

Informe Técnico N° A 6771

# EVALUACIÓN DEL PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN SABANCAYA Región Arequipa



POR:

OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO  
DEL INGEMMET - OVI

AGOSTO  
2017

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. MONITOREO VOLCÁNICO .....	3
2.1 MONITOREO SÍSMICO .....	3
2.2 MONITOREO GEOQUÍMICO .....	6
2.3 MONITOREO GEODÉSICO.....	7
2.4 MONITOREO TÉRMICO SATELITAL .....	10
2.5 MONITOREO VISUAL Y DISPERSIÓN DE CENIZA.....	10
2.6 MONITOREO Y ANÁLISIS DE LA CENIZA.....	17
3. ESCENARIOS ERUPTIVOS ANTE UN POSIBLE INCREMENTO DE ACTIVIDAD DEL VOLCÁN SABANCAYA.....	26
4. MAPA DE PELIGROS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO- SABANCAYA .....	30
CONCLUSIONES.....	39
RECOMENDACIONES .....	42
REFERENCIAS .....	43
ANEXO 1 .....	45

## 1. INTRODUCCIÓN

El volcán Sabancaya, ubicado a 75 km al NO de la ciudad de Arequipa, después del volcán Ubinas (Moquegua), es considerado el segundo volcán más activo del Perú. Desde el 06 de noviembre del 2016 viene presentando un nuevo proceso eruptivo caracterizado por recurrentes explosiones con presencia de gases y ceniza.

Estudios geológicos efectuados por Gerbe y Thouret (2004); Mariño, (2012); Samaniego *et al.*, (2016); Rivera *et al.*, (2016), entre otros, describen el comportamiento eruptivo pasado del Sabancaya, desde los últimos 10000 años. De acuerdo a su actividad recurrente en el pasado histórico, este volcán ha presentado erupciones efusivas lávicas y actividad explosiva moderada con considerables emisiones de ceniza. Así, la actividad eruptiva del Sabancaya ocurrida durante los últimos 400 años, consistió en erupciones explosivas de leves a moderadas (Índice de Explosividad Volcánica IEV 1-2). Durante este periodo presentó tres erupciones explosivas de leves a moderadas ocurridas en los años 1750, 1784 y entre 1990 - 1998, caracterizados por una intensa actividad fumarólica y emisiones de ceniza (Rodríguez & Uribe, 1994; Gerbe y Thouret, 2004). Durante la última crisis eruptiva (1990-1998), el volcán emplazó ceniza de hasta 3 cm de espesor a 8 km al Este del volcán.

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) es el servicio geológico de nuestro país. Según el Reglamento de Organizaciones y Funciones del INGEMMET (Decreto Supremo Nro. 035-2007-EM), en el ámbito de competencia y funciones, tiene como misión "*Identificar, estudiar y monitorear los peligros asociados a movimientos en masa, actividad volcánica, aluviones, tsunamis y otros*". En el INGEMMET, la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico es el órgano de línea que realiza investigaciones, programas y proyectos Geoambientales, Geotécnicos, y de Evaluación y Monitoreo de Peligros Geológicos del territorio nacional, brindando asistencia técnica a gobiernos locales y regionales en materia de peligros geológicos, con el objetivo de reducir el riesgo de desastres en nuestro país.

Por otro lado, a través del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), creado por Resolución de Presidencia Nro. 037-2013-INGEMMET/PCD, se elabora los mapas de peligros volcánicos. El Observatorio es un centro de estudio y vigilancia permanente de volcanes activos en el sur de Perú, de carácter interdisciplinario, con el fin de determinar la naturaleza y probabilidad de ocurrencia de una erupción volcánica. Así mismo realiza la evaluación de los tipos de peligros volcánicos en base a estudios geológicos; proporciona alertas oportunas a la sociedad sobre peligro de actividad volcánica inminente, a fin de reducir el riesgo de desastre en el área de influencia de los volcanes activos o con crisis volcánica. La elaboración del mapa de peligros volcánicos es responsabilidad de profesionales geólogos-vulcanólogos de INGEMMET, con amplia experiencia técnico-científica.

El OVI realiza el monitoreo instrumental permanente del volcán Sabancaya, cuyos resultados del procesamiento son presentados en este informe especial teniendo como objetivo mostrar las técnicas empleadas en el monitoreo volcánico, el grado de actividad volcánica actual y mostrar el área afectada por las cenizas emitidas por dicho volcán.

Cabe mencionar que los resultados del monitoreo volcánico que realiza el OVI sobre el volcán Sabancaya son presentados en forma de reportes semanales al COER del Gobierno Regional de Arequipa.

Estos reportes se realizan a través del Comité Científico Técnico para la Gestión del Riesgo Volcánico de la Región Arequipa, formado por Ordenanza Regional N° 252-Arequipa del 05/12/2013, y constituido por:

- Observatorio Vulcanológico del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - OVI del INGEMMET
- Observatorio Vulcanológico del Sur del Instituto Geofísico del Perú – IGP -OVS del IGP
- Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín, IG-UNSA
- Instituto Nacional de Defensa Civil-Dirección Regional, INDECI SUR.
- Oficina Regional de Defensa Nacional y Defensa Civil (ORDNDC)
- Dirección Zonal 06 Arequipa Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI

Es necesario mencionar que el Comité Científico Técnico desarrolla los siguientes trabajos:

- Recepciona, procesa y dispone de información técnico-científica en tiempo real, para emitir alertas, reportes y comunicados.
- Asesora permanente a las autoridades en el manejo de emergencias o crisis volcánicas.
- Proporciona información técnico-científico como estudios, boletines, mapas de peligros, etc. al COER para establecer planes de emergencia.
- Desarrolla procedimientos y protocolos articulados para el manejo de la información y toma de decisiones a fin de emitir alertas de manera oportuna y conjunta.
- Elabora informe técnico sustentatorio para proponer el cambio de nivel de alerta al Gobierno Regional.
- Reporta semanalmente al COER, sobre la situación del volcán Sabancaya.
- Emite alertas de caídas de cenizas u otros eventos asociados a la actividad del volcán Sabancaya cuando la situación lo amerite.

- Realiza la vigilancia de otras señales (muestreo de cenizas emitidas, agua fuentes termales, presencia de fisuras, presencia de nuevas zonas de emisiones de gases, entre otras) que permitan verificar la actividad del volcán y en caso necesario emitir las alertas o comunicados.
- Elabora informes especiales para la Declaratoria de Situación o Estado de Emergencia.
- Participa en eventos (reuniones, talleres, etc.) de sensibilización y capacitación a autoridades y pobladores en general.
- Opina técnicamente sobre propuestas de lugares de refugio y rutas de evacuación.

## 2. MONITOREO VOLCÁNICO

El OVI tiene instalados equipos modernos en el volcán Sabancaya (Fig. 1) y su información es transmitida en tiempo real y permanente hacia las instalaciones del observatorio en la ciudad de Arequipa.

Complementariamente, existen importantes datos proporcionados por sistemas de monitoreo satelitales, entre los que destacan:

- 1) El Sistema MIROVA (<http://www.mirovaweb.it/?action=volcanoes>) de la Universidad de Torino-Italia, que provee el valor diario de la temperatura en el cráter del Sabancaya.
- 2) el Global Sulfur Dioxide Monitoring de la NASA ([https://so2.gsfc.nasa.gov/pix/daily/0117/peru\\_so2lf\\_5k\\_ts\\_plot.html](https://so2.gsfc.nasa.gov/pix/daily/0117/peru_so2lf_5k_ts_plot.html)), que proporciona información diaria de la densidad del gas magmático SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre) en inmediaciones del volcán.

Toda la información generada es analizada diariamente; con ella se elaboran reportes y comunicados que son transmitidos de manera oportuna, a las autoridades, locales, regionales y nacionales.

El presente informe describe el comportamiento del volcán Sabancaya desde el 06 de noviembre del 2016 al 11 de agosto del presente año.

### 2.1 MONITOREO SÍSMICO

Desde el inicio del proceso eruptivo (06 de noviembre del 2016) a la fecha, la actividad sísmica del volcán Sabancaya ha estado dominada principalmente por sismos asociados al movimiento de fluidos volcánicos (sismos tipo largo periodo), ascenso de material magmático (sismos tipo híbridos) y emisión de ceniza (tremor: vibración continua). Este último tipo de sismicidad (tremor volcánico), generalmente, precede a explosiones.

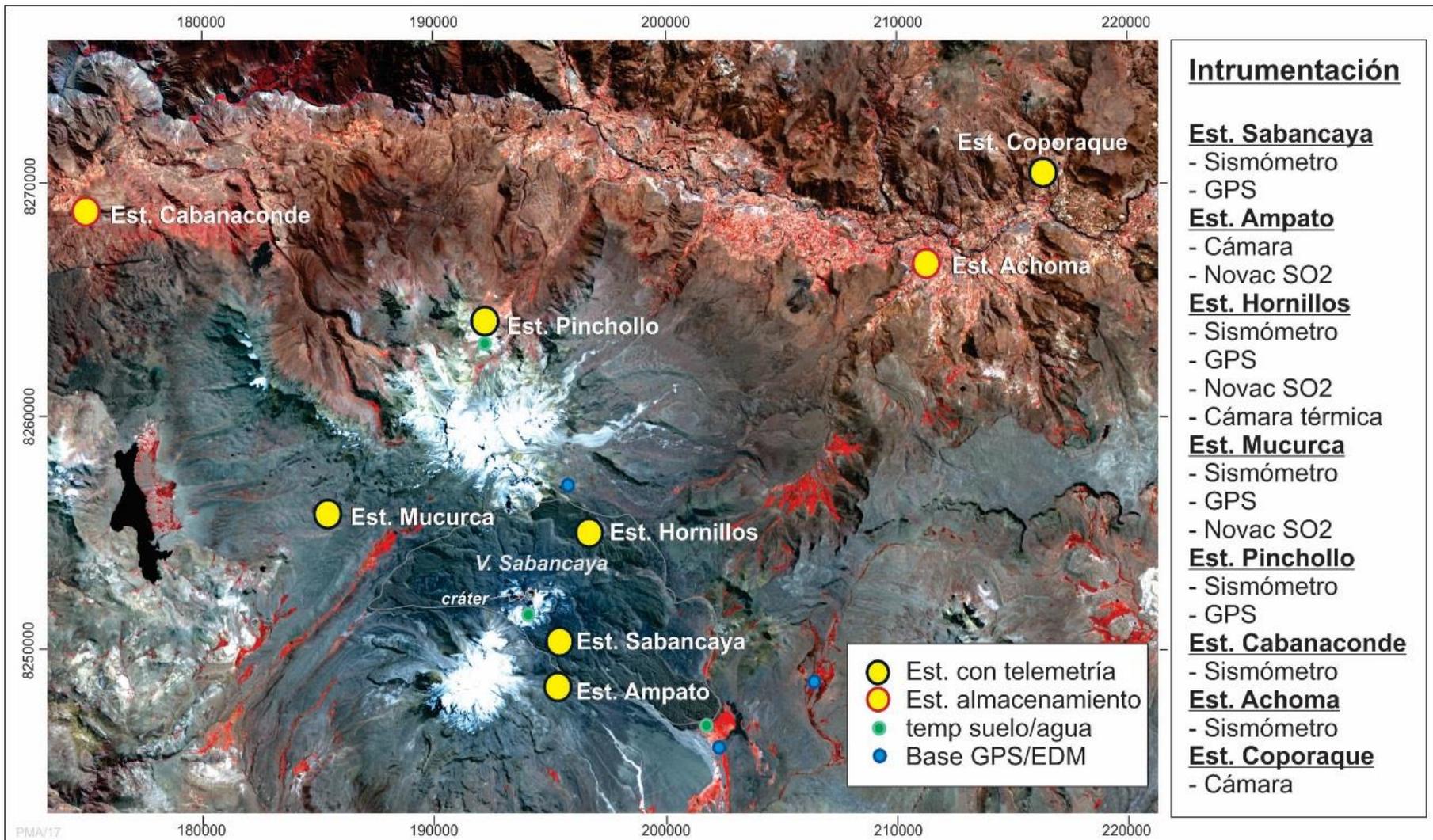


Figura 1. Red de monitoreo del volcán Sabancaya operados por el OVI.

A continuación, se realiza una descripción detallada de la actividad sísmica que viene presentando el volcán Sabancaya (Figura 2):

Se registran sismos volcánico tectónico – VT, ligados al fracturamiento de roca al interior del volcán. Al respecto, se destaca un incremento registrado el día 30 de abril del presente año, debido a la ocurrencia de 02 sismos volcánico – tectónicos, distales localizados al NE (poblado de Maca) y al NO (poblado de Cabanaconde), con profundidades entre los 11 y 12 km y magnitudes de 4.6 y 4.5 ML, respectivamente (Fuente: IGP). Otras zonas donde se registraron sismicidad durante este periodo, fueron al Norte y NE del volcán Sabancaya, con profundidades que van hasta los 10 km. A la fecha, la tasa de ocurrencia de estos eventos es de 30 sismos VT por día, en promedio.

También, hasta la fecha, se registran sismos asociados al movimiento de fluidos (sismos tipo largo periodo), con mayor predominio desde el inicio del proceso eruptivo, la cual, en líneas generales, ha venido incrementando paulatinamente; siendo importante destacar que hubo periodos en que este tipo de sismicidad disminuyó. Desde julio del presente año a la fecha, se apreció nuevamente un incremento en los sismos de largo periodo, contabilizándose hasta más de 200 por día.

Respecto a los sismos, que indican ascenso de material magmático (sismos Híbridos), se ha observado 03 episodios; en la cual claramente se aprecia un incremento en este tipo de sismicidad: el PRIMERO, ocurrido a inicios del proceso eruptivo (noviembre – diciembre de 2016) registrándose hasta más de 90 sismos híbridos, muchos de estos con energías considerables, destacando el sismo ocurrido el 02 de noviembre a las 09:28 HL y el cual, liberó una energía de 13 MJ, MegaJoule (4 días antes de que inicio el proceso eruptivo); el SEGUNDO episodio de incremento se aprecia entre febrero y marzo de 2017 con un valor máximo de 81 sismos híbridos (día 01 de marzo). Las energías de estos sismos no superan los 4 MJ, sin embargo, aún son considerados energéticos. Finalmente, en el ÚLTIMO episodio (fines de junio a fines de julio), se observa un leve incremento en la tasa de ocurrencia, contabilizándose hasta 25 sismos en promedio, con energías muy bajas que no alcanzan el MegaJoule.

Las señales de Tremor volcánico, básicamente se han asociado a las emisiones de ceniza, las cuales, fueron confirmadas a través de las imágenes registradas por las cámaras de video que se encuentran instaladas en los alrededores del volcán. Cabe destacar que, las duraciones de este tipo de sismos, fueron variables al igual que sus frecuencias.

Desde el inicio del proceso eruptivo a la fecha, las explosiones han permanecido constante, a excepción de fines de junio e inicios de julio del 2017, fecha en que claramente se aprecia una gran disminución en la

ocurrencia de explosiones e incluso días en donde no ocurrieron explosiones (24 y 30 de junio); sin embargo, a partir del 4 de julio nuevamente se observa un incremento en el número de explosiones, al igual que su energía sísmica, fecha en la cual ocurrieron 3 explosiones con energías entre 2 y 3 MJ, y el 24 de julio ocurrió nuevamente otra explosión con una energía de hasta 3.5 MJ. A la fecha, la actividad explosiva se mantiene constante, registrándose en promedio 45 explosiones por día con energías que van hasta los 2 MJ.

