

Informe
técnico

MAPA

DE PELIGROS DEL VOLCÁN SABANCAYA

Arequipa, 2024



CRÉDITOS

Juan Carlos Castro Vargas
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Presidente ejecutivo del IGP

Edmundo Norabuena
Director científico del IGP

Marco Rivera
Director del Observatorio Vulcanológico del Sur

Antonella Condorena
Jefa de la Unidad Funcional de Comunicaciones

Marco Rivera
David Valdivia
Juan Cuno
José Del Carpio
Autores

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Marco Rivera
Jorge Concha
Edición de contenido

cenvul@igp.gob.pe
<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/>

Carátula: explosión y expulsión de cenizas del volcán Sabancaya

A. H. José María Arguedas, mz. D, lt. 8, Sachaca, Arequipa

Teléfono: +5154369212

Arequipa, noviembre de 2024

CONTENIDO

6	Presentación
7	Resumen
8	Introducción
9	Condiciones climatológicas
10	Aspecto socioeconómico
11	Los peligros volcánicos
11	Caída de piroclastos (tefras)
12	Flujos de lava
12	Flujos y oleadas piroclásticas
12	Lahares (flujos de lodo y escombros)
12	Avalanchas de escombros
13	Gases volcánicos
14	El volcán Sabancaya
14	Historia eruptiva
15	Actividad volcánica reciente
17	Datos y metodología para la elaboración de mapas
17	Metodología para la elaboración de mapas
17	Softwares empleados
18	Parámetros de entrada para posibles escenarios eruptivos
22	Resultados: mapas de peligros del volcán Sabancaya
22	Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal
24	Mapa de peligros por caídas de ceniza durante erupción vulcaniana (IEV1-2)
26	Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción subpliniana (IEV 3-4)
28	Mapa de peligros por lahares
30	Conclusiones
31	Referencias

SABANCAYA



Elevación

5960 m s. n. m.



Región

Arequipa



Provincia

Caylloma



Última erupción

2016-2024 (continúa)



Población en un radio de 30 km

10 204 personas



Inicio de vigilancia en tiempo real

2013



Instrumentos y técnicas de vigilancia

6 estaciones sísmicas
4 cámaras científicas
2 estaciones GNSS
2 estaciones DOAS
1 estación multigas
1 estación infrasonido
Sistemas satelitales



PRESENTACIÓN



Dr. Hernando Tavera
Presidente ejecutivo
Instituto Geofísico del Perú

Todos sabemos que vivimos en un país cuyo paisaje y topografía se han moldeado a lo largo del tiempo por la ocurrencia de sismos y erupciones volcánicas. Estos procesos naturales son cíclicos y, por lo tanto, sabemos que se repetirán en el futuro con igual o incluso mayor intensidad. En este escenario, las ciencias, de la mano de nosotros los científicos, hemos aportado y seguimos contribuyendo para comprender estos procesos. En el caso de los volcanes, estos estudios nos permiten conocer sus erupciones históricas y anticipar los escenarios eruptivos que podrían desarrollarse y afectar a las localidades y ciudades que se han asentado en sus alrededores.

Para entender los actuales escenarios de riesgo de las diferentes áreas urbanas frente a posibles erupciones volcánicas, es crucial contar con información plasmada en documentos cartográficos, es decir, en mapas georreferenciados que muestren la extensión de los productos volcánicos emitidos por cada volcán. Así, podemos anticipar el alcance que han tenido y podrían tener en una nueva erupción las cenizas, los flujos piroclásticos, los proyectiles balísticos, los flujos de lava, los lahares y las avalanchas de escombros. Contar con estos mapas es sencillamente imprescindible para realizar una adecuada gestión del riesgo.

En el Instituto Geofísico del Perú (IGP), en nuestra calidad de institución oficial del Estado peruano responsable del monitoreo volcánico y la alerta de erupciones, hemos asumido el desafío científico de elaborar mapas de peligro para cada uno de los volcanes activos y potencialmente activos del país. Gracias a estos productos, los tomadores de decisiones y las instituciones que conforman el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD) pueden evaluar la exposición de localidades y ciudades cercanas a volcanes. Más aún, estos mapas se consolidan como herramientas esenciales para el ordenamiento territorial y para planificar la expansión urbana, siempre considerando los peligros que trae consigo una erupción volcánica.

Estos mapas son el resultado de investigaciones vulcanológicas que venimos realizando desde 1988, cuando el IGP inició la vigilancia volcánica mediante la implementación de redes geofísicas de monitoreo, la formación continua de profesionales y la firma de convenios con universidades e instituciones tanto nacionales como internacionales para llevar a cabo estudios pioneros en volcanes. Más de 35 años dedicados a documentar la actividad volcánica, sus eventos precursoros, sus productos y manifestaciones, con el único propósito de contribuir con la seguridad y bienestar de la población.

Comprender los volcanes es un desafío constante, una misión permanente que el Estado peruano ha hecho suya. En virtud de esta confianza, hoy contamos con el Observatorio Vulcanológico del Sur, ubicado en el distrito de Sachaca, Arequipa, una facilidad técnico-científica del IGP que alberga al Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), el servicio de vigilancia volcánica desde el cual se emiten alertas, reportes y boletines sobre la evolución del comportamiento de 13 volcanes activos y potencialmente activos del país. El CENVUL, con su labor de vigilancia permanente, es aliado vital de los gobiernos regionales y locales, del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) y del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED) para la gestión del riesgo volcánico en el Perú.

Quienes formamos parte del SINAGERD tenemos claro que no es posible gestionar el riesgo sin el respaldo de la ciencia. Confiamos en que esta misma perspectiva sea compartida por cada peruano y peruana. Sabemos que es un proceso, pero creemos que la generación periódica de productos científicos, como lo es en esta oportunidad este mapa de peligros del volcán Sabancaya, ayudará a que cada persona comprenda mejor la amenaza que enfrenta en su entorno, y que la prevención debe estar basada en información científica oficial, confiable y oportuna. Esta es nuestra labor en el IGP, hacer "ciencia para protegernos, ciencia para avanzar".

RESUMEN

El volcán Sabancaya, ubicado a 18 km al sur del valle del Colca (Caylloma, Arequipa) y a 70 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, es el segundo volcán más activo del Perú. Desde noviembre de 2016, y hasta la actualidad, viene presentando un proceso eruptivo de tipo vulcaniano. Basados en estudios previos sobre la actividad pasada del Sabancaya y en el comportamiento de volcanes peruanos similares, en caso de una nueva erupción del volcán Sabancaya se consideran seis escenarios eruptivos: el primero considera una erupción de tipo vulcaniana (IEV 1-2); el segundo, una erupción efusiva con emisión de lavas; el tercero, una erupción con crecimiento de domo; el cuarto, una erupción de tipo subpliniana (IEV 3); el quinto, una erupción de tipo pliniana (IEV 4-5) y, el sexto, corresponde al colapso de flanco y emplazamiento de avalancha de escombros.

