 2016. Las esferas rojas y blancas muestran los tipos de mecanismos focales.

#### Infrasonido

Muchos de los procesos volcánicos como explosiones, emplazamiento de flujos piroclásticos, lahares, caída de rocas, etc., generan fuentes naturales de infrasonido. El infrasonido es la componente de baja frecuencia del sonido que normalmente varía de 0.001 a 20 Hz (imperceptibles al oído humano). Los volcanes constituyen un emisor común y variado de ondas infrasonicas generadas principalmente por la interacción de procesos magmáticos con la atmósfera (Johnson et al., 2004). En volcanes explosivos y activos como el Ubinas y Sabancaya, las columnas

eruptivas de gases y cenizas que se expanden rápidamente hacia la atmósfera producen señales de infrasonido que proporcionan información muy valiosa sobre la dinámica de la erupción y el estado de la actividad volcánica.

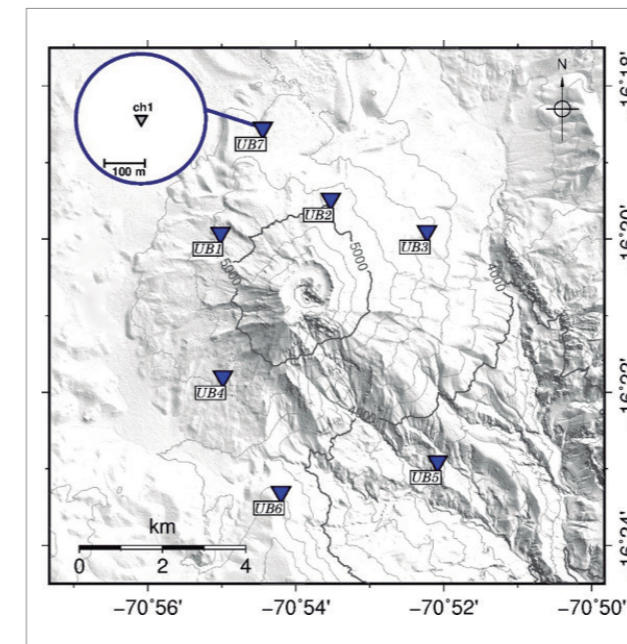


Figura 3.- Ubicación del sensor de infrasonido (ch1) instalado dentro de la red sísmica del volcán Ubinas.

#### Geodesia

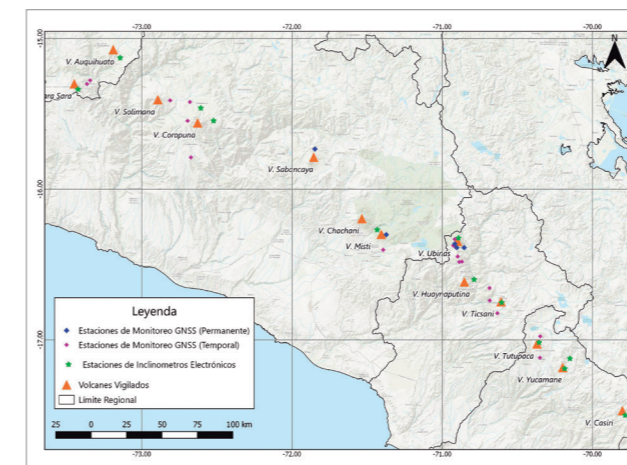


Figura 4.- Red de estaciones de monitoreo geodésico del CENVUL. La instrumentación son de tipo GNSS e inclinómetros.

La deformación de la superficie de un volcán se produce debido a la presión interna generada por el paso de los fluidos (magma, gases, etc.) que genera levantamientos, subsidencias y/o cambios en la estructura y superficie de un volcán. Generalmente, los desplazamientos superficiales son centimétricos o milimétricos, los cuales pueden ser medidos y

cuantificados con instrumentos de alta precisión como los GPS, inclinómetros y otros. La deformación superficial que ocurre en zonas volcánicas o en volcanes es uno de los parámetros más importantes a considerar para el monitoreo de un volcán. El seguimiento de la migración o ascenso del magma es crucial para el pronóstico de erupciones y la evaluación de los riesgos (Battaglia et al., 2019).

El CENVUL realiza el monitoreo geodésico con equipos instalados en 12 de los 16 volcanes peruanos.



Figura 5.- Instalación de la estación GNSS: A) Monumento, B) base nivelante y ducto protector, C) antena, D) domo protector, E) configuración del receptor y F) estación completa GNSS.

#### Sensores remotos

##### • Monitoreo térmico

Los volcanes activos presentan zonas térmicas como respiraderos de vapor, fuentes termales, flujos de lava, domos, etc. Estas características térmicas, que a veces se presentan antes de un proceso eruptivo, se conocen como "anomalías térmicas". Para identificar los cambios de temperatura de la superficie de un volcán se necesita un monitoreo continuo para comprender las características térmicas, lo cual es útil para el pronóstico de erupciones.

El CENVUL analiza la temperatura de tres tipos de anomalías térmicas registradas en volcanes, ello con base en las salidas de campo:

- La temperatura de gases en zonas de respiraderos o cerca de cráteres de los volcanes, la cual varía desde el punto de ebullición hasta algunos cientos de grados (aproximadamente 300 °C).
- La temperatura de géiseres y fuentes termales, la cual varía desde la congelación hasta el punto de ebullición.

- Las características de los flujos de lava, domo de lava y flujos piroclásticos que pueden alcanzar temperaturas mayores de 600 °C.

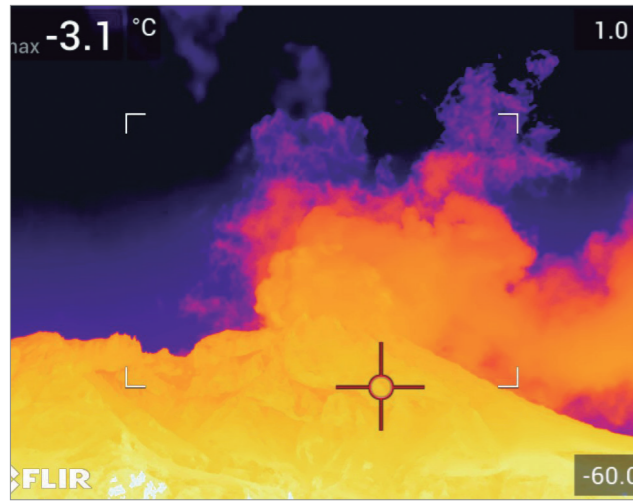


Figura 6.- Imagen térmica del volcán Ubinas obtenida con la cámara infrarroja FLIR del IGP. Los colores señalan diferentes temperaturas.

#### • Monitoreo con cámaras de video

Este tipo de monitoreo consiste en observar continuamente las condiciones físicas del volcán, tales como el aumento o disminución de emisiones fumarólicas o de cenizas, aparición y/o ampliación de grietas, presencia de campos fumarólicos, explosiones, ocurrencia de lahares, etc.

Para el realizar el monitoreo visual de los volcanes activos, el CENVUL ha desplegado una red de 10 cámaras de vigilancia ubicadas estratégicamente en 7 volcanes: Sabancaya (2), Ubinas (2), Misti (2), Ticsani (1), Coropuna (1), Sara Sara (1) y Yucamane (1).

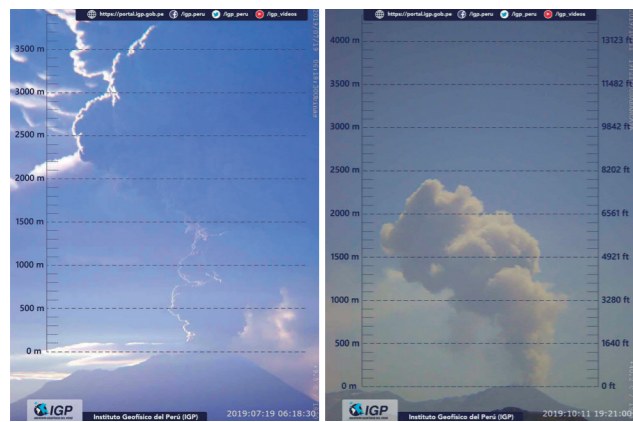


Figura 7.- Imágenes obtenidas por las cámaras científicas de monitoreo instaladas por el IGP en los volcanes Ubinas y Sabancaya.

#### • Monitoreo con imágenes satelitales

A diferencia de las técnicas de monitoreo que se realizan en superficie, las técnicas de sensores remotos, en particular por satélites, pueden cubrir grandes extensiones de terreno (miles de km de área). En el CENVUL, se utiliza rutinariamente las imágenes satelitales de manera individual por cada volcán.

Dependiendo del tipo de imagen satelital, se monitorea una amplia gama de procesos volcánicos que incluyen la dispersión de ceniza volcánica y gases generados por erupciones explosivas, crecimiento de domo de lava, emplazamiento de flujos de lava y flujos piroclásticos, cambios topográficos y emisiones del gas SO<sub>2</sub>.

En el CENVUL, se usan datos satelitales que varían ampliamente con respecto a la cobertura espectral (UV, visible, IR medio, IR térmico y microondas), la resolución espacial (centímetros a decenas de kilómetros) y la resolución temporal (15 minutos a varias semanas).

Las imágenes de satélite que el CENVUL utiliza son descargadas de plataformas virtuales libres; posteriormente, son almacenadas en un servidor NAS. En virtud de este trabajo, se realizan las siguientes tareas de monitoreo: determinación de dirección de dispersión de ceniza volcánica, caracterización de anomalías térmicas, detección de emisiones de SO<sub>2</sub>, detección de cambios en la morfología del volcán y pronóstico de dispersión de cenizas con ayuda del programa ASH 3D.

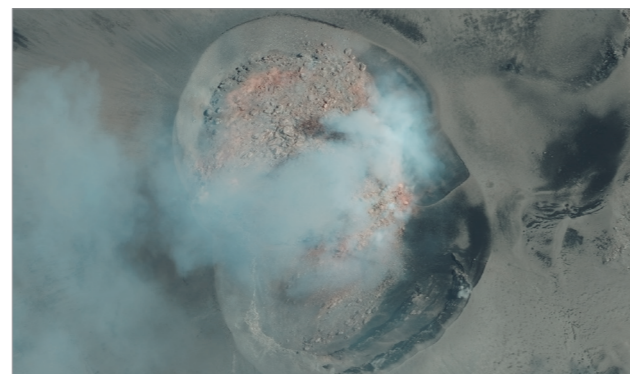


Figura 8.- Imagen del cráter del volcán Sabancaya (noviembre de 2019) donde se distingue un domo de lava. Foto: Digital Globe

#### Geoquímica de gases

Al interior de los volcanes, los gases magmáticos circulan por un sistema de fracturas interactuando con los acuíferos y las rocas encajonantes; posteriormente, salen hacia la superficie en forma de fumarolas. Más del 90 % del gas emitido en

las emanaciones volcánicas es vapor de agua. Le siguen en abundancia los gases CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y, en menor proporción, HCl, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HF, CO, CH<sub>4</sub>, B, Li, halógenos, gases raros, etc.

En el marco del proyecto de "Mejoramiento y Ampliación del Sistema de Alerta Volcánica en el Sur del Perú", el Instituto Geofísico del Perú ha adquirido 6 equipos DOAS (espectrómetro de absorción diferencial) que miden el flujo del gas volcánico SO<sub>2</sub>, gas presente antes y durante las erupciones volcánicas. Dicho equipos serán instalados próximamente en diferentes volcanes activos.



Figura 9.- Equipos DOAS adquiridos por el IGP en el marco del proyecto de "Mejoramiento y Ampliación del Sistema de Alerta Volcánica en el Perú."

#### Geoelectrica

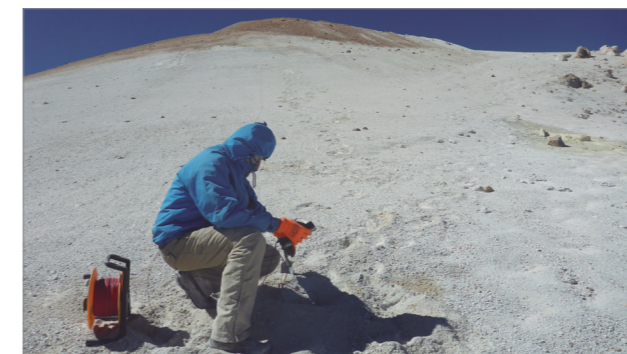


Figura 10.- Mediciones de Potencial Espontáneo en el volcán Ticsani realizadas en 2017.

Es un método geofísico bastante económico y de fácil uso que permite conocer el potencial eléctrico natural de la tierra tomando como referencia dos puntos sobre un terreno.

La aplicación de este método en volcanes activos devela la distribución de fuentes térmicas, así como el límite estructural a profundidades muy someras. La detección depende principalmente de la frecuencia de muestreo. De aplicarse periódicamente, este

método puede mostrar la dinámica o comportamiento del sistema hidrotermal de un volcán frente al ascenso del magma. La presencia de un sistema hidrotermal en un volcán se pone de manifiesto por la actividad fumarólica y presencia de fuentes termales.

Esta técnica se viene aplicando en el monitoreo de los volcanes Misti, Ubinas, Sabancaya y Ticsani.

#### Monitoreo de procesos volcánicos superficiales

Este trabajo de monitoreo comprende dos actividades:

##### • Evolución de procesos volcánicos

Los volcanes, desde el inicio de su reactivación, emiten diversos tipos de productos que deben ser analizados para prever su comportamiento futuro a corto y mediano plazo. Además, en procesos eruptivos existe la aparición de grietas, emisiones de gases en algunos sectores del volcán, presencia de lava, domos, etc., fenómenos que deben ser analizados de manera visual o con ayuda de drones para descartar posibles eventos desastrosos. Para ello, es necesario realizar visitas rápidas a los volcanes en actividad.

##### • Modelamiento de procesos

Uno de las funciones del CENVUL es emitir las alertas oportunas sobre la ocurrencia de lahares, flujos piroclásticos y avalanchas de escombros, para lo cual se realiza el modelamiento numérico de los flujos de origen volcánico. Esta actividad se efectúa con el propósito de elaborar pronósticos y obtener información de escenarios de peligros, generando así productos útiles para las autoridades y poblaciones asentadas en áreas aledañas a los volcanes.

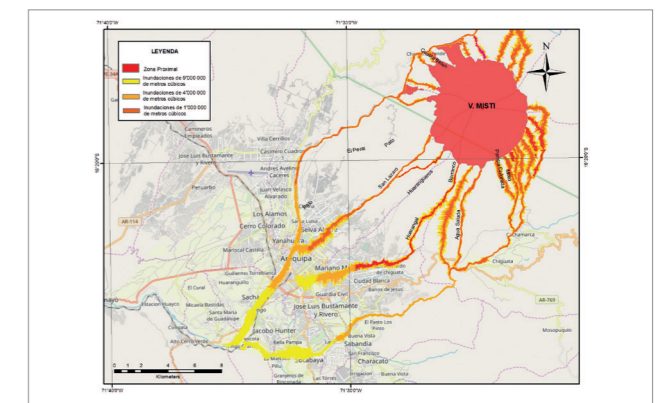


Figura 11.- Modelamiento por descenso de lahares a través de las principales quebradas del volcán Misti.

## 4.- PRODUCTOS

### Emisión de alertas, reportes y boletines vulcanológicos

El CENVUL es el servicio oficial del Estado responsable de emitir alertas, reportes y boletines oficiales sobre la actividad volcánica. Los reportes vulcanológicos se emiten de manera rápida con información precisa que describe las características de la actividad volcánica ocurrida, además de proporcionar pronósticos. Por su parte, los boletines vulcanológicos son documentos detallados que incluyen el análisis e interpretación de datos geofísicos que describen el comportamiento dinámico de un volcán en un periodo determinado. La emisión de cada uno de estos documentos se realiza en función del grado de actividad de un volcán.

#### • Reporte vulcanológico

En volcanes en alerta amarilla, se emite un reporte de manera diaria.  
En volcanes en alerta naranja, se emite un reporte diario como mínimo.  
En volcanes en alerta roja, se emiten dos reportes diarios. Si la situación lo amerita, se emiten algunos reportes complementarios.



Figura 12.- Reporte vulcanológico n.º 016-2019 emitido en el contexto del proceso eruptivo del volcán Ubinas.

#### • Boletín vulcanológico

En volcanes en alerta verde, se emite un boletín de manera quincenal o mensual.  
En volcanes en alerta amarilla, se emite un boletín de manera semanal o quincenal.  
En volcanes en alerta naranja, se emite un boletín de manera semanal.  
En volcanes en alerta roja, se emite un boletín de manera diaria.

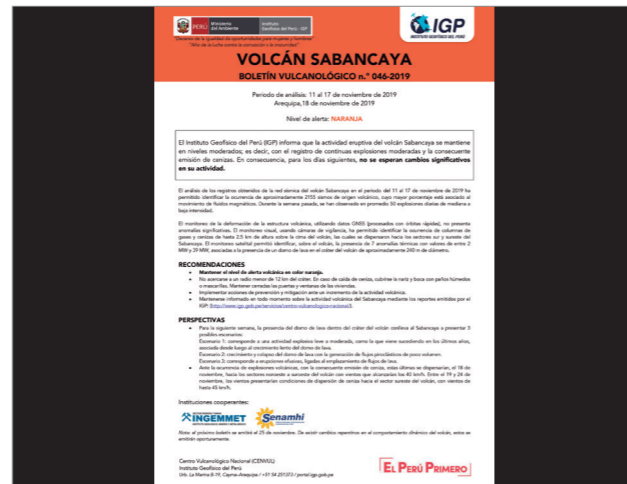


Figura 13.- Boletín vulcanológico n.º 046-2019 del volcán Sabancaya que incluye el análisis de su actividad entre el 11 y 17 de noviembre.

#### • Alerta de dispersión de cenizas

Las alertas de dispersión de ceniza contienen información de la dirección y el radio de dispersión de las cenizas. También, mencionan los pueblos o zonas posiblemente afectadas, la altura de la columna eruptiva, la fecha y hora del evento, observaciones y recomendaciones. Las alertas son enviadas inmediatamente cuando ocurre un evento explosivo.

#### • Alerta de lahar

La generación de lahares o flujos de barro está relacionada, principalmente, al periodo de lluvias. Se estima que la velocidad de desplazamiento de los lahares oscila entre 10 y 20 km/h (por ejemplo, caso del volcán Misti). Al emitirse inmediatamente una alerta de lahar, se determina, en lo posible, el área de influencia del fenómeno y el tiempo de arribo del flujo a la población.

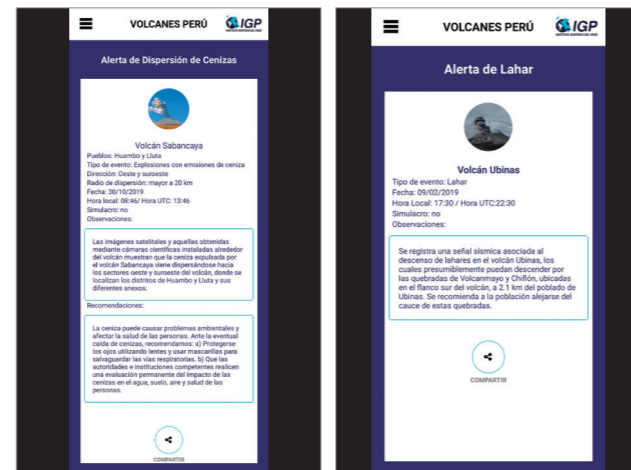


Figura 14.- Modelo de alerta de dispersión de cenizas y de alerta de lahar enviadas a través de la aplicación móvil Volcanes Perú.

## 5.- GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO

Uno de los aspectos más importantes para construir una cultura de prevención de desastres en nuestra sociedad es la implementación de acciones de educación y de difusión con base en la información técnico-científica. En el marco de las funciones del Instituto Geofísico del Perú y dentro del Modelo de Gestión del Conocimiento científico con valor social y gerencia pública, especialmente en la cadena de valor en la producción del conocimiento científico del IGP, existe un área dedicada a la "Gestión del Conocimiento", cuyas principales actividades están abocadas a generar y transferir conocimiento científico integrado y actualizado, buscando su aplicación en el planeamiento del uso del territorio, prevención, atención y mitigación de desastres.

### Asesoramiento a las autoridades de los diversos niveles de gobierno

El IGP es integrante de las Plataformas de Defensa Civil de los gobiernos regionales y locales del sur peruano, así como también de las diferentes instituciones gubernamentales inmersas dentro del SINAGERD. Para tales casos, se participa en la elaboración de planes de contingencia volcánica, simulacros de evacuación por erupción volcánica, charlas, talleres de capacitación a las autoridades. Asimismo, se propicia eventos nacionales e internacionales relacionados a la actividad volcánica y a la gestión del riesgo volcánico, entre otros.



Figura 15.- A) Asesoramiento a autoridades del INDECI sobre la evolución del proceso eruptivo del volcán Ubinas. B) Participación en la reunión de la Plataforma Regional de Defensa Civil del Gobierno Regional de Moquegua, realizada el 19 de julio de 2019 tras la violenta actividad explosiva del volcán Ubinas.

## Trabajos con la comunidad

Talleres, seminarios, charlas de capacitación dirigidas a pobladores, autoridades, instituciones públicas y privadas, etc. son efectuados por el CENVUL, teniendo en cuenta que las personas mejor informadas y sensibilizadas en temas relacionados a la actividad volcánica tienen una mejor percepción del riesgo y capacidad de respuesta. El Instituto Geofísico del Perú capacita a poblaciones vulnerables, lo cual facilita el trabajo de las autoridades, especialmente para el caso de evacuación de la población hacia zonas seguras.



Figura 16.- Capacitación a los estudiantes de la I.E. Maucallacta, en la comunidad de Pucuncho, próxima al volcán Coropuna.

## Elaboración de materiales de difusión

El IGP, a través de los especialistas del CENVUL, viene realizando el diseño y diagramación de diferentes tipos de materiales de difusión con la intención de educar y sensibilizar a las comunidades que habitan zonas de riesgo volcánico. Estos materiales son elaborados empleando un lenguaje sencillo, didáctico y con conocimientos básicos, en los cuales se explican los tipos de procesos volcánicos y acciones a implementarse antes, durante y después de una crisis volcánica.



Figura 17.- Cuadríplico informativo sobre el volcán Ubinas, métodos de monitoreo empleados por el IGP y peligros asociados a una erupción volcánica.

# INVESTIGACIÓN

## APORTES DEL MONITOREO GEOFÍSICO EN EL MANEJO DE CRISIS DEL VOLCÁN UBINAS: ACTIVIDAD ERUPTIVA 2019

José Del Carpio<sup>1</sup>, Marco Rivera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú

### RESUMEN

El Ubinas es considerado como el volcán más activo del Perú; en junio de 2019, inició un nuevo proceso eruptivo. Antes y durante dicho proceso, el Instituto Geofísico del Perú (IGP), a través del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), realizó un pronóstico exitoso de explosiones volcánicas basado en la interpretación de señales sísmicas. Gracias al análisis de la información geofísica registrada en el anterior proceso eruptivo, ocurrido entre 2013 y 2017, se ha logrado identificar un patrón sísmico (ABC); es decir, una secuencia ordenada de sismos que ocurren antes de la fase explosiva. Este patrón está compuesto por tres fases: la fase A corresponde al registro de sismos de tipo Volcano-Tectónicos (VT) y Tornillos que estarían asociados a intrusiones de magma y al incremento de la presión interna del sistema; además, se registran tremores sísmicos. Durante la fase B se registra el incremento de señales sísmicas de tipo Híbrido que estarían relacionadas con el ascenso de magma. Finalmente, en la fase C se registran las primeras explosiones y emisiones de tefras.

Este patrón ABC ha correlacionado la actividad preeruptiva y eruptiva con los niveles de alerta volcánica (verde, amarillo, naranja y rojo), generando la oportuna emisión de alertas volcánicas que han permitido informar a las autoridades competentes en la gestión del riesgo, quienes respondieron anticipadamente frente al desarrollo de una erupción volcánica en beneficio de la población.

### ABSTRACT

*Ubinas is considered the most active volcano in Peru; in June 2019, a new eruptive process began. Before and during this process, the Geophysical Institute of Peru (IGP), through the National Vulcanological Center (CENVUL), made a successful forecast of volcanic explosions based on the interpretation of seismic signals. Thanks to the analysis of the geophysical information recorded in the previous eruptive process, which occurred between 2013 and 2017, it has been possible to identify a seismic pattern (ABC); that is, an orderly sequence of earthquakes that occur before the explosive phase. This pattern is composed of*

*three phases: phase A corresponds to the registration of Volcano-Tectonic (VT) and Screw type earthquakes that would be associated with magma intrusions and the increase in the internal pressure of the system; in addition, seismic tremors are recorded. During phase B the increase in seismic signals of the Hybrid type that would be related to the rise of magma is recorded. Finally, in phase C the first explosions and emissions of tephra are recorded.*

*This ABC pattern has correlated the preeruptive and eruptive activity with the volcanic alert levels (green, yellow, orange and red), generating the timely issuance of volcanic alerts that have allowed the competent authorities in risk management to be informed, who responded early against the development of a volcanic eruption for the benefit of the population.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El IGP, de acuerdo a investigaciones geofísicas realizadas desde el año 2013, ha reconocido un patrón de eventos sísmicos que se registran antes del inicio de las explosiones o erupciones volcánicas en el Ubinas. Esta secuencia de señales sísmicas ha permitido a los especialistas realizar pronósticos de erupciones volcánicas, anticipándose al inicio de los episodios explosivos del volcán Ubinas en los años 2014, 2015, 2016 (proceso eruptivo 2013-2017) y 2019.

Gracias al pronóstico, el CENVUL cumple su rol de alertar oportunamente a las autoridades y población sobre la ocurrencia de una erupción volcánica, lo que permite que las instituciones competentes en la gestión del riesgo puedan responder a tiempo en beneficio de la población.