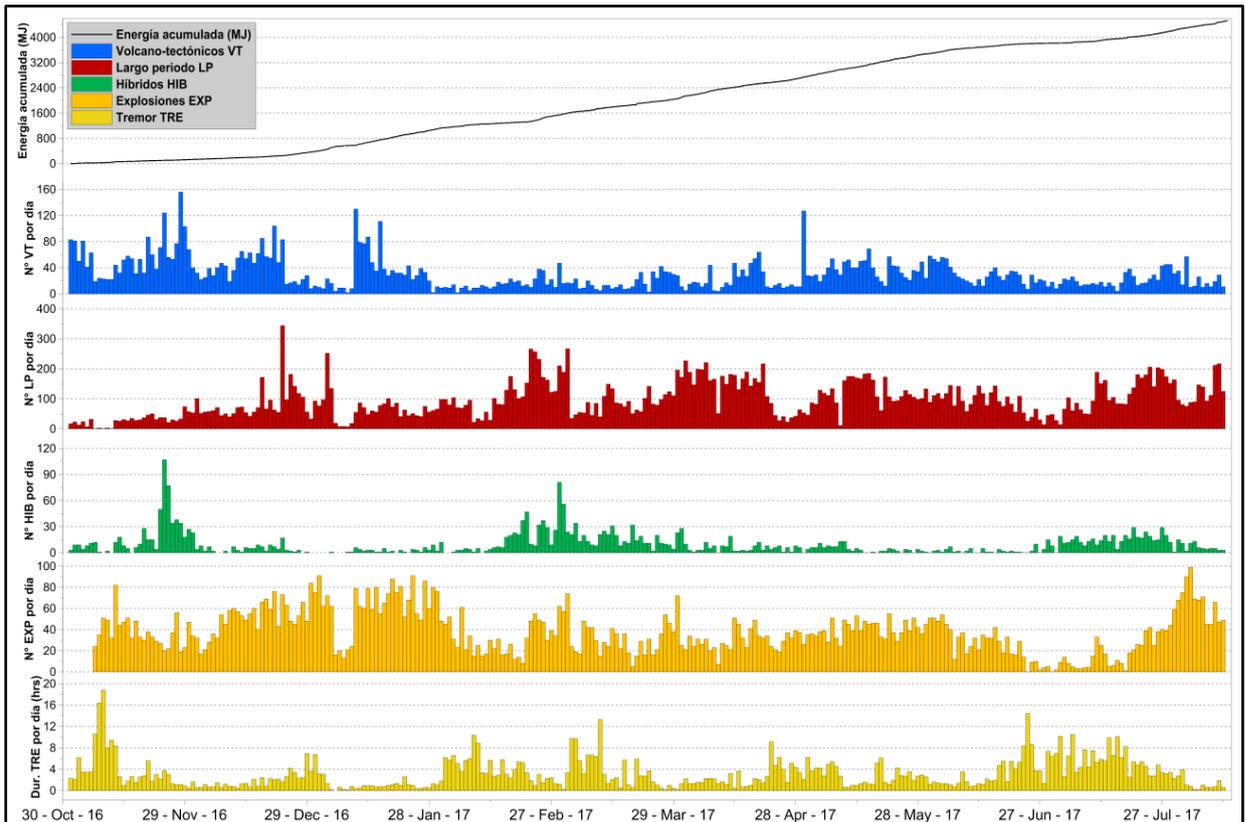


Figura 2. Evolución temporal de la actividad sísmica del volcán Sabancaya, periodo noviembre 2016 a agosto 2017.

La **CONCLUSIÓN** principal durante todo este proceso eruptivo, es que el volcán Sabancaya, sísmicamente, viene presentando nuevamente un incremento en la actividad explosiva desde inicios del mes de julio; muchas de estas explosiones presentan energías que no superan los 4 MJ. Sin embargo, son energías considerables; existiendo la posibilidad de que la actividad se mantenga o incluso incremente.

## 2.2 MONITOREO GEOQUÍMICO

El flujo del gas volcánico  $SO_2$ , emitido por el Sabancaya, se mide mediante dos escáner-DOAS desplegados alrededor del edificio volcánico. Estos han registrado valores cercanos a las 6000 Toneladas/día (Figura 3). Los valores

máximos fueron registrados el día 28 de febrero (5962 T/día) y el 24 de junio (5703 T/día), observándose periodos de incremento de actividad, lo cual, podría deberse a nuevos ascensos de magma.

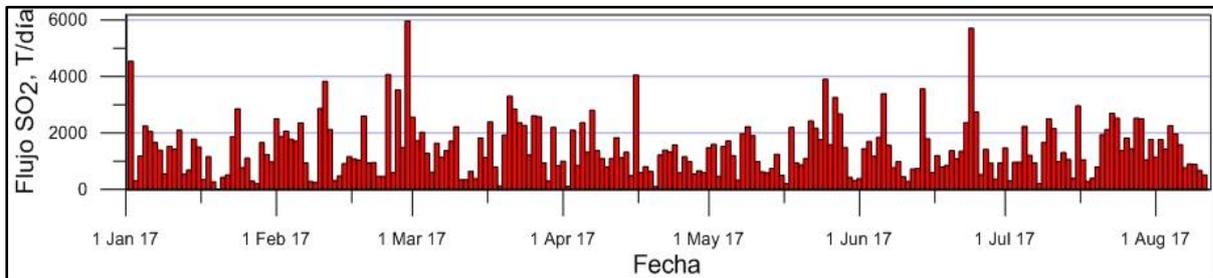


Figura 3. Resultados del monitoreo geoquímico. Entre el 1 de enero y el 11 de agosto de 2017.

### 2.3 MONITOREO GEODÉSICO

El monitoreo de deformación empleando equipos GPS corresponde al periodo del 01 de enero al 11 de agosto del 2017. Los registros en forma de series de tiempo corresponden a la estación “SBSE” (Figura 4) ubicada en el flanco sureste a 2.7 del cráter, y la estación “SBHO” (Figura 5) localizada en el flanco norte del volcán Sabancaya a 3.7 km del cráter.

En las figuras 4 y 5, se observan hasta tres episodios de deformación, las líneas de color rojo limitan dicho episodios: primera corresponde a un ligero proceso de deflación generado por el sismo de magnitud de 4.5 ML del 30 de marzo de 2017, registrado en ambas estaciones. El segundo episodio corresponde a un proceso de inflación del volcán, se observa desde el día 16 de mayo en la estación “SBSE” y desde el día 10 de junio en la estación “SBHO” entre 15 a 20 mm, aproximadamente. Finalmente, el tercer episodio corresponde a un proceso de deflación que se observa desde el día 22 y 23 de julio en ambas estaciones. A la actualidad, los procesos de deformación observados corresponden a la componente vertical.

Respecto, a los desplazamientos horizontales como se observan en las figuras 4 y 5, la componente ESTE registra dos periodos de aceleración limitadas con líneas de color rojo. Así mismo, la componente NORTE, no presenta mayor desplazamiento durante los episodios de deformación. Los procesos inflacionarios y deflacionarios estuvieron asociados a la emisión de cenizas y gases del volcán Sabancaya

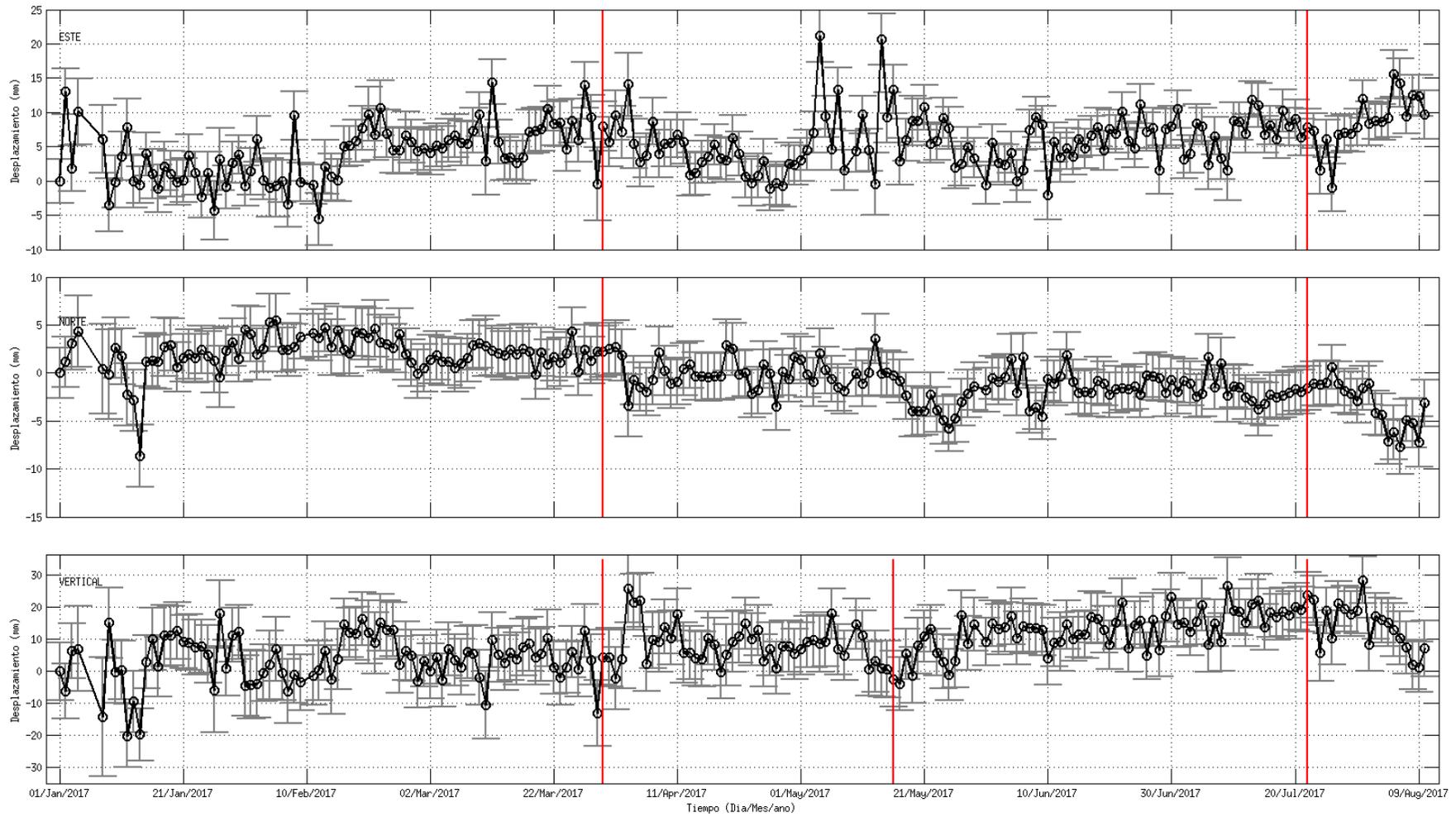


Figura 4. Resultados del monitoreo geodésico en la estación GPS SBSE (Sureste) efectuado desde el 01 de enero del 2017 al 04 de agosto del 2017

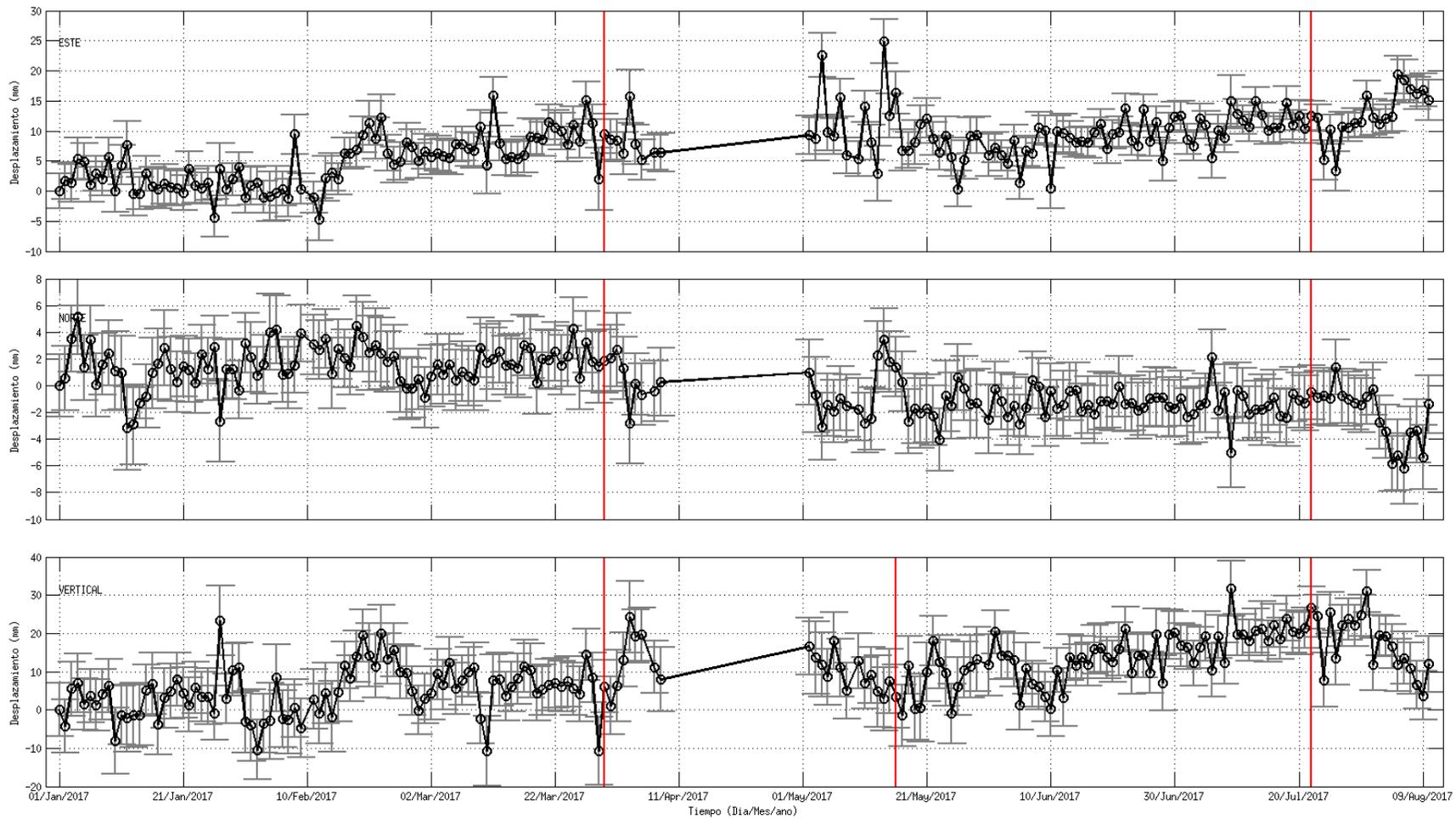


Figura 5. Resultados del monitoreo geodésico en la estación GPS (Hornillos) efectuado desde el 01 de enero del 2017 al 04 de agosto del 2017.

## 2.4 MONITOREO TÉRMICO SATELITAL

La Universidad de Torino (Italia) mediante el sistema satelital MIROVA, realiza la detección de puntos calientes en el volcán Sabancaya. Durante el proceso eruptivo del Sabancaya, se ha registrado una anomalía térmica máxima de 71 MW - Megawatts de Energía Volcánica Irradiada (VRP), el 01 de agosto de 2017 mostrando así un incremento del gradual del 70% con respecto al inicio del periodo eruptivo, como se aprecia en la Figura 6. Las líneas azules indican valores térmicos observados, considerados de nivel moderado. Los mayores valores: 41 y 43 Mw de VRP de anomalías térmicas, se observaron entre los días 15 de marzo y fines de mayo. Así mismo, la línea roja de la figura 6 indica valores acumulados de la energía volcánica irradiada. El incremento en dichos valores se observa desde principios de febrero con aparente calma hasta mediados de marzo. Posteriormente, los valores muestran un incremento sustancial de la energía irradiada hasta la emisión del presente reporte, lo cual, indicaría que un cierto volumen de magma estaría muy próximo a la superficie, generando una transferencia de calor directamente sobre el cono volcánico. Las anomalías térmicas principalmente se distribuyen en los flancos noreste, norte y noroeste del volcán.

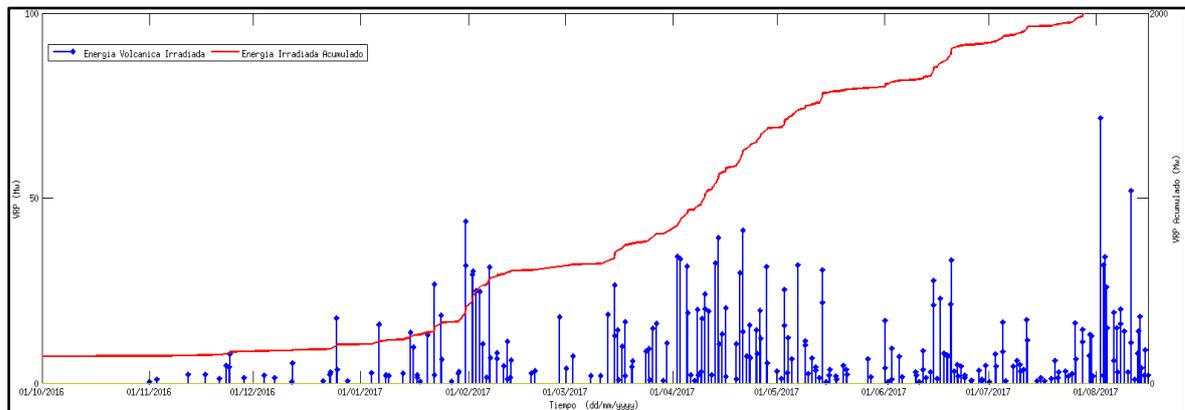


Figura 6. Evolución de las anomalías térmicas detectadas en el volcán Sabancaya durante el periodo de noviembre de 2016 a agosto de 2017.

## 2.5 MONITOREO VISUAL Y DISPERSIÓN DE CENIZA

El proceso eruptivo del Sabancaya se inicia el 06 de noviembre 2016, fecha en la cual se registraron las primeras explosiones (Fig. 7). Entre los meses de noviembre y diciembre las emisiones de ceniza del volcán Sabancaya eran recurrentes alcanzando alturas de hasta 4500 m sobre la cima del volcán (Fig. 8).