Además, con base en estudios previos y modelamiento de procesos volcánicos, se han elaborado cuatro mapas de peligros que son presentados en un solo póster: a) Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal, que considera la ocurrencia de flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares, avalanchas de escombros y caída de proyectiles balísticos. b) Mapa de peligros por caídas de cenizas asociadas a una erupción vulcaniana (Índice de Explosividad volcánica [IEV] 1-2), en la cual la zona de alto peligro (rojo) se halla a una distancia de 39 km al este y 44 km al oeste del cráter del volcán Sabancaya. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se halla entre 39 km y 240 km al este, y entre 44 km y 125 km al oeste del cráter del volcán Sabancaya. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de pocos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, con distancias de más de 240 km al este, 125 km al oeste y 100 km al sur del volcán. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de menos de 1.0 mm de espesor. c) Mapa de peligros por caídas

piroclásticas asociadas a una erupción subpliniana, en la cual la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal, y se halla aproximadamente hasta 380 km al este, 160 km al oeste y 200 km al sur del Sabancaya. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez de varios centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro, y tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 380 km a 640 km al este, de 160 km a 260 km al oeste y de 270 km al sur. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) comprende una distancia mayor a 640 km al este, más de 260 km al oeste y más de 370 km al sur del Sabancaya. En esta zona se depositarían cenizas de menos de 0.1 mm de espesor. d) Mapa de peligros por lahares: la zona roja es considerada de alto peligro y corresponde al área de mayor probabilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos asociados a erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1-2) o lluvias intensas. La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de moderado volumen. La zona amarilla es considerada de bajo peligro, o de menor probabilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos (2 millones de m³). Los lahares voluminosos podrían estar asociados a erupciones de gran magnitud (IEV ≥ 3); sin embargo, la probabilidad de ocurrencia de tales erupciones es muy baja.

En caso de una eventual erupción del volcán Sabancaya, las zonas más propensas a ser afectadas por los productos volcánicos, como caídas de cenizas y eventuales lahares, corresponden al valle del río Colca, valle del río Siguan y la altiplanicie volcánica, donde se localizan poblados, caseríos/parajes, terrenos de cultivos, pastizales y obras de infraestructura. Asimismo, se vería afectado el ganado camélido que habita la zona.

1. Introducción

En el sur del Perú, la subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental sudamericana genera la existencia de una cadena volcánica Pliocuaternaria de naturaleza calcoalcalina, situada sobre la cordillera occidental de los Andes. Esta cadena volcánica, que forma parte de la denominada Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC; de Silva y Francis, 1991), está ubicada a aproximadamente 240 km al este del borde occidental de la placa sudamericana, paralela a la fosa Perú-Chile. La dirección de convergencia de la placa de Nazca debajo del continente sudamericano es de N79°E y tiene una velocidad media de 5-6 cm/año (Norabuena et al., 1999).

Los estudios geológicos, geofísicos y vulcanológicos efectuados en el sur del Perú desde la década de los 80 han permitido visualizar la intensa actividad volcánica reciente e histórica manifestada por los volcanes activos existentes dentro de la cadena volcánica: Sabancaya,

Sara Sara, Ubinas, Misti, Huaynaputina, Ticsani, Yucamane y Tutupaca. En épocas históricas, estos volcanes causaron enormes estragos a varios poblados, terrenos de cultivo y obras de ingeniería localizadas en sus inmediaciones. La reactivación sucesiva de los volcanes Sabancaya (1988-1998 y 2013-actualidad) y Ubinas (2006-2009; 2013-2017, 2019 y 2023-actualidad), así como el alto grado de exposición de los habitantes de la ciudad de Arequipa (1 080 635 habitantes) frente a una eventual reactivación del Misti, ha llevado al Instituto Geofísico del Perú (IGP) a desarrollar un programa destinado a realizar estudios vulcanológicos y a la elaboración de mapas de peligros de los volcanes activos del sur peruano.

El volcán Sabancaya (15° 46'-15° 52' S; 71° 49' y 71° 54' O) se ha edificado al sur del volcán Hualca Hualca (6025 m s. n. m.) y al norte del volcán Ampato (6280 m s. n. m.). El Sabancaya está constituido de dos conos superpuestos, en medio de los cuales se encuentra el cráter activo. Asimismo, dicho volcán se encuentra ubicado a 70 km al noroeste de la ciudad de Arequipa (Figura 1), en la provincia de Caylloma, región Arequipa.

La fresca morfología de los domos y coladas de lava en bloques de este volcán sugieren su emplazamiento en una etapa muy reciente, probablemente en el Holoceno (Rivera et al., 2023). Los trabajos previos de Thouret et al. (1994), Juvigné et al. (1998, 2008), Gerbe y Thouret (2004), Rivera et al. (2016), Samaniego et al. (2016) y otros, han puesto en evidencia la ocurrencia de erupciones explosivas y efusivas del volcán Sabancaya durante el Holoceno, la época histórica y, recientemente, entre 1988-1998.

El objetivo central del presente informe es presentar los mapas de peligros del volcán Sabancaya con el propósito de brindar a la sociedad, instituciones del SINAGERD (INDECI, CENEPRED, etc.) y autoridades locales y regionales (Gobierno Regional de Arequipa, municipalidades provinciales y distritales, etc.) un documento oficial que permita efectuar un adecuado ordenamiento territorial, la formulación de proyectos de desarrollo, la elaboración de planes de prevención y el manejo de una eventual crisis volcánica del Sabancaya.

temperatura máxima promedio de 19.3 °C, y una temperatura mínima promedio fue de 1.3 °C. La temperatura máxima registrada fue de 26.8 °C y la temperatura mínima de -10 °C.

Además, de acuerdo con los registros de la estación Madrigal, entre los años 2002 y 2024, la temperatura máxima promedio fue de 20.9 °C y la temperatura mínima promedio fue de 4.1 °C. En tanto, la temperatura máxima fue de 27.5 °C y la temperatura mínima de -10.5 °C.

1.1.2 Precipitación

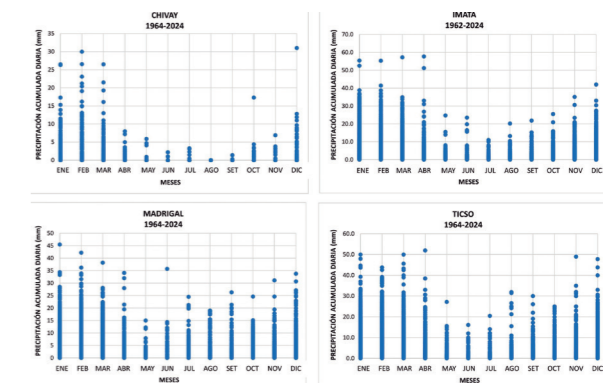


Figura 2. Precipitaciones diarias de las estaciones meteorológicas de Chivay, Imata, Madrigal y Ticso, localizadas dentro de un radio de 30 km del volcán Sabancaya.