### 2. DATOS Y METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO

Durante el periodo de análisis 2013-2017, el IGP realizó el procesamiento de 251 354 señales sísmicas, registrando sismos asociados a procesos de ruptura o fractura de rocas (sismos VT), movimiento de fluidos volcánicos como gases y magma (sismos de tipo LP e Híbridos), así como señales relacionadas

Toma de punto de control GPS en las inmediaciones del volcán Coropuna.

a explosiones y emisión de tefras (Tremor sísmico). Se ha identificado que antes del registro de los episodios explosivos de los años 2014, 2015 y 2016, estos tipos de eventos sísmicos se repetían ordenadamente formando una secuencia o patrón antes de la erupción. Las características de tales señales se detallan a continuación:

### Sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT)

Son sismos producidos por el fracturamiento de rocas dentro del edificio volcánico o próximo a él como resultado de esfuerzos causados, principalmente, por la presión de fluidos volcánicos (gases, magma, etc.) (figura 1A).

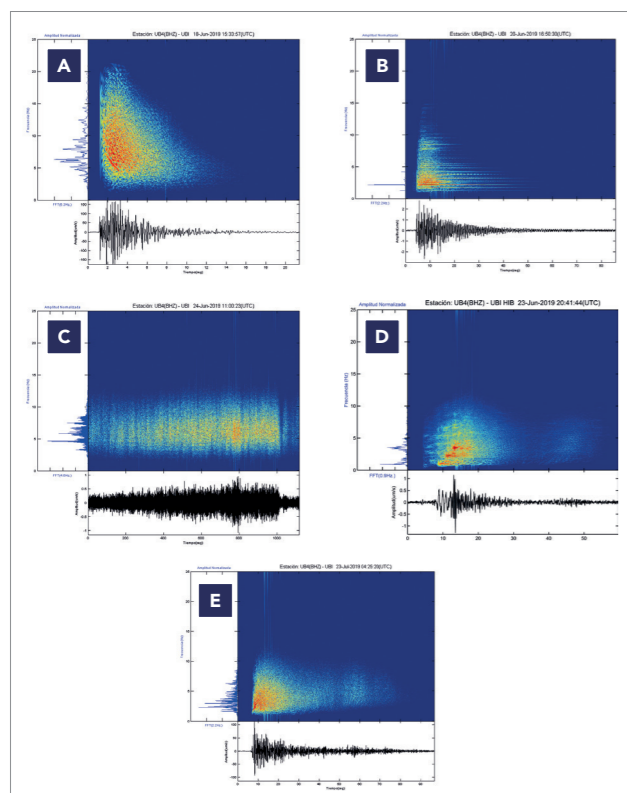


Figura 1.- A) sismo de tipo VT, B) señal sísmica de tipo Tornillo, C) Tremor sísmico, D) señal sísmica de tipo Híbrido y E) explosión volcánica.

### Sismos de tipo Tornillo

El término Tornillo fue acuñado por la forma de la señal sísmica. La fuente de los eventos de tipo Tornillo tendría su origen en la resonancia de una grieta llena de fluidos. Estos sismos denotan el incremento de la presión interna del sistema volcánico. Ver figura 1b.

### Tremores sísmicos

Los tremores sísmicos (figura 1c) están relacionados a la perturbación del sistema hidrotermal como consecuencia del ascenso del magma hacia la

superficie. La señal sísmica puede durar por varios minutos, horas o días.

### Sismos de tipo Híbrido

Este tipo de eventos (figura 1d) están asociados al ascenso de magma. La señal sísmica indicaría el transporte a presión del magma hasta cercanías de la superficie, provocando rupturas en las paredes del conducto volcánico.

### Explosión volcánica

Una explosión genera una señal sísmica de alta energía (figura 1e). Inmediatamente generada la explosión, se registra el Tremor Espasmódico asociado con la expulsión de cenizas y gases hacia la atmósfera.

## 3. RESULTADOS

El análisis sísmico del proceso eruptivo 2013-2017 ha permitido identificar una secuencia de eventos sismovolcánicos registrados previo al inicio de un proceso eruptivo (Del Carpio et al., 2016). Dicha secuencia constituye un patrón sísmico que ha sido dividido en tres fases (ABC) de acuerdo al tipo de sismos identificados:

Fase A: ocurrida al inicio del proceso eruptivo. Se caracteriza por el registro de sismos de tipo VT y Tornillos ligados a la presurización del sistema volcánico debido a la presencia de mayor cantidad de gases y magma. Incluye, también, la aparición de sismos de tipo Tremor vinculados a la vibración sísmica al nivel del sistema hidrotermal, producto de la influencia y cercanía del magma en ascenso hacia la superficie.

Fase B: se caracteriza por el registro de un mayor número de sismos de tipo Híbrido que sugieren el ascenso del magma hacia la superficie.

Fase C: se caracteriza por el registro de explosiones volcánicas, sugiriendo el inicio de una erupción volcánica con emisiones de grandes volúmenes de tefras (ceniza, escoria, bloques, etc).

## 4. ACTIVIDAD SÍSMICA Y NIVELES DE ALERTA VOLCÁNICA

Durante el registro de la Fase A, es decir, debido a la presencia de sismos VT y sismos tipo Tornillos, el IGP, según protocolo interno, recomienda elevar el nivel de alerta volcánica de color verde a amarillo (figura 2).

En la Fase B se empiezan a registrar sismos de tipo

Híbrido, los que se incrementan con el transcurrir de horas o días tanto en el número como en energía. En esta fase, las probabilidades del desarrollo de una erupción volcánica se incrementan y, en ocasiones, es inminente. Durante la fase B pueden ocurrir explosiones volcánicas. En ese escenario, el IGP recomienda elevar el nivel de alerta amarilla a color naranja (figura 2).

Finalmente, la fase C corresponde al inicio de una erupción explosiva con un IEV $\geq$ 2, caracterizada por la emisión de cenizas, escorias (tefras) y, eventualmente, flujos piroclásticos (figura 2).

El pronóstico fue aplicado con éxito en los episodios eruptivos de los años 2014, 2015 y 2016 (proceso eruptivo de 2013-2017) y, actualmente, en 2019.

## 5. PRONÓSTICO EXITOSO DE ERUPCIÓN DEL VOLCÁN UBINAS EN 2019

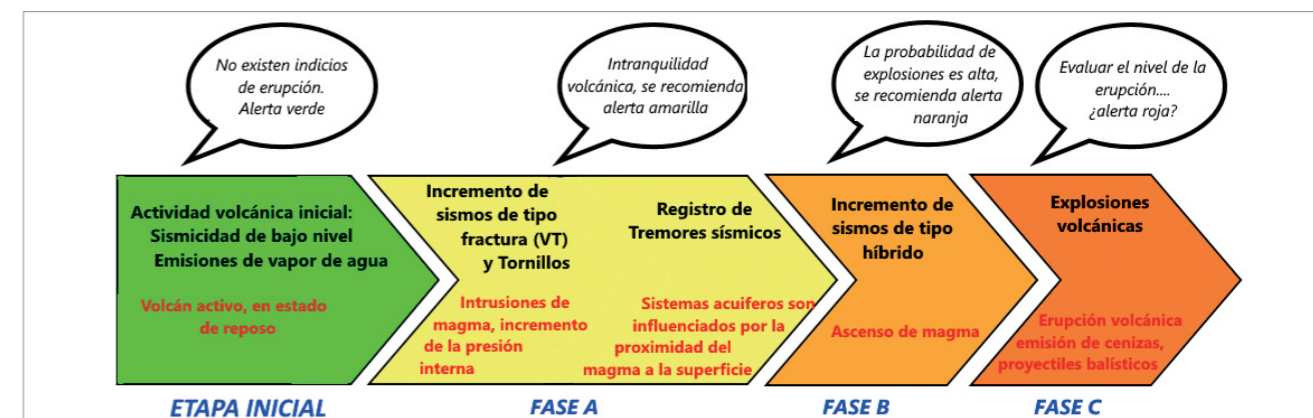


Figura 2.- Las tres fases (ABC) de distinta actividad sísmica están representadas por flechas de color diferente. En el gráfico se detalla el tipo de actividad sísmica y el proceso volcánico que se desarrolla. De acuerdo a parámetros geofísicos, se realizan las recomendaciones de cambio de nivel de alerta volcánica.

El comportamiento dinámico del volcán Ubinas, observado después de su último proceso eruptivo (2013-2017), mostró la disminución de diversos parámetros geofísicos. En este contexto, su nivel de actividad registrado entre marzo de 2017 y junio de 2019 era considerado bajo y se encontraba en alerta verde, tal como consta en los reportes de monitoreo emitidos por el IGP. Esta situación cambió a partir del 18 de junio de 2019, cuando el CENVUL detectó las primeras señales de intranquilidad volcánica.

A continuación, se detalla el proceso eruptivo dividido en tres fases de actividad sismovolcánica tomando en cuenta el pronóstico de erupciones ABC:

### FASE A: intranquilidad volcánica

Correspondió a la detección temprana de 33 sismos de tipo VT registrados el día 18 de junio en forma de enjambre sísmico. Un enjambre sísmico es un grupo de sismos de magnitudes similares registrados en un corto periodo de tiempo y en una misma área.

Posteriormente, desde el 19 de junio se registraron los primeros sismos de tipo Tornillo, los mismos que empezaron a incrementarse a una tasa promedio de 6 señales sísmicas por día hasta el inicio de la erupción ocurrida el 24 de junio. La fase A del

pronóstico eruptivo fue reportada en los boletines vulcanológicos del IGP n.º 012-2019 y n.º 013-2019, emitidos los días 18 y 21 de junio de 2019, respectivamente.

Hasta ese momento, se recomendó al Gobierno Regional de Moquegua (GRM) elevar el nivel de alerta volcánica de color verde a amarillo, el mismo que fue oficializado por el GRM según la Resolución Ejecutiva Regional n.º 282-2019-GR/MOQ.

### FASE B: incremento de señales sísmicas asociadas al ascenso de magma

Del 30 de junio al 13 de julio de 2019, el registro de señales sísmicas de tipo Híbrido, asociadas al ascenso de magma en el Ubinas, era constante y en alza con la ocurrencia promedio de 26 eventos por día. Entre el 14 y 18 de julio, previo a la fase explosiva del 19 de julio, el número promedio de sismos de tipo Híbrido disminuyó abruptamente a una tasa de 3 sismos por día. En este contexto, se evidencia, mediante imágenes satelitales Sentinel-2, la presencia de un cuerpo de lava en el fondo del cráter del Ubinas, el cual arribó a la superficie entre el 15 y 19 de julio.

Los boletines vulcanológicos n.º 015-2019 y n.º 016-2019 emitidos por el IGP dan detalle del incremento de las señales sísmicas de tipo Híbrido. Esto indicaba, además, la probabilidad del registro de explosiones volcánicas.

## FASE C: explosiones volcánicas

En el proceso eruptivo 2019, la fase explosiva mayor fue registrada el 19 de julio, día durante el cual se registraron hasta tres explosiones consecutivas a las 02:27 h, 02:48 h y 03:09 h. Las explosiones emitieron volúmenes de cenizas y gases volcánicos en cantidades no vistas en actividades eruptivas recientes del Ubinas.

Las cenizas fueron dispersadas hacia los sectores este y sureste del cráter (figura 4), alcanzando distancias mayores a los 250 km y afectando las regiones de Moquegua, Puno y Tacna; además, llegaron a algunas ciudades de Bolivia como La Paz. La población e infraestructura de las regiones de Moquegua, Tacna y Puno afectada por esta actividad eruptiva ascendió a 29 703 habitantes, 617 instituciones educativas y 20 establecimientos de salud (Reporte Complementario n.º 1528-21/07/2019/COEN-INDECI, Reporte n.º 04).

El día 19 de julio, en horas de la madrugada, el IGP, mediante el boletín vulcanológico n.º 017-2019, recomendó elevar el nivel de alerta de color amarillo a naranja; este incremento de nivel de alerta fue aprobado según Resolución Ejecutiva Regional n.º 306-2019-GR/MOQ. Este nuevo nivel de alerta involucraba implementar acciones de contingencia ante la caída de ceniza volcánica, así como iniciar la evacuación de los centros poblados asentados en un radio de hasta 15 km del volcán hacia el refugio provisional de Anascapa.

## 4. FUTUROS ESCENARIOS ERUPTIVOS

### Primer escenario

Considera que la actividad explosiva leve a moderada del Ubinas cese y este volcán permanezca por varios meses o años en calma.

### Segundo escenario

Considera una reactivación del Ubinas en los próximos meses, con erupciones leves a moderadas de tipo vulcaniana que continuarían generando caída de ceniza y, eventualmente, emitiendo bloques incandescentes en áreas aledañas al volcán (en un radio de 2-3 km del cráter). Durante una erupción de tipo vulcaniana con IEV 2, pueden producirse flujos

piroclásticos de poco volumen que descenderían a más de 3 km del cráter.

### Tercer escenario

La actividad del volcán Ubinas puede ser aún más explosiva y violenta que la registrada el 19 de julio de 2019, la que generaría caída de cenizas y, eventualmente, emitiría bloques incandescentes en áreas aledañas al volcán (en un radio mayor de 2 km del cráter). Durante una erupción de tipo vulcaniana con IEV 3, como la que ha presentado el Ubinas en 1677, podrían producirse flujos piroclásticos que descenderían a más de 4 km del volcán. La posibilidad de ocurrencia de flujos piroclásticos en el volcán Ubinas es de baja a moderada. Una erupción explosiva con IEV 3 podría incluso desestabilizar un sector del flanco sur del Ubinas, provocando su derrumbe y produciendo depósitos de avalanchas de escombros que alcanzarían distancias mayores a 6 km del volcán.

## CONCLUSIONES

Se ha desarrollado y aplicado con éxito un modelo de pronóstico de erupciones volcánicas que ha beneficiado a la población del valle de Ubinas, al alertar oportunamente a las autoridades en todos los niveles de gobierno sobre el desarrollo de un nuevo proceso eruptivo del volcán Ubinas ocurrido en junio de 2019.

Con base en el comportamiento presentado durante los últimos 500 años, actividad reciente (2006-2009; 2013-2017) y en los datos de monitoreo que maneja el CENVUL, se presentan tres escenarios para el volcán Ubinas: 1) Primer escenario: considera que la actividad cese y este volcán permanezca por varios meses o años en calma. 2) Segundo escenario: considera una reactivación del Ubinas durante los próximos meses, con erupciones leves a moderadas (IEV 3). Tercer escenario: la actividad del volcán Ubinas podría ser aún más explosiva que la registrada el 19 de julio de 2019, alcanzando incluso un IEV 3.

## REFERENCIA

- COEN, 2019. Explosión volcánica afecta a los departamentos de Moquegua, Arequipa, Tacna y Puno. Reporte Complementario n.º 1528 - 21/07/2019 / COEN-INDECI.
- Del Carpio J., Macedo O., Puma N., Centeno R., Torres J., Cruz J., 2016. Características de la actividad sísmica en el proceso eruptivo 2013-2015 del volcán Ubinas. XVIII Congreso Peruano de Geología.

# NUEVAS INTRUSIONES DE MAGMA EN EL VOLCÁN SABANCAYA EN 2019 Y APARICIÓN DE UN DOMO DE LAVA EN EL CRÁTER

Nino Puma<sup>1</sup>, Marco Rivera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú

## RESUMEN

Desde el inicio del proceso eruptivo del volcán Sabancaya en noviembre de 2016 hasta octubre de 2019, la actividad explosiva ha venido registrando variaciones tanto en número como en energía, lográndose distinguir tres etapas claras en la actividad volcánica. El presente artículo se enfoca en la última etapa (Etapa III) iniciada en abril de 2019, durante la cual se ha registrado una perturbación en el sistema volcánico evidenciada con la variación de los parámetros sísmicos, térmicos y de deformación. La sismicidad durante esta etapa muestra cuatro intrusiones magmáticas, representadas por la ocurrencia de sismos volcánicos de tipo VT (Volcano-Tectónico) o de ruptura.

Según estudios con métodos INSAR (Pritchard & Simons, 2002 y González et al. 2009), GPS y sismicidad, el Sabancaya presentaría dos cámaras magmáticas: una profunda ubicada a 7 km al norte del Sabancaya y otra superficial. Los enjambres sísmicos de tipo VT (intrusiones) ocurren siempre lejos del cráter del volcán, principalmente en la zona norte. Estos enjambres estarían ligados a los aportes de magma hacia la cámara profunda, tras lo cual el magma migraría hacia la cámara superficial del Sabancaya generando a su paso el incremento de sismos de tipo Largo Periodo (LP: asociados a movimiento de fluidos). Ya en los últimos kilómetros de recorrido hacia la superficie, el magma generaría sismos de tipo Híbrido en número y energía importantes. Finalmente, el magma sería expulsado generando el incremento de las explosiones.

La actividad eruptiva, desde su inicio en noviembre de 2016, ha puesto de manifiesto la presencia de un domo (cuerpo de lava) que ha venido creciendo de manera lenta y constante; sin embargo, desde abril de 2019 el crecimiento se ha acelerado. Después de las dos últimas intrusiones (agosto de 2019 y septiembre de 2019), este cuerpo de lava experimentó una ligera aceleración en su crecimiento.

## ABSTRACT

*From the beginning of the eruptive process of the Sabancaya volcano in November 2016 to October*

*2019, the explosive activity has been registering variations in both number and energy, being able to distinguish three clear stages in volcanic activity. This article focuses on the last stage (Stage III) that began in April 2019, during which there was a disturbance in the volcanic system evidenced by the variation of the seismic, thermal and deformation parameters. The seismicity during this stage shows four magmatic intrusions, represented by the occurrence of volcanic earthquakes of type VT (Volcano-Tectonic) or rupture.*

*According to INSAR studies (Pritchard & Simons, 2002 and Gonzales et al. 2009), GPS and seismicity, Sabancaya volcano would show two magma chambers: one deep located 7 km north of the Sabancaya and another superficial. VT seismic swarms (intrusions) always occur far from the crater of the volcano, mainly in the north. These swarms would be linked to the contributions of magma to the deep chamber, after which the magma would migrate to the shallow chamber of the Sabancaya generating in its wake the increase of Long Period events (LP: associated with fluid movement). In the last kilometers to the surface, magma would generate earthquakes of Hybrid type in important numbers and energy. Finally, magma would be expelled generating the increase in explosions.*

*The eruptive activity, since its beginning in November 2016, has revealed the presence of a dome (lava body) that has been growing slowly and steadily; however, since April 2019 this growth has accelerated. After the last two intrusions (August and September 2019), this lava dome experienced a light acceleration in its growth.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El estratovolcán Sabancaya (193998E; 8252525N; 5967 m s.n.m.) está ubicado a 80 km al NNO de la ciudad de Arequipa. Su última erupción ocurrió entre 1990 y 1998, alcanzando un IEV de 3 (Siebert et al, 2011). En febrero de 2013, el volcán mostró indicios de reactivación reflejado en el incremento de la sismicidad y emisión de fumarolas. Después de casi cuatro años de intranquilidad, el Sabancaya inicia su proceso eruptivo en noviembre de 2016. Desde entonces, las explosiones han venido registrando variación en el número de ocurrencia diaria y su energía.

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) cuenta con una red de monitoreo compuesta por siete estaciones sísmicas, dos cámaras video científicas y una estación GPS (figura 1). En la presente investigación, se han analizado los datos obtenidos de diferentes métodos de monitoreo con el objetivo de entender mejor la evolución del actual proceso eruptivo 2016-2019, asociado al crecimiento del domo de lava visible en el cráter del volcán. Se resalta la actividad ocurrida durante el año 2019. Dentro de los parámetros evaluados, se observó un importante incremento en el número de sismos, principalmente en su energía. Los sismos de tipo VT registrados se presentaron a manera de enjambre, es decir, en agrupaciones de sismos (Wassermann, 2012) que fueron creciendo en el número de sismos en cada enjambre. La deformación muestra una tendencia positiva en la componente vertical (inflación). Del mismo modo, el parámetro de temperatura se ha visto incrementado. Adicionalmente, se han analizado imágenes satelitales y realizado estudios de fotogrametría para correlacionar la aparición y crecimiento del domo emplazado en el cráter del Sabancaya.

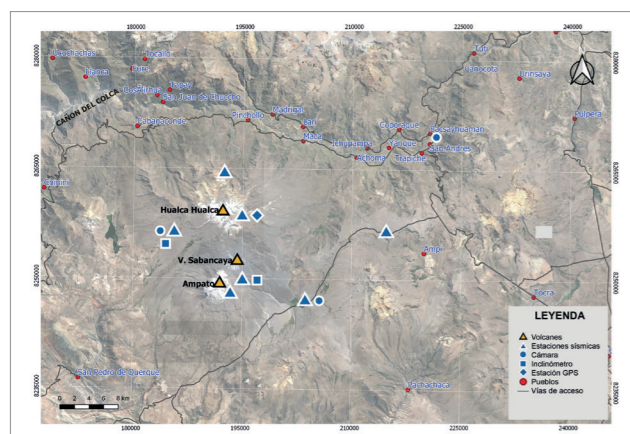


Figura 1. Mapa de ubicación del volcán Sabancaya, la red de monitoreo y los principales centros poblados y vías de acceso.

## 2. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

El IGP vigila permanentemente la actividad del volcán Sabancaya desde febrero de 2013. El procesamiento de los datos sísmicos se realizó siguiendo la clasificación propuesta por Wassermann (2011) y White & McCausland (2016). Además, se realizó el cálculo de la energía sísmica mediante la ecuación propuesta por Johnson & Aster (2005).

El Sabancaya, desde el inicio de su actividad eruptiva ocurrida en noviembre de 2016 hasta octubre de 2019, ha venido registrando explosiones volcánicas que variaron en número y energía. Gracias al monitoreo geofísico, geodésico, geoquímico y visual

que realiza el CENVUL de manera permanente, se han podido determinar tres etapas de actividad (figuras 2A y 2B) descritas a continuación:

Etapa I (noviembre de 2016 a enero de 2017): se registró un mayor número de explosiones (hasta 110 eventos por día), con energías que fueron experimentando un incremento sostenido hasta fines de esta etapa. Etapa II (febrero de 2018 hasta marzo de 2019): el número y la energía de las explosiones se mantuvieron constantes, con un promedio de 21 explosiones por día que tuvieron energías del orden de 20 Megajoules (MJ). Etapa III (abril a octubre de 2019): se registró un ligero incremento en el número de explosiones (promedio de 24 explosiones por día); sin embargo, se observó que las energías de las explosiones se incrementaron, alcanzando valores de hasta 373 MJ el día 12 de abril de 2019.

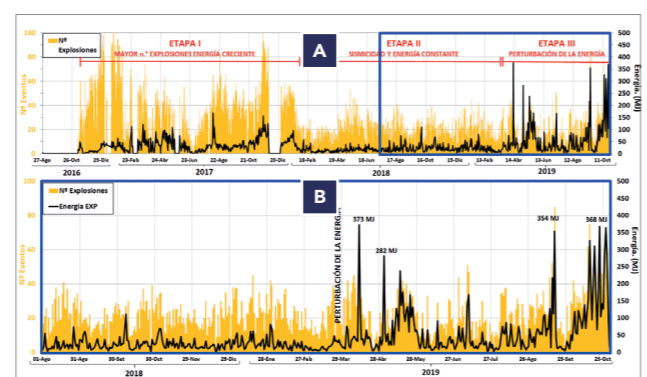


Figura 2.- Muestra el número (barras de color amarillo) y la energía (línea negra) de las explosiones desde el inicio del proceso eruptivo. A) Etapas de las explosiones desde el inicio del proceso eruptivo. B) Acercamiento y detalle de la Etapa III (recuadro azul), donde se observa un ligero incremento de explosiones y la energía (agosto de 2018 a octubre de 2019).

## 3. ENJAMBRES REGISTRADOS EN 2019

### Sismicidad

La sismicidad de tipo Volcano-Tectónico o de fractura ha sido localizada a 7 km al norte del Sabancaya, en forma de enjambres (agrupación de sismos en tiempo y espacio). Desde abril hasta octubre de 2019, se han registrado cuatro enjambres de sismos (figura 3A).

#### • Primer enjambre (abril de 2019)

No es muy notorio debido a que se han presentado problemas técnicos; sin embargo, se registró un sismo de magnitud M3.6, apreciándose la perturbación en todos los parámetros sísmicos. Después de esta actividad, ocurrieron eventos de tipo Híbrido con energías de hasta 5.7 MJ, este último registrado el

12 de mayo (figura 5B).

#### • Segundo enjambre (mayo-junio de 2019)

Se presentó entre el 21 de mayo y 4 de junio, registrando un pico de 449 sismos de tipo VT por día con magnitudes de hasta M4.1 el 21 de mayo. Posteriormente, se registraron eventos de tipo Híbrido con energías de hasta 4.7 MJ, ocurrido el 27 de julio.

#### • Tercer enjambre (agosto de 2019)

Se presentó entre el 12 de agosto y el 4 de septiembre, registrando un pico de 1057 sismos de tipo VT por día con magnitudes de hasta M3.7, este último registrado el 14 de agosto. Posteriormente, ocurrieron sismos de tipo Híbrido durante cinco días con energías de hasta 2.6 MJ, este último registrado el 9 de septiembre.

#### • Cuarto enjambre (septiembre de 2019)

Se presentó entre el 15 y 27 de septiembre, registrando un pico de 730 sismos de tipo VT por día con magnitudes de hasta M3.7. Este último registrado el 16 de septiembre. Posteriormente, ocurrieron sismos de tipo Híbrido con energías de hasta 5.8 MJ, este último registrado el 16 de octubre.

### Anomalías térmicas MIROVA

El sistema satelital MIROVA proporciona medidas de calor en volcanes a través de valores de Potencia Volcánica Irradiada (VPR). La figura 3 muestra que este parámetro también ha sido perturbado desde abril de 2019, registrando el incremento notorio de las anomalías.

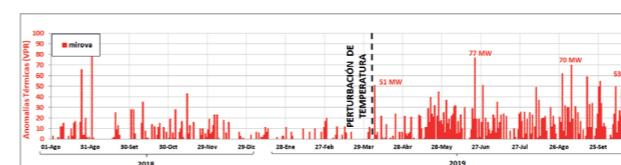


Figura 3.- Cuadro que muestra los valores de las anomalías térmicas (MIROVA) que indican una perturbación desde abril de 2019.