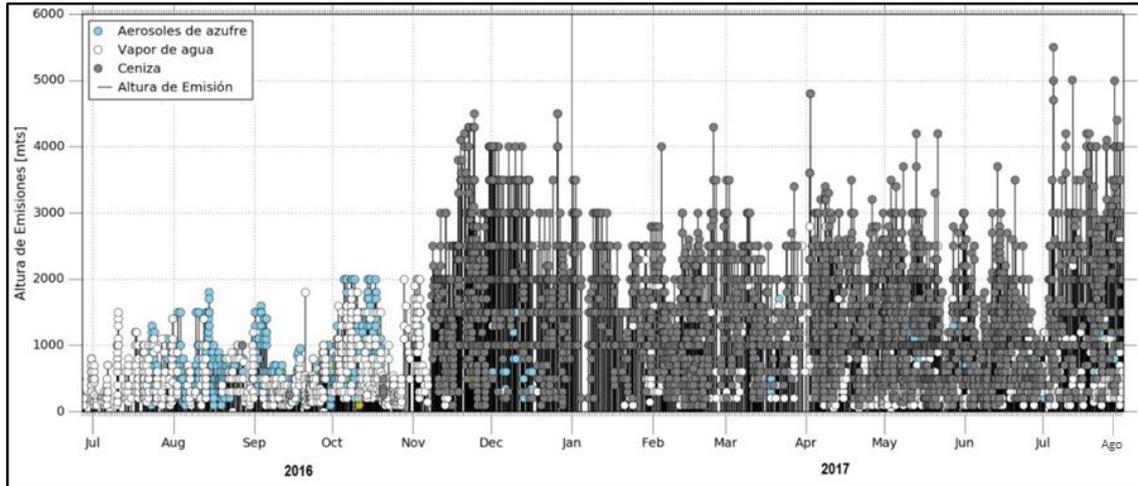
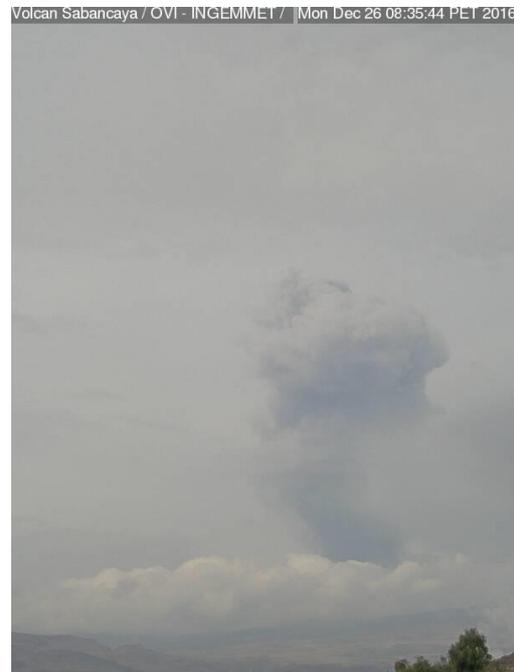


Figura 7. Características y altura de las columnas de gases y cenizas emitidas por el volcán Sabancaya entre julio del 2016 a agosto de 2017.



Fecha	Hora	Altura (m)	Dirección	Fecha	Hora	Altura (m)	Dirección
18/11/2016	06:52	4000	NO	26/12/2016	08:35	4000	Norte

Figura 8. Emisiones más representativas de noviembre y diciembre de 2016 del volcán Sabancaya.

Desde mediados del mes de enero hasta marzo de 2017, la actividad fue moderada; en efecto, en estos meses las emisiones de gases y ceniza se mantuvieron constantes, alcanzando alturas de hasta 4200 m sobre la cima del volcán, las cuales, fueron dispersadas por el viento principalmente en dirección noroeste y oeste del Sabancaya, llegando hasta 50 km de distancia afectando los poblados de Huambo, Cabanaconde, Tapay, Pinchollo, Maca y Achoma.





Fecha	Hora	Altura (m.)	Dirección
26/12/2016	08:35	4000	Norte

Figura 10. Explosión del 02 de abril de 2017 captadas con la cámara Axis modelo1765-LE

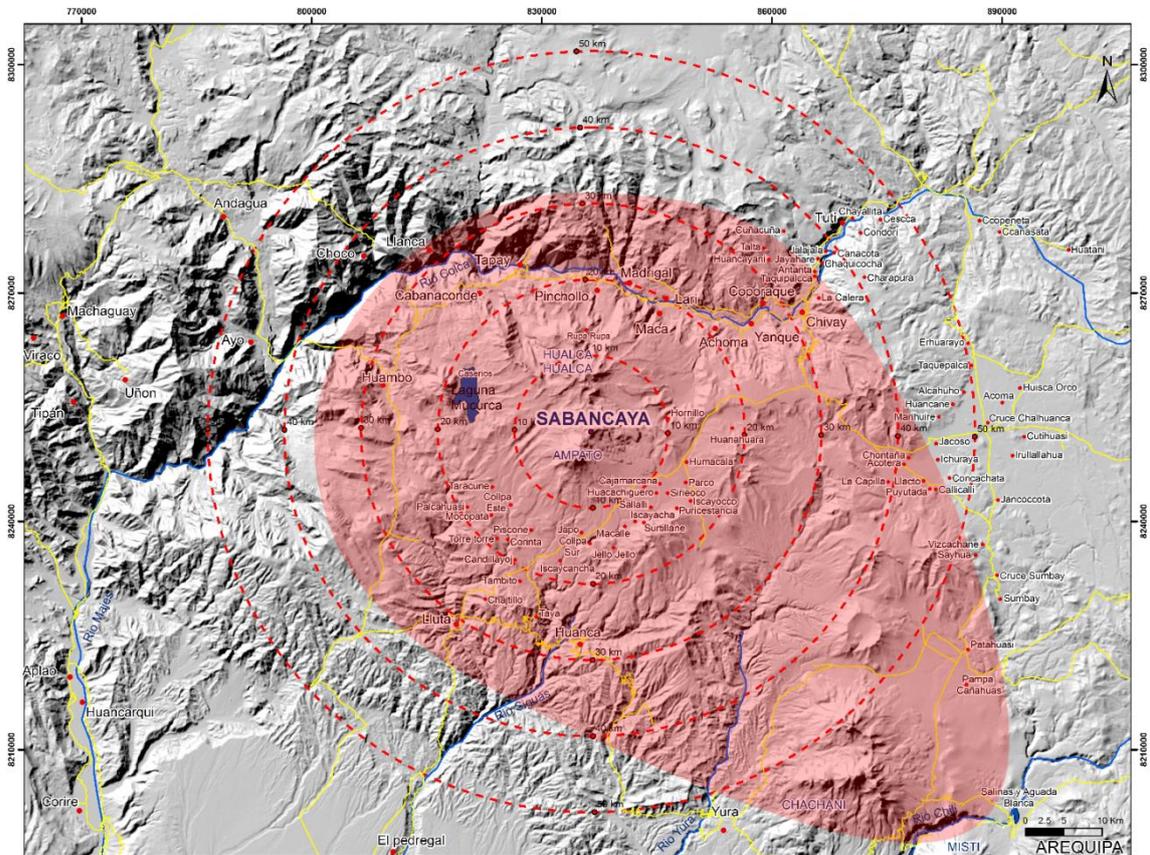


Figura 11. Zona de afectación por caídas de ceniza del volcán Sabancaya registrada en los meses de abril a junio de 2017 (área de color rojo).

En la segunda quincena de junio, la actividad disminuyó ligeramente, fecha en la cual, se registraron explosiones leves. En esta oportunidad, las emisiones de ceniza y gases continuaron alcanzando alturas por debajo de los 2000 m sobre la cima del volcán.

Posteriormente, el día 4 de julio de 2017 en horas de la noche, ocurrió una importante explosión, con expulsión de bloques incandescentes que cayeron alrededor de la cima del volcán (Fig. 12). Los días siguientes a la explosión la actividad aumentó considerablemente, registrándose emisiones densas de ceniza y gases acompañados de proyectiles balísticos. En esta oportunidad las columnas eruptivas alcanzaron alturas de hasta 5500 m sobre la cima del volcán, siendo luego dispersadas por el viento, en dirección Sur, afectando principalmente los distritos de Lluta y Huanca, incluso llegando hasta el norte de la ciudad de Arequipa (Fig. 13). En esta fecha, las cenizas han logrado superar los 60 km de distancia respecto al volcán.



Fecha	Hora	Altura (m)	Dirección
10/07/2017	06:59	4000	N-SE

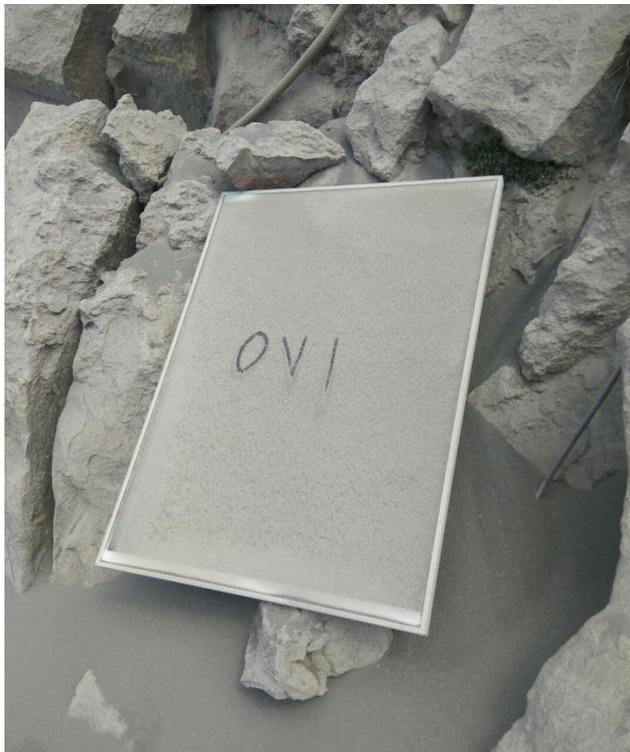
Fecha	Hora	Altura (m)	Dirección
28/07/2017	08:32	4500	S-SE

Figura 12. Imágenes más representativas del volcán Sabancaya captadas con la cámara Axis modelo 1765-LE.





*Figura 15. La vegetación localizada alrededor del volcán se encuentra cubierta por la ceniza.*



*Figura 16. Paneles solares de la estación de monitoreo del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET cubierta con ceniza.*



*Figura 17. Caseta metálica de la estación de monitoreo del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET cubierta con ceniza.*

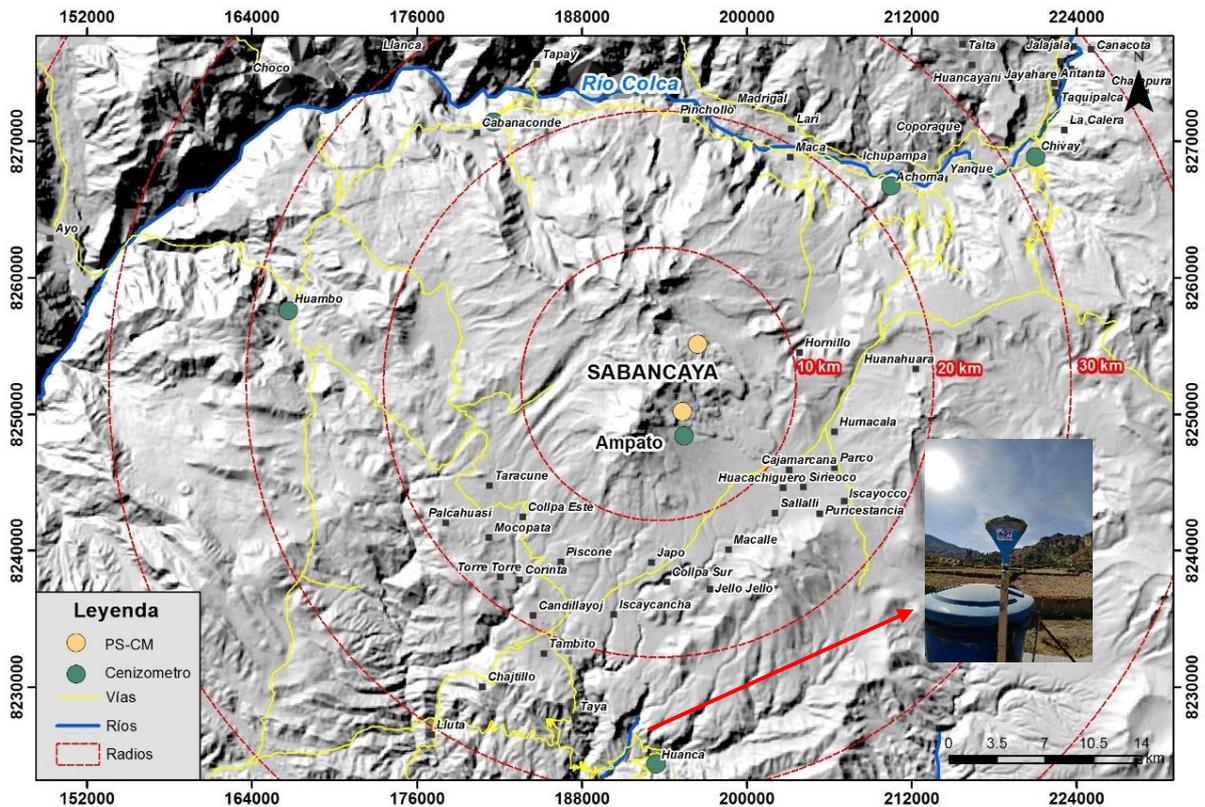
## **2.6 MONITOREO Y ANÁLISIS DE LA CENIZA**

Debido a la actividad actual del Sabancaya, el OVI implementó el monitoreo de cenizas, con la finalidad de estimar la cantidad de cenizas que vienen cayendo en áreas aledañas al volcán, así como realizar análisis mineralógicos, granulométricos, petrográficos y geoquímicos con el fin de hacer el seguimiento del proceso eruptivo.

Para lograr el monitoreo sistemático de la ceniza se han considerado 2 estaciones (Figura 18): estación Hornillos (Sab 11), localizada a 2.3 km al Noreste del cráter del volcán Sabancaya y estación Sab 07, ubicada a 2.5 km al Sureste del volcán.

El OVI también ha implementado una red de cenizómetros, dispositivos que se utilizan para medir espesores, densidad de área y densidad total de cenizas (< 20 mm) utilizando la técnica descrita por Bernard (2013). Hasta la fecha se han instalado 6 cenizómetros, de los cuales 5 fueron instalados entre el 1 y 4 de abril, en la estación Ampato (a 4.3 km al Sureste del volcán) y en los pueblos de Chivay, Achoma, Cabanaconde y Huambo. Mientras que el último fue instalado el 26 de julio del presente año en el centro de Salud de la localidad de Huanca. Para realizar las mediciones de espesores en los cenizómetros se han

capacitado a pobladores y profesionales del área de salud para enviar la información al OVI.



**Figura 18:** Ubicación de cenizómetros, paneles solares (PS) y cajas metálicas (CM) alrededor del volcán Sabancaya.

### 2.6.1 Mineralogía y granulometría de la ceniza

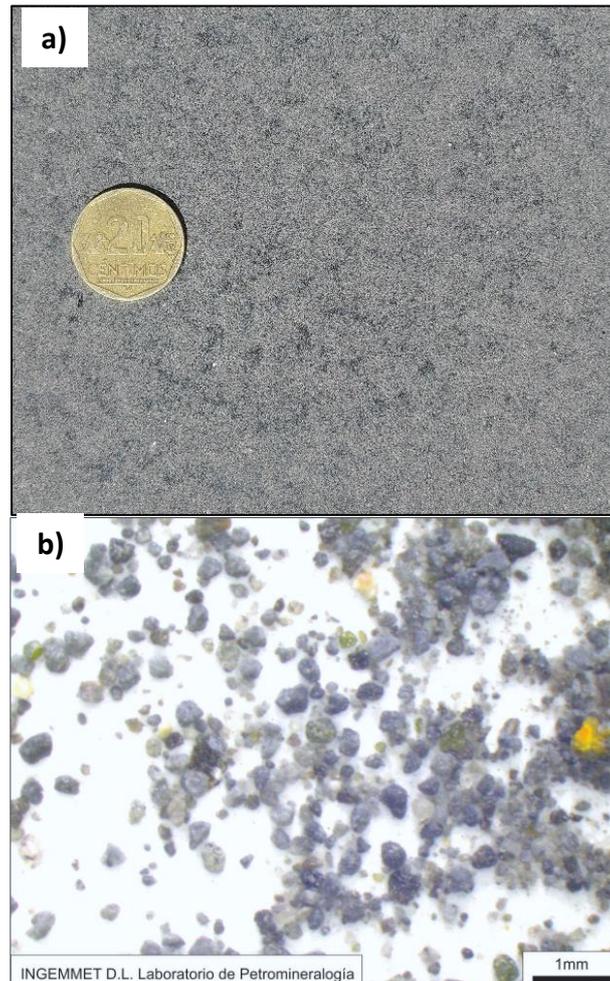
El estudio de la ceniza se ha realizado con muestras tomadas en la estación Hornillos (Sab 07) localizada a 2.5 km del volcán y con muestras de ceniza recolectadas en los pueblos de Maca y Huanca, localizados a 18 y 28 km, respectivamente.