Según los datos de las estaciones pluviométricas, las mayores precipitaciones ocurren entre diciembre y marzo (Figura 2). Entre esos meses se han alcanzado precipitaciones diarias de hasta 57.2 mm. Entre abril a noviembre se presentaron precipitaciones diarias de hasta 24.2 mm. Cabe mencionar que se han registrado precipitaciones diarias inusuales, con valores entre 24.2 mm y 57.7 mm. El 5 de abril de 2024, la estación Imata registró una precipitación máxima de 57.7 mm.

1.1 Condiciones climatológicas

Para el análisis de la precipitación y temperatura de la zona de volcán Sabancaya se tomó información de las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de los años 1964 y 2024. Dichas estaciones están ubicadas en las localidades de Chivay, Imata, Madrigal y Ticso (Tabla 1).

1.1.1 Temperatura

La estación meteorológica de Chivay (valle del Colca), entre los años 1965 y 2024, registró una

Tabla 1. Estaciones meteorológicas localizadas en la cuenca alta del valle del río Colca, operadas por SENAMHI.

Nombre	Coordenadas		Altitud (m s. n. m.)	Periodo de Registro	Cuenca
	Latitud	Longitud			
Chivay	15° 38' 29.86"	71° 36' 6.08"	3644	1932-2024	Camaná
Imata	15° 50' 33.56"	71° 24' 26.22"	4475	1965-2024	Coata
Madrigal	15° 36' 35.96"	71° 48' 23.56"	3276	1964-2024	Camaná
Ticso	15° 20' 44.77"	71° 26' 49.25"	4195	2015-2024	Camaná

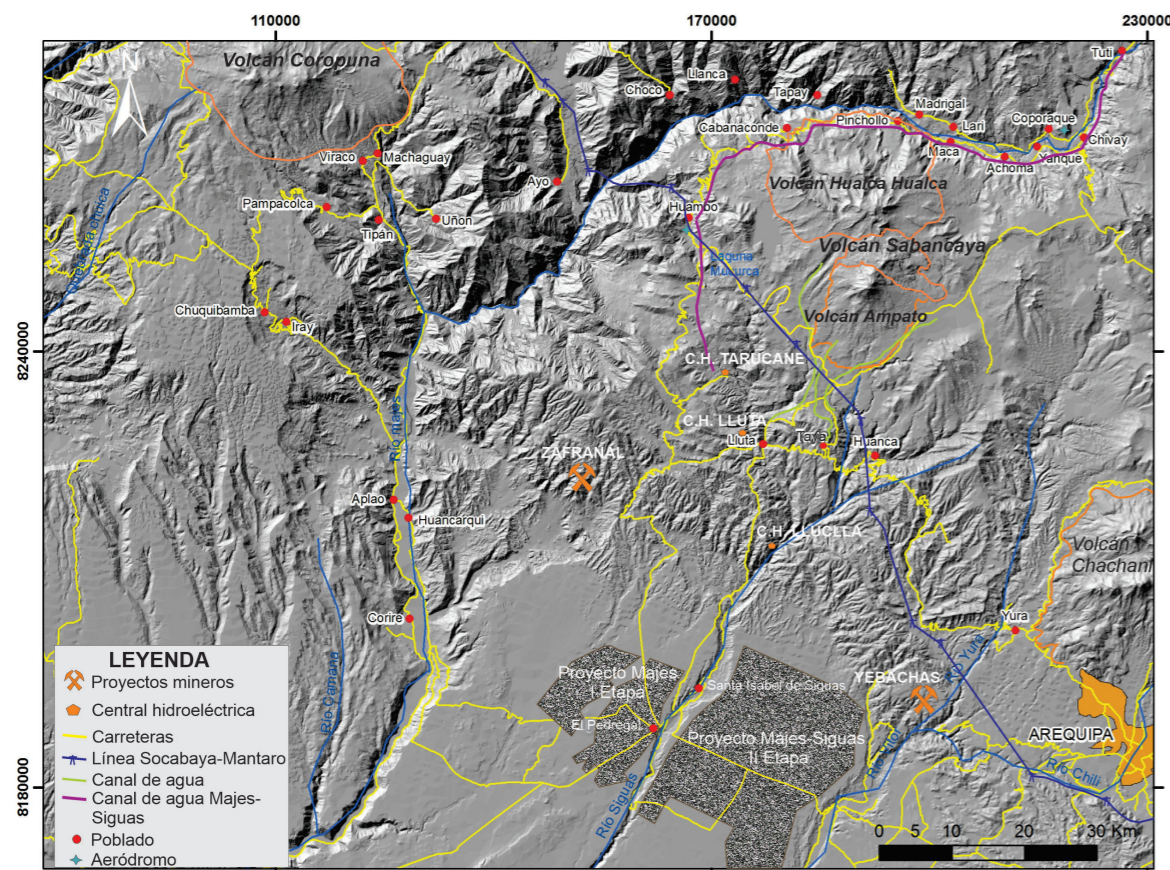


Figura 1. Mapa de ubicación del complejo volcánico Ampato-Sabancaya, poblados y obras de infraestructura ubicadas en sus inmediaciones.

1.2 Aspecto socioeconómico

La región Arequipa está conformada por ocho provincias: Arequipa, Caylloma, Caravelí, Islay, La Unión, Camaná, Castilla y Condesuyos. Solo las provincias de Caylloma, Castilla y Arequipa se encuentran bajo influencia directa de cualquier erupción del volcán Sabancaya.

Los datos de población y vivienda de la zona de estudio, perteneciente a la región Arequipa, han sido tomados del Compendio Estadístico del INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática), del año 2018, el cual alberga información del último censo correspondiente al año 2017: Censo XII de población y VII de vivienda (Tabla 2).

Tabla 2. Datos del censo del INEI del año 2017, referente a vivienda, población rural y urbana del área de influencia del volcán Sabancaya.

Provincia	Distrito	Altura (m s. n. m.)	Población Total	Viviendas
Caylloma	Chivay	3632	5770	2364
Caylloma	Coporaque	3583	1089	572
Caylloma	Yanque	3420	2117	1316
Caylloma	Tuti	3837	621	490
Caylloma	Achoma	3487	841	594
Caylloma	Huanca	3078	1010	809
Caylloma	Lluta	2999	718	734
Caylloma	Huambo	3308	670	803
Caylloma	Tapay	2984	772	420
Caylloma	Maca	3279	701	524
Caylloma	Cabanaconde	3296	2096	1618
Caylloma	Ichupampa	3397	555	421
Caylloma	Callalli	4211	1458	1197
Caylloma	Lari	3358	904	564
Caylloma	Sibayo	3855	669	430
Caylloma	Madrigal	3271	648	555
Caylloma	Tisco	4211	1441	1095
Caylloma	Santiago de Chuca	4457	886	589
Castilla	Chachas	3059	1646	1104
Castilla	Ayo	1982	242	204
Castilla	Uñón	2730	207	144
Castilla	Choco	2500	702	716
Arequipa	Santa Isabel de Siguas	1344	682	604
Arequipa	Yura	2529	33 346	35 394
TOTAL			59 791	53 261

Dentro de un radio de 50 km alrededor del volcán Sabancaya, se localizan los siguientes poblados: Chivay, Coporaque, Yanque, Tuti, Achoma, Huanca, Lluta, Huambo, Tapay, Maca, Cabanaconde, Ichupampa, Callalli, Lari, Sibayo, Madrigal, Tisco, Santiago de Chuca y Pinchollo, los cuales pertenecen a dieciocho distritos (Tabla 2) y albergan una población total (rural y urbana) de 22 966 habitantes, todos pertenecientes a la provincia de Caylloma. El número de viviendas de estos dieciocho distritos es de 15 095 viviendas.