### Deformación GPS

La estación geodésica GNSS ubicada en el sector norte del volcán Sabancaya ha registrado un desplazamiento de aproximadamente 2.8 cm en la componente vertical (inflación), posiblemente ligada a nuevas intrusiones de magma. Esto ha sido evidenciado también por la ocurrencia de sismos en forma de enjambre. En la figura 4 se observa que la deformación se correlaciona

con el registro de la actividad sísmica de tipo enjambre ocurrida desde abril de 2019 hasta la actualidad. En ese periodo, se observa una tendencia positiva en los valores de deformación. Este incremento se acentúa con la ocurrencia de los enjambres sísmicos registrados en mayo (M4.1), agosto (M3.7) y el último en septiembre de 2019 (M3.7).

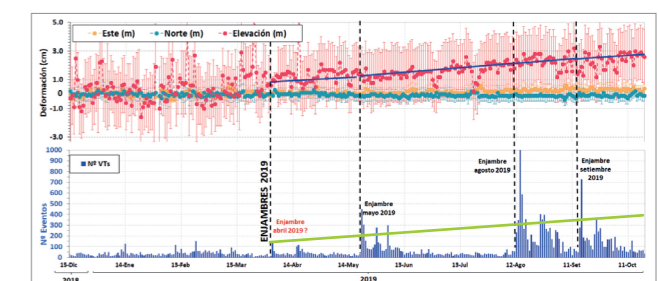


Figura 4.- Cuadro que muestra la correlación de la serie de tiempo GNSS con los enjambres de VT. La línea verde muestra una tendencia del desplazamiento.

## 4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

La deformación observada con datos INSAR (Pritchard & Simons, 2002, Gonzáles et al., (2009) y GPS diferencial, además de la sismicidad de tipo VT localizada principalmente en la zona norte, indican que el Sabancaya tendría una cámara magmática profunda al norte del Sabancaya y una superficial bajo el propio volcán. El ascenso del magma (intrusiones) hacia la cámara magmática profunda generaría presión en las capas de las rocas que se fracturarían al exceder su límite de resistencia, produciéndose así los enjambres de tipo VT (White & McCausland, 2016).

La interpretación de los diferentes parámetros de monitoreo indican que los cuatro enjambres sísmicos registrados desde abril de 2019 representarían nuevas intrusiones de magmas hacia la cámara profunda ubicada al norte del Sabancaya, generando así enjambres sísmicos lejos del volcán y perturbación en todo el sistema volcánico, proceso evidenciado en la variación de los parámetros sísmicos (figura 5), térmicos (figura 3) y de deformación (figura 4). Posteriormente, este magma migraría hacia la cámara superficial del Sabancaya, provocando a su paso sismicidad, principalmente de tipo LP (figura 5C). Al llegar a unos kilómetros cerca de la superficie, el magma en ascenso generaría los eventos Híbridos importantes con energías de 5.7 MJ, 4.7 MJ, 2.6 MJ y 5.8 MJ. Finalmente, el magma sería expulsado a la superficie por las explosiones que se registraron con energías importantes (figura 5D).

El incremento en el número y la energía de los sismos de tipo Híbrido y el posterior aumento de las explosiones (también en número y energía) están relacionados con la ocurrencia de intrusiones

o ascensos de magma; es decir, mientras mayor volumen tengan las intrusiones hacia la cámara profunda, los sismos de tipo Híbrido tendrán mayor energía, generando seguidamente un incremento de explosiones (energía de 463 MJ). Esto explicaría el importante incremento de las explosiones registrado en octubre de 2019 (figura 5D).

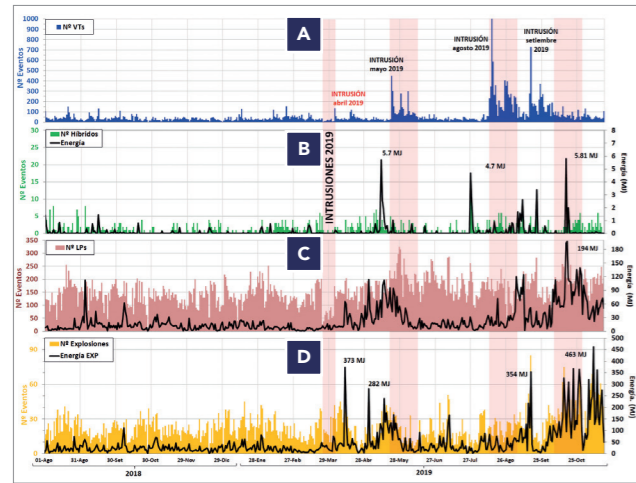


Figura 5.- Cuadro que muestra el número de sismos registrados en inmediaciones del Sabancaya (barras de color azul, verde, rojo y amarillo) y energía sísmica (línea negra). A) sismos de fractura (tipo VT) originados por las intrusiones. B) sismos de tipo Híbrido relacionados al ascenso de magma. C) sismos de tipo LP asociados al movimiento de fluidos y D) registro de las explosiones.

El análisis de las imágenes satelitales ha permitido observar el emplazamiento de un domo de lava desde el 2017, aunque con un crecimiento lento y constante. Desde el registro de las intrusiones en abril de 2019, el domo incrementó su crecimiento, el cual se ha acelerado en octubre de 2019 (figura 5), fecha en la que se observó el registro de Híbridos con energías importantes (M3.4 y M5.8) y el incremento del número y energía de las explosiones (figura 5D). Por otro lado, con el uso de técnicas de fotogrametría (foto del 17 de septiembre 2018), se ha desarrollado un DEM (Modelo de Elevación Digital) de 40 cm, el cual, al ser comparado con otras imágenes satelitales, ha demostrado un crecimiento del domo de 90 metros de altura aproximadamente desde septiembre de 2018 hasta octubre de 2019 (figura 6B).

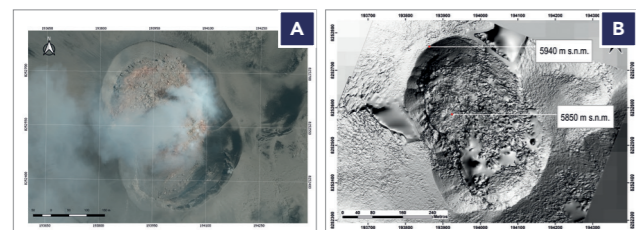


Figura 6.- Domo de lava emplazado en el cráter del volcán Sabancaya. A) Imagen satelital cortesía DIGITAL GLOBE de octubre de 2019. B) DEM de 40 cm de resolución obtenido a partir de levantamiento fotogramétrico.

## CONCLUSIONES

En el proceso eruptivo del Sabancaya iniciado en noviembre de 2016, y que continúa a la fecha, se han identificado tres etapas de actividad: Etapa I: caracterizada por la ocurrencia de numerosas explosiones con energías en ascenso. Etapa II: actividad sismovolcánica constante, tanto en número como en energía. Etapa III: incremento de actividad sismovolcánica.

Dentro de la última etapa (etapa III), específicamente desde abril de 2019, se han observado cuatro enjambres sísmicos asociados a intrusiones de magma en los meses de abril, mayo, agosto y septiembre; posterior a ello, se registraron eventos Híbridos ligados al ascenso de magma y su posterior expulsión mediante continuas explosiones.

Se ha observado un domo de lava de 240 m de diámetro en el cráter del volcán, el cual ha venido creciendo desde el año 2017. Su crecimiento se incrementó desde abril de 2019 y aceleró en octubre de 2019. Este proceso ha sido evidenciado por el incremento de sismos de tipo LP, Híbridos y explosiones.

## REFERENCIAS

- Gonzales K., Froger J. L., Audin L., Macedo O. (2009). Ejemplos de Deformación producto de la Tectónica extensiva en las zonas de Huambo-Cabanaconde en Arequipa y Calacoa-Huaytire en Moquegua de los Andes Centrales vistos por Interferometría Radar-InSAR. Bol. Soc. Geol. Perú 103, p. 109-124.
- Johnson J.B. and Aster R.C. (2005). Relative partitioning of acoustic and seismic energy during strombolian eruptions JVGR, 148, 334-354.
- Pritchard, M. E & Simons, M. (2002). A satellite geodetic survey of large-scale deformations of volcanic centres in the central Andes. Nature, 418(6894), 167-71.
- Sébrier, M.; Mercier, J.; Megard, F. & Laubacher, G. (1985). - Quaternary normal and reverse faulting and the State of Stress in the Central Andes of South Peru. Tectonics, vol. 4 p 739-780.
- Siebert, L., Simkin, T. and Kimberly, P. 2010. Volcanoes of the world. Third edition. Smithsonian Institution, University of California Press.
- Wassermann, J. (2012). Volcano Seismology, IASPEI New manual of seismological observatory practice 2. Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Second, edited by Peter Bormann p. 1-77.
- White R., & McCausland W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. Journal of Volcanology and Geothermal Research 309 (2016) 139-155.

# CAMBIOS MORFOLÓGICOS A PARTIR DE LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO EN EL VOLCÁN UBINAS, PROCESO ERUPTIVO 2019

Katherine Vargas<sup>1</sup>, John Cruz<sup>1</sup>, Juan Carlos Villegas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú

## RESUMEN

A raíz de la gran actividad explosiva presentada por el volcán Ubinas el 19 de julio de 2019, el Instituto Geofísico del Perú (IGP), a través del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), realizó trabajos de aerofotogrametría del cráter y flanco sur del volcán Ubinas, labores realizadas con ayuda de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) diseñado y desarrollado por el IGP, con la capacidad de adquirir información de volcanes con elevaciones por encima de los 6000 m s.n.m.

Este trabajo se realizó con la finalidad de evaluar e identificar los cambios morfológicos del cráter a fin de que sirva a las autoridades y población para la toma de decisiones en el marco de la Gestión de Riesgo de Desastres. Se han realizado seis sobrevuelos con una adquisición de 883 imágenes utilizadas para la elaboración de un Modelo de Elevación Digital (DEM) del terreno de 0.6 m de resolución espacial. Dicho DEM ha sido comparado con otro obtenido por el IGP en el año 2016 bajo la misma modalidad.

Los resultados obtenidos muestran que, en estos tres años, la morfología del cráter ha experimentado un cambio importante ligado a la acumulación de material volcánico (ceniza, bloques, etc.) producto de las explosiones suscitadas en el actual proceso eruptivo que ha rellenado su superficie. El cálculo efectuado precisa que el material de relleno tiene un volumen de ~2 640 000 m<sup>3</sup>. Por otro lado, los resultados muestran que, en caso de una gran erupción explosiva del Ubinas, una parte del flanco sur del volcán (con un volumen de ~1 021 400 m<sup>3</sup>) podría colapsar hacia la quebrada Volcanmayo, afectando los centros poblados ubicados valle abajo.

## ABSTRACT

Following the great explosive activity presented by the Ubinas volcano on July 19, 2019, the Geophysical Institute of Peru (IGP), through the National Vulcanological Center (CENVUL), carried out aerial photography of the crater and southern flank of the

Ubinas volcano with the help of an unmanned aerial vehicle (VANT) designed and developed by the IGP, with the ability to acquire information on volcanoes with elevations above 6000 m asl.

This work was carried out with the purpose of evaluating and identifying the morphological changes of the crater in order to serve the authorities and population for decision-making within the framework of Disaster Risk Management. Six overflights have been made with an acquisition of 883 images used for the development of a Digital Elevation Model (DEM) of the land of 0.6 m spatial resolution. This DEM has been compared to another obtained by the IGP in 2016 under the same modality.

The results obtained show that, in these three years, the morphology of the crater has undergone an important change linked to the accumulation of volcanic material (ash, blocks, etc.) resulting from the expulsions caused in the current eruptive process that has filled its surface. The calculation made suggest that the filling material has a volume of ~2 640 000 m<sup>3</sup>. On the other hand, the results show that, in case of a large explosive eruption of the Ubinas, a part of the southern flank of the volcano (with a volume of ~1 021 400 m<sup>3</sup>) could collapse towards the quebrada Volcanmayo gorge, affecting the villages located in the valley down.

## 1. INTRODUCCIÓN

El volcán Ubinas se encuentra ubicado en la región Moquegua y es considerado el volcán más activo del Perú. En los últimos 500 años, ha registrado al menos 26 procesos eruptivos, siendo el más reciente el iniciado el 24 de junio de 2019, el cual generó columnas eruptivas de gases y cenizas de más de 5 km de altura sobre la cima del volcán y la emisión de fragmentos de roca de hasta 6 cm que alcanzaron las localidades de Ubinas y Querapi, ubicadas a 4 km y 6 km del cráter del volcán, respectivamente. Entre los métodos e instrumentos utilizados para el monitoreo volcánico, el IGP, a través del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), emplea el método sísmico, de deformación, infrasonido, geoquímico, geoléctrico y sensores remotos. Esta última técnica se desarrolla

gracias a la ayuda de vehículos aéreos no tripulados e información de imágenes de satélites.

En el Perú, el IGP es pionero en el monitoreo de volcanes utilizando vehículos aéreos no tripulados (VANT o dron). En el año 2016, el IGP realizó el primer sobrevuelo de drones en el Ubinas, el cual permitió adquirir información valiosa sobre el estado de la morfología del cráter y del flanco sur a través de la elaboración de modelos de elevación digital (realizados con métodos de fotogrametría) y el registro de imágenes, información que sirvió como línea de base para realizar nuevas mediciones que permitan evaluar y medir cambios morfológicos ocurridos como consecuencia de la actividad volcánica.

El principio básico de la fotogrametría consiste en obtener dos fotografías aéreas verticales sucesivas que enfocan un punto común del terreno y permite determinar las coordenadas del mismo. La aplicación de esta técnica en el monitoreo de volcanes ha demostrado ser muy eficiente, ya que ha permitido detectar cambios morfológicos en macizos volcánicos con alto nivel de detalle y precisión (Diefenbach et al., 2012). El presente trabajo de investigación muestra los resultados obtenidos mediante la obtención de imágenes del cráter y flanco sur del volcán Ubinas con ayuda de un vehículo aéreo no tripulado desarrollado por el IGP para la detección de cambios morfológicos en volcanes.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO

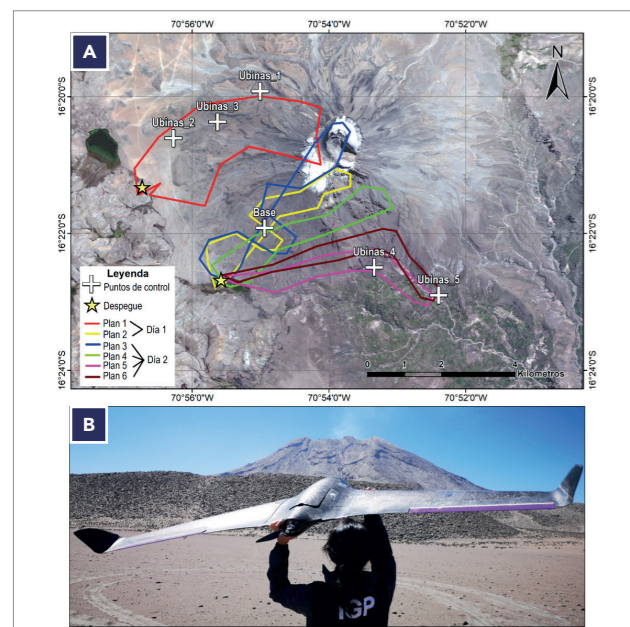


Figura 1.- A) Mapa que muestra la ubicación de los cinco puntos de control (cruces) y las trayectorias de los seis planes de vuelo (polígonos). Se observa que los sobrevuelos cubren principalmente la zona del cráter y los flancos sur y oeste del volcán. B) Vehículo aéreo no tripulado "Skywalker X8" desarrollado por el IGP.

El vehículo aéreo no tripulado utilizado es un dron tipo "Skywalker X8", el cual lleva incorporado dos cámaras GoPro (figura 1B). La realización del plan de vuelo se efectuó en gabinete haciendo uso del software libre *Mission Planner*, el cual permitió establecer y configurar diversos parámetros, entre ellos la ruta de desplazamiento del dron, la altura, velocidad, potencia del motor, tasa de muestreo de adquisición de imágenes, porcentaje de traslape y los puntos de despegue y aterrizaje del dron, entre otros. Tomando en cuenta las áreas de interés y los parámetros antes mencionados, se establecieron seis planes de vuelo ejecutados en dos días (figura 1A).

Además, para georreferenciar las fotografías aéreas y obtener un modelo georreferenciado, se llevó a cabo la instalación y medición en campo de cinco puntos de control geodésico distribuidos en la superficie del volcán Ubinas (figura 1A), ello haciendo uso de instrumentos GNSS en modo RTK (cinemático en tiempo real). Cada punto de control fue debidamente señalado sobre el terreno, de modo que dichos puntos sean lo suficientemente visibles en las fotografías aéreas.

Para la generación del DEM se utilizó el software *Agisoft Metashape*, que permite obtener imágenes de alta calidad con base en el alineamiento de imágenes y corrección de enfoque utilizando la tecnología multivisor de reconstrucción 3D. Para una corrección precisa y reducción de errores en la proyección de la nube de puntos, se llevó a cabo el ajuste de imágenes utilizando las coordenadas de seis puntos de control GPS establecidos en el terreno.

## 3. RESULTADOS

### Modelo de elevación digital de alta resolución 2019

La información recolectada por un dron es valiosa debido al gran nivel de resolución que tiene en comparación con las imágenes satelitales. En la figura 2 se muestran los modelos obtenidos por el radiómetro ASTER con una resolución de 38 m (figura 2A), el satélite ALOS con una resolución de 12.5 m (figura 2B) y el modelo DEM, con una resolución de 0.8 m, obtenido por el IGP a partir de las imágenes aéreas del año 2016 (figura 2C). La comparación de las imágenes evidencia que, a mejor resolución, mejor detalle de las características estructurales, lo cual resulta de importancia para hacer cálculos, simulación de procesos volcánicos y realizar una interpretación sólida de la actividad del volcán. Con las aerofotografías recolectadas en campo en 2019, se elaboró un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) de una resolución espacial de

0.6 m (figura 2D). El cálculo de las dimensiones del cráter es de ~805 m de largo, ~445 m de ancho y una profundidad promedio de ~200 m.

El DEM permitió determinar el volumen de material o roca que conforma el flanco sur del Ubinas, el cual puede colapsar en caso de una gran erupción explosiva de dicho volcán. El volumen asciende a ~1 021 400 m<sup>3</sup>. Dicho material puede cubrir la cabecera de la quebrada volcánmayo o río Ubinas, afectando los centros poblados ubicados valle abajo.

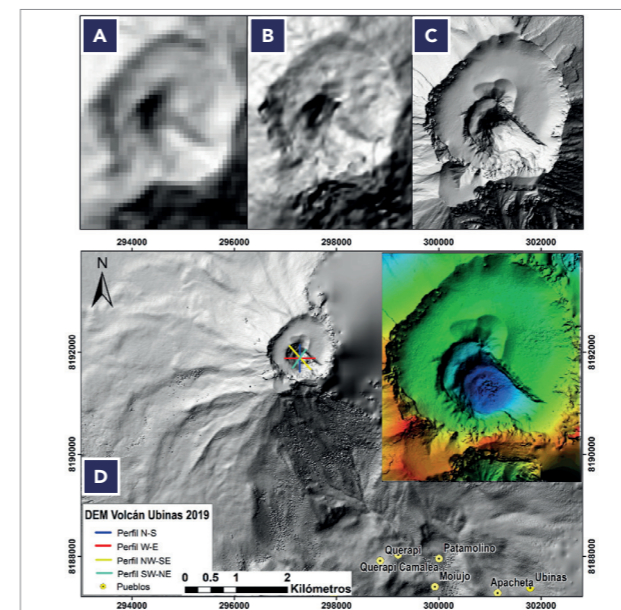


Figura 2.- Comparación de modelos digitales de elevación obtenidos a través de imágenes satelitales y dron: A) ASTER, B) ALOS y C) Modelo Digital de Elevación a partir del sobrevuelo en 2016 con resolución de 0.8 m y D) Modelo digital de elevación a partir del sobrevuelo en 2019 con resolución de 0.6 m.

### Cambios morfológicos de la superficie del cráter del volcán Ubinas

Para realizar la identificación de cambios morfológicos de la superficie del cráter, se realizó una comparación entre el DEM obtenido en el año 2016 (figura 2C) y el obtenido en este estudio (figura 2D). Cabe mencionar que posterior a la obtención del primer DEM en 2016, hasta el 2019, ocurrieron varias explosiones volcánicas con emisiones importantes de gases, cenizas y bloques balísticos.

Según la evaluación realizada, se observa que en el año 2019 el cráter contiene en su interior un volumen considerable de material volcánico (ceniza, bloques, etc.) respecto al modelo de 2016, en el que presenta una zona más cóncava.

Para analizar a detalle las variaciones en la morfología del cráter del Ubinas, se elaboraron perfiles en

dirección norte-sur, oeste-este, noroeste-sureste y suroeste-noreste (figura 3).

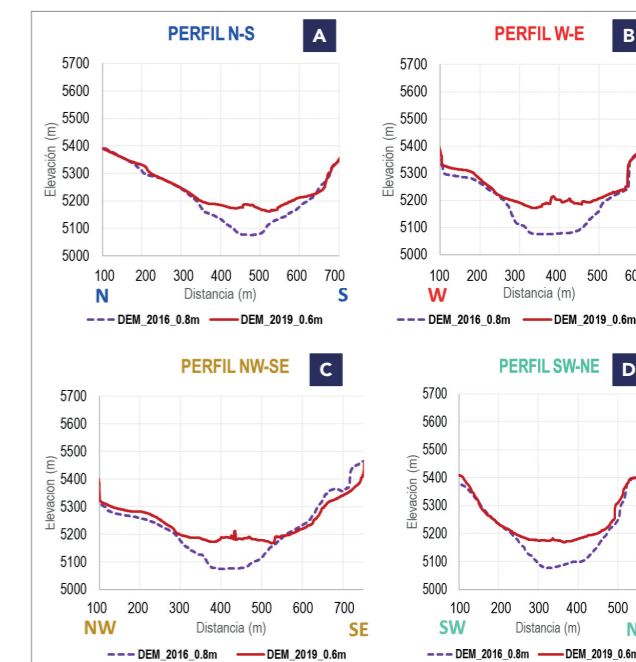


Figura 3.- Comparación entre perfiles de los años 2016 (líneas discontinuas) y 2019 (líneas continuas) trazados en el cráter del volcán Ubinas: A) norte-sur, B) oeste-este, C) noroeste-sureste y D) suroeste-noreste.

En el DEM de 2016, a lo largo del perfil norte-sur, se observa una superficie cóncava profunda (figura 3A, línea discontinua), mientras que en el DEM de 2019 se observa una superficie semiplana (figura 3A, línea continua). Esta diferencia estaría asociada a un posible relleno del cráter de material expulsado durante la fase final ocurrida en el anterior proceso eruptivo (2013-2017) y las últimas explosiones registradas desde julio de 2019. El relleno estaría constituido de ceniza, lapilli y fragmentos de lava y tendría un espesor promedio de 100 m.

En el perfil oeste-este también se presenta el mismo patrón: una zona cóncava de mayor profundidad con relleno promedio de 110 m de espesor (figura 3B, línea discontinua). En el perfil noroeste-sureste (figura 3C), se obtiene un espesor promedio de 100 m y se destaca, al igual que en el perfil norte-sur, el desgaste o la erosión de la pared sureste del cráter. Finalmente, en el perfil suroeste-noreste (figura 3D), se estimó un espesor promedio de 90 m. Utilizando esta información, se estima que en 2019 el volumen de material de relleno existente en el cráter del volcán Ubinas es de ~2 640 000 m<sup>3</sup>, cuyo espesor promedio es de 100 m.

Adicionalmente, a partir de los modelos digitales de elevación de alta resolución de los años 2016 y 2019, se realizó el cálculo del volumen del sector inestable,

localizado en la parte superior del flanco sur (tabla 1). Se dividió la región total en dos áreas (norte y sur) debido a la diferencia en pendiente (figura 4).

| DIMENSIONES               | DEM 2016 (0.8 m) |            |              | DEM 2019 (0.6 m) |            |              |
|---------------------------|------------------|------------|--------------|------------------|------------|--------------|
|                           | REGIÓN TOTAL     | REGIÓN SUR | REGIÓN NORTE | REGIÓN TOTAL     | REGIÓN SUR | REGIÓN NORTE |
| VOLUMEN (m <sup>3</sup> ) | 1 058 700        | 743 700    | 315 000      | 1 021 400        | 720 600    | 300 800      |
| ÁREA (m <sup>2</sup> )    | 71 800           | 43 450     | 28 350       | 68 170           | 40 350     | 27 820       |

Tabla 1.- Dimensiones del bloque inestable del flanco sur del volcán Ubinas calculados a partir de los DEM de alta resolución de los años 2016 y 2019.

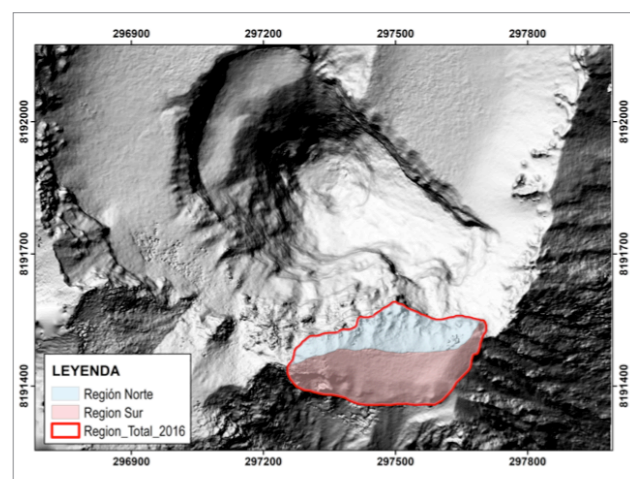


Figura 4.- Área delimitada del bloque inestable en el flanco sur del volcán Ubinas a partir del DEM de 0.8 m de resolución del año 2016.

La diferencia obtenida de 37 300 m<sup>3</sup> entre los años 2016 y 2019 puede asociarse a un proceso de denudación o erosión de dicha zona. Este desgaste podría desencadenar el desprendimiento de un sector del flanco sur que está constituido de rocas fracturadas e hidrotermalizadas; en consecuencia, existe el peligro latente de derrumbe o colapso de esta parte del volcán.