En la estación Hornillos la ceniza depositada a inicios de noviembre de 2016 son angulares y ligeramente redondeadas e incluyen un amplio rango de componentes clasificados de acuerdo a su abundancia: líticos juveniles, vidrio, cristales de plagioclasa, olivino, biotita y líticos hidrotermalizados y oxidados. El tamaño de los componentes de la ceniza alcanza hasta 600  $\mu\text{m}$ . Durante este periodo se observa que el porcentaje de los fragmentos finos (32  $\mu\text{m}$ ) es mayor que los componentes gruesos (250 - 500  $\mu\text{m}$ ).

Mientras que las cenizas emitidas desde febrero del 2017 contienen principalmente líticos juveniles, vidrio, cristales de plagioclasa, biotitas, olivinos, piroxenos y una pequeña cantidad de partículas oxidadas e hidrotermalizadas. En este periodo se observa un incremento de tamaño de los componentes que

alcanzan a medir hasta 1 mm. También se observó una variación con respecto al tamaño de grano. En efecto, durante los meses de junio y julio el porcentaje de componentes gruesos (250 - 500  $\mu\text{m}$ ) fue superior al porcentaje de componentes finos (32  $\mu\text{m}$ ).

En este periodo, la ceniza caída en los pueblos de Maca y Huanca fueron mucho más finas (Fig. 19), con tamaños inferiores a 500  $\mu\text{m}$ . Aquí predominaron cristales de plagioclasa, líticos juveniles y vidrio.



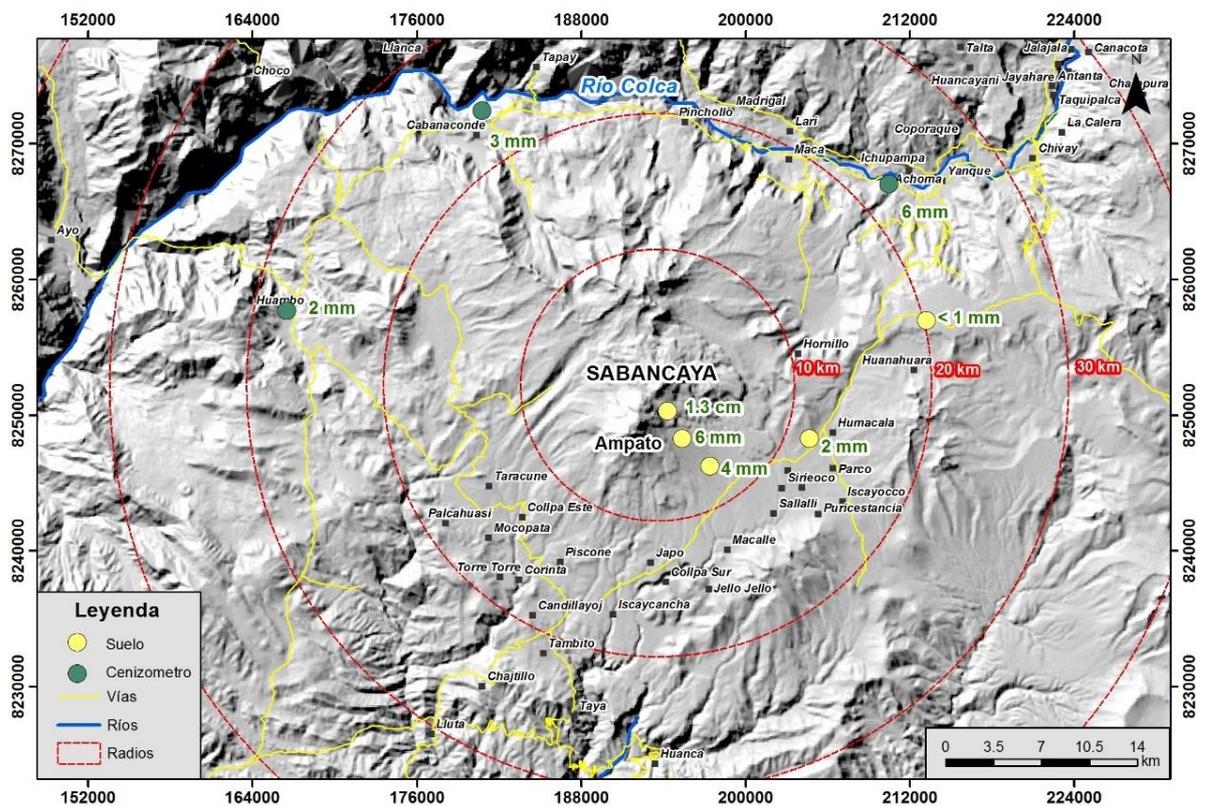
**Figura 19:** a) Ceniza fina acumulada en el techo del centro de salud de Huanca. b) Ceniza correspondiente al periodo inicial (diciembre 2016), con presencia de olivino, líticos juveniles, vidrio y fragmentos lávicos hidrotermalizados. Los tamaños son inferiores a 1 mm.

## 2.6.2 Estimación de espesores de la ceniza

Los espesores de caída de ceniza se han determinado con las medidas obtenidas de los cenizómetros ubicados en los pueblos de Achoma, Cabanaconde y Huambo. El pueblo de Achoma está localizado a 21 km al Noreste del Sabancaya. Hasta el mes de julio de 2017 en la zona se ha reportado 6 mm de espesor (Fig. 20). En ese mismo periodo, en la localidad de Huambo, localizada a 27 km al Oeste del volcán, la ceniza tuvo 2 mm de

espesor (Fig. 20). En la localidad de Cabanaconde, localizada a 22 km al Noroeste del Sabancaya, en el mes de Junio el espesor de ceniza alcanza los 3 mm (Fig. 20).

Así mismo, entre el 31 de julio y 1 de agosto se realizaron medidas de espesores de ceniza en un radio de 20 km hacia el sector Sureste y Este del volcán. En el sector proximal, a 2.5 km del cráter se tiene un espesor de 1.3 cm, en la pampa de Sallalli, entre 7 y 12 km, se ha medido 4 y 2 mm de espesor. Mientras que en el sector de Patapampa el espesor es inferior a 1 mm. Es importante mencionar que debido a la presencia de vientos fuertes en la zona, la ceniza es retrabajada y retransportada.



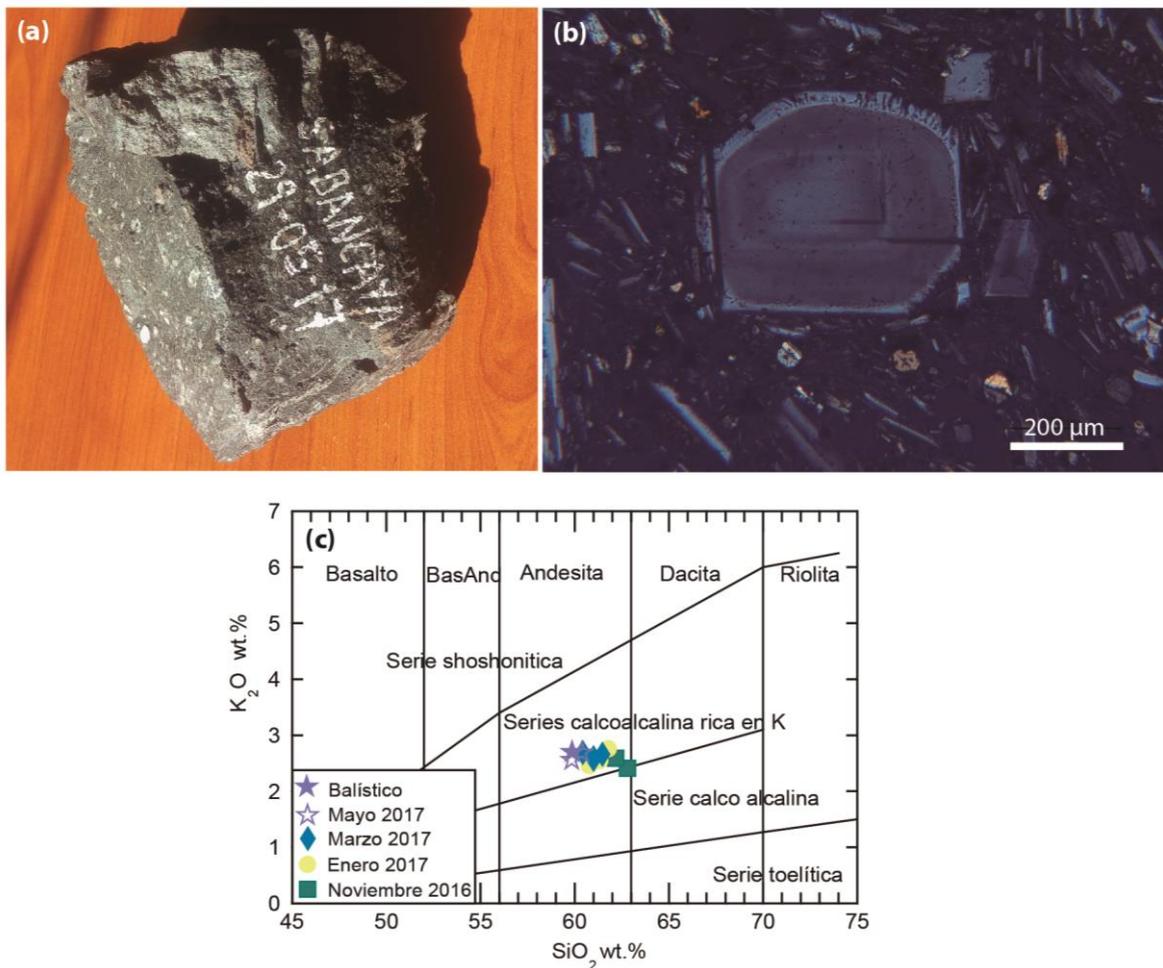
**Figura 20:** Los círculos de color verde indican los espesores medidos en los cenizómetros, mientras que los círculos de color amarillo representan los espesores medidos en el terreno.

### 2.6.3 Petrografía y composición química de las cenizas y proyectiles balísticos

Además de la ceniza emitida por el Sabancaya también se ha registrado la presencia de proyectiles balísticos que cayeron alrededor del volcán. Los proyectiles balísticos son fragmentos de lava que son emitidos de manera violenta durante las explosiones volcánicas. Estos bloques han sido emitidos muy cerca al cráter, y debido a esta cercanía solo se ha logrado muestrear un bloque que fue encontrado el 29 de mayo del presente año.

El bloque es de color gris oscuro (Fig. 21a), de textura porfirítica, denso, con algunas vesículas. Contiene cristales de plagioclasa, clinopiroxeno, biotita, anfíbol, apatito y óxidos de Fe-Ti. Algunos de los cristales de plagioclasa muestran texturas de desequilibrio como sobrecrecimiento (Fig. 21b) o textura sieve. De la misma forma los anfíboles presentan coronas de reacción. Estas características nos estarían indicando alteraciones en el sistema magmático, probablemente debido a la inyección de un magma nuevo.

Con respecto a la composición geoquímica, tanto la ceniza como el fragmento balísticos expulsado por el Sabancaya son de composición andesíticas calcoalcalinas, ricas en K.

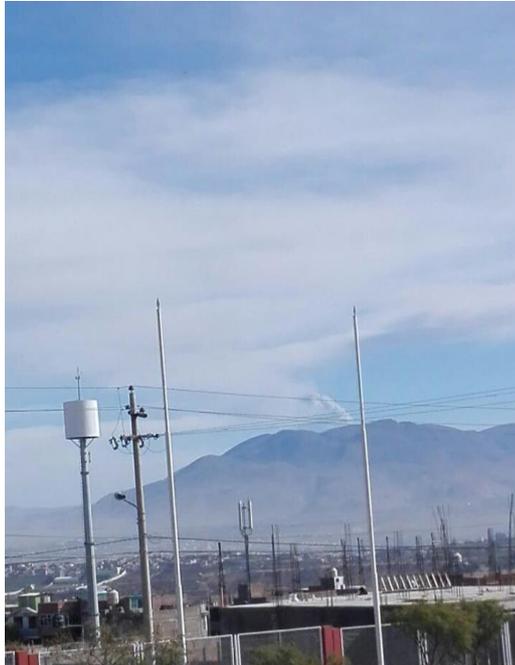


**Figura 21:** a) Fotografía del proyectil balístico de color gris oscuro. b) Grueso cristal de plagioclasa con borde de sobrecrecimiento. b) Composición química de la ceniza y el proyectil balístico.

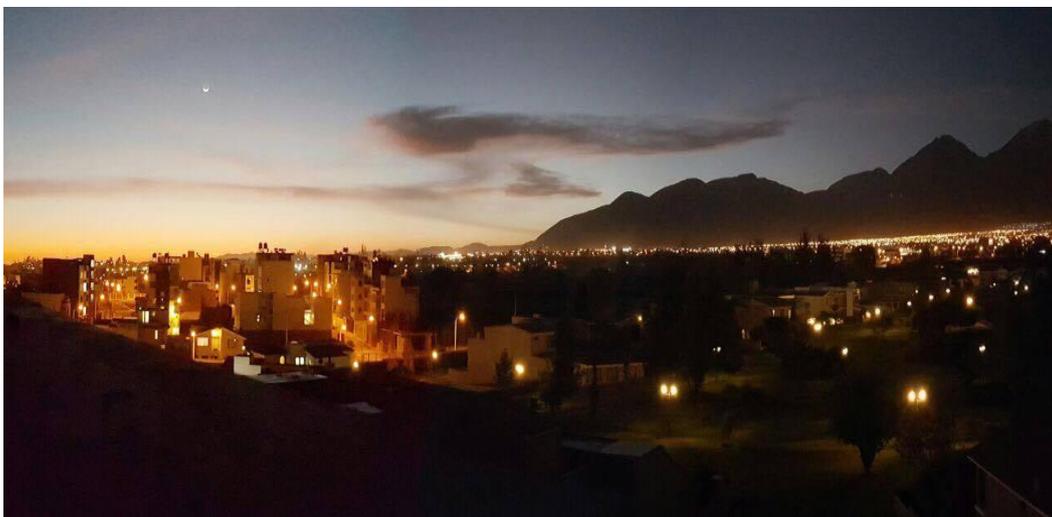
#### 2.6.4 Efectos de caída de ceniza en el medio ambiente

Durante las últimas semanas de julio de 2017 la emisión de ceniza estuvo dirigida principalmente al sur del volcán Sabancaya. Es así que los días 24 (Figs. 22 y 23) y 25 (Figs. 24, 25 y 26) de julio se retrasaron algunos vuelos de la ciudad de Lima a Arequipa debido a la alerta de caída de ceniza en el

aeropuerto de Arequipa lanzada por el VAAC de Argentina (Volcanic Ash Advisory Centers). En esos días, al Norte y Noroeste de la ciudad de Arequipa, cerca al volcán Chachani y al distrito de Yura se visualizó la dispersión de ceniza.



**Figura 22:** Las explosiones del 24 de julio generaron la dispersión de ceniza visible sobre el volcán Chachani.



**Figura 23:** En la foto se observa que la dispersión de ceniza se dirige hacia el Sur de la ciudad de Arequipa (Referencia: Macedo O.).



**Figura 24:** *Dispersión de ceniza sobre el volcán Chachani, cono norte de ciudad de Arequipa registrado durante el día 25 de julio de 2017.*



**Figura 25:** *Dispersión de ceniza sobre el volcán Chachani en horas de la tarde del día 25 de julio.*

Debido a la caída de ceniza en el cono norte de Arequipa, el día miércoles 26 de julio se realizó una inspección de campo para verificar la caída de ceniza en la zona. En la zona de Yura a 55 km del cráter del volcán (Figs. 26 y 27), no se registraron caídas considerables de ceniza. A pesar que se pudo ver que la dispersión de ceniza estaba casi por encima de dicho pueblo. En el poblado de Huanca, localizado a 27 km al Sureste del volcán Sabancaya se pudo corroborar caída de ceniza que cubría hasta 1 mm de espesor en los techos de las casas, calles y ventanas. Los pobladores de Huanca declararon que el 24 de julio durante el mediodía comenzó a caer mucha ceniza que cubrió rápidamente su ropa, irritando sus ojos.