Además, existen otros distritos pertenecientes a las provincias de Castilla y Arequipa, localizados a una distancia de 50 km del volcán Sabancaya. En la provincia de Castilla, los distritos de Chachas, Ayo, Uñón y Choco tienen una población aproximada de 2168 habitantes, tanto rural como urbana. En la provincia de Arequipa, los distritos de Santa Isabel de Siguas y Yura tienen una población total (tanto rural como urbana) de 35 998 habitantes.

Los pobladores que habitan en áreas aledañas al volcán Sabancaya se dedican a las siguientes actividades: agricultura, ganadería, turismo, artesanía y otras.

En el entorno del volcán Sabancaya existen importantes obras civiles, las que son descritas a continuación:

- Obras de conducción (túneles y canales) del Proyecto Especial Majes-Siguas.
- Línea de transmisión energética Socabaya-Mantaro.
- Centrales hidroeléctricas de Lluta (280 MW), Luclla (380 MW), Mocollo.
- Sistema de irrigación en los valles de Sihuas y Majes.
- Sistema vial Chivay-Cabanaconde-Huambo; Arequipa-Chivay-Espinar-Cusco; Arequipa-Caylloma-Orcopampa-Arcata y carreteras vecinales.

2. Los peligros volcánicos

Diversos estudios han compilado los principales peligros volcánicos que corresponden a caídas de ceniza y pómez, flujos de lava, flujos y oleadas piroclásticas, lahares (flujos de escombros), avalanchas de escombros y gases volcánicos (Blong, 1984; Tilling, 1989; Blong, 2000; Bignami et al., 2012), los cuales son representados en la Figura 3.

2.1 Caída de piroclastos (tefras)

Las erupciones explosivas emiten fragmentos de roca o piroclastos hacia la atmósfera en forma de una columna eruptiva densa que, en

ocasiones, puede alcanzar varios kilómetros de altura. Posteriormente, la columna es transportada por los vientos a distancias kilométricas. Los fragmentos más grandes y densos caen cerca del volcán y se denominan bombas o bloques (>64 mm), mientras que las partículas de menor tamaño, denominadas lapilli (2-64 mm) y ceniza (<2 mm), son llevadas por el viento a grandes distancias, para luego caer y formar una capa de varios milímetros o centímetros de espesor. La distancia alcanzada por los fragmentos de roca dependerá de su densidad, la magnitud de la erupción y de la velocidad del viento al momento de la erupción. Las partículas pueden cubrir y afectar extensas áreas, de algunas centenas de km² a varios cientos de km² (Cas y Wright, 1987).

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, además de otros impactos (Tilling, 1989).

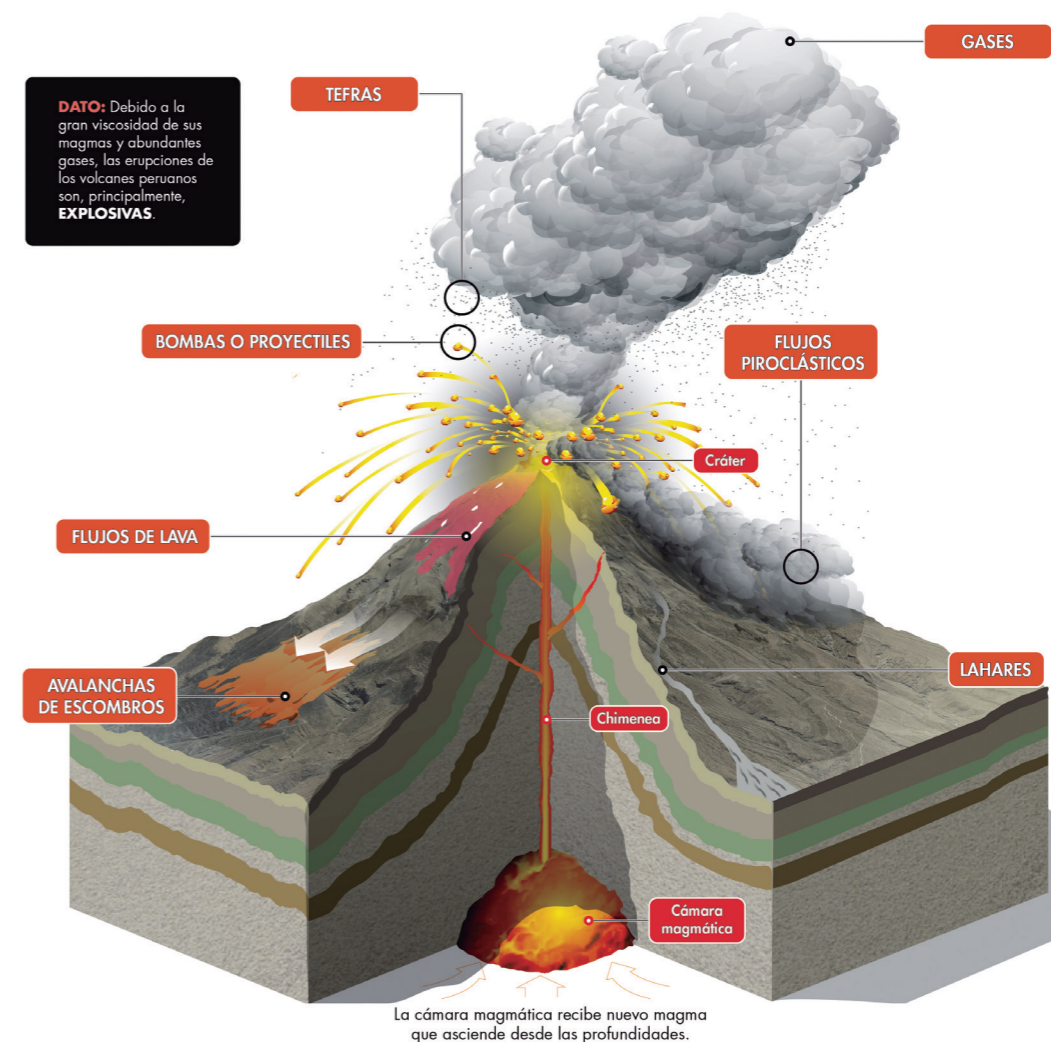


Figura 3. Tipos de peligros volcánicos que puede presentar durante una erupción un estratovolcán como el Sabancaya.