## CONCLUSIONES

Durante los años 2016 y 2019 se han identificado cambios morfológicos ocurridos en el cráter y en la pared sur de la caldera del volcán Ubinas. El cambio morfológico estaría asociado a la acumulación de material volcánico expulsado durante los procesos eruptivos 2013-2017 y 2019. El relleno estaría constituido de ceniza, lapilli y fragmentos de lava. El espesor de dicho relleno ha sido calculado en ~100 m y el volumen aproximado alcanza los ~2 640 000 m<sup>3</sup>.

El DEM de alta resolución realizado a través de técnicas de fotogrametría obtenido con dron ha

permitido identificar la presencia de un bloque o macizo rocoso de un volumen aproximado ~1 021 000 m<sup>3</sup> que corresponde al extremo sur de la caldera, el cual puede derrumbarse. De producirse una gran erupción explosiva, el bloque podría colapsar directamente por la quebrada Volcanmayo, generando depósitos de avalanchas que fácilmente afectarían las localidades situadas valle abajo.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Programa de Asistencia para Desastres Volcánicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (VDAP-USGS), en especial a la Dra. Angie Diefenbach, por la donación de una licencia profesional del software Agisoft Metashape, enseñanzas y asesoría para el procesamiento de las imágenes de dron.

## REFERENCIAS

- Del Carpio J., Macedo O., Chijcheapaza R., Puma N., Torres J., (2016). Observaciones asociadas a los lahares ocurridos el 06 de febrero y 11-13 de abril de 2015 en el valle de Ubinas. Póster, XVIII Congreso Peruano de Geología 2016.
- Diefenbach, A. K., Crider, J. G., Schilling, S. P., & Dzurisin, D. (2012). Rapid, low-cost photogrammetry to monitor volcanic eruptions: an example from Mount St. Helens, Washington, USA. *Bulletin of Volcanology*, 74(2), 579-587.
- Thouret, J. C., Rivera, M., Wörner, G., Gerbe, M. C., Finizola, A., Fornari, M., & Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 67(6), 557-589.

# EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS SEÑALES SÍSMICAS OBSERVADAS DURANTE EL PERIODO 2018-2019 EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO NEVADO COROPUNA, PERÚ

José Torres<sup>1</sup>, R. Machacca<sup>1</sup>, J. Del Carpio<sup>1</sup>, Riky Centeno<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú

## RESUMEN

El presente trabajo describe los resultados del análisis sísmico realizado en el volcán Coropuna, ubicado a 150 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, utilizando datos sísmicos de la red del volcán Coropuna que opera desde mayo de 2018.

El objetivo de este estudio es analizar y caracterizar la actividad sísmica ocurrida en el complejo volcánico Coropuna y localizar la fuente de los sismos volcánicos. Los sismos fueron analizados utilizando el espectro de frecuencias, *cross-correlation*, localización de sismos, mecanismos focales y distribución frecuencia-magnitud. Se han registrado cuatro grupos de sismos denominados Volcano-Tectónico (VT), Largo Periodo (LP) y Tremores (TRE). Además, la estación más próxima al volcán registró sismos relacionados a la dinámica del glaciar del Coropuna (DG). En total, se han identificado ~4000 sismos volcánicos; de ellos, el 78 % son VT, asociados al fracturamiento de rocas, 11 % son LP y TRE, asociados a movimiento de fluidos y el 10 % están relacionados a la dinámica del glaciar. Los sismos VT fueron localizados en dirección oeste y noroeste, entre 6 km y 15 km del volcán con magnitudes <M3.7. Su ocurrencia se asocia a fallas inversas. El análisis frecuencia-magnitud de los VT muestra mayores valores de "b", lo cual es característico en ambientes volcánicos. Se interpreta que los sismos registrados en el Coropuna se han generado posiblemente por la intervención de un cuerpo caliente (magma remanente) en profundidad que interactúa con el sistema hidrotermal, ocasionando fractura de rocas (sismos VT) y movimiento de fluidos (sismos LP y TRE). La última erupción del volcán ocurrió hace ~700 años, ligada a emisiones de flujo de lava.

## ABSTRACT

*This paper describes the results of the seismic analysis carried out in the Coropuna volcano, located 150 km northwest of the city of Arequipa, using seismic data from the Coropuna volcano network in operation since May 2018.*

*The objective of this study is to analyze and characterize the seismic activity that occurred in the Coropuna volcanic complex and locate the source of the volcanic earthquakes. The earthquakes were analyzed using the frequency spectrum, cross-correlation, earthquake location, focal mechanisms and frequency-magnitude distribution. Four groups of earthquakes called Volcano-Tectonic (VT), Long Period (LP) and Tremors (TRE) have been registered. In addition, the station closest to the volcano recorded earthquakes related to the dynamics of the Coropuna glacier (DG). In total, ~4000 volcanic earthquakes have been identified; Of these, 78% are VT, associated with the occurrence of rock fractures, 11% are LP and TRE, associated with fluid movement and 10% are related to glacier dynamics. The VT earthquakes were located in the west and northwest, between 6 km and 15 km of the volcano with magnitudes <M3.7. Its occurrence is associated with inverse failures. The frequency-magnitude analysis of the VT shows higher values of "b", which is characteristic in volcanic environments. It is interpreted that the earthquakes recorded in the Coropuna were possibly generated by the intervention of a hot body (remaining magma) in depth that interacts with the hydrothermal system, causing rock fractures (VT earthquakes) and fluid movement (LP and TRE earthquakes). The last eruption of the volcano occurred ~700 years ago, linked to lava flow emissions.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El complejo volcánico nevado Coropuna (CVNC), ubicado al extremo norte de la Zona Volcánica Central (15.5167°S, 72.7000°W; 6377 m s.n.m.) y a 150 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, es el más alto de los 16 volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú. Presenta un casquete glaciar de 44.1 km<sup>2</sup> (Kochitzky et al., 2018) que beneficia a más de 90 000 habitantes en zonas de influencia del volcán (INEI, 2018). La última erupción fue datada hace ~700 años, ligada a la emisión de flujos de lava que se emplazaron al sur del volcán hasta 7 km del cráter (Úbeda, 2011).

Estudios del Instituto Geofísico del Perú (IGP) consideran al Coropuna dentro de los cuatro

volcanes de muy alto riesgo en el país, solo superado por los volcanes Ubinas, Sabancaya y Misti. Entre los años 2001 y 2002, la red sísmica nacional del IGP registró sismicidad a menos de 30 km del volcán con magnitudes por debajo M5.0. Una estación sísmica a menos de 8 km del volcán registró sismos típicos de ambientes volcánicos durante el periodo 2008-2010. Estos antecedentes llevaron al IGP a implementar una red de monitoreo geofísico en tiempo real (figura 1), la cual permitió analizar y caracterizar la actividad sísmica del Coropuna utilizando las metodologías ya existentes de clasificación de señales e identificación de fuentes sísmicas (McNutt, 2000; Ibáñez & Carmona, 2000). La localización de sismos se efectuó empleando el algoritmo de *Hypoellipse* (Lahr, 1999), mientras que para el cálculo de "b" se utilizó la distribución frecuencia magnitud (Gutenberg-Richter, 1944). Para el cálculo de los mecanismos focales se utilizó el programa FOCMEC (Snoke et al., 1984).

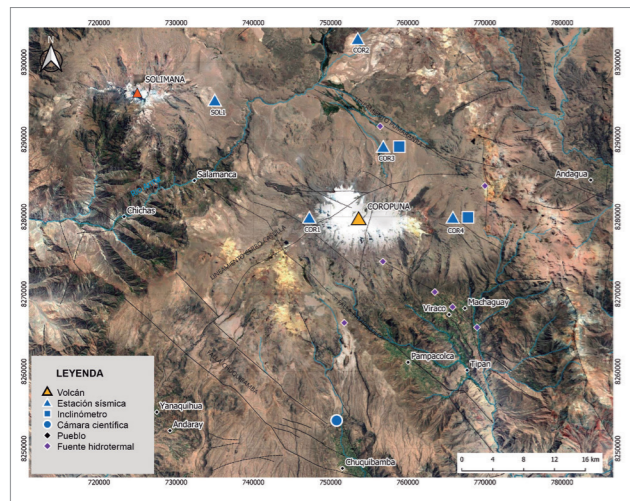


Figura 1.- Mapa de localización de estaciones de monitoreo desplegadas en el complejo volcánico nevado Coropuna. Las líneas negras son los sistemas de fallas y lineamientos (Margirier, 2015).

## 2. DATOS Y PROCESAMIENTO

En el presente trabajo se utilizaron datos de la red sísmica del volcán Coropuna (figura 1) del periodo mayo de 2018 a septiembre de 2019, registrados con cinco estaciones sísmicas de banda ancha marca Trillium compact 120 s con registrador REFTEK. Se han empleado tres metodologías para caracterizar la actividad sísmica: (1) clasificación de eventos sismovolcánicos a partir de su forma de onda y contenido espectral; (2) correlación cruzada de la forma de onda para determinar familias sísmicas; y (3) análisis de las fuentes sísmicas, es decir, la localización de sismos, cálculo de mecanismos focales y distribución frecuencia-magnitud.

En el volcán Coropuna se han identificado cuatro tipos de eventos sísmicos: (1) sismos Volcano-

Tectónicos (VT): caracterizados por poseer, en algunos casos, ondas con arribo impulsivo de sus fases P y S; típicamente presentan una amplia banda espectral de hasta 20 Hercios (Hz) (figura 2A). (2) Sismos de Largo Periodo (LP): caracterizados por presentar frecuencias menores a 6 Hz. No presentan fases claras de las ondas P ni ondas S (figura 2B). (3) sismos Tremor (TRE): se caracterizan por el registro continuo de la señal sísmica con una duración mayor a 60 s (figura 2C). (4) Sismos asociados a la dinámica del glaciar (DG): dentro de este grupo se han identificado diversos tipos de señales sísmicas con frecuencias que varían entre 3 Hz a 20 Hz (figura 2D). Este último tipo de evento posiblemente esté asociado a la actividad del glaciar del Coropuna debido a su rápida atenuación (fuente superficial).

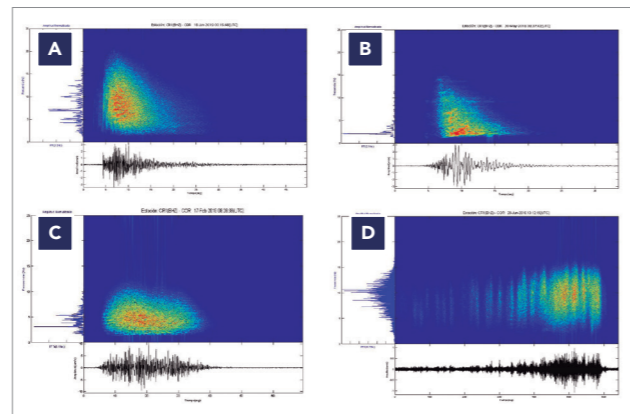


Figura 2.- Ejemplos de señales sísmicas registradas en el volcán Coropuna. A) sismo VT ocurrido el día 18/01/2019 a las 00:15 UTC. B) Sismo LP ocurrido el 30/05/2018 a las 08:37 UTC. C) Sismo TRE ocurrido el 17/02/2019 a las 09:26 UTC y D) sismo DG ocurrido el 29/01/2018 a las 13:12 UTC.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se han identificado y catalogado un total de 4358 eventos sísmicos generados al interior del volcán Coropuna. El 78 % (3384) de estos eventos estarían asociados a procesos de ruptura (sismos de tipo VT), mientras que el 10 % (445) corresponden a sismos de tipo LP y el 1% a Tremor. Tanto los eventos LP como Tremor podrían relacionarse al paso de fluidos volcánicos (agua, vapor y gases). Por otra parte, el 11 % (496) de estas señales sísmicas estarían relacionadas a la dinámica propia del glaciar del Coropuna (tipo DG). En promedio, se registraron 7 sismos VT por día y menos de un sismo tipo LP, TRE y DG, lo que denota niveles bajos de actividad en comparación con otros volcanes que están en pleno proceso eruptivo.

### Fuente de los sismos VT

Se obtuvieron los parámetros de localización de

105 sismos de tipo VT registrados hasta en cinco estaciones con magnitudes menores a M3.7. Se distinguieron dos zonas sísmicas (zona 1 y zona 2) en los sectores O y NO del Coropuna, a distancias de 3 km y 18 km del volcán, respectivamente. La zona 1 está localizada bajo la superficie del volcán hasta los 10 km de profundidad; sus epicentros están distribuidos en dirección E-O en un radio menor a 6 km. La zona 2 está distribuida y denota un alineamiento NO a SE, con profundidades de entre 6 km y 15 km (figura 3).

Por otra parte, se obtuvieron los mecanismos focales (MF) de 6 sismos de tipo VT de magnitudes entre M3.0 y M3.7. Para este cálculo, se utilizaron sismos registrados en más de cinco estaciones. Los resultados muestran mecanismos focales de tipo inverso (compresión) con componente transcurrente en concordancia con las fallas identificadas en la zona del volcán Coropuna. De acuerdo a los MF, la zona 1 estaría asociada a la falla NE a SO de azimut N45°, mientras que la zona 2 correspondería a la falla NO-SE con azimut N315°.

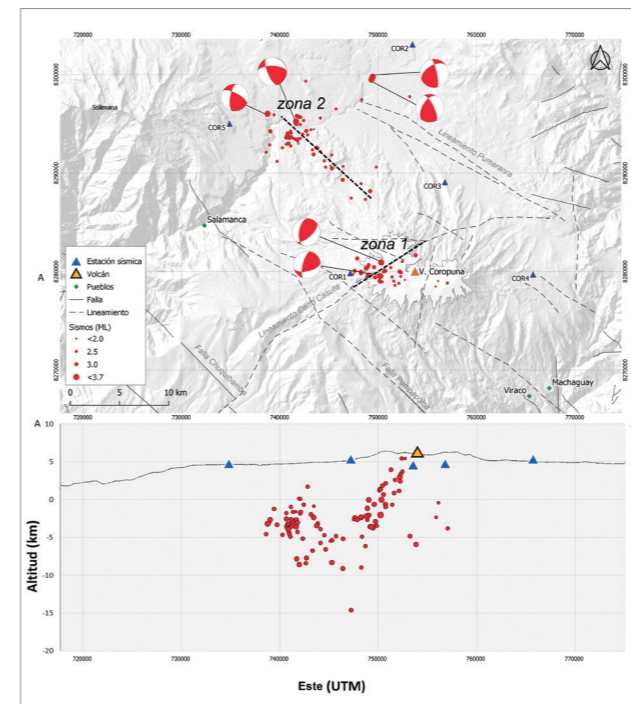


Figura 3.- Mapa sísmico de eventos VT registrados durante el periodo mayo de 2018 a septiembre de 2019. El triángulo de color amarillo destaca la localización del volcán. Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas. Los círculos de color blanco y rojo representan fallas inversas. Las líneas punteadas en gris corresponden a lineamientos y fallas. Los puntos rojos representan las zonas de ruptura al interior del volcán.

Asimismo, se ha realizado la *cross-correlation* de los eventos VT, tras lo cual se ha podido identificar dos familias sísmicas con coeficientes de correlación (CC) de más de 70 %, las cuales están asociadas a las dos zonas sismogénicas: zona 1 (figura 4A) y zona 2 (figura 4B).

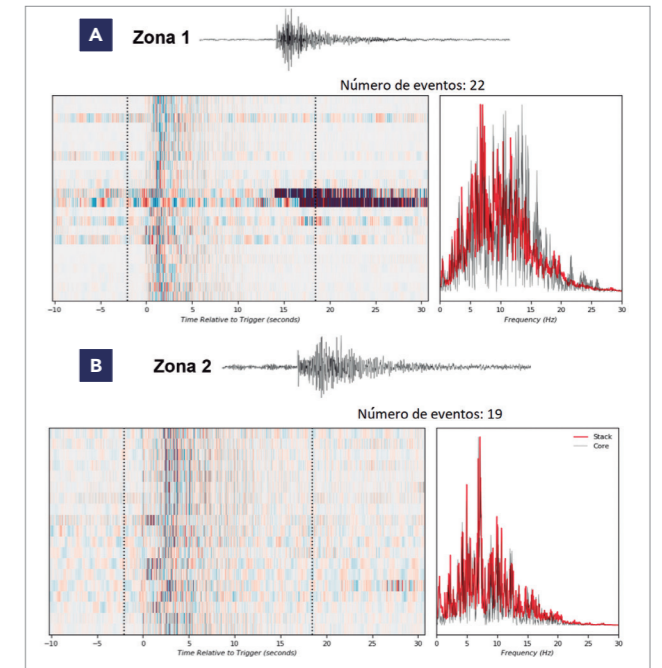


Figura 4.- Gráfico de la correlación cruzada de sismos de tipo VT. Se identificaron dos familias asociadas a la zona 1 (A) y zona 2 (B).

## Discusión final

Para determinar si la ocurrencia de la sismicidad es consecuencia de la intervención de un cuerpo magmático en profundidad, se ha realizado el cálculo del valor de "b" mediante la distribución frecuencia-magnitud (ley de Gutenberg-Richter, 1994). Diversos trabajos han mostrado que "b" resulta tener altos valores si están asociados a gradientes térmicos elevados, así como a ambientes con aumento de presión de poro y de alto grado de heterogeneidad, frecuentes en ambientes volcánicos (Wyss, 1973 y Wiemer y McNutt 1997). Los resultados muestran que la zona 1 presenta el valor de  $b=1.89$  y la zona 2 de 1.68, respectivamente (figura 5A y 5B).

Actualmente, en la zona del Coropuna no se evidencia actividad fumarólica; sin embargo, se identificaron diversas fuentes termales ubicadas alrededor al mencionado complejo volcánico con temperaturas que varían de 20 °C a 50 °C (Masías, 2018 y Úbeda, 2011). Estudios de Masías (2018) muestran que el volcán Coropuna presentaría un importante sistema hidrotermal (alimentado por agua meteórica del deshielo) que interacciona con la fuente caliente o magma remanente.

Por lo tanto, los sismos registrados en el Coropuna se podrían interpretar como señales que se generaron por la intervención de un cuerpo caliente (posiblemente magma remanente) en profundidad, que interacciona con el sistema hidrotermal del volcán, ocasionando fractura de rocas (sismos VT) y movimiento de fluidos (sismos LP y TRE).

# MONITOREO



Actividad explosiva del volcán Sabancaya: imagen obtenida mediante una cámara térmica (superior) e imagen capturada empleando una cámara digital (inferior).

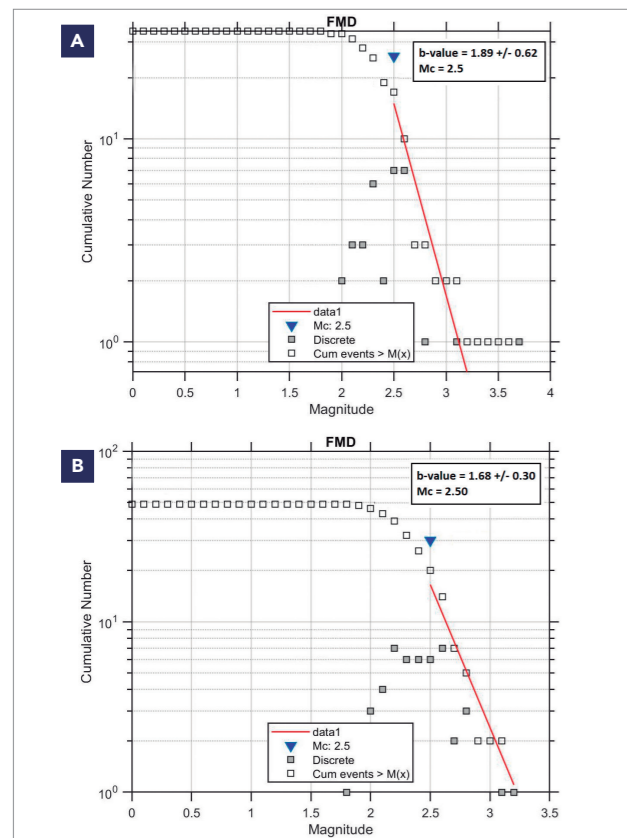


Figura 5.- Gráfico de la distribución frecuencia-magnitud para el cálculo del valor de "b" efectuado para las zonas sísmicas denominadas zona 1 (A) y zona 2 (B). La línea roja representa la pendiente de la recta denominada valor de "b".

## CONCLUSIONES

Durante el periodo de estudio se han identificado y catalogado un total de 4358 sismos volcánicos asociados a la actividad del volcán Coropuna, clasificados como sismos de tipo VT, LP, TRE y DG.

Los sismos de tipo VT, con magnitudes menores a M3.7, formaron dos fuentes sismogénicas localizadas en el sector O y NO (zona1 y zona 2) del Coropuna. Estas se generarían por la reactivación de fallas inversas de dirección NE-SO y NO-SE.

Los sismos que ocurren en la zona del volcán Coropuna tendrían su origen en la intervención de un cuerpo caliente (magma remanente) que interacciona con el sistema hidrotermal, ocasionando fractura de rocas (sismos VT) y movimiento de fluidos (sismos LP y TRE) al interior del volcán. Posiblemente, este fenómeno estaría reactivando las fallas preexistentes en la zona.

La actividad sísmica observada desde mayo de 2018 en el volcán Coropuna confirma que este es un volcán activo. A pesar de ello, su comportamiento es calificado de bajo nivel, por lo que a corto y mediano plazo no se espera una reactivación de dicho volcán. Las autoridades y la población deben tener en cuenta

que la última erupción de este volcán ocurrió hace 700 años aproximadamente, la cual se caracterizó por la emisión de flujos de lava que se emplazaron a 7 km al sur del Coropuna. Debe tenerse en cuenta que la emisión de flujos de lava podría generar el derretimiento de la masa glaciar del Coropuna, produciendo lahares o flujos de lodo que afectarían terrenos de cultivo, obras de infraestructura y otros.

## REFERENCIAS

- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, 34(4), 185-188.
- Ibáñez, J., & Carmona, E. (2000). Sismicidad volcánica. Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica, Serie Casa de los Volcanes, 7, 269-282.
- Kochtitzky, W. H., Edwards, B. R., Enderlin, E. M., Mariño, J., & Marinque, N. (2018). Improved estimates of glacier change rates at Nevado Coropuna Ice Cap, Peru. Journal of Glaciology, 64(244), 175-184.
- Lahr, J. C. (1999). HYPOELLIPSE: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first motion pattern. Denver, Colorado: US Geological Survey. p. 119.
- Margirier, A., Audin, L., Carcaillet, J., Schwartz, S., & Benavente, C. (2015). Tectonic and climatic controls on the Chuquibamba landslide (western Andes, southern Peru). Earth Surface Dynamics, 3(2), 281-289.
- Masías P. (2018). Características químicas e isotópicas del sistema hidrotermal del complejo volcánico nevado Coropuna, (Tesis de maestría). Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Arequipa-Perú.
- McNutt S. (2000). Volcanic seismicity, Encyclopedia of Volcanoes. Ed. H. Sigurdsson, Academic Press, San Diego. Pp. 1015-1034.
- Snoke, J. (1984). FOCMEC: FOCal MECHANism Determinations. Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA.
- Úbeda, J. (2011). El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico nevado Coropuna (cordillera occidental de los Andes centrales), (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid-España.
- Wiemer, S., & McNutt, S. R. (1997). Variations in the frequency-magnitude distribution with depth in two volcanic areas: Mount St. Helens, Washington, and Mt. Spurr, Alaska. Geophysical Research Letters, 24(2), 189-192.
- Wyss, M. (1973). Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 31(4), 341-359.

# Sabancaya

**Elevación**  
5960 m s.n.m.

**Región**  
Arequipa

**Provincia**  
Caylloma

**Última erupción**  
2016-2019 (continúa)

**Población en riesgo**  
23 mil personas aprox.

**Inicio de vigilancia**  
2013

**Métodos de vigilancia**  
7 estaciones sísmicas  
3 cámaras científicas  
1 estación GPS  
2 inclinómetros

## ACTIVIDAD

Periodo: enero-marzo de 2019

La actividad eruptiva del volcán Sabancaya ha continuado durante el 2019; no obstante, la sismicidad disminuyó en comparación con lo registrado el 2016 y 2017. Durante el primer trimestre (enero-marzo), el Instituto Geofísico del Perú (IGP), como entidad rectora del monitoreo de la actividad sísmica y volcánica en el país, informó sobre la evolución del actual proceso eruptivo mediante trece boletines vulcanológicos elaborados y publicados cada semana.

En general, durante este periodo, la actividad sísmica no experimentó una variación importante en el número ni tampoco en la energía, con excepción de algunos picos de eventos Volcano-Tectónicos (VT) y de Largo Periodo (LP), los que presentaron ligeras variaciones principalmente en el número de eventos (figura 1C y 1D).

Con relación a la actividad explosiva, esta mostró una leve variación en el número y energía de eventos desde el 1 de enero hasta el 15 de marzo, alcanzando un promedio de 21 explosiones/día. Posterior a

ello, se observó un ligero incremento que llegó a un máximo de 39 explosiones/día el 22 de marzo (figura 1A). Estas explosiones generaron columnas eruptivas de hasta 3700 m sobre la cima del volcán, cuyas cenizas expulsadas fueron dispersadas por los vientos hacia los sectores suroeste y noroeste del Sabancaya, principalmente, en dirección de los distritos de Lluta, Huambo y Cabanaconde.

Los sismos de tipo Híbrido, vinculados al ascenso de magma, son eventos que siempre registraron bajos valores en el proceso eruptivo. Durante este primer trimestre, se observaron algunas agrupaciones de eventos Híbridos (6 Híbridos el 21 de marzo) con energías moderadas (0.7 Megajoules el 7 de febrero).

Los eventos LP son los que ocurren con mayor frecuencia. Estos sismos, asociados al movimiento de fluidos en el interior del volcán, alcanzaron en este periodo un registro diario de 142 LP/día. Su tendencia de evolución ha sido similar a las explosiones volcánicas.