*Figura 26: Fotografía del día 26 de julio 2017 que muestra la dispersión de ceniza en la zona de Yura.*



*Figura 27: Vista del poblado de Huanca del día 26 de julio 2017, fecha en la cual se registró caída de ceniza.*

Entre el 31 de julio y el 1 de agosto de 2017 se realizó otra inspección en el sector de Sallalli y Patapampa (al Este del Sabancaya). Se observó que las emisiones se dirigen tanto al Norte como al Sur del volcán (*Fig. 28*), cubriendo toda la pampa en un radio de 20 km (*Fig. 29*). En estas zonas los pobladores manifestaron que la caída de ceniza es constante, sin embargo no tienen otro lugar a donde llevar su ganado (*Fig. 30*), por lo cual les preocupa el hecho de que se vean afectados por la ceniza. En esta época del año la presencia de vientos ha incrementado por lo cual la ceniza fina es removilizada fácilmente y se adhiere a la vegetación que posteriormente es consumida por los animales. La ceniza también se deposita en las fuentes de agua que son consumidas tanto por las personas como los animales.



**Figura 28:** Se observa que las emisiones de ceniza están dirigidas hacia el Norte y Sur del volcán Sabancaya.



**Figura 29:** Caída de ceniza en el sector de Sallalli (a 20 km al Este del Sabancaya).



**Figura 30:** Ganado camélidos en el sector de Sallali, a 13 km al Este del Sabancaya.

### **3. ESCENARIOS ERUPTIVOS ANTE UN POSIBLE INCREMENTO DE ACTIVIDAD DEL VOLCÁN SABANCAYA**

El OVI para la elaboración de los escenarios eruptivos ha considerado la presencia de los depósitos antes descritos, así como, los siguientes aspectos:

- El tipo de comportamiento eruptivo actual que viene presentando el volcán Sabancaya.
- La magnitud de las erupciones pasadas, establecida en función del trabajo de campo y de la distribución de los productos volcánicos.
- Probables dinanismos eruptivos futuros en base al comportamiento pasado.
- El comportamiento de otros volcanes peruanos, considerados como «análogos» al Sabancaya, tales como el Ubinas.

Adicionalmente, se consideró la presencia del casquete glacial en las partes altas de los volcanes Ampato y Sabancaya, a partir del cual se podrían generar lahares durante una erupción volcánica.

#### ***Primer escenario: Erupción vulcaniana (IEV 1-2)***

Las erupciones vulcanianas, como las que viene presentando actualmente el Sabancaya son erupciones explosivas moderadas a violentas que emiten cenizas, bloques, bombas, escorias y eventualmente pómez. Las explosiones se dan en intervalos de minutos a horas e incluso días, como resultado de estas explosiones se generan columnas eruptivas de gases y cenizas de menos de 10 km de altura (Sigurdsson, 2000).

El cartografiado geológico detallado (1:25000) y el estudio estratigráfico del Sabancaya efectuado por Mariño (2012), Rivera et al. (2016), así como los trabajos previos de Thouret et al. (1994), Juvigné et al. (1998, 2008) y Gerbe y

Thouret (2004), han puesto en evidencia la ocurrencia de erupciones explosivas leves a moderadas (principalmente vulcanianas) del volcán Sabancaya ocurridas durante el Holoceno, la época histórica y recientemente entre 1988-1998; 2016-2017. Estudios de tefrocronología realizados por Juvigné et al. (2008) y Juvigné et al. (1998), permitieron identificar por lo menos tres depósitos de ceniza que guardan similitud con la ceniza de la erupción del volcán Sabancaya de 1988-1998. Estas cenizas han sido emplazadas hace aproximadamente 4500, 2050 y 1790 años, antes del presente.

Por otro lado, los depósitos de caída de ceniza identificados en las calicatas de los sectores de Sallalli I, II y III, y Colihuri (al SE y este del volcán Sabancaya, respectivamente), poseen similitudes de espesor, granulometría y mineralogía, con respecto a la ceniza emitida durante la actividad eruptiva 1988-1998. Por tanto pensamos que se trataron de erupciones de tipo vulcaniano con IEV 1-2. En la calicata Sallalli II se identificaron seis depósitos de ceniza, emplazados en los últimos 4000 años y en la calicata Colihuri se tienen quince depósitos de caída de ceniza, depositados en los últimos 3000 años, aproximadamente.

La última actividad del volcán Sabancaya, ocurrida entre los años 1988 y 1998, presentó dinamismos de tipo vulcaniano, en aquella oportunidad la ceniza fue dispersada a más de 30 km al Este del volcán y luego de las explosiones se expulsaron proyectiles balísticos en un radio de 2 km alrededor del cráter (Guillande et al., 1992; Thouret et al., 1994). En aquel entonces la actividad eruptiva del Sabancaya permaneció por cerca de 10 años.

Por lo antes citado, se concluye que la actividad actual del Sabancaya continuará por varios meses o años. Desde luego, en periodos lluviosos, entre noviembre a marzo, las cenizas emitidas viajarán preferencialmente al Oeste y SO, afectando pastizales del ganado camélido, contaminando suelos, canales de agua, en particular el canal Majes-Siguas, afectando poblados como Huambo, Cabanaconde, LLuta y otros (Fig. 19). Durante los meses secos de abril a octubre, las cenizas viajarán preferentemente al NE, E, SE y S del Sabancaya. En este caso, cenizas caerían sobre los poblados de Maca, Achoma, Yanque, Chivay, Tuti, Sibayo, Callalli y otros, localizados dentro del valle del río Colca, hasta una distancia mayor de 40 km del volcán Sabancaya. En este último escenario, la situación es más compleja pues hay una variación diaria de las direcciones de viento, por ejemplo, en abril la pluma se dirigiría en la mañana al S-SO, mientras que, en la tarde se dirigiría al E-NE.

También, es frecuente la formación de lahares o flujos de barro durante la ocurrencia de este tipo de erupciones, sobre todo si consideramos que el Sabancaya posee un casquete glacial. Esto sucedió en enero de 2017 y durante la última erupción de los años 1988-1998, donde se generaron lahares en quebradas aledañas al volcán Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca. Específicamente en noviembre de 1990 y mayo de 1995 (GVN, 1995). Durante el cual, algunos lahares alcanzaron el río Colca, situado a más de 15 km al norte del cráter del Sabancaya. Se trató de lahares de pequeño volumen, posiblemente de 0.5 a 1 millón de m<sup>3</sup>.

En caso de un incremento de actividad del volcán Sabancaya, productos calientes emitidos por dicho volcán pueden fundir parte del casquete glaciar y generar lahares de moderado volumen. Estos descenderían por las quebradas que drenan del volcán Sabancaya, e incluso por quebradas que drenan por los volcanes Ampato y Hualca Hualca. Los lahares causarían graves daños en terrenos de cultivo, carreteras como la vía Chivay - Huambo, puentes, sobre todo, si descienden del volcán Hualca Hualca. Los lahares pueden descender por la quebrada Mollebaya-Río Sepina (Achoma), el río de Hualca Hualca y la quebrada Huayuray.

Durante erupciones vulcanianas moderadas (IEV 2), también pueden generarse flujos piroclásticos de poco volumen y limitado alcance. En efecto, los flujos piroclásticos pueden alcanzar al menos 6 km de distancia del cráter, sin afectar la vida de los pobladores de la zona.

### **Segundo escenario: Erupción efusiva**

El volcán Sabancaya durante los últimos 10000 años presentó en variadas oportunidades erupciones efusivas, que emitieron principalmente flujos de lava. Estos flujos han alcanzado distancias máximas de 6 y 7 km de la fuente. Sin embargo, no existen evidencias, ni geológicas ni históricas, que sugieran la ocurrencia de una erupción efusiva en los últimos siglos. Por esta razón, la posibilidad de ocurrencia de una erupción de este tipo es baja a moderada. Sin embargo, si ocurriese una erupción efusiva, la lava puede fundir la capa de hielo y nieve que existe en la cumbre del volcán Sabancaya y producir lahares que descenderían por las quebradas que surcan el cono volcánico. Los lahares causarían graves daños en terrenos de cultivo, carreteras, puentes, sobre todo, si descienden por la quebrada Mollebaya-Río Sepina (Achoma), río de Hualca Hualca, quebrada Huayuray y otros.

### **Tercer escenario: Erupción vulcaniana o subpliniana (IEV 3)**

Durante las erupciones de tipo vulcaniano o sub-pliniano, con IEV 3, las columnas de ceniza y/o pómez alcanzan entre 3 y 15 km de altura sobre el cráter, y generan depósitos de caída y flujos piroclásticos (Sigurdsson, 2000). La ceniza que viaja a mayor distancia, puede ser dispersada a algunas decenas de kilómetros del volcán, e incluso sobrepasar fácilmente los 60 km. En este tipo de erupciones pueden generar flujos piroclásticos de pómez y ceniza que serían canalizados por quebradas y valles aledaños al volcán.

La mayoría de volcanes del sur del Perú han presentado este tipo de actividad. En el volcán Sabancaya no se han encontrado depósitos asociados a erupciones subplinianas o vulcanianas con IEV 3. En tal sentido, la posibilidad de ocurrencia de erupciones vulcanianas y subplinianas con IEV de 3, es de moderada a baja en el volcán Sabancaya.

Uno de los eventos muy característicos asociados a la erupciones vulcanianas a subplinianas fuertes son las emisiones de ceniza, escorias o pómez, estas, según la estación del año viajarán preferencialmente al Oeste y SO, esto es

entre noviembre a marzo, afectando terrenos de cultivo, terrenos de pastizales, ganado, canales de agua, canal Majes-Siguas, los poblados de Huambo, Maca, Lari, Madrigal, Cabanaconde, Ayo y otros. Mientras que entre los meses de abril a octubre, lo harán preferencialmente al NE, Este y SE. En este caso las cenizas pueden afectar a los habitantes de Sallalli, Parco, Humacala, o los poblados de Maca, Achoma, Ichupampa, Yanque, Coporaque, Chivay y otros localizados entre 8 y 50 km del cráter del Sabancaya, donde caería ceniza, acumulándose con algunos centímetros de espesor. En este tipo de actividad, cenizas pueden también alcanzar las represas de Agua Aguada Blanca y El Frayle, las cuales abastecen de agua a la ciudad de Arequipa.

Los flujos piroclásticos también pueden ser producidos por este tipo de actividad. Varios casos sustentan esta afirmación, por ejemplo, en la erupción del año 1667 d.C. del volcán Ubinas que tuvo un IEV 3 (Thouret et al., 2005) se generaron flujos piroclásticos cuyos depósitos se encuentran a 3 km al oeste del cráter. Sin embargo, dependiendo del volumen de magma y la pendiente del terreno, estos flujos pueden alcanzar mayores distancias. Por ejemplo, los flujos piroclásticos de la erupción del volcán Tungurahua de agosto 2006, alcanzaron entre 7 y 8 km de distancia (Kelfoun et al., 2009). Flujos piroclásticos generados durante este tipo de actividad puede ser letal para los pocos habitantes que viven dentro de un radio de 10 km alrededor del volcán, a quienes sería recomendable evacuar.

Las erupciones vulcanianas y subplinianas (IEV 3), también pueden generar lahares, especialmente si los flujos piroclásticos se emplazan sobre el casquete glacial originando su fusión (Major y Newhall, 1989), como ocurrió durante la erupción del volcán nevado del Ruiz en 1985, que tuvo un IEV 3 (Pierson et al., 1990). Se estimó que el casquete glacial del nevado del Ruiz, sufrió una disminución de 8 y 10 %, produciendo una serie de flujos de escombros, cuyo volumen total se estimó en 60 millones de m<sup>3</sup> (Naranjo et al., 1986; Thouret et al., 2007).

En caso de una erupción del Sabancaya pueden descender lahares de gran volumen por las quebradas que drenan de dicho volcán, e incluso por quebradas que drenan por los volcanes Ampato y Hualca Hualca. Lahares causarían graves daños en terrenos de cultivo, carreteras, puentes, sobre todo si descienden por las quebradas que drenan del volcán Hualca Hualca, entre ellas: quebrada Mollebaya-Río Sepina (Achoma), río de Hualca Hualca, quebrada Japo, quebrada Huayuray y otros.

#### **4. MAPA DE PELIGROS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO-SABANCAYA**

El OVI ha elaborado tres mapas de peligros que consideran una erupción del volcán Sabancaya. Estos mapas son: 1) mapa proximal para peligros múltiples; 2) mapa de peligros por lahares distales y avalanchas de escombros y 3) mapa por caídas de piroclastos.

##### **Mapa proximal de peligros múltiples**

La zonificación de peligros del mapa proximal se realizó para peligros múltiples, es decir para el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava y eyección de proyectiles balísticos. El mapa está a una escala 1/50 000 (Figura 30).

##### ***Zona de alto peligro (rojo)***

Para delimitar la zona de alto peligro, se consideró el valor 0.35 para la relación H/L y 250 m para el valor de  $H_0$ . Estos valores fueron estimados en base al estudio de campo y corroborado con los datos de la bibliografía. Dichos valores son frecuentes para flujos piroclásticos de escoria de volumen pequeño, generados durante erupciones débiles con IEV 1 - 2 (Escenario 1: erupción vulcaniana).

Los límites de la zona de alto peligro coinciden con el alcance de un gran número de flujos de lavas del Sabancaya, posiblemente las más viscosas, que se encuentran entre los 3 y 4 km de distancia desde su punto de emisión. Por otro lado, los proyectiles balísticos generados durante erupciones vulcanianas (IEV 1-2), han alcanzado distancias limitadas a las zonas muy proximales al cráter, típicamente menores a 3 km, en varios volcanes del sur del Perú. Por ejemplo durante la erupción del volcán Ubinas 2006-2009, el alcance máximo de proyectiles balísticos fue poco más de 2 km (Rivera et al., 2010), y durante la última erupción del volcán Sabancaya 1988-1998, alcanzó menos de 1.5 km (Thouret et al., 1994).

La zona de peligro rojo corresponde a un área semi-circular, con un radio aproximado de 4 km alrededor del cráter, el cual se prolonga a más de 10 km de distancia del cráter, en zonas de quebradas y valles que drenan del volcán, como la quebrada Sahuancaya o Sallalli. Es necesario mencionar que también se considera como zona de alto peligro quebradas principales que drenan del volcán Ampato, el cual posee un casquete glaciar que puede ser cubierto por cenizas del Sabancaya y esto puede ocasionar su fusión y a la vez lahares que descenderían en dirección sur.

En resumen la zona de alto peligro (rojo), puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones pequeñas a moderadas con IEV 1-2; así como por flujos de lava y por proyectiles balísticos.

### **Zona de moderado peligro (naranja)**

Para delimitar la zona de moderado peligro, se consideró el valor 0.30 para la relación H/L y 500 m como valor de  $H_0$ , según datos de campo y bibliográficos. Estos valores son frecuentes para flujos piroclásticos de escoria de tamaño mediano, generados durante erupciones explosivas violentas con IEV 3 (Escenario 2). En este escenario también se consideró como centro de emisión el cráter del volcán Sabancaya.

Los límites de los flujos piroclásticos se encuentran entre 5 y 6 km en los flancos Sureste, Este y Noreste del Sabancaya (Figura 30); entre 3 y 5 km en los flancos Noreste y Norte; y menos de 2 km en el flanco Sur y Sureste (ver mapa de peligros). En este último caso, la distancia alcanzada es menor ya que es limitada por el flanco noreste del volcán Ampato, que actúa como una «barrera» topográfica.

Los límites de la zona de moderado peligro también coincide con los máximos alcances de algunos flujos de lava emitidos por el volcán Sabancaya, que se encuentran alrededor de 6 km de distancia desde su punto de emisión. Por lo tanto, esta zona de moderado peligro también sirve como zona de peligro para el escenario efusivo (área hasta donde cubrirían los flujos de lava).

Por otro lado, el alcance máximo de proyectiles balísticos se encuentra dentro de un radio menor a 4 km, según datos tomados de Blong (1984). Esta distancia se encuentra dentro de los límites de la zona de moderado peligro.