En el sur peruano, todos los volcanes activos, a lo largo de su evolución, han presentado actividad explosiva, con emisión de volúmenes variables de ceniza, lapilli de pómez, escorias y flujos piroclásticos. Los productos de estas erupciones han afectado poblados, obras de infraestructura y el medio ambiente. Como ejemplo de este tipo de actividad se tienen los efectos nocivos provocados por la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d. C., que afectó todo el sur peruano, así como los efectos ocasionados por la actividad explosiva de los volcanes Ubinas y Sabancaya registradas en los últimos 500 años.

2.2 Flujos de lava

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida que son expulsadas por el cráter o fracturas en los flancos del volcán. Pueden fluir por el fondo de los valles y alcanzar varios kilómetros de distancia; rara vez, recorren más de 8 km del centro de emisión (Francis, 1993). Los volcanes del sur peruano han emitido lavas viscosas que recorren algunos kilómetros de distancia, mientras que otras se enfrían en la zona del cráter formando domos de lava.

Los flujos de lava calcinan y destruyen todo a su paso; sin embargo, no representan un peligro para las personas debido a su baja velocidad de desplazamiento (Tilling, 1989).

2.3 Flujos y oleadas piroclásticas

Los flujos piroclásticos son masas calientes (300 °C a 800 °C) conformadas por una mezcla de ceniza, fragmentos de rocas volcánicas y gases. Estos flujos descienden por los flancos del volcán a ras de la superficie del suelo y a grandes velocidades, comprendidas entre 100 m/s y 300 m/s (Hoblitt et al., 1995). Poseen generalmente una parte inferior densa que se encauza y desplaza por el fondo de las quebradas o valles, y otra superior, menos densa, denominada oleada piroclástica, compuesta por una nube turbulenta de gases y ceniza que con facilidad sale del valle, sobrepasa relieves importantes y afecta una mayor área. Estos flujos y oleadas destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso (Tilling, 1989).

Los estudios vulcanológicos realizados durante los últimos veinte años muestran que la gran mayoría de los volcanes activos del sur peruano, como

Misti, Ubinas, Yucamane, Tutupaca, Ticsani y Sara Sara (Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Mariño & Thouret, 2003; Samaniego et al., 2015; Rivera et al., 2020a; Rivera et al., 2020b), presentaron durante su evolución erupciones explosivas con emisiones de flujos piroclásticos, cuyos depósitos yacen en sus alrededores.

2.4 Lahares (flujos de lodo y escombros)

Los lahares o flujos de lodo y escombros son mezclas de partículas volcánicas de tamaños diversos movilizadas por el agua y que fluyen rápidamente (20-60 km/h) por valles y quebradas originadas en los volcanes. Se generan en periodos de erupción o de tranquilidad volcánica, principalmente ligados a lluvias intensas (Tilling, 1989), aunque también pueden provenir de la fusión de hielo o nieve, ríos, o lagunas cratéricas.

Los lahares, eventualmente, pueden salir de estos cauces en los abanicos de inundación, como ocurrió con los lahares que destruyeron la ciudad de Armero en Colombia luego de la erupción del volcán nevado del Ruiz en 1985 (Naranjo et al., 1986). El área inundada o afectada depende del volumen de agua y de materiales sueltos disponibles, así como de la pendiente y topografía de los valles o quebradas. Normalmente, destruyen todo a su paso, pueden alcanzar grandes distancias (>100 km) e, incluso, generar inundaciones cerca al cauce de ríos (Tilling, 1989).

La mayoría de volcanes activos en los Andes peruanos presentan este tipo de peligro, sobre todo en periodo de lluvias (diciembre a marzo), durante el cual ocurren precipitaciones en sus laderas o cumbres. El volumen total y distancia a recorrer por el lahar están en función del volumen de agua, el volumen del material suelto, la temperatura del material emitido y la pendiente del volcán.

2.5 Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros son derrumbes o colapsos de un sector del volcán. Se originan debido a factores de inestabilidad, tales como la elevada pendiente del volcán, presencia de fracturas o fallas tectónicas, movimientos sísmicos fuertes y explosiones volcánicas. Las avalanchas

de escombros ocurren con poca frecuencia. Comúnmente, pueden alcanzar decenas de kilómetros de distancia mientras se desplazan a gran velocidad. Por ejemplo, en el caso del Monte St. Helens (EE. UU.), la avalancha registrada estuvo asociada a una erupción lateral dirigida; en este episodio, se estimaron velocidades del orden de 240 km/h (Glicken, 1996).

Las avalanchas de escombros tienen mayor movilidad, sobre todo, si son voluminosas (a mayor volumen, mayor velocidad y distancia recorrida). Esto se debe a diferentes factores, los cuales van desde la reología del flujo, la pendiente del terreno, la formación de una capa de alto cizallamiento en la base, o la presencia de fluidos hidrotermales o magmáticos (Ui et al., 2000).

Las avalanchas de escombros entierran y destruyen todo lo que encuentran a su paso. Adicionalmente, pueden generar lahares y crecientes, a partir del desagüe de agua represada por la avalancha (Tilling, 1989).

2.6 Gases volcánicos

Durante las erupciones volcánicas 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, flúor, etc. (Hoblitt et al., 1995).

Los gases volcánicos se diluyen y dispersan rápidamente; sin embargo, pueden alcanzar concentraciones altas en las zonas bajas o depresiones muy cercanas al volcán 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, además de contaminación de aguas y suelos. Frecuentemente, los efectos nocivos están restringidos a un radio menor de 10 km del volcán (Tilling, 1989).

3. El volcán Sabancaya

3.1 Historia eruptiva

El volcán Sabancaya cubre un área de 65 km² a 70 km² y tiene un volumen de 6 km³ a 10 km³ (Samaniego et al., 2016). En la cumbre del cono norte, se distingue al cráter ligeramente alargado de norte a sur, de 480 m de largo x 320 m de ancho. En el extremo norte de dicho cráter se distingue un domo de lava de 240 m de diámetro que se desarrolló entre los años 2019 y 2024.

Con base en los trabajos de Samaniego et al. (2016), Rivera et al. (2016) y Thouret et al. (1999), se ha logrado definir tres etapas de construcción en la historia eruptiva del volcán Sabancaya:

Un edificio volcánico basal (unidad Sabancaya I) que se extiende hacia el oeste y este del volcán (Figura 4). Dicho edificio está constituido por una secuencia de flujos de lava de composición andesítica y dacítica (60.6-65.6 wt.% SiO₂) que se emplazaron sobre las rocas más antiguas de los volcanes Ampato y Hualca Hualca (Figura 4). Estos flujos de lava tienen de 40 m a 80 m de espesor, y la secuencia en total alcanza a medir entre 300 m a 400 m de espesor. Una muestra de lava, correspondiente a la unidad SA-1, arrojó una edad de 6.3 ± 0.31 ka (Samaniego et al., 2016). Asimismo, un flujo de lava, emplazado en el sector occidental del volcán, fue datado en 5440 ± 40 años AP (antes del presente) por Gerbe & Thouret

(2004), también pertenece a esta etapa.