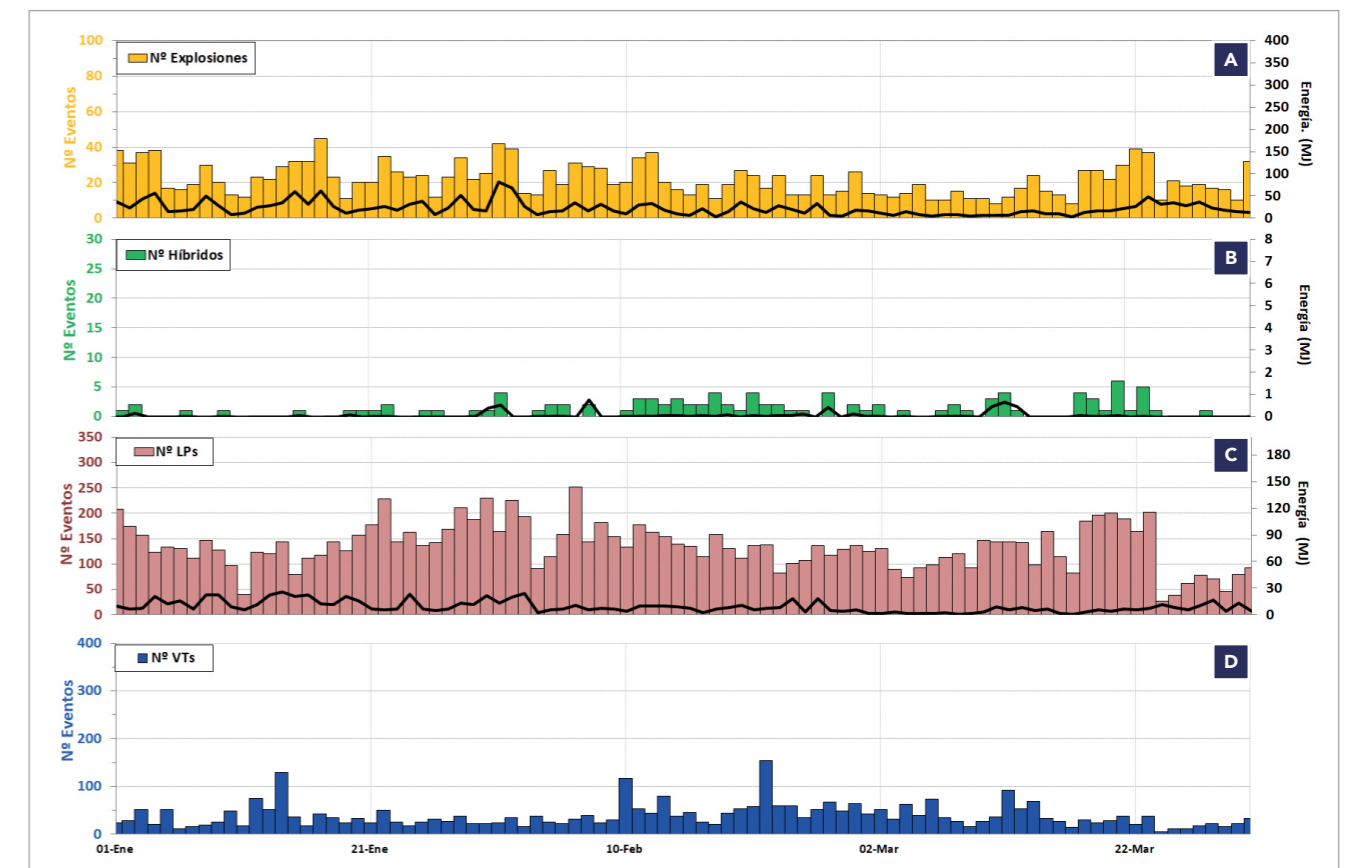


Figura 1.- Cuadro que muestra la evolución temporal de los principales eventos sísmovolcánicos registrados en el volcán Sabancaya entre el 1 de enero y el 31 de marzo, además de sus respectivos valores de energía (líneas negras).

# ACTIVIDAD

Periodo: abril-junio de 2019

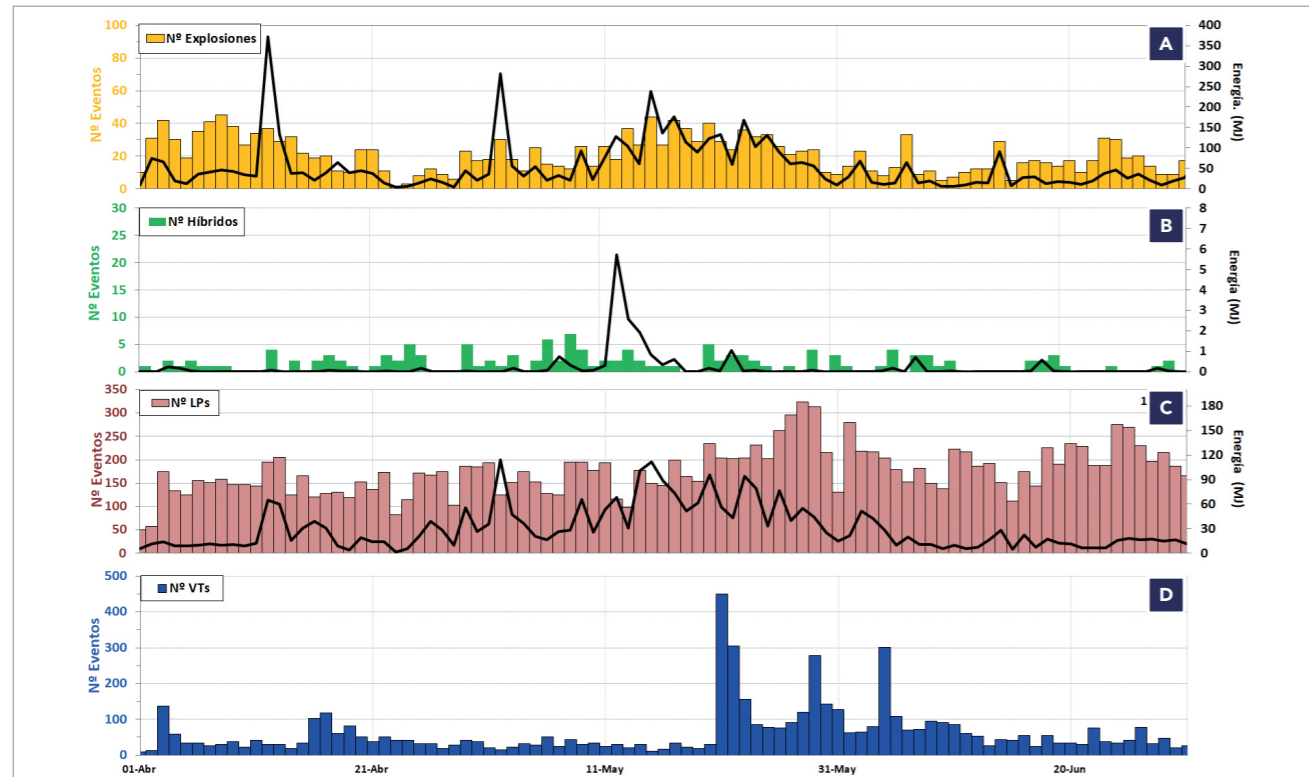


Figura 2.- Cuadro que muestra la evolución temporal de los principales eventos sismovolcánicos registrados en el volcán Sabancaya entre el 1 de abril y el 30 de junio, además de sus respectivos valores de energía (líneas negras).

La actividad sísmica durante este trimestre mostró variaciones importantes en todos los parámetros. Lo más destacado fue el registro de enjambres de sismos de tipo VT (figura 2D), registrados lejos del volcán, a 12 km al este del cráter. En este periodo, el IGP elaboró trece boletines vulcanológicos semanales.

El primero de estos enjambres ocurrió en la primera semana de abril, con un número de 137 sismos de tipo VT registrado el 3 de abril. El segundo enjambre tuvo lugar el 21 de mayo hasta el 5 de junio. El 21 de mayo se registró un pico máximo de 449 sismos VT.

Esta actividad en forma de enjambre estaría relacionada a intrusiones de magma hacia la cámara magmática profunda del Sabancaya. Este magma, en su migración hacia la superficie, habría generado un incremento, tanto en número como en la energía, de los eventos asociados al movimiento de fluidos (LP), seguido de eventos Híbridos y, finalmente, de las explosiones volcánicas.

Esta variación en el número y energía de las explosiones se registró entre el 1 y el 23 de abril, registrándose 45 explosiones el 8 de abril y un

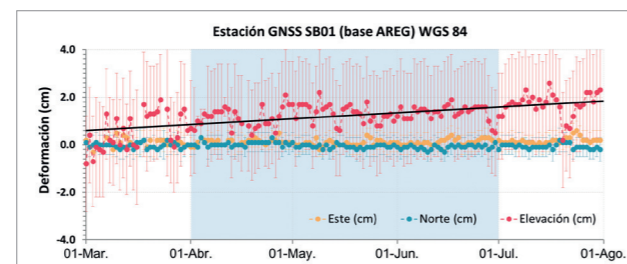


Figura 3.- Evolución de la deformación volcánica en el volcán Sabancaya utilizando datos GNSS (procesados con órbitas rápidas). Sombreado azul corresponde al periodo del 1 de abril al 30 de junio de 2019.

máximo de energía de 372 Megajoules (MJ) el 12 de abril. Posteriormente, se observó un nuevo aumento de hasta 44 explosiones el 15 de mayo y un máximo de energía de 282 MJ el 2 de mayo.

Cabe destacar que la estación de monitoreo GNSS, instalada en el sector norte del Sabancaya, también registró un cambio en su tendencia en concordancia con los enjambres sísmicos registrados (figura 3). Esta inflación confirmaría las mencionadas intrusiones de magma.

# ACTIVIDAD

Periodo: julio-septiembre de 2019

Durante este periodo, la actividad eruptiva del Sabancaya mantuvo la misma tendencia observada en el segundo trimestre.

Se continuaron registrando enjambres sísmicos. Estos presentaron mayor cantidad de eventos que los observados en el anterior trimestre: el primero de ellos con un total de 1057 eventos el 14 de agosto y el segundo con 730 eventos el 16 de septiembre. Ambos enjambres habrían acelerado el crecimiento del domo de lava en el cráter del volcán observado desde el inicio del proceso eruptivo.

La actividad explosiva presentó un promedio de 21 explosiones/día, destacándose un pico importante de 85 explosiones y 354 MJ de energía el 16 de septiembre (figura 5). Los eventos de tipo Híbrido, asociados al ascenso de magma, registraron un promedio de 2 sismos por día, con un pico de 13 MJ el 28 de julio, siendo este el segundo valor de energía más importante en lo que va del año.

El sistema satelital MIROVA detectó anomalías

importantes como la registrada el 4 de septiembre de 70 Megavatios (MW) de Potencia Volcánica Irradiada (VPR).

Para reforzar el monitoreo del volcán, el IGP instaló una segunda cámara de vigilancia a 11 km al SE del cráter del Sabancaya. Las imágenes son captadas cada minuto y enviadas en tiempo real al Centro Vulcanológico Nacional en Arequipa (figura 4).



Figura 4.- Imagen capturada por la cámara de vigilancia instalada en la estación Cajamarcana, localizada a 11 km al sureste del volcán.

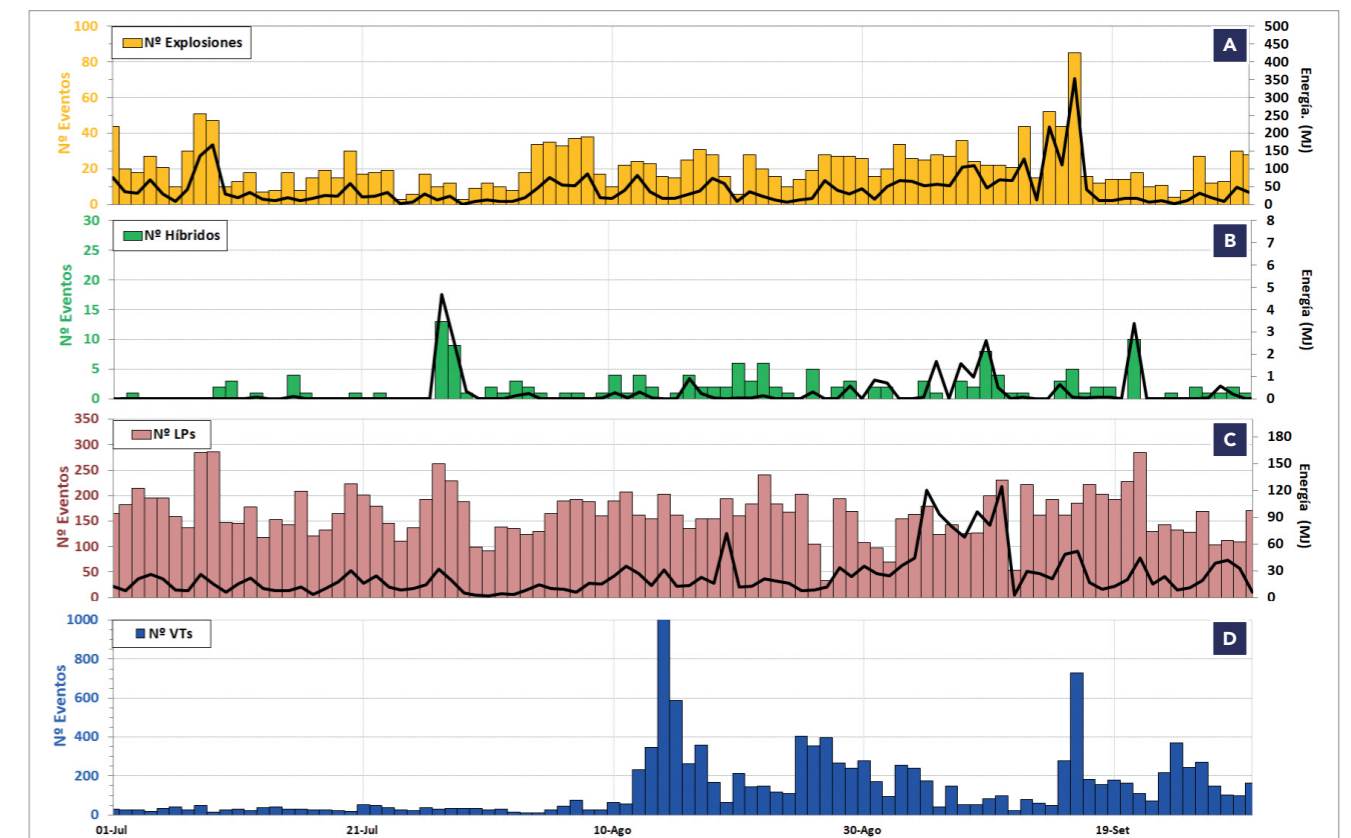


Figura 5.- Cuadro que muestra la evolución temporal de los principales eventos sismovolcánicos registrados en el volcán Sabancaya entre el 1 de julio y el 30 de septiembre, además de sus respectivos valores de energía (líneas negras).

# ACTIVIDAD

Periodo: octubre-noviembre de 2019

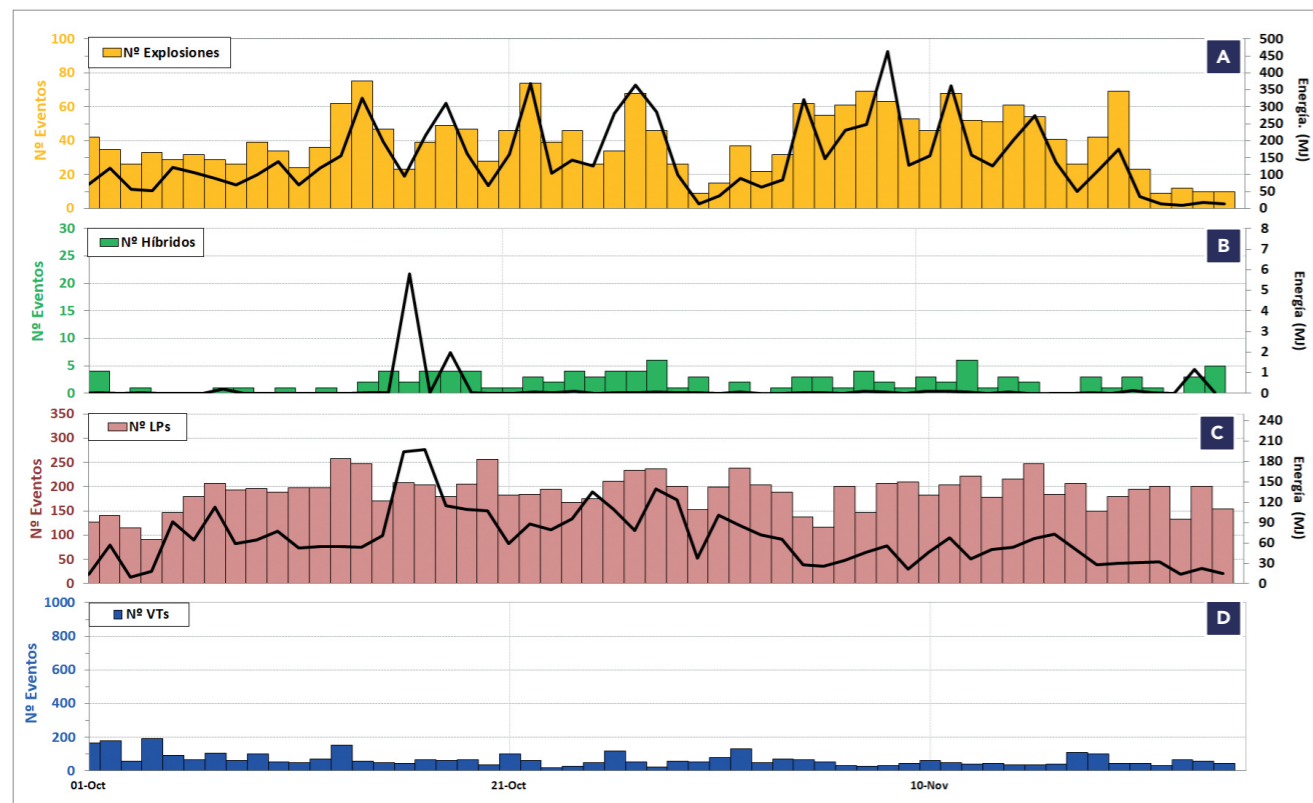


Figura 6.- Cuadro que muestra la evolución temporal de los principales eventos sismovolcánicos registrados en el volcán Sabancaya entre el 1 de octubre y el 30 de noviembre, además de sus respectivos valores de energía (líneas negras).

Entre octubre y noviembre de 2019, la actividad eruptiva del Sabancaya mostró un incremento en el número y energía de la actividad sísmica, principalmente en el caso de las explosiones. Asimismo, fue posible la visualización y evaluación del domo de lava en el cráter del volcán.

Se registraron en promedio 40 explosiones/día, además de un pico máximo de 74 explosiones el 22 de octubre y de 463 MJ de energía el 8 de noviembre (figura 6A). Este aumento sería consecuencia de las intrusiones de magma registradas en agosto y septiembre.

Con relación al domo de lava, se logró determinar su dimensión (240 m de diámetro) y proponer tres escenarios de peligro a partir de su progresivo crecimiento. El IGP advirtió a las autoridades de Defensa Civil este suceso a través de un informe técnico.

Los tres escenarios futuros de la actividad del Sabancaya son los siguientes: Escenario 1: corresponde a una actividad explosiva leve a moderada como la que viene sucediendo en los últimos años, asociada, desde luego, al crecimiento lento del domo de lava.

Escenario 2: crecimiento y colapso del domo de lava con la generación de flujos piroclásticos de poco volumen. Escenario 3: corresponde a erupciones efusivas, con el emplazamiento de flujos de lava.

El IGP, a través del CENVUL, continúa con la vigilancia en tiempo real del Sabancaya para informar el posible desarrollo de los escenarios 2 y 3, no vistos con anterioridad en el actual proceso eruptivo.

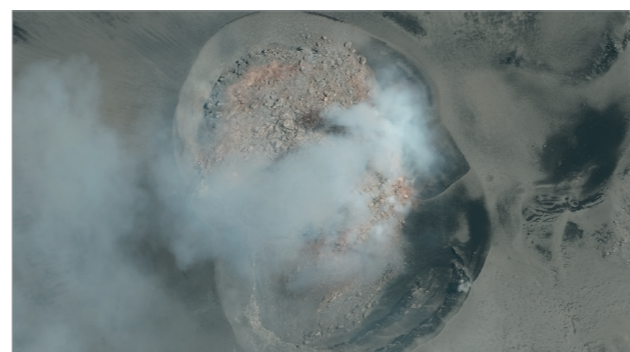


Figura 7.- Imagen satelital del domo de lava en el cráter del volcán Sabancaya. Foto: Digital Globe

# Ubinas



- Elevación**  
5672 m s.n.m.
- Región**  
Moquegua
- Provincia**  
General Sánchez Cerro
- Última erupción**  
2019 (continúa)
- Población en riesgo**  
10 mil personas aprox.
- Inicio de vigilancia**  
2006
- Métodos de vigilancia**  
7 estaciones sísmicas  
2 cámaras científicas  
1 estación GPS  
3 inclinómetros

# ACTIVIDAD

Periodo: enero-marzo de 2019

Los parámetros geofísicos monitoreados del volcán Ubinas, entre ellos la sismicidad, se encontraban en niveles bajos desde el anterior proceso eruptivo finalizado en enero de 2017. Por tal motivo, durante este primer trimestre de 2019, el volcán permaneció en nivel de alerta verde.

Entre enero y marzo, se registraron 238 sismos de origen volcánico a razón de 1 evento por día en promedio. El 72.3 % de estas señales sísmicas (tipo VT) habrían estado asociadas a procesos de ruptura de rocas al interior del volcán, mientras que el 27.3 % de los eventos analizados fueron relacionados al movimiento de fluidos volcánicos como agua, vapor o gas.

El monitoreo de la deformación de la estructura volcánica, utilizando datos GNSS (procesados con órbitas rápidas), no presentó anomalías y las emisiones fumarólicas fueron escasas.

Desde el 23 de enero se registraron y alertaron la ocurrencia de hasta doce lahares que descendieron por los flancos sur y sureste del volcán (figura 1B y 1C). Estos flujos fueron encausados, principalmente, en las quebradas Volcancamayo y Chiflón (figura 1A).

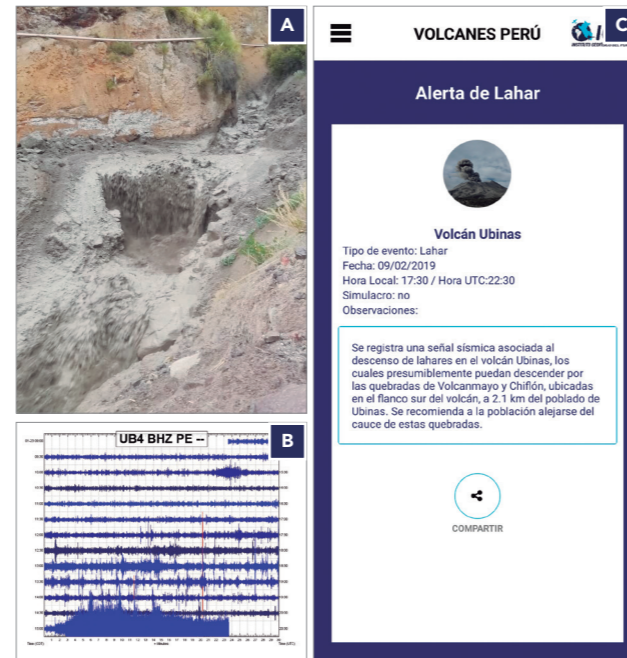


Figura 1.- A) Vista de un lahar que descendió por la quebrada Volcanmayo (04-02-2019). B) Señal sísmica del lahar registrada por la estación de monitoreo UBI4. C) Alerta de lahar emitida a través de la aplicación móvil Volcanes Perú.

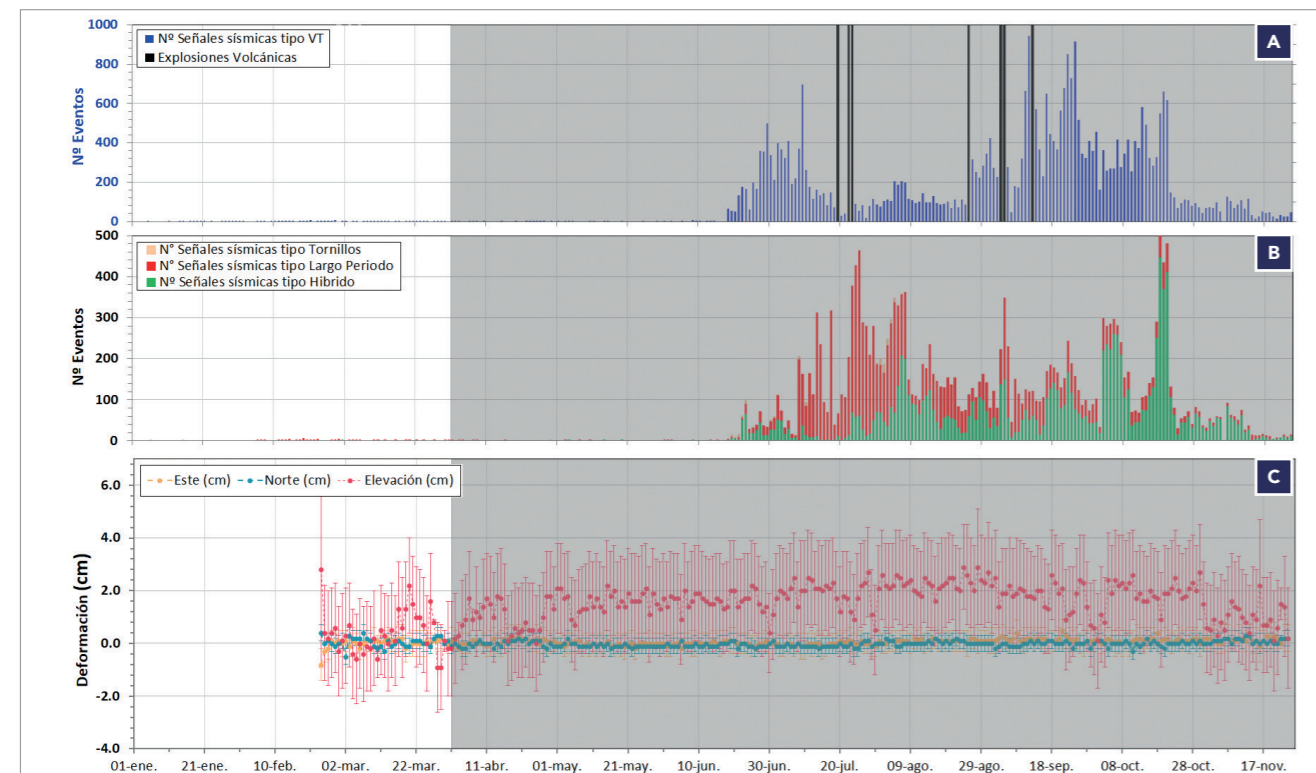


Figura 2.- Cuadro que muestra la evolución temporal de los principales eventos sismovolcánicos registrados por la red de vigilancia geofísica permanente del volcán Ubinas entre el 1 de enero y el 31 de marzo de 2019 (área sin sombreada). Se observan, en general, niveles bajos de actividad.