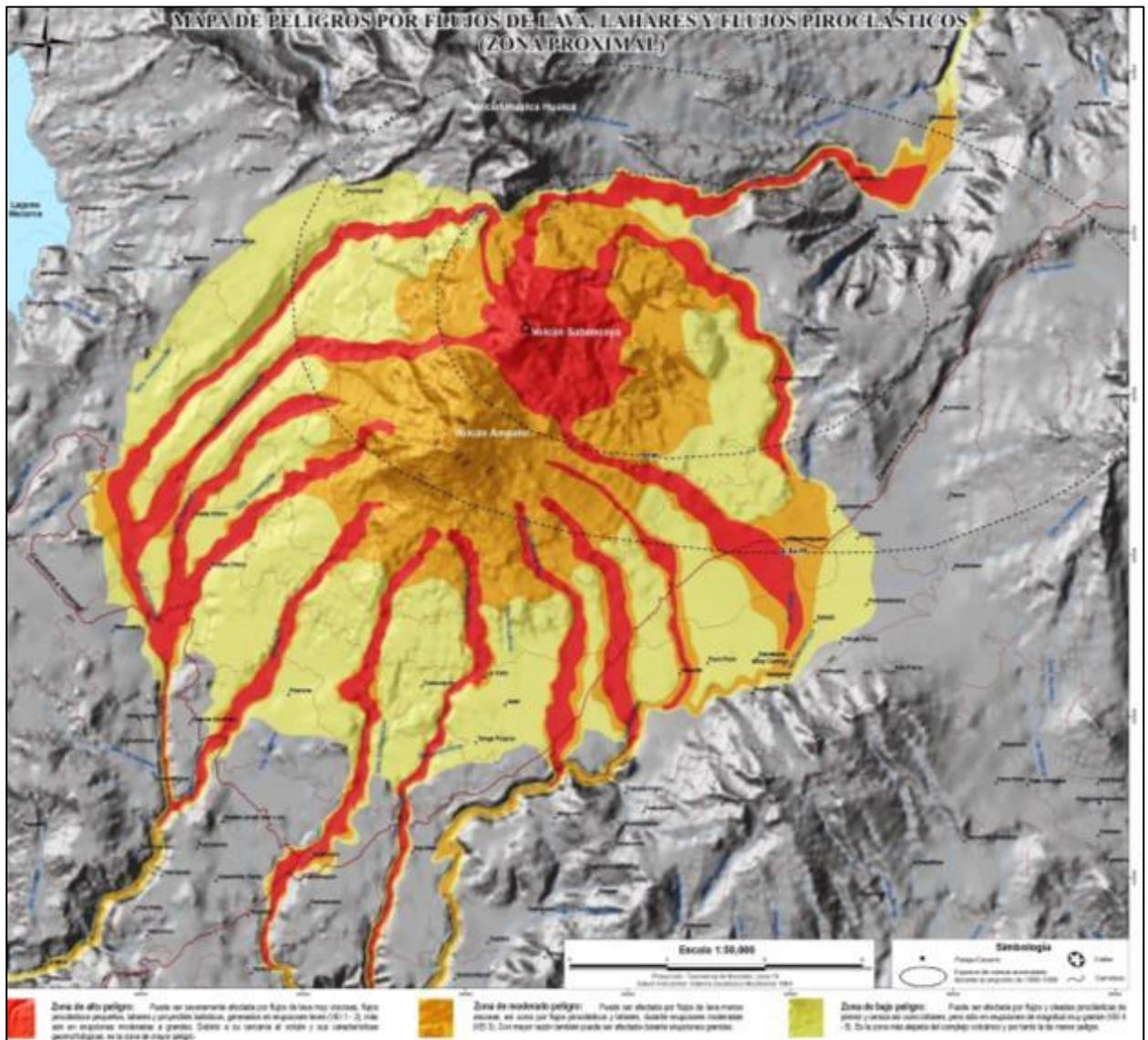
En resumen, la zona de moderado peligro (naranja) puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones con IEV 3, así como, por flujos de lavas y también por proyectiles balísticos.

### **Zona de bajo peligro (amarillo)**

Para delimitar la zona de bajo peligro, se consideró el valor 0.20 para la relación H/L y 500 m el valor de  $H_0$ . Valores cercanos a 0.2 del coeficiente H/L, son frecuentes para flujos piroclásticos de pómez y ceniza (Hayashi y Self, 1992) originados durante erupciones plinianas (IEV 3-4), (Escenario 3). Se escogió el valor de 0.2 para el coeficiente H/L debido a que este tipo de flujos piroclásticos poseen alta movilidad. En este escenario se ubicó el centro de emisión en la cumbre del volcán Ampato, debido a que se han encontrado depósitos de caída de pómez (unidad «Corinta») y depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza (unidad «ladrillo»), que habrían sido emplazados por erupciones plinianas.

Los alcances antes descritos coinciden con el alcance del flujo piroclástico de pómez y ceniza «ladrillo», que llegó alrededor de 10 km de distancia hacia el SE. También, varias erupciones plinianas con IEV 4-5, de volcanes del sur del Perú han recorrido distancias casi similares. Por ejemplo, los flujos piroclásticos de pómez y ceniza de la erupción del volcán Misti de hace 2050 años AP, alcanzaron alrededor de 12 km de distancia (Thouret et al., 2001).

En resumen, la zona de bajo peligro (amarillo), puede ser afectada por flujos piroclásticos de pómez y ceniza generados durante erupciones plinianas (IEV 4-5). La probabilidad de ocurrencia de este tipo de erupciones es muy baja (ocurren en un rango de varios miles de años).



**Figura 30.** Mapa de peligros múltiples de la zona proximal del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya (Tomado de Mariño, 2012).

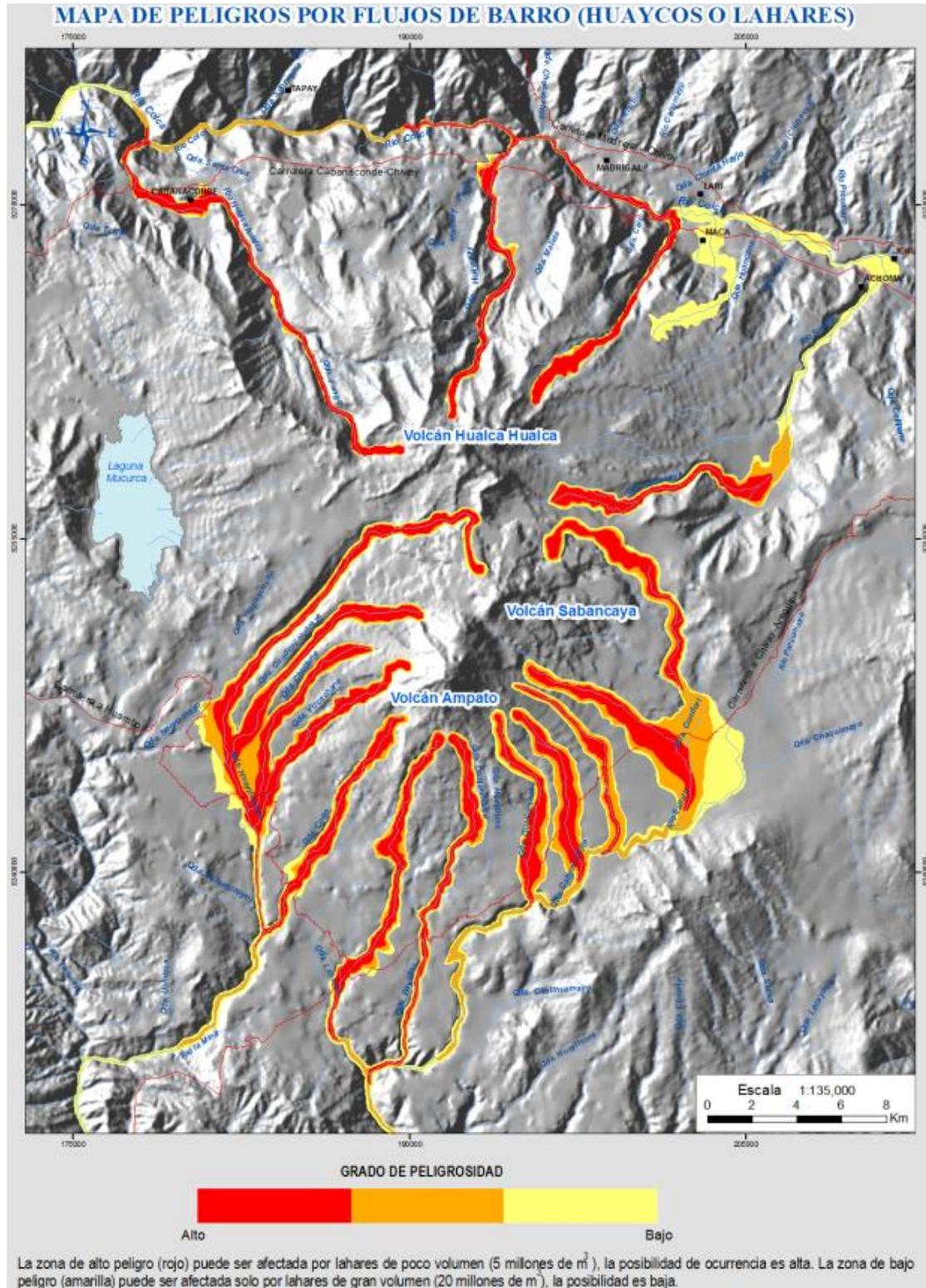
## Mapa de peligros por lahares

La zonificación de áreas de inundación por flujos de lodo (lahares) para el complejo Ampato-Sabancaya, fue realizado por Bellot (2011), utilizando el programa LAHARZ (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998). Los volúmenes de los eventos laháricos escogidos por Bellot (2011) fueron de 1, 5, 10 y 20 millones de m<sup>3</sup>.

Debido a que las erupciones explosivas del complejo volcánico han emplazado depósitos piroclásticos en zonas proximales y distales, el modelamiento se realizó sobre las principales quebradas ubicadas en los flancos de los volcanes Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca.

En el volcán Sabancaya se escogieron 4 principales quebradas: Mollebaya, Colihuiri, Sallalli y Sahuancaya-Pujro Huayjo. En el volcán Ampato, se escogieron 5 quebradas: Jaruma-Cabana-Pujio, Colquemarca-Tungapujio-Baylillas, Collo-Chacramayo, Vizcachane y Cabadillayoc. En el volcán Hualca Hualca, se escogieron 4 quebradas: Pungo-Hualca Hualca, Huayuray, Japo y Huancané. También, se realizó el modelamiento en 3 ríos ubicados a más de 20 km del complejo volcánico, los ríos La Mina y Torrejaja al sur, y el río Colca al norte. Este escenario es válido ya que en la erupción de 1990, y durante el mes de enero 2017, fueron reportados lahares que llegaron hasta el río Colca, situado a más de 15 km al norte del complejo volcánico Ampato-Sabancaya.

En el mapa de peligros por lahares (Figura 31), la zona roja es considerada la zona de alto peligro, y corresponde a la zona de mayor posibilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos asociados a erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1-2). La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de moderado volumen y la zona amarilla, es la zona considerada de bajo peligro o de menor posibilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos. Los lahares voluminosos (10 y 20 millones de m<sup>3</sup>) podrían estar asociados a erupciones de gran magnitud (IEV 3). Se debe recalcar que la posibilidad de ocurrencia de tales erupciones es baja o muy baja.



**Figura 31.** Mapa de peligros para flujos de lodo (lahares) del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya (Tomado de Mariño, 2012).

## **Mapa de peligros por caídas piroclásticas**

El mapa de peligros por caídas piroclásticas para el complejo volcánico Ampato-Sabancaya, se ha dividido en tres zonas: zona de alto peligro en rojo, zona de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo, cuyo foco de emisión sería el cráter del volcán Sabancaya (Figura 32).

Para la zonificación de peligros se consideraron los tres escenarios explosivos previamente definidos en Mariño (2012): erupciones vulcanianas con IEV 1-2, vulcanianas y subplinianas con IEV 3, y erupciones plinianas con IEV 4-5. En el volcán Sabancaya, no se han encontrado depósitos piroclásticos asociados a erupciones sub-plinianas y plinianas con IEV 4-5, pero si en el volcán Ampato.

También, se tuvieron en cuenta las direcciones predominantes de vientos, ya que estas controlan la dispersión de las cenizas. Las direcciones de vientos fueron determinadas mediante el análisis de datos NCEP/NCAR, para el periodo 1979-1998 (ver mapa de peligro), por especialistas del Instituto Geofísico del Perú (Yamina Silva, comunicación escrita, 2007). Para el escenario vulcaniano con IEV 1-2, se utilizaron direcciones de vientos a 5865, 9690 y 10960 msnm, y para escenarios vulcaniano y subpliniano (IEV 3), así como pliniano (IEV 4-5), se utilizaron direcciones de vientos a 12445, 16645, 20662 y 26415 msnm. Durante el año se tienen dos direcciones preferentes, entre Abril y Octubre se dirigen hacia el Este, Sureste y Noreste, y entre noviembre y marzo se dirigen principalmente en dirección Suroeste y Oeste.

### **Zona de alto peligro (rojo)**

La zona de alto peligro, es el área proximal y se halla aproximadamente dentro de un radio de 8 km de distancia del complejo volcánico (Figura 32). Durante erupciones vulcanianas con IEV 2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. Está basado en la dispersión de cenizas de erupciones vulcanianas de los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti.

Durante erupciones vulcanianas o sub-plinianas con IEV 3, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez de varios centímetros de espesor (Figura 32). Está basado en el mapa de isópacas de la erupción del volcán nevado del Ruiz de 1985 (IEV 3, Naranjo et al., 1986). También durante la erupción del volcán Tungurahua (Ecuador) de agosto 2006, de IEV 3, se reportaron espesores de caídas de ceniza de entre 4 y 5 cm a 10 km de distancia del cráter y en el eje de dispersión de la pluma (Eychenne et al., 2012).

Durante erupciones plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor. Está basado en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Misti de 2050 años AP (IEV 4), a 10 km de distancia emplazó caídas de lapilli de pómez de entre 30 y 40 cm de espesor (Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011). La erupción del volcán Ticsani de 11000 años AP. (IEV 4), emplazó caídas de

ceniza de alrededor de 3 m de espesor a 10 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).

En resumen, la zona de alto peligro puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-5).

### **Zona de moderado peligro (naranja)**

La zona de moderado peligro se halla aproximadamente entre los 10 y 30 km de distancia del complejo volcánico (Figura 32). Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de pocos milímetros de espesor. Esto está basado en la dispersión de cenizas de la erupción vulcaniana del volcán Sabancaya de 1988-1998 (IEV 2), durante la cual caídas de ceniza de 1 mm de espesor alcanzaron cerca de 30 km de distancia del cráter en dirección este, es decir en el eje de dispersión de la pluma (Thouret et al., 1994).

Durante erupciones vulcanianas o sub-plinianas con IEV 3, esta zona de moderado peligro puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor (Figura 32). Esto basado en algunos ejemplos, como en el caso de la erupción de noviembre de 1985 del volcán nevado del Ruiz, durante el cual la ceniza alcanzó cerca de 2 cm de espesor a 30 km de distancia del volcán. Mientras que en el caso de la erupción del volcán Tungurahua de agosto 2006 (IEV 3, Eychenne et al., 2012) se reportaron espesores de 0.7 a 0.8 cm a la misma distancia.

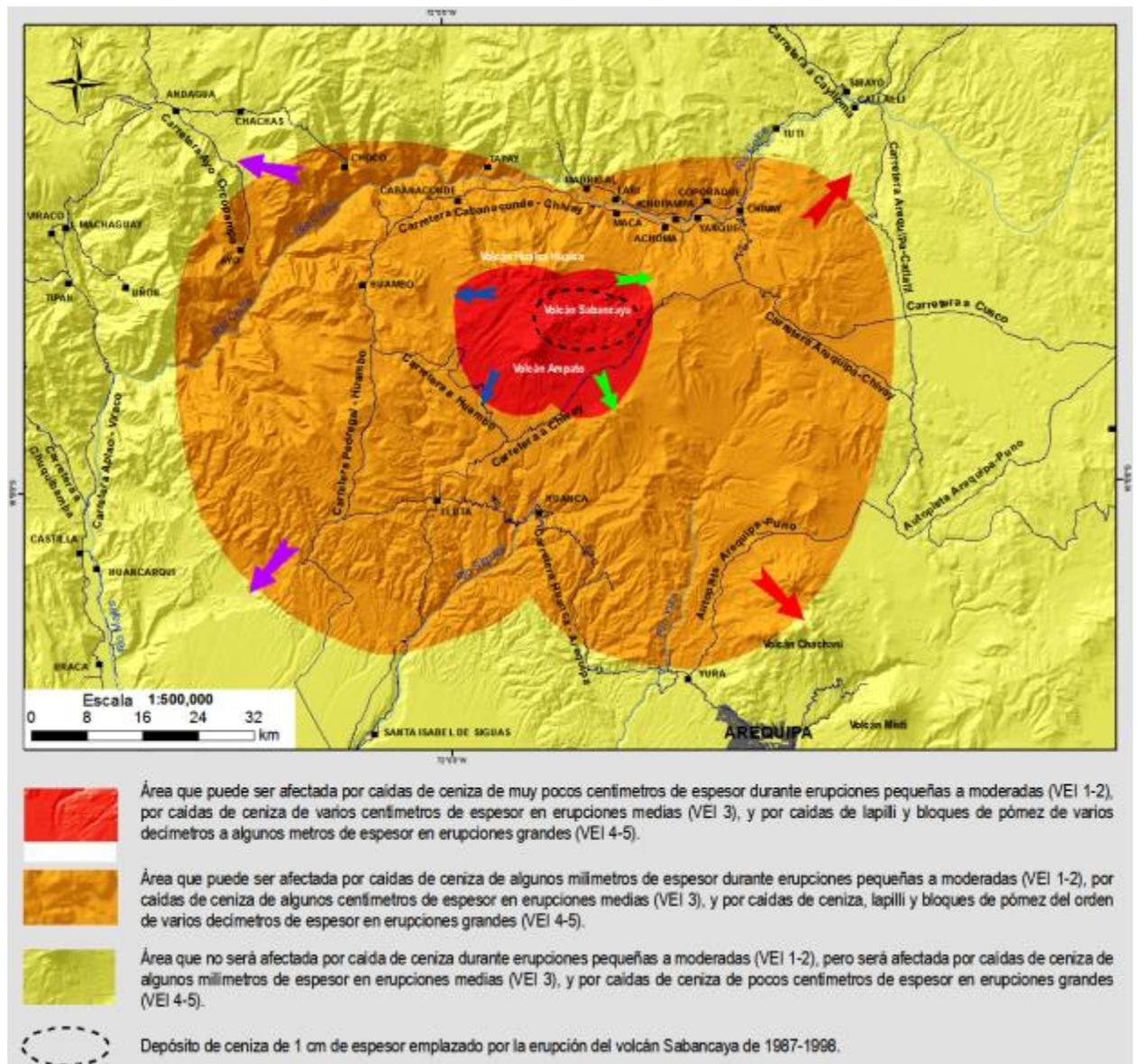
Durante erupciones plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez, de varios decímetros de espesor (Figura 16). Está basado en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Misti de 2050 años AP (IEV 4), a 30 km de distancia emplazó caídas de lapilli de pómez que tienen entre 4 y 5 cm de espesor (Thouret et al., 2001). La erupción del volcán Ticsani de 11 000 años AP (IEV 4), emplazó caídas de ceniza de alrededor de 50 cm de espesor a 30 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).