En una etapa intermedia (unidad Sabancaya II) se emplazaron flujos de lava andesíticas y dacíticas (60.0-64.5 wt.% SiO₂) que conforman el cono medio del volcán. Asociada con esta unidad, se emplazaron al menos tres flujos de lava andesíticas subhorizontales en el sector de Sallalli (unidad Sabancaya III). Bulmer et al. (1998) y Samaniego et al. (2016) mencionan que esta secuencia provendría de un ventó satélite ubicado a 4 km al suroeste del cráter. Dos de estos flujos de lava fueron datados por Samaniego et al. (2016) con el método cosmogénico ³He en 6.65 ± 0.32 ka y 12.34 ± 0.55 ka. Posteriormente, Bromley et al. (2019) realizaron dataciones con el método cosmogénico de He de dos muestras tomadas de la misma zona de Samaniego et al. (2016). La primera muestra del flujo SA-3 arrojó una edad de 5.2 ± 0.1 ka, y la segunda muestra del flujo de lava superior arrojó una edad de 4.1 ± 0.1 ka. Con base en estos argumentos, Bromley et al. (2019) sugieren que el volcán Sabancaya se construyó durante el Holoceno.

Juvigné et al. (1998) y Samaniego et al. (2016) encontraron, en los bofedales ubicados en el sector este del volcán Sabancaya, capas de ceniza de 5 cm a 30 cm de espesor emitidas por dicho volcán. Juvigné et al. (1998) mostraron que existen entre cuatro y cinco capas de cenizas centimétricas emplazadas entre 11 000 y 8000 años. Posteriormente, Samaniego et al. (2016) encontraron capas de ceniza en las turberas de Sallalli, Colihuiri y Quebrada Huaraya (inmediaciones del Sabancaya) las cuales arrojaron edades de menos de 4500 años. En la Quebrada Huaraya, Samaniego et

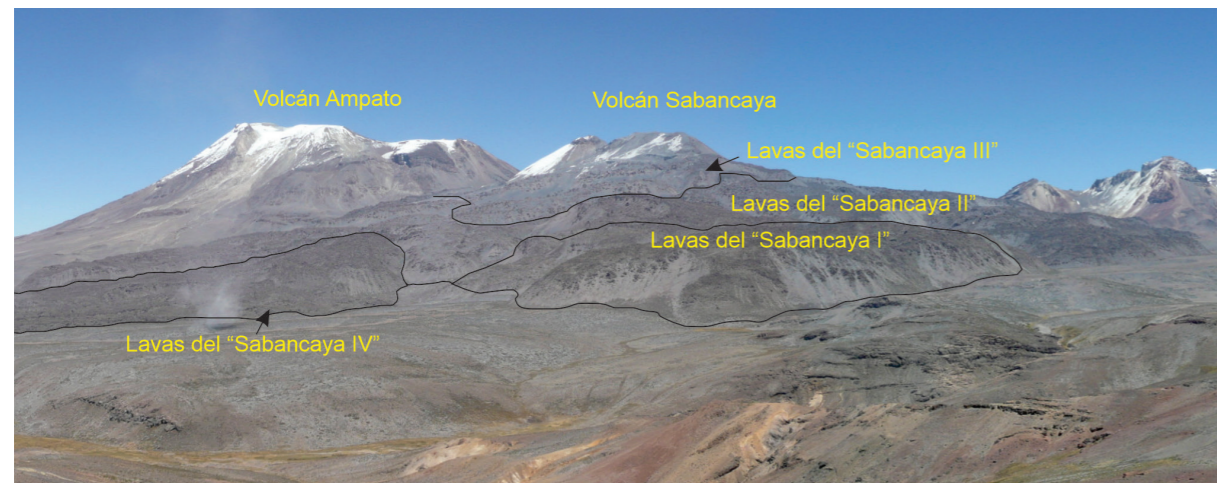


Figura 4. Vista del sector este del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Al pie del volcán Sabancaya se distinguen flujos de lava de las etapas "Sabancaya I, II y III".

al. (2016) encontraron una capa de ceniza de 5 cm a 10 cm de espesor, que yace sobre una turba que fue datada en 265 ± 30 años AP. Esta edad está acorde con la fecha de 300 ± 50 años AP obtenida por Juvigné et al. (2008), y confirma la ocurrencia de erupciones explosivas durante el siglo XVII o XVIII (Travada y Cordova, 1752; Zamácola, 1804). En efecto, el volcán Sabancaya, según las crónicas, ha presentado tres erupciones en los últimos trescientos años: en 1750, 1784 y 1988-1998 (Thouret et al., 1994; Gerbe & Thouret, 2004; Siebert et al., 2010).

3.2 Actividad volcánica reciente

La actividad eruptiva histórica del volcán Sabancaya, registrada al menos en los últimos quinientos años, es poco conocida, hasta el punto que no fue mencionado como volcán activo en el catálogo de *Volcanoes of the world* publicado por Simkin et al. (1981). Su nombre quechua "Sahuancqueya" significa volcán que escupe (Thouret et al., 1994).

En 1985, el volcán Sabancaya se reactiva con un incremento en la actividad fumarólica. Su actividad se intensifica en 1990, con el desarrollo de actividad eruptiva que se prolonga hasta 1998.

3.2.1 Actividad eruptiva 1986-1998

Los datos que presentamos a continuación están basados principalmente en los trabajos efectuados por Guillaude et al. (1992) y Thouret et al. (1994), así como los datos registrados en los catálogos del Global Volcanism Network (GVN del Smithsonian National Museum of Natural History). Los primeros signos de reactivación del volcán Sabancaya fueron percibidos en 1981 por pobladores que viven en áreas aledañas, entre ellos los pobladores de Cajamarca y Huacachiguero, y posteriormente en 1985 por los pobladores del valle del Colca (Guillaude et al., 1992). Dicha actividad se incrementó en 1986. Entre 1986 y 1989, el volcán Sabancaya presentó emisiones de fumarolas. Durante abril de 1989, las columnas de gases ascendieron hasta 800 m de altura. Esta actividad permaneció por los siguientes meses. Entre el 13 y 19 de abril de 1990 ocurrieron explosiones cada veinte a treinta minutos que produjeron columnas de ceniza que ascendieron entre 3 km y 4 km de altura. Entre el 28 de mayo al 3 de junio de 1990, se apreció un incremento gradual de la actividad volcánica.

En junio de 1990 la actividad se incrementa generando explosiones con emisiones importantes de gases y ceniza que forman columnas eruptivas de 2 a 3 km de altura. Las cenizas emitidas durante las explosiones eran de poco volumen y fueron dispersadas alrededor del cráter. Los bloques balísticos centimétricos alcanzaron una distancia de algunos cientos de metros a pocos kilómetros de distancia respecto al volcán, mientras que la ceniza alcanzó entre 20 km a 30 km de distancia (Gerbe & Thouret, 2004).