# ACTIVIDAD

Periodo: abril-junio de 2019

Entre el 1 de abril y el 17 de junio, la actividad volcánica del Ubinas mantuvo un comportamiento similar (niveles bajos) al observado en el trimestre anterior. En dicho periodo, el promedio diario de sismos era menor a 1 y el 71 % de la sismicidad (tipo VT) se relacionaba a procesos de fracturamiento de rocas que ocurrían al interior del volcán.

Este escenario cambió el 18 de junio, cuando desde las 09:40 h el IGP empezó a registrar la ocurrencia de un enjambre de sismos de tipo VT que fueron localizados bajo el volcán a una profundidad próxima a los 7.5 km. Este enjambre sísmico estuvo conformado por 33 eventos con magnitudes por debajo de M2.7, ocurridos en un lapso de 75 minutos. Esta anomalía en el comportamiento del volcán Ubinas fue reportada en el boletín vulcanológico n.º 012-2019.

Entre el 19 y 23 de junio, la actividad sísmica de tipo VT se incrementó a razón de 55 sismos por día; aunado a ello, se empezaron a registrar señales sísmicas de tipo Tornillo que indicaban la acumulación de presión al interior del volcán. Es en este contexto que se empiezan a registrar sismos relacionados al

ascenso de magma (tipo Híbrido).

El 21 de junio, el IGP emitió un nuevo boletín recomendando elevar el nivel de alerta volcánica de color verde a amarillo. Finalmente, la erupción inició el 24 de junio con las primeras emisiones de ceniza.



Figura 3.- Emisiones de ceniza observadas en el volcán Ubinas el 24 de junio. Estas fueron capturadas por la cámara Campbell Scientific del IGP instalada en el flanco sur del volcán.

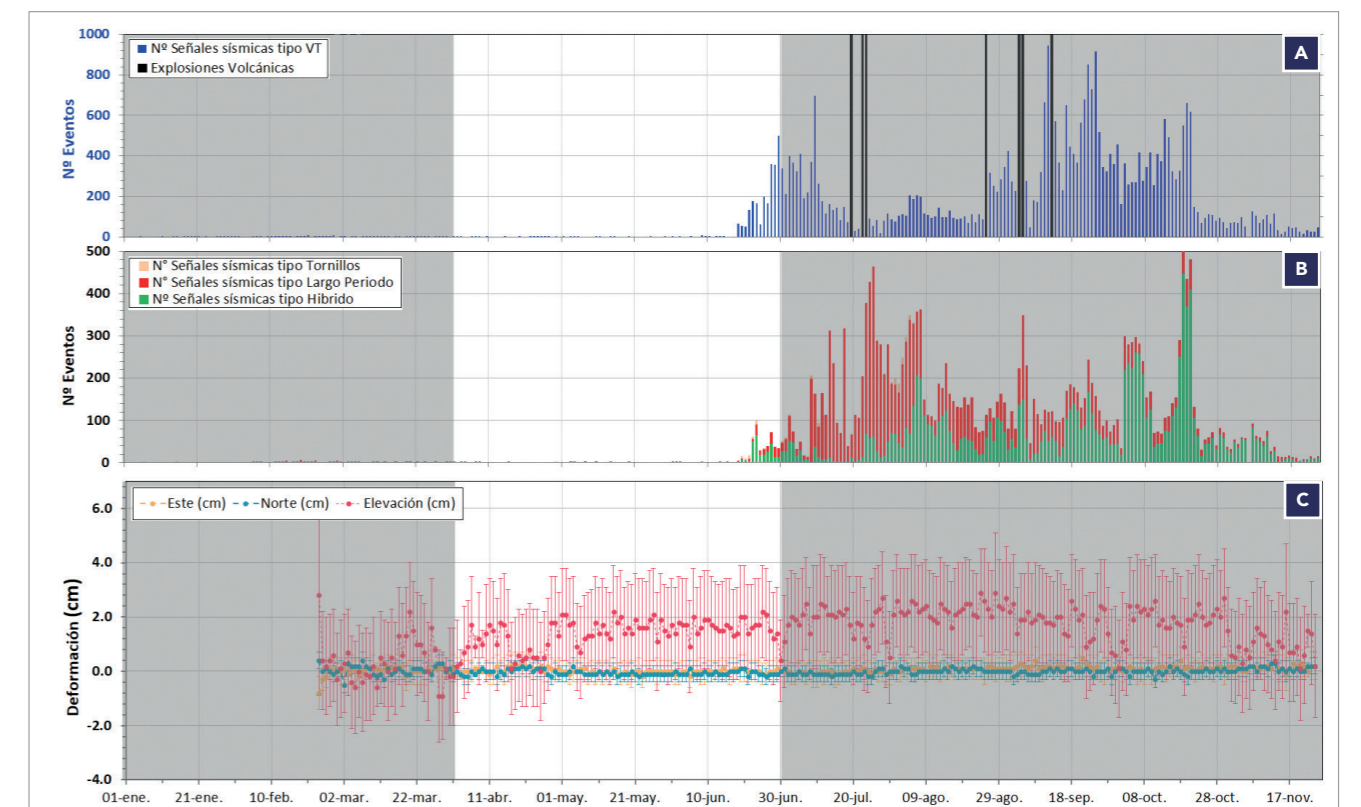


Figura 4.- Cuadro que muestra la evolución temporal de los principales eventos sismovolcánicos registrados por la red de vigilancia geofísica permanente del volcán Ubinas entre 1 de abril y el 30 de junio de 2019 (área sin sombreada). Destaca la actividad sísmica asociada al inicio del proceso eruptivo 2019.

# ACTIVIDAD

Periodo: julio-septiembre de 2019

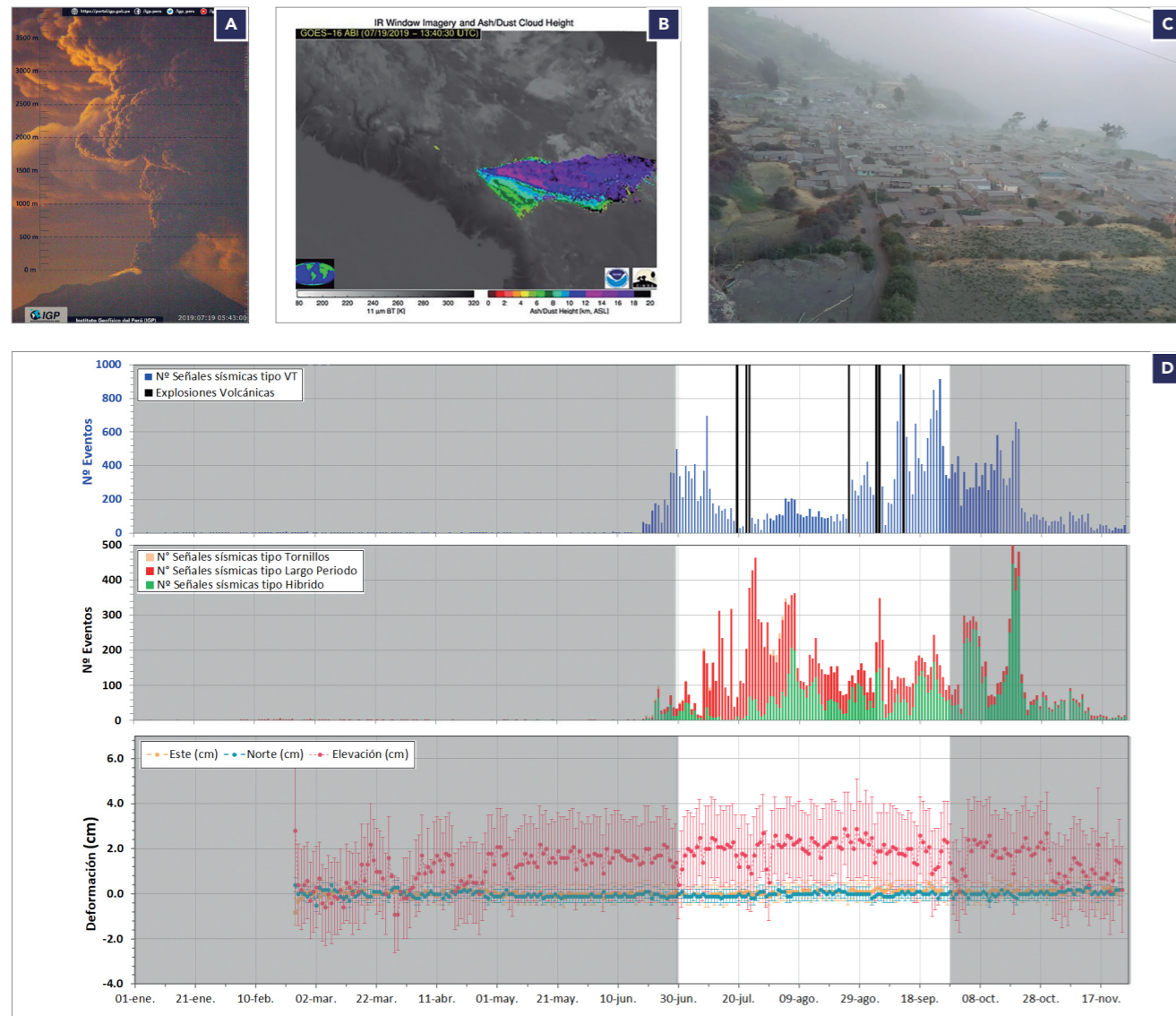


Figura 5.- A) Actividad explosiva del 19 de julio que generó columnas eruptivas de más de 5 km de altura. B) Dispersión de las cenizas expulsadas el 19 de julio. Las partículas viajaron más de 250 km en dirección este y sureste del Ubinas (Foto: NOAA). C) Pueblo de Ubinas (ubicado a 6 km de distancia del volcán) afectado por la caída de cenizas del día 19 de julio de 2019. D) Cuadro que muestra la evolución temporal de los principales eventos sismovolcánicos registrados por la red de vigilancia geofísica permanente del volcán Ubinas entre el 1 de julio y el 30 de septiembre de 2019 (área sin sombrear).

Iniciado el proceso eruptivo del volcán Ubinas en junio, la actividad continuó mostrando un incremento en el número y energía de las señales sísmicas asociadas al ascenso de magma (tipo Híbrido) y movimiento de fluidos volcánicos (tipo LP). Solo entre el 1 al 18 de julio, se registraron 6640 sismos a razón de 391 eventos por día. Las imágenes satelitales adquiridas entre el 14 y 19 de julio evidenciaron la presencia de un cuerpo de lava en la superficie del cráter.

En estas fechas, se generan las primeras y más violentas explosiones volcánicas registradas en los últimos años

en el volcán Ubinas. Los productos emitidos fueron dispersados en dirección este y sureste del volcán, a distancias mayores a los 250 km. El 19 de julio, en horas de la madrugada, el IGP recomienda elevar el nivel de alerta de color amarillo a naranja.

Entre agosto y septiembre, se registraron 27 926 sismos de origen volcánico: el 34 % de estos estuvieron relacionados al ascenso de magma y al movimiento de fluidos volcánicos. Durante este trimestre, ocurrieron cinco explosiones volcánicas; la última de ellas tuvo lugar el 12 de septiembre.

# ACTIVIDAD

Periodo: octubre-noviembre de 2019

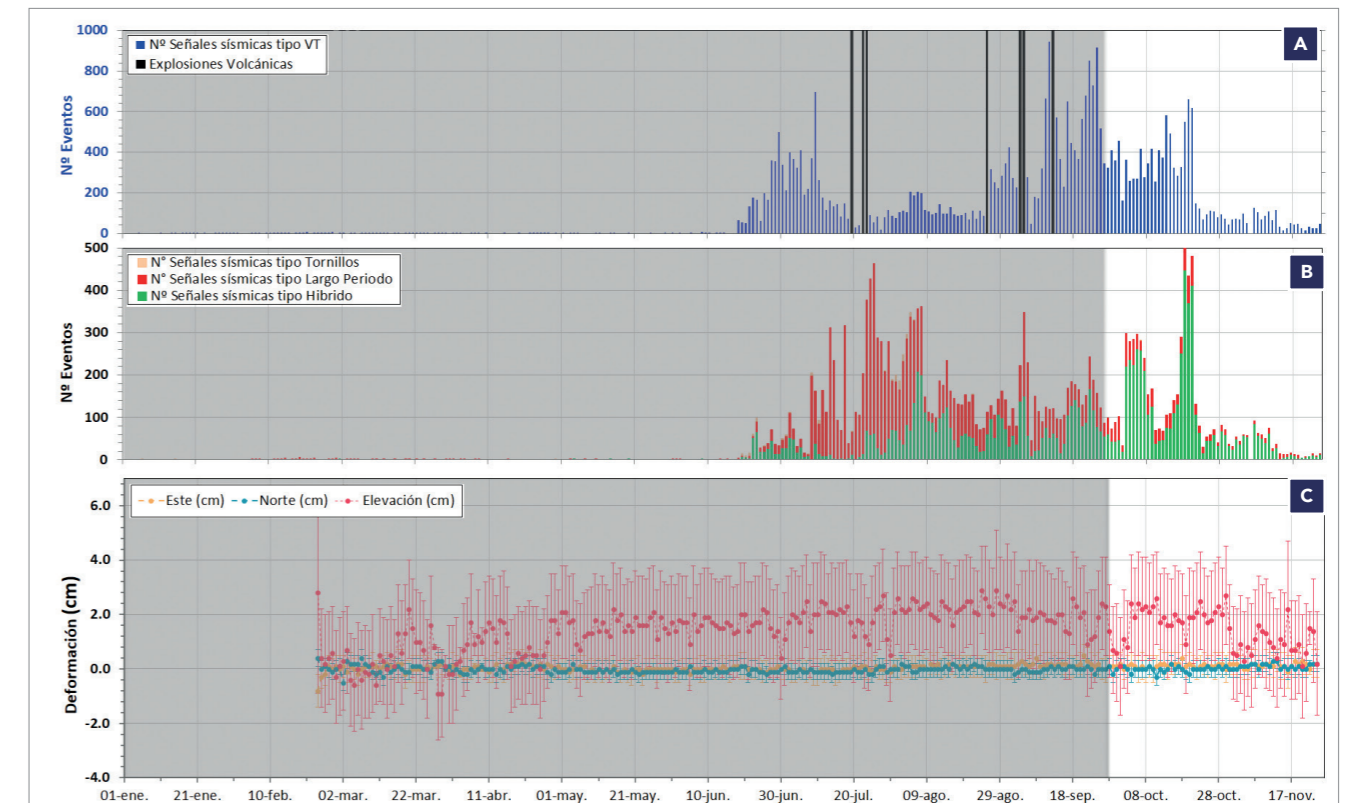


Figura 6.- Cuadro que muestra la evolución temporal de los principales eventos sismovolcánicos registrados por la red de vigilancia geofísica del volcán Ubinas entre el 1 de octubre y el 30 de noviembre de 2019. Se aprecia un descenso paulatino tras los eventos explosivos de julio y septiembre.

La actividad del volcán Ubinas comenzó a disminuir progresivamente. Durante octubre, se clasificaron un total de 13 835 sismos volcánicos: el 62.6 % de ellos correspondieron a eventos de sismos de tipo Volcano-Tectónicos tipo (VT) o fractura, mientras que el 37.4 % restante habrían estado asociados al ascenso de magma y al movimiento de fluidos (sismos Híbridos y Largo Periodo). Es importante destacar que los niveles de energía de estos eventos sísmicos fueron 60 % más bajos que los registrados entre junio y julio de 2019

El sistema satelital MIROVA detectó anomalías térmicas de bajo nivel, con valores iguales o menores a 2 MW. Debido a ello, y dado que desde el 12 de septiembre no se registraron nuevas explosiones volcánicas, el IGP recomendó disminuir el nivel de alerta volcánica de color naranja a amarillo.

Durante el mes noviembre, las cámaras de vigilancia registraron emisiones tenues de gases magmáticos y de vapor de agua que alcanzaron alturas menores a los 1000 m por encima del cráter. Los niveles bajos de actividad registrados en los parámetros geofísicos

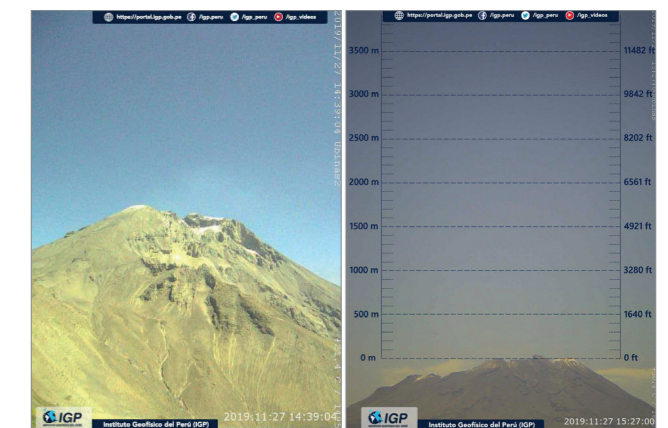


Figura 7.- Imágenes del volcán Ubinas capturadas por las dos cámaras de vigilancia del IGP. No se apreciaron emisiones de ceniza en el periodo.

de tipo sísmico, geodésicos y de sensores remotos permanecieron sin variaciones hasta el 30 de noviembre.

La probabilidad del registro de nuevas explosiones volcánicas es baja; sin embargo, se recomendó a las autoridades no descuidar las acciones de prevención ante un posible incremento de la actividad eruptiva.

# Misti

- Elevación**  
5822 m s.n.m.
- Región**  
Arequipa
- Provincia**  
Arequipa
- Última erupción**  
1454 ± 16 años
- Población en riesgo**  
1 millón de personas aprox.
- Inicio de vigilancia**  
2005
- Métodos de vigilancia**  
7 estaciones sísmicas  
2 cámaras científicas  
1 estación GPS

## ACTIVIDAD

Periodo: enero-noviembre de 2019

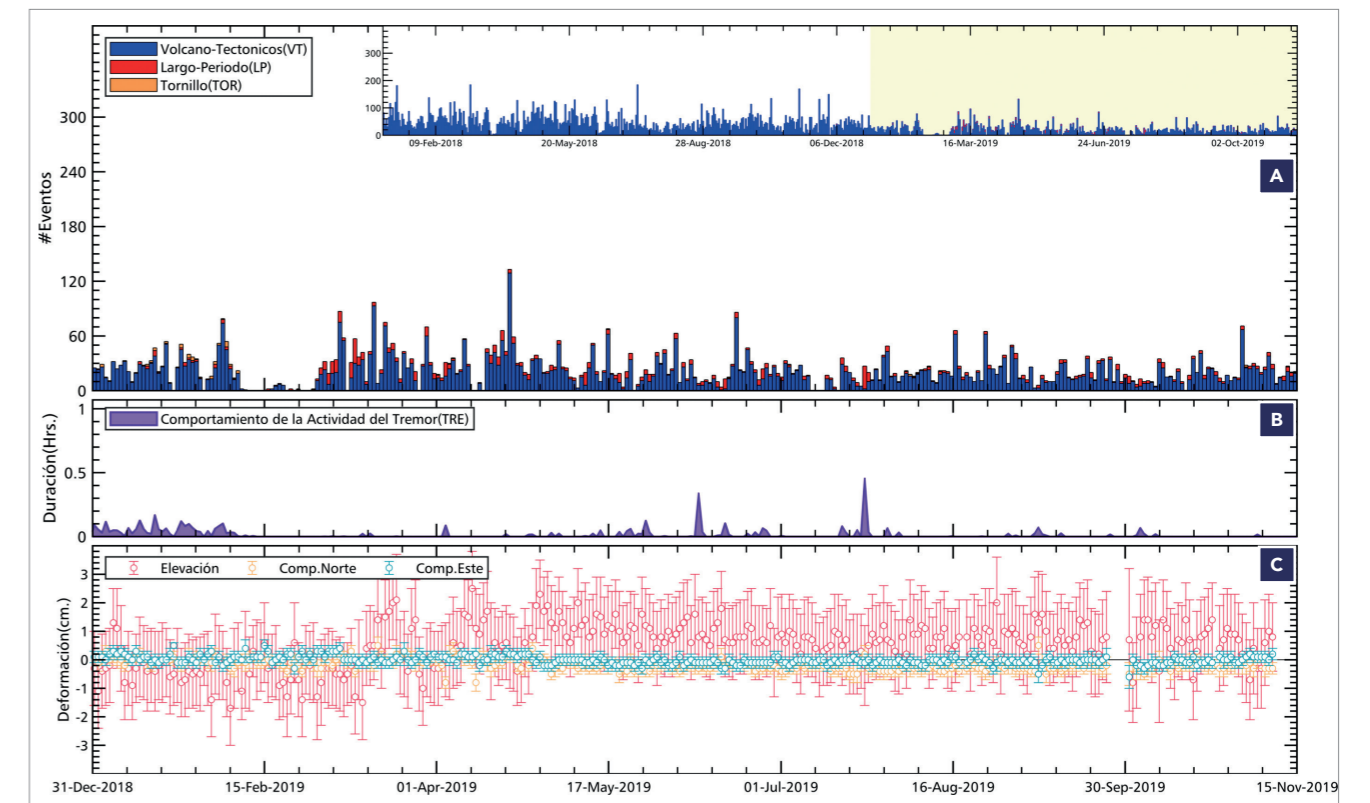


Figura 1.- Evolución temporal de los principales eventos sismovolcánicos (Volcano-Tectónico, Largo Periodo y Tornillo) y valores de deformación superficial del volcán Misti registrados entre el 1 de enero y el 15 de noviembre de 2019. El sombreado en amarillo corresponde al periodo de análisis.

El Misti es un volcán activo considerado de muy alto riesgo debido a su proximidad a la ciudad de Arequipa, la cual cuenta con más de 1 millón de habitantes. La actividad del Misti se caracteriza por presentar microsismicidad permanente, esporádicas fumarolas y desprendimientos de roca sobre sus flancos. Entre enero a noviembre de 2019, el IGP elaboró veintidos boletines vulcanológicos describiendo el tipo de actividad (figura 2).

En dicho periodo, la dinámica interna y externa del volcán no mostró cambios significativos respecto al año anterior. Se mantuvo una tasa de ocurrencia de 45 sismos diarios en promedio, la mayoría de los cuales corresponden a sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) asociados a la ruptura de rocas al interior del macizo (figura 1A). Estos sismos son, por lo general, imperceptibles al sentido humano.

Por otro lado, los sismos asociados a la circulación de fluidos volcánicos (tipo LP, Tremor, etc.) no presentaron variaciones significativas (figura 1B). Asimismo, los resultados obtenidos con el GPS instalado en el Misti (figura 1C), concluyen que no existen indicios de una



Figura 2.- Modelo de boletín vulcanológico del volcán Misti. Estos fueron emitidos quincenalmente entre enero y noviembre de 2019.

importante deformación del edificio volcánico.

El IGP, a través del CENVUL, mantiene la vigilancia de este volcán las 24 horas del día.

# Ticsani

- Elevación**  
5408 m s.n.m.
- Región**  
Moquegua
- Provincia**  
Mariscal Nieto
- Última erupción**  
Hace 400 años aprox.
- Población en riesgo**  
12 mil personas aprox.
- Inicio de vigilancia**  
2015
- Métodos de vigilancia**  
5 estaciones sísmicas  
1 cámara científica  
1 inclinómetro

## ACTIVIDAD

Periodo: enero-noviembre de 2019

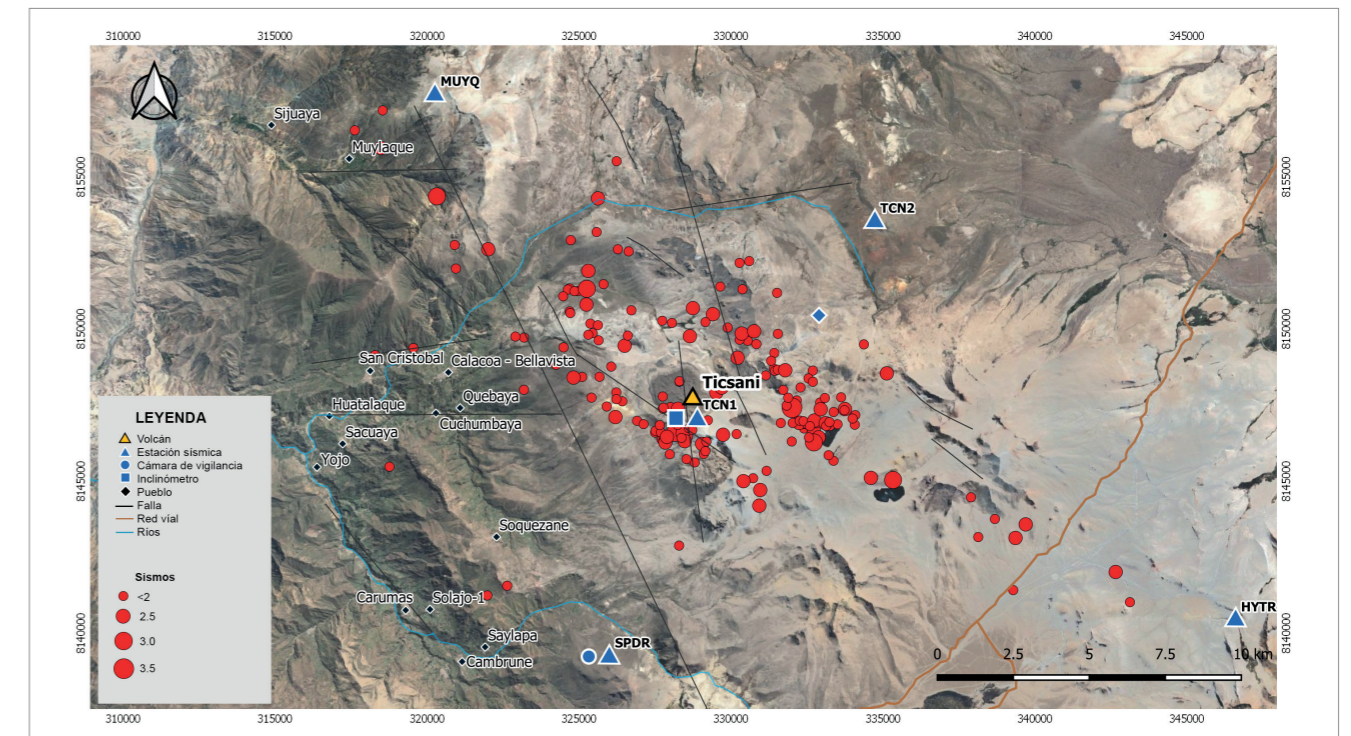


Figura 1.- Distribución espacial representativa de sismos de tipo Volcano-Tectónico ligados al fracturamiento de rocas en el volcán Ticsani, registrados en el periodo enero-noviembre de 2019.