En resumen, la zona de moderado peligro, puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez de varios centímetros a decímetros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-5).

### **Zona de bajo peligro (amarillo)**

La zona de bajo peligro se halla aproximadamente entre los 30 y 60 km de distancia del complejo volcánico (Figura 32). Durante erupciones vulcanianas

con IEV 1-2, esta área difícilmente sería afectada por caídas de ceniza. Durante erupciones vulcanianas o sub-plinianas con IEV 3, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de varios milímetros de espesor. Está basado en las erupciones de los volcanes Nevado del Ruiz de noviembre de 1985, que a 50 km de distancia emplazó caídas de ceniza de entre 2 y 3 mm de espesor. Por su parte, luego de la erupción del volcán Tungurahua de agosto 2006 (IEV 3, Eychenne et al., 2012) se reportaron espesores de ceniza de 6 mm a la misma distancia. Durante erupciones plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor. Está basado en el mapa de isópacas de la erupción del volcán Ticsani de hace 11 000 años AP. (IEV 4), que emplazó caídas de ceniza de alrededor de 1 cm de espesor, a 50 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).



**Figura 32.** Mapa de peligros para caídas piroclásticas del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya (tomado de Mariño, 2012).

En esta zona de bajo peligro se encuentran Yura, Arequipa, Tuti, Sibayo, Callalli, Chachas, Andagua, Viraco, Machaguay, Tipán, Uñón, Aplao, Huancarqui, Pedregal, entre otros (ver mapa).

En resumen, la zona de bajo peligro sería poco afectada por caídas de ceniza durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), pero sí por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-5).

## CONCLUSIONES

En base al procesamiento y análisis de la información científica, se llega a las siguientes conclusiones:

- La actividad sísmica estuvo dominada principalmente por sismos asociados a movimiento de fluidos (largo periodo), ascenso de material magmático (híbridos) y emisión de ceniza (tremor), también, se registraron eventos asociados al fracturamiento de roca al interior del volcán (volcano-tectónicos).
- Desde el 06 de noviembre hasta fines de junio (24 de junio) el volcán presentó una actividad explosiva relativamente constante, con ocurrencia entre 50 a 60 explosiones por día en promedio, de leves a moderadas (energías entre 1 y 5 MJ), sin embargo, se tuvo un periodo de relativa calma (del 24 de junio al 04 de julio), durante el cual la ocurrencia de explosiones disminuyeron considerablemente en número y energía: 10 explosiones en promedio y energías que no superaron 01 MegaJoule.
- Actualmente, se ha venido registrando nuevamente un incremento en la actividad explosiva, tanto en número y energía, contabilizándose así un promedio entre 30 y 45 explosiones por día y energías que van hasta los 3.5 MJ.
- Las mediciones de gases magmáticos  $SO_2$  registrados por nuestras estaciones, muestran presencia importante de  $SO_2$ , con tendencia al incremento, variando dentro del rango de FLUJOS GRANDES. Se han registrado valores cercanos de hasta 6000 Toneladas/día (28 de febrero y 24 de junio).
- Los registros de las estaciones de monitoreo GPS que permite evaluar la deformación de la superficie volcánica del Sabancaya durante el proceso eruptivo, mostraron hasta tres episodios de deformación correspondiente a procesos deflacionario asociados al sismo del 30 de marzo de 4.6 ML, mientras el segundo episodio corresponde a un proceso inflacionario asociado probablemente a un mayor volumen de magma en movimiento, observado en las estaciones "SBSE" y "SBHO" con valores entre 15 a 20 mm, y finalmente, el tercer episodio corresponde a un proceso deflacionario probablemente asociado a la emisión de cenizas y gases.
- El sistema satelital MIROVA, ha identificado un incremento gradual de las anomalías térmicas, que corresponde a valores moderados clasificados en la escala de mediciones MIROVA, destacando durante este proceso una anomalía máxima de 71 MW, asociado probablemente a un cuerpo caliente muy próximo a la superficie que es continuamente observado en el flanco norte, noreste y noroeste.

- Las emisiones de gases y cenizas durante el proceso, se mantuvieron ligeramente constantes; pero hubo días, en donde las columnas de gases y cenizas alcanzaron alturas de hasta 5500 m sobre la cima del volcán. Las cenizas fueron dispersadas por los vientos hacia los sectores Norte, Noroeste, Este y Sureste del Sabancaya, afectando a los poblados del valle del Colca, además de los distritos de Huambo, Lluta y Huanca, incluso, llegando hasta la parte Norte de la ciudad de Arequipa.
- Según los datos de monitoreo presentados en este informe, la actividad del volcán Sabancaya se mantiene moderada y existe la posibilidad de que se mantenga y/o incluso incrementa.
- A inicios de la erupción, el diámetro de la ceniza depositada en el sector de Hornillos, a 2.5 km del cráter, fue de 600  $\mu\text{m}$  y el porcentaje de finos (32  $\mu\text{m}$ ) fue mayor que los componentes gruesos (250 - 500  $\mu\text{m}$ ). Con el paso del tiempo el tamaño de la ceniza ha aumentado alcanzando hasta 1 mm de diámetro, y el porcentaje de finos ha disminuido con respecto a los componentes gruesos. Probablemente al inicio de la erupción la fragmentación del magma fue más fuerte.
- Con ayuda de los cenizómetros se ha logrado tomar los espesores de la caída de ceniza en algunos pueblos como Achoma, Cabanaconde y Huambo, donde se midió 6, 3 y 2 mm de espesor, respectivamente.
- También se tomaron medidas de los espesores de ceniza en un radio de 20 km hacia el sector Sureste – Este. A 2.5 km del volcán el espesor es de 1.3 cm, en la pampa Sallalli y Patapampa, a 12 y 16 km del Sabancaya donde existen ganados camélidos el espesor de la ceniza oscila entre 4 y 1 mm.
- El proyectil balístico emitido por el Sabancaya contiene cristales de plagioclasa, clinopiroxeno, biotita, anfíbol, apatito y óxidos de Fe-Ti. Algunos minerales como la plagioclasa y el anfíbol que presentan texturas de desequilibrio como bordes de sobrecrecimiento, textura en tamiz y coronas de reacción. Estas texturas probablemente fueron provocadas por una inyección de un nuevo magma en la cámara magmática.
- La ceniza y el bloque balístico son de composición andesítica.
- En el volcán Sabancaya se han identificado tres escenarios eruptivos en caso de continuar la actividad. El escenario que tiene mayor probabilidad de continuar corresponde a erupciones vulcanianas (IEV 1-2). Los escenarios menos probables corresponden a erupciones efusivas (emisiones de lava) y erupciones sub-plinianas con (IEV 3).
- El mapa proximal de peligros múltiples (por flujos de lava, flujos piroclásticos, flujos de barro o lahares), muestra una zona de alto peligro

(rojo) que se encuentra entre 2 y 4 km de distancia del cráter del volcán Sabancaya; la zona de moderado peligro (naranja), se encuentra entre 4 y 6 km del volcán; y la zona de bajo peligro (amarillo), están entre 9 y 14 km del complejo volcánico. En estas 3 zonas de peligro, no se encuentran pueblos importantes, solo estancias con muy pocas viviendas, las que están muy dispersas. Sin embargo, se hallan cientos de camélidos, así como ganado ovino y vacuno.

- En el mapa de peligros por flujos de lodo (lahares) distales, la zona roja, considerada de alto peligro, puede ser afectada por lahares de hasta 5 millones de m<sup>3</sup>; la zona naranja, de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de 10 millones de m<sup>3</sup>; mientras que, la zona amarilla, de bajo peligro, puede ser afectada por lahares de 20 millones de m<sup>3</sup>. Estos lahares pueden descender principalmente por las quebradas que drenan en dirección Este, y por los flancos del Hualca Hualca y afectar las vías de acceso al valle y cañón del Colca, destruyendo los puentes y carreteras de la margen izquierda. También pueden afectar los accesos en la zona sur, los accesos a los poblados de Taya, Lluta y Huanca.
- En el mapa de peligros por caídas piroclásticas, la zona de **alto peligro (rojo)** puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas, pómez y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-5). En esta zona de alto peligro, no se encuentran pueblos importantes, solo estancias con muy pocas casas, las que están muy dispersas. Sin embargo, se hallan cientos de camélidos, así como ganado ovino y vacuno.
- La zona de **moderado peligro (naranja)**, puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez del orden de varios centímetros a decímetros de espesor en erupciones explosivas grandes (IEV 4-5). En esta zona se encuentran casi todos los pueblos del valle del Colca, tales como Chivay, Lari, Yanque, Coporaque, Ichupampa, Achoma, Maca, Madrigal, Pinchollo, Tapay, Cabanaconde, Choco, Huambo y Ayo. También están pueblos en la zona sur, tales como Huanca, Lluta, Taya y Yura.
- La zona de **bajo peligro (amarillo)** no sería afectada por caídas de ceniza durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), pero sí por caídas de ceniza de algunos milímetros a centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), a grandes (IEV 4-5). En esta zona se encuentran Arequipa, Tuti, Sibayo, Callalli, Chachas, Andagua, Viraco, Machaguay, Tipán, Uñón, Aplao, Huancarqui, Pedregal, entre otros (ver mapa).

## RECOMENDACIONES

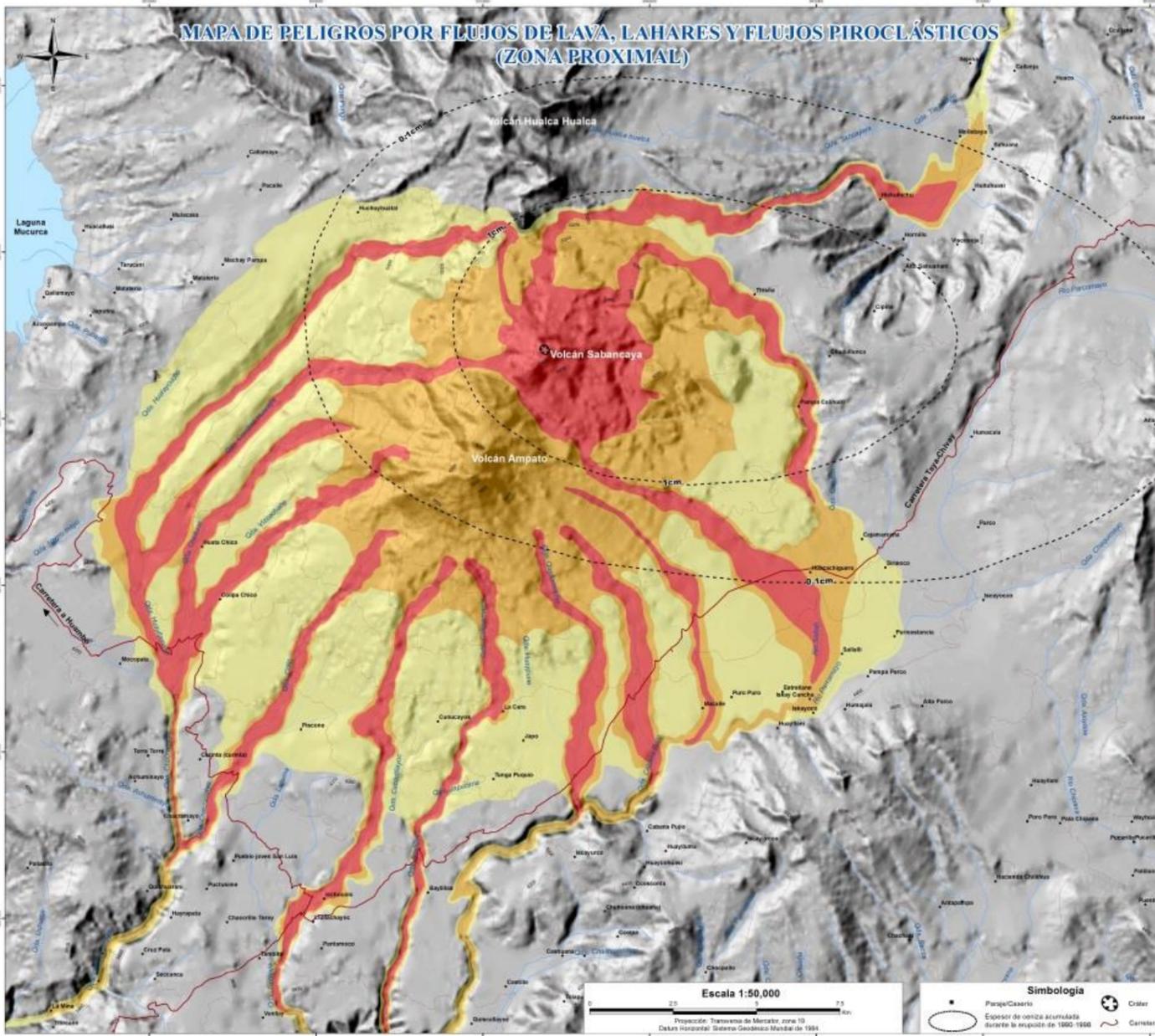
- Según la evolución y características que presenta el actual proceso de erupción del volcán Sabancaya, descritas en el presente informe, se recomienda mantener el nivel de alerta volcánica en color **NARANJA**.
- No acercarse al volcán, en un radio de 12 km alrededor del cráter.
- Ejecutar planes de contingencia considerando el incremento en la actividad volcánica observada.
- Mantenerse informado sobre la actividad del volcán Sabancaya a través de las alertas, pronósticos y los reportes de monitoreo del OVI y del IGP.
- Recomendamos a las autoridades e instituciones públicas del Ministerio de Salud, Agricultura, etc., realizar una evaluación del impacto de las cenizas en la salud de las personas, en el medio ambiente y en los poblados afectados, principalmente en un radio de 40 km.
- Mejorar los accesos (caminos carrozables y trochas) que permiten desarrollar el trabajo de monitoreo del volcán.
- Convocar a los diferentes sectores (Agricultura, ANA, Vivienda y Construcción, Salud, Educación, Transportes y Comunicaciones, Comercio y Turismo, Energía y Minas, CORPAC, Inclusión Social) sobre las actividades inherentes a sus despachos, a fin de conjugar esfuerzos en relación al incremento de la actividad volcánica y sus efectos.
- El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET - OVI, continuará realizando trabajos de monitoreo de manera permanente a fin de informar de manera oportuna y veraz a las autoridades y la población acerca del desarrollo de este proceso eruptivo.