En abril y mayo de 1991 ocurrieron explosiones que generaron columnas de ceniza de color gris que ascendieron entre 3 km y 4 km de altura (Figura 5), y luego produjeron caídas de ceniza que formaron capas de 2 mm de espesor en el sector de Cajamarca (a 9 km al sureste del cráter del volcán Sabancaya).



Figura 5. Fotografía que muestra una erupción de tipo volcánica ocurrida el 15 de abril de 1991. Fotografía tomada por Pierre V. desde el flanco este del volcán Sabancaya.

A inicios de 1994, el Sabancaya presentó permanentes emisiones de gases y ceniza. En marzo de 1994, la actividad explosiva fue moderada y las columnas de gases y ceniza alcanzaron algunos cientos metros de altura. La columna eruptiva más alta alcanzó 2.5 km de altura y fue de color gris oscura.

La actividad explosiva, de niveles bajos, continuó hasta 1998, año en el que se apreciaron emisiones de gases que se elevaron entre 200 m a 300 m de altura sobre la cima.

La actividad eruptiva 1988-1998 depositó una capa de ceniza de 1 cm de espesor a 12 km al este del cráter del Sabancaya (Figura 6), lo que sugiere que el eje de dispersión de la ceniza durante ese periodo de actividad fue predominantemente hacia el este del volcán (Thouret et al., 1994).

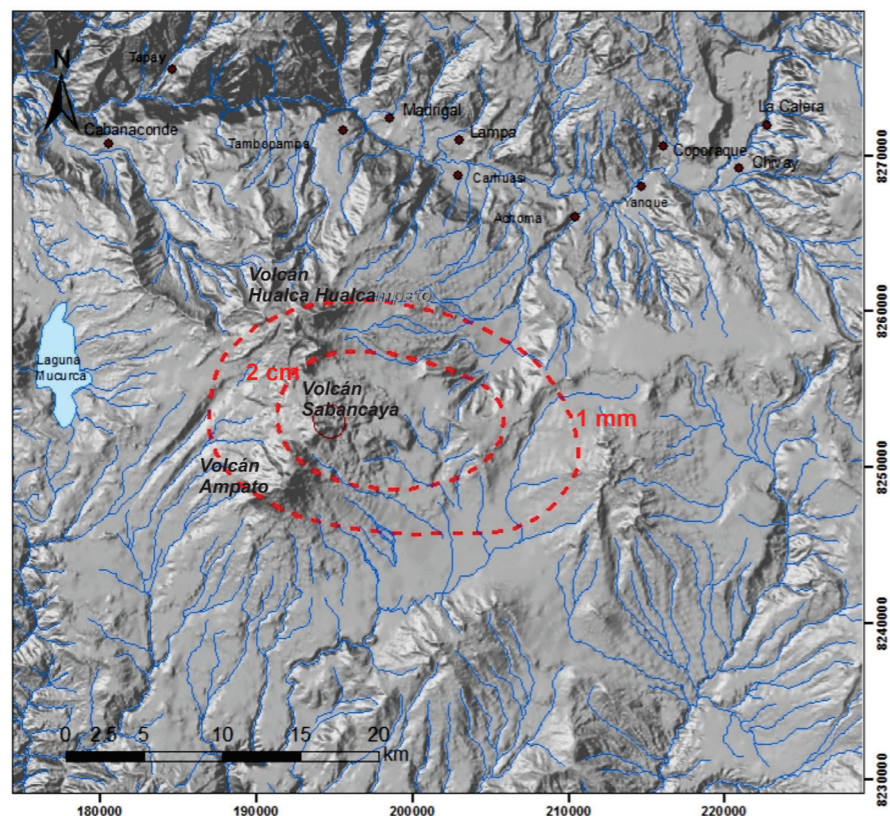


Figura 6. Mapa de distribución de cenizas durante la actividad eruptiva del volcán Sabancaya entre 1988-1998 (tomado de Thouret et al., 1994).

3.2.2 Actividad eruptiva 2016 hasta el presente

De acuerdo con Rivera et al. (2023) y Machacca et al. (2023), se detecta a fines de 2012 un ligero incremento de las emisiones de gases en el volcán Sabancaya que ascendieron entre 100 m y 200 m de altura sobre la cima del volcán. Entre el 15 y 18 de febrero de 2013, se observaron importantes emisiones de gases. Durante los siguientes meses de 2013, el Sabancaya emitió gases que ascendieron entre 800 m y 1200 m de altura sobre la cima del volcán. Durante 2014, la actividad fumarólica fue incrementándose gradualmente. Posteriormente, el 6 de noviembre de 2016, se registran las primeras explosiones que se caracterizaron por la emisión de cenizas y gases que ascendieron, en promedio, hasta 3000 m de altura. En los periodos de mayor actividad, estas columnas de gases y cenizas alcanzan alturas de hasta 5500 m sobre la cima del volcán (p. ej., el 4 julio de 2017), con presencia de bloques balísticos de 20 cm aproximadamente, con un alcance de 500 m de distancia del cráter.

En los años posteriores, 2018 a 2023, las cenizas

emitidas fueron dispersadas en un radio promedio de 40 km del volcán (Figura 7), lo cual afectó las localidades de Chivay, Yanque, Coporaque, Ichupampa, Achoma, Lari, Madrigal, Maca, Cabanaconde, Tapay, Huanca, Lluta y Huambo.

Asimismo, desde 2017 hasta la actualidad, se visualiza en el interior del cráter del Sabancaya el crecimiento y destrucción de domos de lava.



Figura 7. Imagen de una explosión del volcán Sabancaya registrada el 24 septiembre de 2021.

4. Datos y metodología para la elaboración de mapas

4.1 Metodología para la elaboración de mapas

La metodología empleada para la elaboración de los mapas involucró los siguientes procesos:

- Recopilación de material bibliográfico con el fin de determinar características de las erupciones históricas y la geología del volcán Sabancaya.
- Procesamiento de imágenes de satélite Landsat del volcán Sabancaya para el cartografiado de los depósitos volcánicos.
- Uso de un Modelo Digital de Elevación (DEM) elaborado por CONIDA, a través de imágenes satelitales SPOT 6 de alta resolución.
- Modelamiento de procesos volcánicos con el software Ash3d (Mastin et al., 2009) y LaharZ (Schilling, 1998).
- Elaboración de gráficos y tablas diversas.
- Elaboración de los mapas de peligros volcánicos del Sabancaya.