El Ticsani es catalogado como un volcán de alto riesgo. Este coloso presentó principalmente durante el 2019 actividad sísmica de tipo Volcano-Tectónico, asociada al fracturamiento de rocas bajo el volcán. Se han observado, al menos, cuatro enjambres sísmicos y la presencia, aunque esporádica, de 47 sismos de tipo Híbrido asociados al movimiento de fluidos magmáticos en profundidad.

La sismicidad representativa en 2019 se concentró bajo el domo reciente (figura 1) y a 3.5 km al este de él, con magnitudes de hasta M3.5. Es importante destacar que la actividad sísmica ha disminuido en referencia a años anteriores, cuando se registraron más de 1000 eventos por día.

El Instituto Geofísico del Perú ha continuado en 2019 con la implementación de instrumentación multiparamétrica sobre este macizo. En abril, se instaló una cámara científica de vigilancia permanente que transmite imágenes del macizo volcánico y sus emisiones fumarólicas en tiempo real. Igualmente, en noviembre de 2019, se instaló un inclinómetro próximo al domo reciente del Ticsani, instrumental geodésico que permite observar la variación de la deformación asociada a la actividad volcánica.



Figura 2.- Imagen del volcán Ticsani capturada desde el flanco sur por la cámara de vigilancia permanente instalada por el IGP. El CENVUL, con sede en Arequipa, registra imágenes del volcán cada minuto.

En síntesis, el Ticsani no ha presentado en 2019 indicios de una probable erupción a corto plazo; sin embargo, el IGP realiza un monitoreo permanente de su comportamiento debido al potencial eruptivo que presenta y a los impactos que una erupción volcánica podría generar.

# Coropuna

- Elevación**  
6377 m s.n.m.
- Región**  
Arequipa
- Provincias**  
Castilla y Condesuyos
- Última erupción**  
Hace 700 años aprox.
- Población en riesgo**  
90 mil personas aprox.
- Inicio de vigilancia**  
2018
- Métodos de vigilancia**  
5 estaciones sísmicas  
1 cámara científica  
2 inclinómetros

## ACTIVIDAD

Periodo: enero-noviembre de 2019

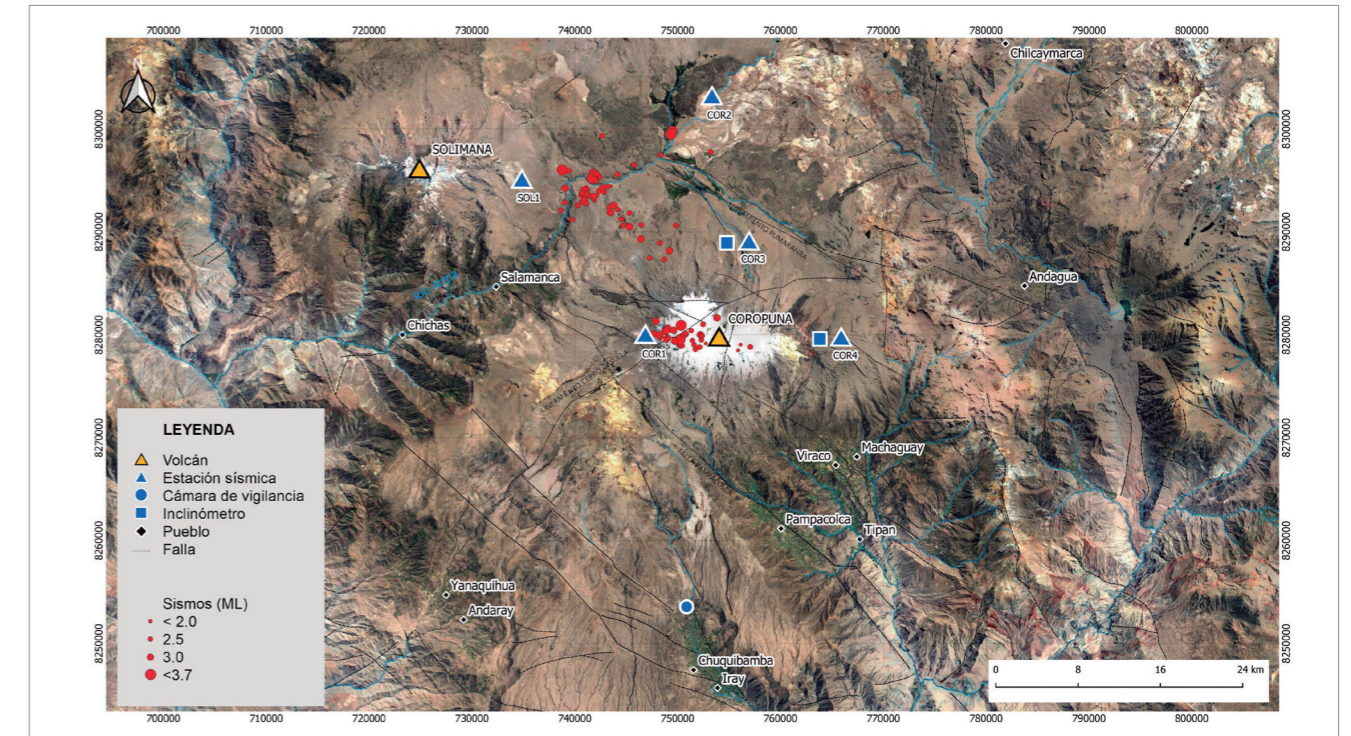


Figura 1.- Mapa de distribución de sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT) registrados en el volcán Coropuna durante el periodo enero-septiembre de 2019. Los sismos fueron localizados en dos grupos: el primero localizado a menos de 6 km al oeste del volcán y el segundo a 18 km al noroeste, respectivamente. El sismo de mayor magnitud (M3.7) fue registrado bajo el volcán Coropuna a 7 km de profundidad y ocurrió el 9 de abril de 2019 a las 09:09 h.

La evaluación realizada de los datos geofísicos provenientes de la red de monitoreo volcánico del Coropuna, correspondiente al periodo enero-noviembre de 2019, ha permitido registrar e identificar un total de 3569 sismos. De este total, se ha distinguido que el 85 % de sismos corresponderían a sismos Volcano-Tectónicos asociados al fracturamiento de rocas al interior del volcán, mientras que el 10 % correspondería a sismos de tipo LP y Tremor que podrían estar vinculados al paso de fluidos volcánicos (agua, vapor y gases). Por otra parte, el 9 % de estas señales sísmicas estarían relacionadas a la dinámica propia del glaciar del Coropuna (tipo DG=dinámica del Glaciar).

En el citado periodo, el promedio de sismos de tipo VT alcanzó un valor de 10 eventos por día, mientras que la sismicidad de tipo LP, Tremor y DG mantuvo un nivel de actividad menor a 1 sismo por día. Se realizó la localización de 97 eventos, los mismos que generaron magnitudes menores a M.3.7. Estos eventos se distribuyeron en dos zonas sísmicas denominadas Z1 y Z2, ubicadas al oeste y noroeste del complejo volcánico, entre los 10 km y 15 km de profundidad, respectivamente (figura 1).



Figura 2.- Imagen del volcán Coropuna capturada desde el flanco sur por la cámara de vigilancia permanente instalada por el IGP.

Entre enero y noviembre de 2019, el IGP, a través del CENVUL, emitió veintidos boletines que indicaron que los niveles de actividad del Coropuna fueron bajos, por lo que no existen indicios que hagan prever el desarrollo de una erupción en el corto o mediano plazo.

# Chachani

- Elevación**  
6057 m s.n.m.
- Región**  
Arequipa
- Provincia**  
Arequipa
- Última erupción**  
Hace 56 mil años aprox.
- Población en riesgo**  
1 millón de personas aprox.
- Inicio de vigilancia**  
2018
- Métodos de vigilancia**  
1 estación sísmica  
1 estación GPS  
1 inclinómetro

## ACTIVIDAD

Periodo: septiembre-noviembre de 2019

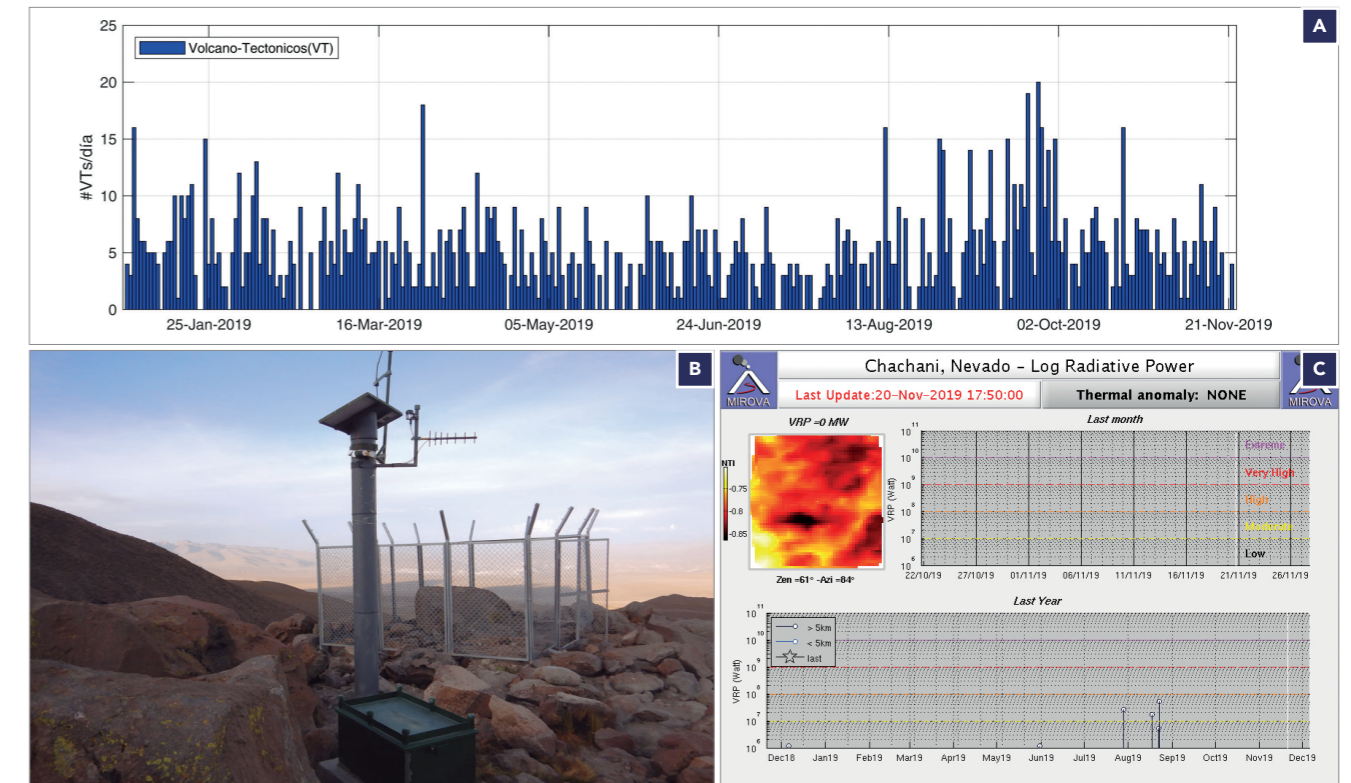


Figura 1.- A) Cuadro que muestra la evolución temporal de la actividad sismovolcánica de tipo fractura registrada en el volcán Chachani entre enero y noviembre de 2019. B) Estación de vigilancia CH1 en inmediaciones del volcán Chachani que aloja un sensor sísmico y un inclinómetro. C) Registro del sistema satelital MIROVA que muestra la carencia de anomalías térmicas asociadas a la actividad del volcán Chachani.

El Chachani es un complejo volcánico potencialmente activo. A la fecha, no existen registros documentados sobre algún tipo de fenomenología asociada a este volcán en épocas históricas. Sin embargo, por los depósitos volcánicos que conforman dicho complejo volcánico y otros que yacen en sus inmediaciones, se alega que dicho volcán presentó variados episodios eruptivos mucho más violentos que el volcán Misti.

Una reciente estimación del riesgo volcánico en el sur del país señala que el Chachani representa un nivel de riesgo alto debido, fundamentalmente, a su proximidad a la ciudad de Arequipa, la cual alberga a una población superior al millón de habitantes e importante infraestructura en sus alrededores. Por ello, el Instituto Geofísico del Perú inició la vigilancia continua de la actividad volcánica del Chachani desde agosto de 2018.

Entre mayo y noviembre de 2019, el IGP reportó el comportamiento del Chachani a través de siete boletines vulcanológicos. En resumen, la actividad sísmica predominante en el volcán estuvo asociada a eventos de ruptura de rocas (VT) al interior del



Figura 2.- Modelo de boletín vulcanológico del volcán Chachani. Estos fueron emitidos mensualmente entre mayo y noviembre de 2019.

macizo volcánico, con un promedio de 6 eventos diarios y de muy baja energía (figura 1A). En 2019, no se observaron sismos asociados a la dinámica de fluidos volcánicos (magma, gas y vapor de agua).

Aunque su actividad no muestra mayores variaciones, el IGP mantiene la vigilancia permanente del Chachani las 24 horas del día.

# Tutupaca

-  **Elevación**  
5801 m s.n.m.
-  **Región**  
Tacna
-  **Provincia**  
Candarave
-  **Última erupción**  
1802
-  **Población en riesgo**  
15 mil personas aprox.
-  **Inicio de vigilancia**  
2018
-  **Métodos de vigilancia**  
3 estaciones sísmicas  
1 cámara científica  
1 inclinómetro

## ACTIVIDAD

Periodo: mayo-noviembre de 2019

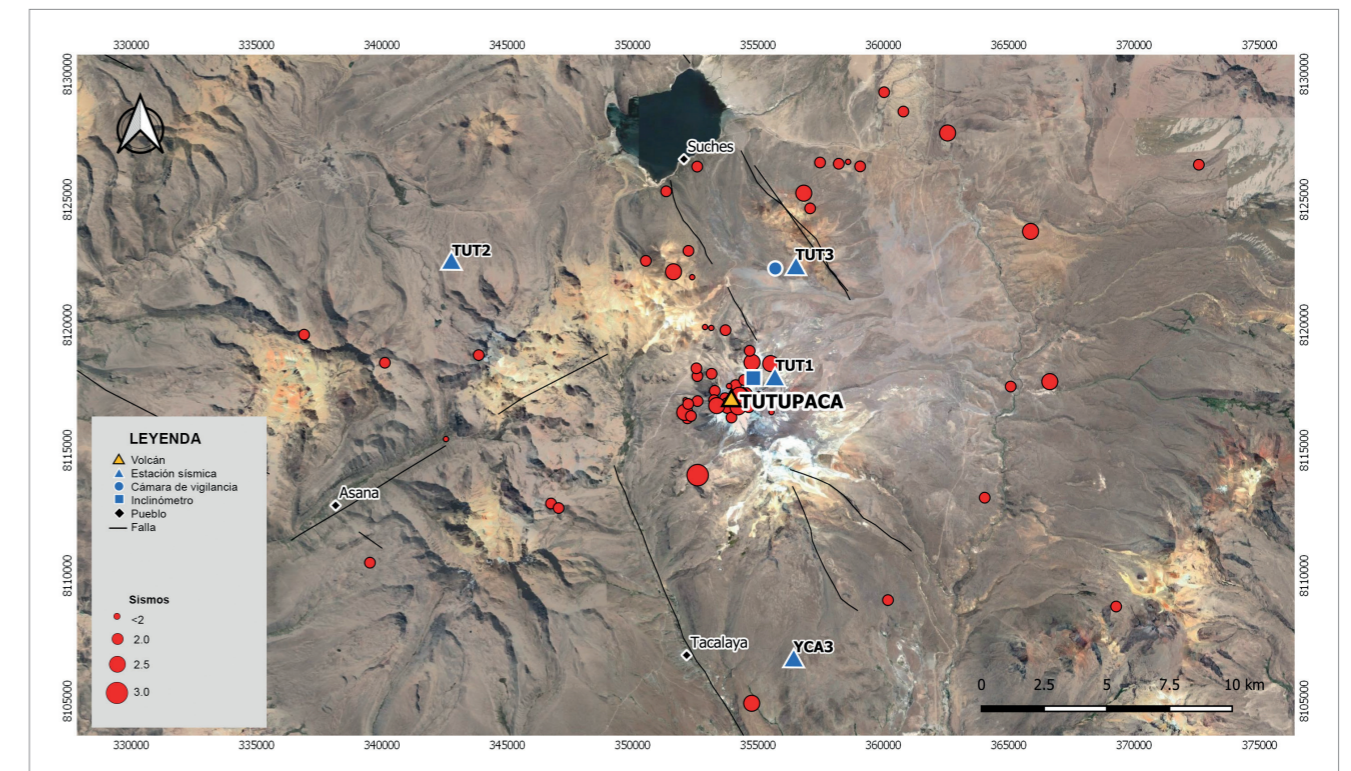


Figura 1.- Distribución espacial de sismos de tipo Volcano-Tectónico ligados al fracturamiento de rocas en el volcán Tutupaca, registrados en el periodo mayo-noviembre de 2019. La sismicidad se agrupó principalmente próxima al complejo volcánico.

El complejo volcánico Tutupaca se encuentra ubicado a 28 km al noroeste de la ciudad de Candarave, región Tacna. El volcán Tutupaca es catalogado como un volcán de alto riesgo. Durante el 2019, presentó actividad sísmica de tipo Volcano-Tectónico, asociada al fracturamiento de rocas al interior del volcán.

La ocurrencia de esta sismicidad, por lo general, se da en forma de pequeños enjambres sísmicos. Entre mayo y noviembre de 2019, se observaron 5 enjambres con un número de entre 49 a 156 sismos por enjambre. La distribución espacial de la sismicidad muestra que los eventos se concentraron próximos al macizo, en su sector este, con magnitudes de hasta M3.0.

La red de monitoreo del IGP sobre el volcán Tutupaca consta, además de sismómetros, de una cámara científica que permite el monitoreo de las emisiones fumarólicas. Es importante destacar también que el Tutupaca ya cuenta con un inclinómetro instalado, instrumental geodésico útil para observar la variación de la deformación asociada a la actividad volcánica.

Los trabajos de monitoreo continúan sobre este

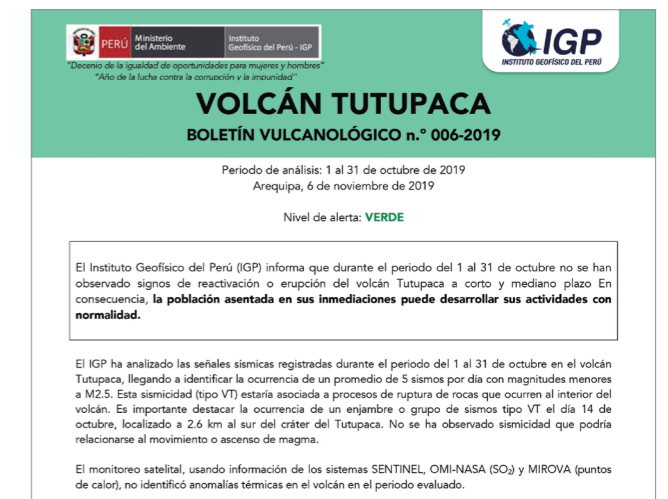


Figura 2.- Modelo de boletín vulcanológico del volcán Tutupaca. Estos fueron emitidos mensualmente entre mayo y noviembre de 2019.

volcán activo. En la actualidad, no se han observado indicios asociados a un posible proceso eruptivo; sin embargo, el IGP, en su compromiso con la gestión del riesgo de desastres y la alerta temprana de erupciones, proporciona información periódica a las autoridades y a la población involucrada.

# Yucamane

- Elevación**  
5495 m s.n.m.
- Región**  
Tacna
- Provincia**  
Candarave
- Última erupción**  
Hace 3270 años aprox.
- Población en riesgo**  
16 mil personas aprox.
- Inicio de vigilancia**  
2018
- Métodos de vigilancia**  
3 estaciones sísmicas  
1 cámara científica  
2 inclinómetros

## ACTIVIDAD

Periodo: mayo-noviembre de 2019

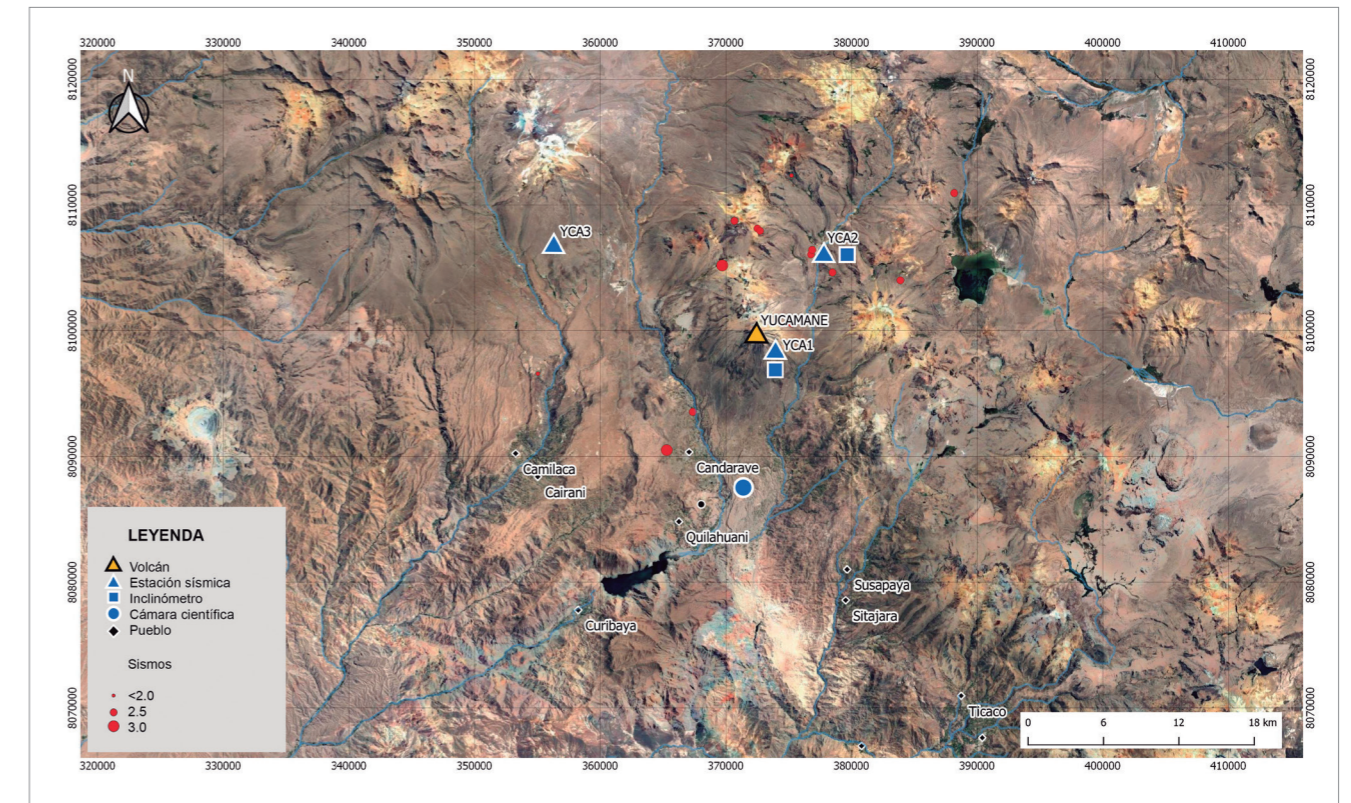


Figura 1.- Distribución espacial de sismos de tipo Volcano-Tectónico ligados al fracturamiento de rocas en el volcán Yucamane, registrados en el periodo mayo-noviembre de 2019. La sismicidad se presenta dispersa en los alrededores del volcán.

El comportamiento dinámico del volcán Yucamane en este periodo presentó niveles de actividad bajos, representados por la ocurrencia de hasta 243 sismos que habrían estado relacionados a procesos de fractura de rocas al interior del volcán (tipo VT). Algunas de estas señales sísmicas fueron localizadas en un radio de hasta 25 km desde el cráter volcánico, las que generaron magnitudes por debajo de  $M2.8$  (figura 1).