## REFERENCIAS

- BENJAMIN B. (2013). Homemade ashmeter: a low-cost, high-efficiency solution to improve tephra field-data collection for contemporary explosive eruptions. *Journal of Applied Volcanology* 2:1
- BELLOT, N. (2011). Modelamiento de lahares en los volcanes Sabancaya y Ubinas (Sur Perú). *INGEMMET, Reporte Interno*, 28 p.
- BLONG, R. (1984). *Volcanic hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions*. Academic Press, Orlando, Florida, pp. 21-26.
- EYCHENNE, J.; LE PENNEC, J.-L.; TRONCOSO, L.; GOUHIER, M.; NEDELEC, J.-M. (2012). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bull Volcanol* (2012) 74:187–205.
- GERBE M.-C., THOURET J.-C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted through the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya in south Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66, 541-561.
- GUILLANDE, R.; THOURET, J.-C.; HUAMAN, D. & LE GUERN, F. (1992). L'activité éruptive actuelle du volcan Nevado Sabancaya (Sud du Pérou) et l'évaluation des menaces et des risques: géologie, cartographie et imagerie satellitaire, informe inédito. Paris: Ministère de L'Environnement et Centre National d'Études Spatiales, 120 p.
- IVERSON, R.; SCHILLING, S.; VALLANCE, J. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, v. 110, N°8; 972-984.
- JUVIGNÉ, E.; THOURET, J.-C.; GILOT, E.; LECLERCQ, L. & GOURGAUD, A. (1998). L'activité du volcan Nevado Sabancaya (Pérou) au cours de l'Holocène. *Quaternaire*, 9(1): 45-51.
- JUVIGNE, E.; THOURET, J.-C.; LOUTSCH, I.; LAMADON, S.; FRECHEN, M. (2008). Retombées volcaniques dans des tourbières et lacs autour du massif des Nevados Ampato et Sabancaya (Pérou Méridional, Andes Centrales). *Quaternaire*, 19 (2): 157-173.
- KELFOUN, K.; SAMANIEGO, P.; PALACIOS, P. & BARBA, D. (2009). Testing the suitability of frictional behaviour for pyroclastic flow simulation by comparison with a well-constrained eruption at Tungurahua volcano (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 71(9): 1057-1075.
- MAJOR, J. NEWHALL, C. (1989). Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods. *Bull. Volcanol.*, 52, No. 1, 1-27.

- MARIÑO, J. (2012). Escenarios eruptivos y mapa de peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Tesis Maestría, Universidad de Nice, Francia, 87 p.
- PIERSON, T.C.; JANDA, R.J.; THOURET, J.C.; BORRERO, C.A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41; 17-66.
- RIVERA, M.; MARIÑO, J.; SAMANIEGO, P.; DELGADO, R. & MANRIQUE, N. (2016). Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa), INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 61, 122 p., 2 mapas.
- RIVERA, M.; THOURET, J.C.; MARIÑO, J.; BEROLATTI, R. & FUENTES, J. (2010). Characteristics and management of the 2006-2008 volcanic crisis at the Ubinas volcano (Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 198(1-2): 19-34
- RODRIGUEZ A. & URIBE M. (1994). Participación del Instituto Geofísico del Perú en relación con la reactivación del Volcán Sabancaya, provincia de Caylloma, región de Arequipa. Informe interno OVS-IGP, Oficina de Arequipa, 28 p.
- SAMANIEGO, P., RIVERA, M., MARIÑO, J., GUILLOU, H., LIORZOU, C., ZERATHE, S., DELGADO, R., VALDERRAMA, P. (2016). The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 323, p. 110-128.
- SCHILLING S. (1998). *LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones*. US Geological Survey Open-File Report 98-638; 79 pp.
- SIGURDSSON, H.; HOUGHTON, B.F.; MCNUTT, S.R.; RYMER H. & STIX, J. EDS (2000). *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, 1442 p.
- THOURET, J.-C.; GUILLANDE, R.; HUAMÁN, D.; GOURGAUD, A.; SALAS, G. & CHOROWICZ, J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin Société Géologique de France*, 165(1): 49-63.
- THOURET, J.C.; FINIZOLA, A.; FORNARI, M.; LEGELEY-PADOVANI, A.; SUNI, J. & FRECHEN, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1593-1610.
- THOURET, J.C.; RIVERA, M.; WÖRNER, G; GERBE, M.C.; FINIZOLA, A., ET AL. (2005) - Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 67(6): 557-589.

# MAPAS DE PELIGROS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO-SABANCAYA



**INTRODUCCIÓN**  
En estos mapas se representan con distintos colores las zonas susceptibles a ser afectadas por los fenómenos volcánicos como son las lavas y flujos piroclásticos. En el mapa principal (proximal), la determinación de las tres zonas de peligros está basada en una combinación o suma de todos los peligros potenciales que pueden afectar dichas áreas. Finalmente, los límites entre cada zona son graduales y no se pueden determinar con exactitud absoluta.

**METODOLOGÍA**  
Para delimitar las zonas de peligro se tuvieron en cuenta estudios geológicos, modelamientos por computadora de flujos de barro (lahares) y flujos piroclásticos. Para ello se usó el programa LAHARZ. Además de ejemplos análogos de erupciones ocurridas en otros volcanes del sur del Perú.

**TIPOS DE PELIGROS VOLCÁNICOS**

**CAÍDAS PIROCLÁSTICAS**  
Estas se generan cuando los fragmentos de roca son expulsados hacia la atmósfera violentamente, formando una columna eruptiva alta y que posteriormente caen sobre la superficie terrestre. Los fragmentos más grandes y densos caen cerca del volcán y se denominan bombas o bloques (>4 mm), mientras que las partículas de menor tamaño, denominadas lapilli (2-64 mm) y cenizas (<2 mm) son llevadas por el viento a grandes distancias, luego caen y forman una capa de varios mm o cm de espesor. Estas partículas pueden causar problemas de salud en las personas, contaminar fuentes de agua, colapsar los techos por el peso acumulado, afectar cultivos, interrumpir el tráfico aéreo, entre otros.

**FLUJOS DE BARRO (Lahares o Huaycos)**  
Los flujos de barro son mezclas de partículas volcánicas de tamaños diversos movilizados por el agua que fluyen rápidamente, con velocidades promedio entre 10 y 20 m/s. Se generan durante periodos de erupción o de reposo volcánico. El agua puede provenir de fuertes lluvias, fusión de hielo o nieve. Normalmente destruyen todo a su paso y pueden alcanzar grandes distancias (>100 km).

**FLUJOS DE LAVA**  
Son corrientes de roca fundida expulsadas por el cráter o fracturas en los flancos del volcán. Pueden fluir por el fondo de las quebradas y alcanzar varios kilómetros de distancia, pero en nuestros volcanes, cuyo magma es viscoso, normalmente se enfrían en la zona del cráter, formando domos de lava, o recorren escasos kilómetros. Los flujos de lava destruyen y calcinan todo a su paso, sin embargo, no representan una amenaza elevada para las personas debido a su baja velocidad.

**FLUJOS Y OLEADAS PIROCLÁSTICAS**  
Los flujos piroclásticos son corrientes calientes (300°C a 800°C), conformadas por una mezcla de ceniza, fragmentos de roca y gases. Estos flujos descienden por los flancos del volcán a grandes velocidades, entre 100 y 300 m/s en promedio. Están constituidos por una parte inferior densa, que se desplaza por el fondo de las quebradas o valles, y otra superior, menos densa denominada oleada piroclástica, compuesta por una nube de gases y cenizas que con frecuencia salen del valle, pudiendo afectar un área mayor. Estos flujos y oleadas destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso.

**AVALANCHA DE ESCOMBROS**  
Las avalanchas de escombros son deslizamientos rápidos del flanco de un volcán. Son causadas por las fracturas que producen la inestabilidad del volcán, así como la pendiente elevada de las laderas, presencia de fallas, sismos fuertes, alteración hidrotermal y explosiones volcánicas. Las avalanchas de escombros bajan a gran velocidad y destruyen todo lo que se encuentra a su paso. Aunque no se han encontrado estos tipos de depósitos asociados a los volcanes Ampato y Sabancaya, se consideró este escenario debido a que el volcán Ampato posee flancos de fuerte pendiente y presenta sectores con rocas bastante hidrotermalizadas. Lo que no ocurre con el edificio volcánico Sabancaya.

**GASES VOLCÁNICOS**  
En etapas pre-eruptivas y eruptivas se produce una importante liberación de gases, principalmente vapor de agua; pero también dióxido de carbono, dióxido de azufre, ácido clorhídrico, monóxido de carbono, ácido fluorhídrico, azufre, nitrógeno, cloro o fluor. Estos gases se diluyen y dispersan rápidamente, sin embargo pueden alcanzar altas concentraciones en el cráter o laderas de la cumbre, donde pueden generar intoxicación y muerte de personas y animales. Los gases también pueden condensarse y adherirse a partículas de ceniza, así como reaccionar con las gotas de agua y provocar lluvias ácidas que generan corrosión, daños en los cultivos y contaminación de aguas y suelos.

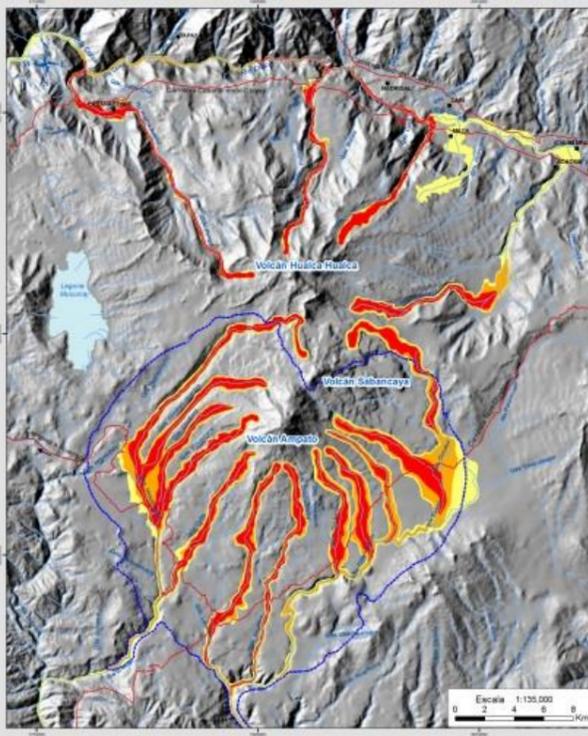
**VEI: Índice de Explosividad Volcánica:** Representa la magnitud de una erupción y es una escala que va de 0 a 8 grados. El VEI se define en función del volumen del material expulsado, la altura de la columna eruptiva y duración de la erupción.

**Zona de alto peligro:** Puede ser severamente afectada por flujos de lava muy viscosos, flujos piroclásticos pequeños, lahares y proyectiles balísticos, generados en erupciones leves (VEI 1-2), más aún en erupciones moderadas a grandes. Debido a su cercanía al volcán y sus características geomorfológicas, es la zona de mayor peligro.

**Zona de moderado peligro:** Puede ser afectada por flujos de lava menos viscosos, así como por flujos piroclásticos y lahares, durante erupciones moderadas (VEI 3). Con mayor razón también puede ser afectada durante erupciones grandes.

**Zona de bajo peligro:** Puede ser afectada por flujos y oleadas piroclásticas de menor tamaño y cenizas del cono lahares, pero sólo en erupciones de magnitud moderada (VEI 4-5). Es la zona más alejada del complejo volcánico y por tanto la de menor peligro.

**MAPA DE PELIGROS POR FLUJOS DE BARRO (LAHARES) Y AVANCHA DE ESCOMBROS**

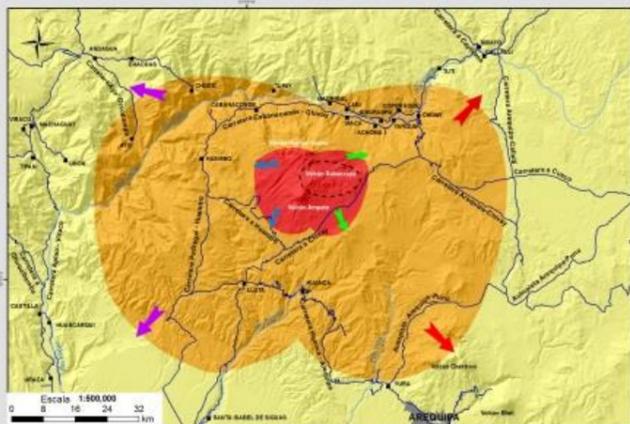


**GRADO DE PELIGROSIDAD**

Alto: La zona de alto peligro (rojo) puede ser afectada por lahares de poco volumen (5 millones de m<sup>3</sup>), la posibilidad de ocurrencia es alta. La zona de bajo peligro (amarillo) puede ser afectada solo por lahares de gran volumen (20 millones de m<sup>3</sup>), la posibilidad es baja.

Bajo: Límite del área que puede ser afectada por una avalancha de escombros originada en el volcán Ampato. El colapso puede estar asociado a una erupción volcánica o sismo fuerte.

**MAPA DE PELIGROS POR CAÍDA DE CENIZA Y PÓMEZ**



**Área que puede ser afectada por caídas de cenizas de muy pocos centímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (VEI 1-2), por caídas de cenizas de varios centímetros de espesor en erupciones medias (VEI 3), y por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor en erupciones grandes (VEI 4-5).**

**Área que puede ser afectada por caídas de cenizas de algunos milímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (VEI 1-2), por caídas de cenizas de algunos centímetros de espesor en erupciones medias (VEI 3), y por caídas de cenizas, lapilli y bloques de pómez del orden de varios decímetros de espesor en erupciones grandes (VEI 4-5).**

**Área que no será afectada por caída de cenizas durante erupciones pequeñas a moderadas (VEI 1-2), pero será afectada por caídas de cenizas de algunos milímetros de espesor en erupciones medias (VEI 3), y por caídas de cenizas de pocos centímetros de espesor en erupciones grandes (VEI 4-5).**

Depósito de ceniza de 1 cm de espesor emplazado por la erupción del volcán Sabancaya de 1990-1996.

Direcciones y velocidades predominantes de vientos a 5,885, 9,950, 10,960 m s.n.m. Fuente: IOP, basado en análisis de datos INCEP/INCAR, periodo 1975-1996.

Las flechas de color azul representan los vientos de noviembre a marzo, y las flechas de color verde representan los vientos de abril a octubre.

Velocidad de vientos.

Direcciones y velocidades predominantes de vientos a 12,445, 16,645, 20,860, 26,415 m s.n.m. Fuente: IOP, basado en análisis de datos INCEP/INCAR, periodo 1975-1996.

Las flechas de color rojo representan los vientos de noviembre a marzo, y las flechas de color rojo oscuro representan los vientos de abril a octubre.

Velocidad de vientos.



Flanco oriental del complejo volcánico Ampato-Sabancaya



Cráter del volcán Sabancaya, ubicado a 5900 msnm y posee 300 m de diámetro.

**REFERENCIAS**

Bello, R., Samaniego, P., Rivera, M., Utrilla, R. (2012). DEMARCACIÓN DE LAS ZONAS DE INUNDACIÓN POR LAHARES EN EL ÁREA DEL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO-SABANCAYA (AREQUIPA). En: XV Congreso Peruano de Geología, Lima Perú, 2012. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 53.

Burns, M., Johnson, A., Engel, F. (1989). ANALYSIS OF SABANCAYA VOLCANO, SOUTHERN PERU: Using RADARSAT and Landsat TM Data. Application Development and Research Opportunity (ADRO) report. CD-ROM: RADARSAT/ASCA/ANSA. http://radarsat.space.gc.ca

Chavez, M. C., Thorne, J. C. (2006). ROLE OF MOUNTAIN-BUILDING IN THE PROGRESS OF LAHAR ERUPTION THROUGH THE 1998-99 EXPLOSIVE ACTIVITY OF NEVADO SABANCAYA IN SOUTH PERU. Bulletin of Volcanology 68, 541-561.

Jungles, E., Thorne, J.C., Utrilla, R., Llanos, S., Frutos, M., Fariñas, M., Rivera, M., Davis, J., Martín, J. (2008). RETORNOS VOLCÁNICOS EN LOS TORRENTES Y LAZOS ALREDOR DEL MANSIF DES NEVADOS AMPATO Y SABANCAYA (PEROU MERIDIONAL, ANDES CENTRALES). Geographica 19 (2): 157-173.

Martin, J., Samaniego, P., Rivera, M., Bello, R., Utrilla, R. (2012). MAPA DE PELIGROS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO-SABANCAYA. En: XV Congreso Peruano de Geología, Lima Perú, 2012. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 53.

Rivera, M., Samaniego, P., Martín, J., Delgado, R., Gallo, R., La Parra, J.L. (2012). HISTORIA ERUPTIVA DEL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO-SABANCAYA (AREQUIPA). En: XV Congreso Peruano de Geología, Lima Perú, 2012. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 53.

Thorne, J.C., Gualandri, R., Huanan, D., Douglas, A., Salas, O., & Chaves, J. (1994). LACTIVE ACTUELLE DU NEVADO SABANCAYA (SUD PEROU): RECONNAISSANCE GEOLOGIQUE ET SATELLITAIRE, EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DES MENACES VOLCANIQUES. Bulletin de la Société Géologique de France, 1, 161, 49-63.