Entre el 1 de mayo y el 30 de noviembre de 2019, el IGP, a través del CENVUL, emitió siete boletines vulcanológicos sobre la actividad del volcán Yucamane, los mismos que fueron compartidos con las instituciones y autoridades vinculadas a la gestión del riesgo volcánico en Tacna, así como al público en general.

La cámara de vigilancia científica instalada en las cercanías del Yucamane no ha registrado actividad fumarólica relacionada a emisiones de gases o de vapor de agua. Asimismo, los sensores satelitales de tipo térmico (MIROVA) no han detectado anomalías en el cráter del volcán Yucamane.

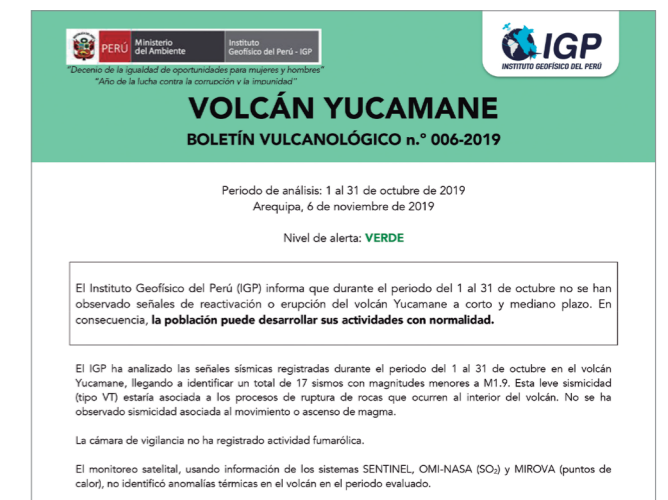


Figura 2.- Modelo de boletín vulcanológico del volcán Yucamane. Estos fueron emitidos mensualmente entre mayo y noviembre de 2019.

En conclusión, durante el 2019 no se han registrado señales sísmicas o emisiones fumarólicas asociadas a la reactivación del volcán Yucamane en el corto o mediano plazo.

# Sara Sara

## ACTIVIDAD

Periodo: agosto-noviembre de 2019

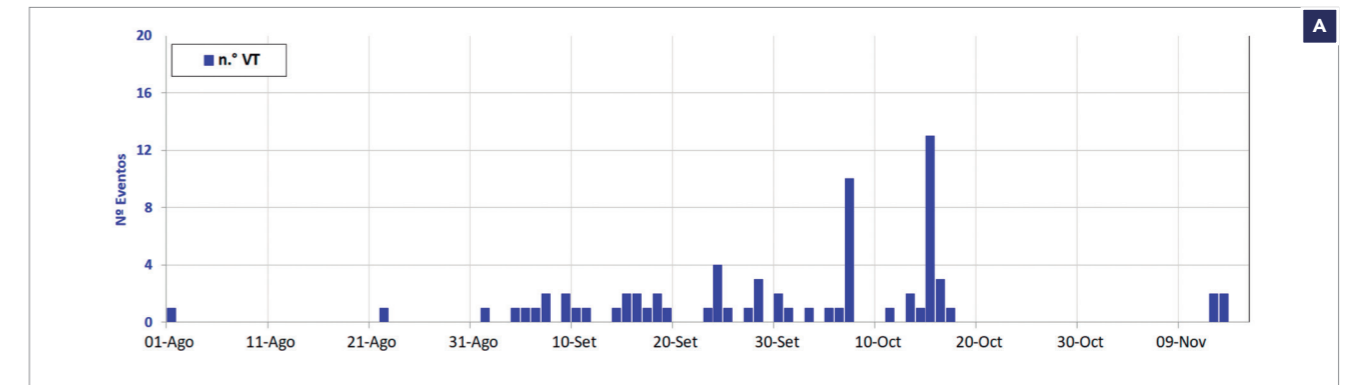


Figura 1.- A) Cuadro que muestra la ocurrencia de sismos de tipo Volcano-Tectónico en el volcán Sara Sara en el periodo agosto-noviembre de 2019. B) Estación de monitoreo SAR1 instalada en el sector sureste del volcán. C) Imagen del volcán Sara Sara capturada cada minuto por la cámara Campbell Scientific del IGP.

El volcán Sara Sara está ubicado entre las provincias de Paúcar del Sara Sara y Parinacochas en la región Ayacucho, emplazado entre la laguna Parinacochas (Ayacucho) y el río Ocoña (Arequipa). Es un volcán joven situado al extremo norte de la cadena volcánica de los Andes que presentó actividad explosiva intermitente desde hace menos de 1 000 000 de años hasta aproximadamente 16 000 años antes del presente.

De acuerdo a la evaluación realizada sobre toda la información geofísica proveniente de la red de monitoreo volcánico del Sara Sara, que corresponde al periodo agosto-noviembre de 2019, se ha identificado que la mayoría de los sismos que ocurren en la zona son de tipo Volcano-Tectónico (VT), ligados al fracturamiento de rocas al interior del volcán. Entre agosto y noviembre de 2019, se registró un total de 76 sismos con magnitudes menores a M3.3; algunos de estos eventos fueron localizados a 10 km al este del volcán a profundidades próximas a los 14 km. Por otra parte, la cámara científica de vigilancia, instalada a 10 km al este del volcán, no ha registrado actividad fumarólica en el presente periodo de análisis.

Hasta noviembre de 2019, el IGP ha emitido

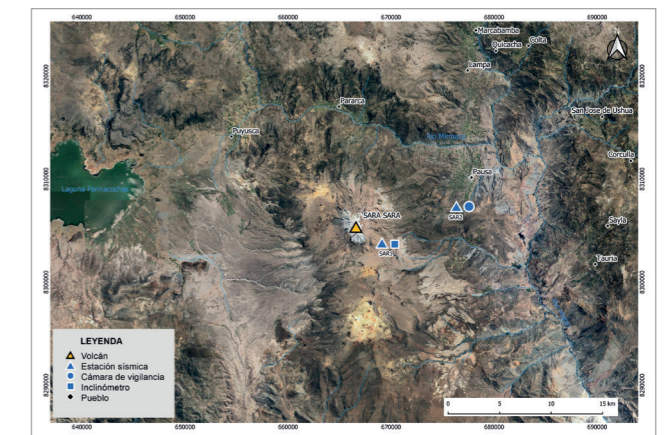


Figura 2.- Ubicación del volcán Sara Sara y distribución de la red de monitoreo geofísico. En triángulos azules se representan las estaciones sísmicas; en cuadrado, el inclinómetro y en círculo azul la cámara de vigilancia científica.

tres boletines vulcanológicos. Estos documentos concluyen que la actividad volcánica del Sara Sara muestra bajos niveles; por lo tanto, no existe indicios que hagan prever el desarrollo de una erupción volcánica en el corto o mediano plazo.

- Elevación**  
5522 m s.n.m.
- Región**  
Ayacucho
- Provincia**  
Paúcar del Sara Sara y Parinacochas
- Última erupción**  
No se tiene registro
- Población en riesgo**  
14 mil personas aprox.
- Inicio de vigilancia**  
2018
- Métodos de vigilancia**  
3 estaciones sísmicas  
1 cámara científica  
1 inclinómetro

# Huaynaputina

-  **Elevación**  
4850 m s.n.m.
-  **Región**  
Moquegua
-  **Provincia**  
General Sánchez Cerro
-  **Última erupción**  
1600
-  **Población en riesgo**  
23 mil personas aprox.
-  **Inicio de vigilancia**  
2019
-  **Métodos de vigilancia**  
3 estaciones sísmicas  
1 inclinómetro

## ACTIVIDAD

Periodo: junio-noviembre de 2019

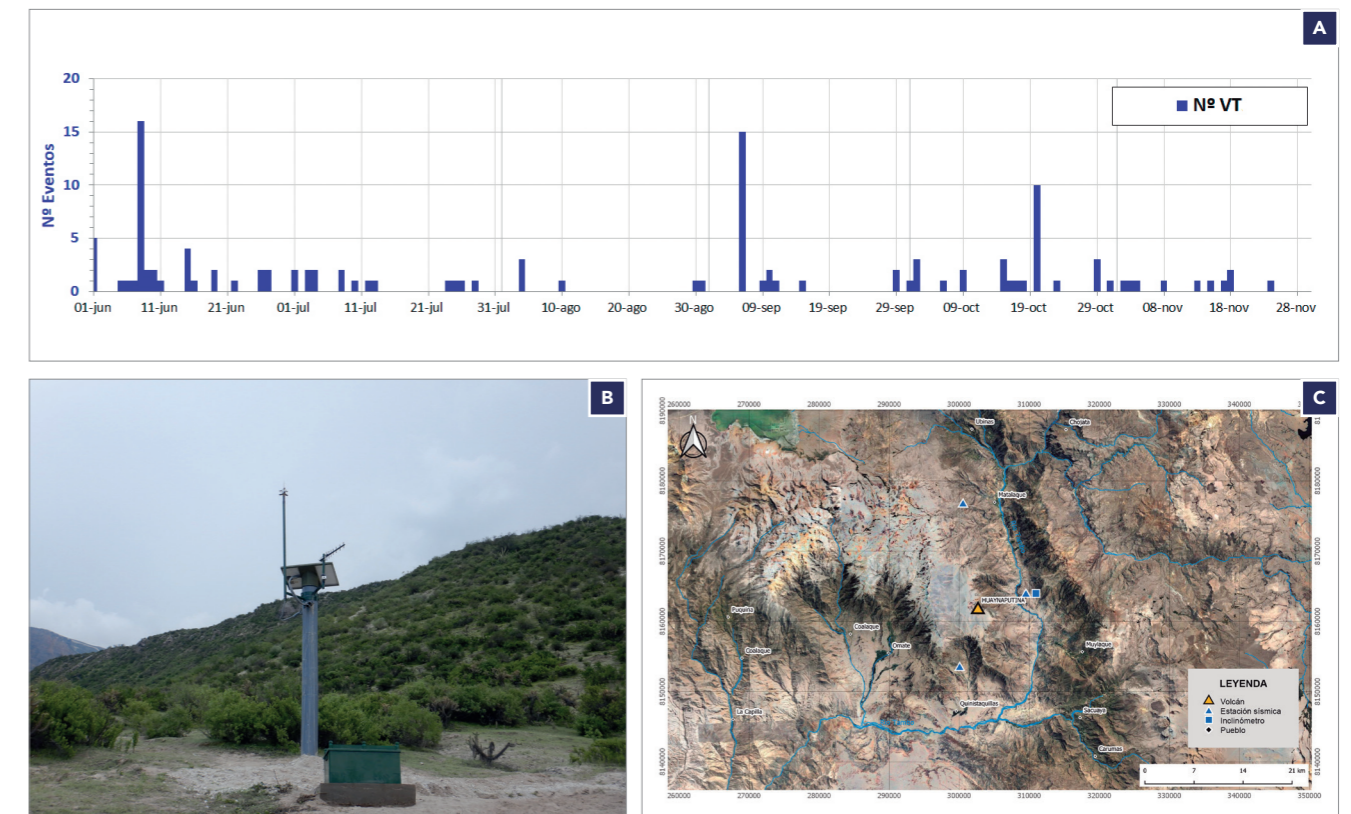


Figura 1.- A) Cuadro que muestra la ocurrencia de sismos de tipo Volcano-Tectónico en el volcán Huaynaputina en el periodo junio–noviembre de 2019. B) Estación de monitoreo HNP1 instalada en el sector sureste del volcán. C) Red de monitoreo desplegada por el IGP en el volcán Huaynaputina.

El Huaynaputina (provincia de General Sánchez Cerro, región Moquegua) es considerado como un volcán de alto riesgo en caso de generar un proceso eruptivo. La última erupción de este volcán ocurrió en el año 1600 y sepultó a aproximadamente 30 pueblos, afectando además el clima a nivel mundial en el año 1601 debido a los grandes volúmenes de productos volcánicos expulsados hacia la. Actualmente, registra actividad sísmica y emisión permanente de fumarolas tenues.

La probabilidad del desarrollo de una nueva erupción es latente, debido a ello el IGP monitorea continuamente su actividad mediante una red de instrumentos que envían información geofísica en tiempo real al CENVUL en Arequipa.

Entre junio y noviembre de 2019, se ha registrado un total de 121 señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico a una tasa promedio de 1 evento por día, las cuales estarían asociadas a procesos de ruptura de rocas bajo el volcán y en sus alrededores. Durante el mencionado periodo, se ha realizado la localización de 40 sismos, todos ellos dentro de un radio de hasta 15 km del centro volcánico con una profundidad de

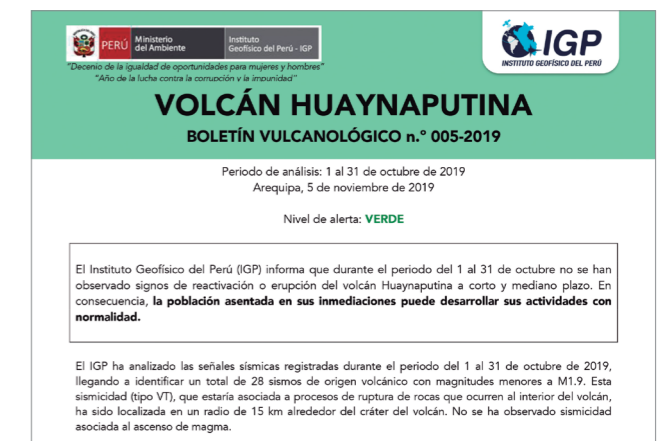


Figura 2.- Modelo de boletín vulcanológico del volcán Huaynaputina. Estos fueron emitidos mensualmente entre junio y noviembre de 2019.

hasta 11 km de profundidad. No se han registrado señales sísmicas que indiquen el desarrollo de una próxima erupción volcánica en el corto o mediano plazo. En 2019, se han publicado un total de seis boletines vulcanológicos, todos ellos enviados a las instituciones integrantes del SINAGERD.

# Casiri

- Elevación**  
5650 m s.n.m.
- Región**  
Tacna
- Provincia**  
Tacna
- Última erupción**  
Hace 2600 años aprox.
- Población en riesgo**  
12 mil personas aprox.
- Inicio de vigilancia**  
2019
- Métodos de vigilancia**  
2 estaciones sísmicas  
1 inclinómetro

## ACTIVIDAD

Periodo: septiembre-noviembre de 2019

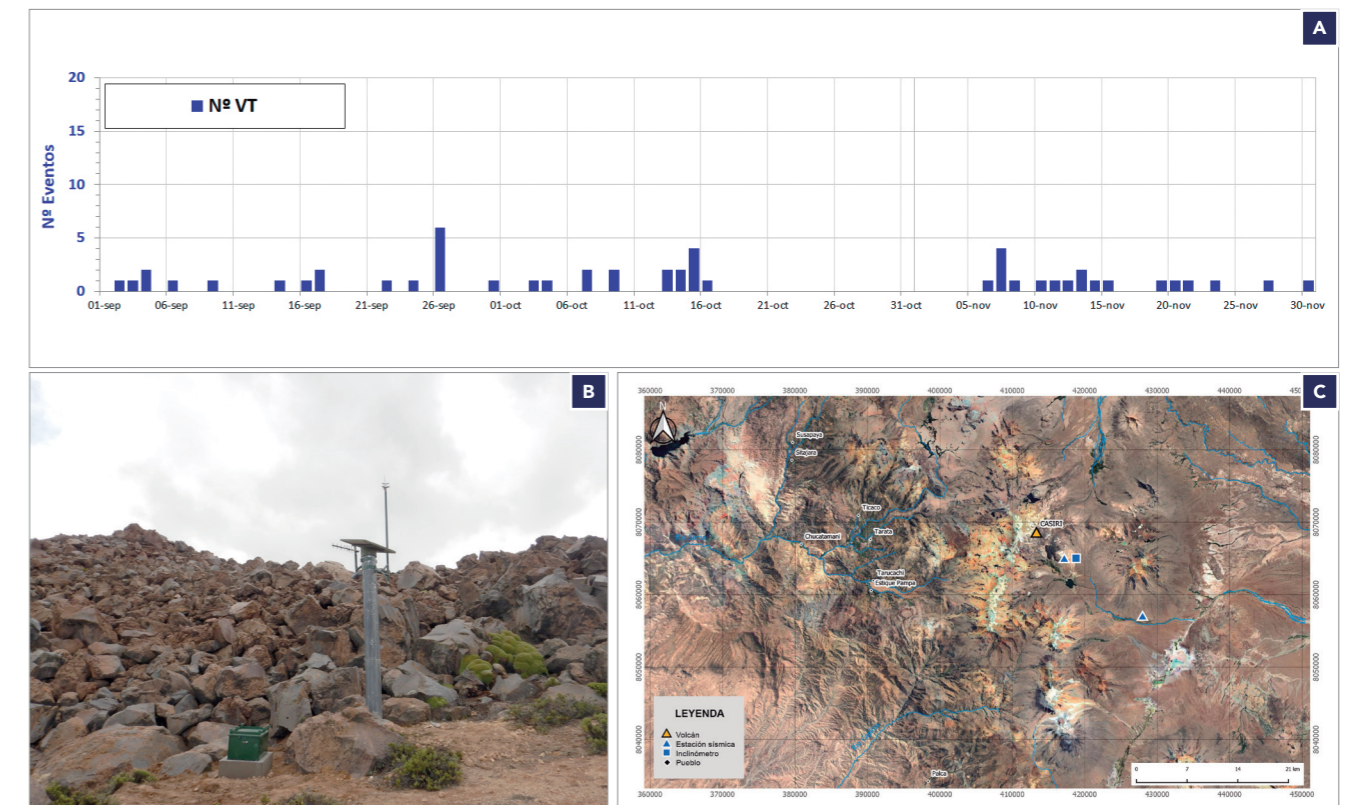


Figura 1.- A) Cuadro que muestra la ocurrencia de sismos de tipo Volcano-Tectónico en el volcán Casiri. B) Estación de monitoreo CAS1 instalada en el sector sureste del volcán. C) Red de monitoreo desplegada por el IGP en las inmediaciones del volcán Casiri.

Según investigaciones recientes, el volcán nevado Casiri es considerado como un volcán activo. Se ubica en el distrito de Palca, provincia y región Tacna. Los depósitos volcánicos más recientes de este volcán habrían sido emplazados en los últimos 6000 años (Bromley et al., 2019) y corresponden a flujos de lava. Desde 2019, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) mantiene operativa una red de monitoreo permanente en el Casiri, la cual transmite datos geofísicos en tiempo real a las instalaciones del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL) en Arequipa.

El análisis de la información registrada por la red de monitoreo entre septiembre y noviembre de 2019 ha permitido identificar la ocurrencia de señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico (VT), las que corresponderían a actividad propia del volcán. Durante el periodo de análisis, se clasificaron un total de 49 sismos que generaron magnitudes menores a M1.5.

En este periodo, se emitieron tres boletines vulcanológicos sobre la actividad volcánica del Casiri. La información brindada en dichos documentos concluye que no se han registrado indicios en el Casiri



Figura 2.- Modelo de boletín vulcanológico del volcán Casiri. Estos fueron emitidos mensualmente entre septiembre y noviembre de 2019.

que puedan desencadenar, en el corto y mediano plazo, una erupción volcánica. En ese sentido, el IGP ha recomendado a las poblaciones asentadas alrededor de este volcán que pueden desarrollar sus actividades con normalidad y que permanezcan atentas a la información generada periódicamente.

# Cerro Auqui huato

- Elevación**  
4980 m s.n.m.
- Región**  
Ayacucho
- Provincia**  
Páucar del Sara Sara
- Última erupción**  
No se tiene registro
- Población en riesgo**  
92 mil personas aprox.
- Inicio de vigilancia**  
2018
- Métodos de vigilancia**  
1 estación sísmica  
1 inclinómetro

## ACTIVIDAD

Periodo: agosto-noviembre de 2019

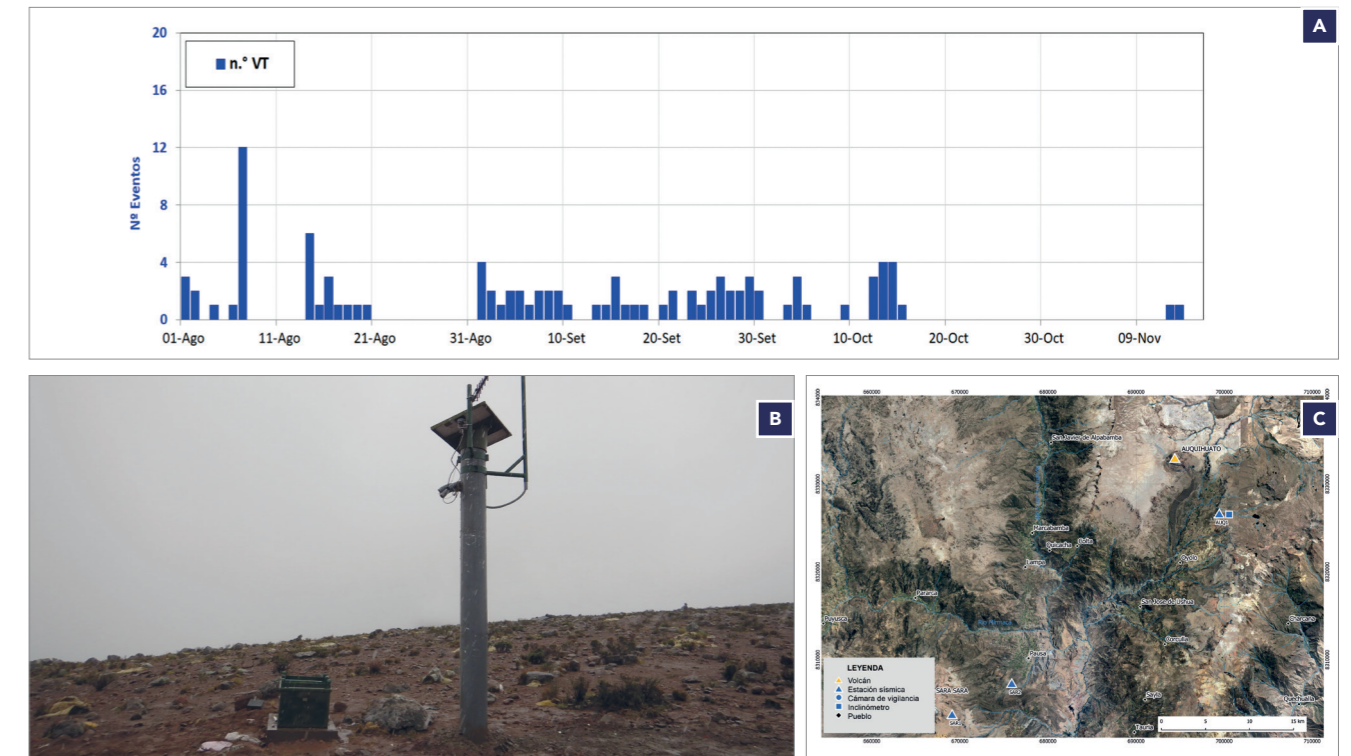


Figura 1.- A) Cuadro que muestra la ocurrencia de sismos de tipo Volcano-Tectónico en el volcán Cerro Auqui huato en el periodo agosto-noviembre de 2019. B) Estación de monitoreo AUQ1 instalada en el sector sureste del volcán. C) Red de monitoreo desplegada por el IGP en las inmediaciones del volcán Cerro Auqui huato.

El volcán Cerro Auqui huato es un cono de 380 m de altura constituido de flujos de lava, ubicado a unos 30 km al NE del volcán Sara Sara. Este volcán es monitoreado por el Instituto Geofísico del Perú desde marzo de 2019.

En años recientes se ha recabado información sobre la actividad eruptiva de este volcán considerado como potencialmente activo. Es así que mediante imágenes InSAR adquiridas entre 2007 y 2011, el laboratorio *Earth and Atmospheric Sciences* de *Cornell University* ha detectado deformación notable de hasta 1.8 cm por año, la cual ocurre a 7 km al SE del volcán. La proximidad de tal deformación al Cerro Auqui huato sugiere que es de origen volcánico y ha sido atribuida a la presurización de una fuente magmática, aunque también podría ser de origen hidrotermal (Rivera et al., 2016). Por otra parte, imágenes satelitales obtenidas de la zona muestran un flujo de lava joven con estructuras de leveés y cuerdas de lava.

La evaluación realizada de los datos geofísicos provenientes de la red de monitoreo del Auqui huato, correspondiente al periodo agosto-noviembre de 2019, muestra que la sismicidad registrada de tipo

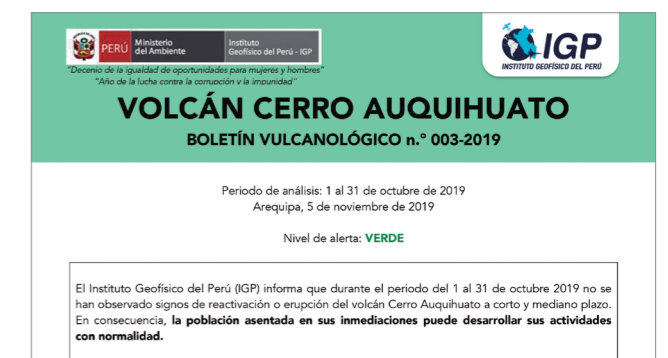


Figura 2.- Modelo de boletín vulcanológico del volcán Cerro Auqui huato. Estos fueron emitidos mensualmente entre agosto y noviembre de 2019.

Volcano-Tectónico (VT) estaría asociada a procesos de ruptura de rocas. Fueron analizados un total de 110 sismos con magnitudes menores a M3.1.


Entre agosto y noviembre de 2019, el IGP emitió cuatro boletines vulcanológicos indicando que los niveles de actividad del volcán Cerro Auqui huato fueron considerados como bajos; por lo tanto, no existen indicios que hagan prever el desarrollo de una erupción en el corto o mediano plazo.





Instituto Geofísico del Perú  
Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo IV Etapa, Ate, Lima, Perú  
Central Telefónica: (511) 3172300

 [www.igp.gob.pe](http://www.igp.gob.pe)

 [/igp.peru](https://www.facebook.com/igp.peru)

 [@igp\\_peru](https://twitter.com/igp_peru)

 [@igp.peru](https://www.instagram.com/igp.peru)

 [/igp\\_videos](https://www.youtube.com/channel/UC...)