4.2 Softwares empleados

4.2.1 Modelo Ash3d

El Ash3d (Mastin et al., 2009) es un software basado en los principios Eulerianos tridimensionales, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) y sus fundamentos son descritos por Schwaiger et al. (2012). Es una herramienta utilizada para calcular la cantidad de ceniza depositada y su concentración en el aire; además, puede usarse para recrear eventos pasados y realizar escenarios de dispersión de ceniza futuros. Ash3d modela el transporte de ceniza volcánica dividiendo la atmósfera en una cuadrícula tridimensional y

calculando el flujo de masa a través de las paredes celulares (Mastin et al., 2009).

Las condiciones iniciales de este software se basan en que una erupción explosiva inyecta tefra en una columna de células sobre el volcán y distribuye la masa verticalmente usando el sistema Suzuki (Suzuki, 1983; Carey, 1996). Posteriormente, resuelve la ecuación de advección, difusión y sedimentación para simular el transporte y depósito de partículas de ceniza eyectadas a la atmósfera por medio de una columna eruptiva generada por la actividad volcánica de tipo explosiva (Schwaiger et al., 2012). La advección del viento se calcula usando datos preexistentes que varían con el tiempo, así como métodos que usan volúmenes finitos de material. La velocidad de caída, distribución y duración del transporte se ve influenciada por el tamaño de grano designada por el programa; la distribución vertical de la masa y elevación son calculadas usando la ecuación de Suzuki (1983).

Las variables que ingresa el usuario en una plataforma virtual son el nombre del volcán, la fecha, hora y duración de la erupción, la altura de la pluma, volumen (km^3) emitido como roca densa equivalente del magma (DRE) y la duración de la simulación. Los archivos resultantes que entrega el modelo son concentración (mg/m^3) y altura de la nube de cenizas (km), espesor de los depósitos (mm y pulgadas), tiempo de arribo de la nube y el depósito luego de la erupción (hrs), así como los aeropuertos afectados. Los parámetros eruptivos utilizados en el modelo Ash3D corresponden a los dos escenarios de erupciones vulcanianas y subplinianas.

4.2.2 Modelo LaharZ

Para delimitar las zonas de alcance de los flujos piroclásticos, lahares y avalanchas de escombros se utilizó el programa LAHARZ_py (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998) y datos de campo sobre áreas cubiertas con erupciones pasadas. El programa se ejecuta dentro de un Sistema de Información Geográfica (GIS) y un Modelo de Elevación Digital (DEM). El DEM empleado ha sido elaborado con base en imágenes satelitales. En las quebradas y ríos de interés se ubicaron las celdas de inicio, es decir, dentro de la zona proximal (cono de energía), mientras que el final de la distancia fue calculado por el programa LAHARZ_py. También se consideran para los lahares tres escenarios de volúmenes establecidos en este estudio.

Para delimitar el alcance de los flujos piroclásticos

y avalanchas de escombros se empleó la metodología denominada “cono de energía” (Malin & Sheridan, 1982), que ha sido muy utilizada para definir las zonas de peligro proximales y mediales alrededor de un volcán. Este método postula que el alcance horizontal (L) de un flujo piroclástico o avalanchas de escombros esta determinado en función de la diferencia de alturas (H) entre el punto de generación del flujo o la cima de un volcán y el punto de alcance del depósito (Figura 8). La relación H/L es un indicador de la movilidad del flujo. Así, para una relación H/L cercana a 0.1, los flujos poseen gran movilidad y, por tanto, alcanzan mayor distancia, mientras que para una relación H/L cercana a 0.3 poseen poca movilidad. Los alcances de los flujos piroclásticos y avalanchas de escombros fueron delimitados con el programa LAHARZ_py.

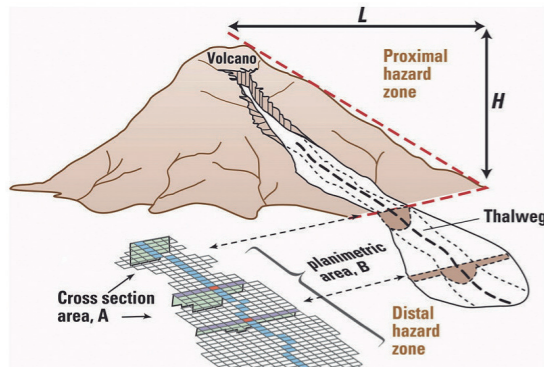


Figura 8. Relaciones entre la distancia (L) y la altura (H) por donde recorrerían los lahares, así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B) inundadas por un lahar (Schilling, 1998).

4.3 Parámetros de entrada para posibles escenarios eruptivos

Para la elaboración de los escenarios eruptivos, se han considerado los estudios geológicos sobre el volcán Sabancaya efectuados por Thouret et al. (1994), Rivera et al. (2016), Samaniego et al. (2020), así como el estado y la morfología que presenta en la actualidad el volcán Sabancaya y otros aspectos descritos a continuación:

- Los dinamismos eruptivos futuros, es decir, los tipos de erupciones que podrían darse en el volcán Sabancaya.
- La magnitud de las erupciones, establecida en función del trabajo de campo y de la distribución de los productos volcánicos.

- El comportamiento de otros volcanes peruanos considerados como análogos al Sabancaya, tales como el Ubinas.

Adicionalmente, se consideró la presencia del casquete glaciar en las partes altas del volcán Sabancaya, a partir del cual se podrían generar lahares durante una erupción volcánica. Además, es frecuente la presencia de nieve, especialmente durante las estaciones lluviosas que ocurren entre los meses de diciembre y marzo. Según estimaciones realizadas por Alcalá (2007), la superficie glaciar total en el año 2000 de la cobertura glaciar del Ampato-Sabancaya y de su vecino el Hualca fue de 13.4 km².

Se definieron seis escenarios eruptivos ante una posible erupción del volcán Sabancaya, los cuales se detallan a continuación.

4.3.1 Erupción de tipo vulcaniana (IEV 1-2)

Las erupciones vulcanianas son erupciones explosivas violentas que emiten ceniza, 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 menos de 20 km de altura (Sigurdsson et al., 2000).

La última actividad del volcán Sabancaya, ocurrida entre los años 1988 y 1998, fue de tipo vulcaniano. En aquel entonces, la ceniza fue dispersada entre 20 km y 30 km al este del volcán; 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).

Los trabajos previos de Thouret et al. (1994), Juvigné et al. (1998, 2008), Gerbe y Thouret (2004), Rivera et al. (2016), Samaniego et al. (2016) han puesto en evidencia la ocurrencia de erupciones explosivas leves a moderadas (principalmente vulcanianas) del volcán Sabancaya durante el Holoceno, la época histórica y, recientemente, entre 1988-1998.

También, es frecuente la formación de lahares durante la ocurrencia de este tipo de erupciones, sobre todo en periodo de lluvias (diciembre a marzo). Esto sucedió en la última erupción del volcán Sabancaya (1988-1998), cuando se generaron lahares en quebradas aledañas al

volcán Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca, en noviembre de 1990 y mayo de 1995 (GVN, 1995). Algunos lahares alcanzaron el río Colca, situado a más de 15 km al norte del cráter del Sabancaya (Figura 9). Asimismo, en las quebradas que bajan por los flancos sureste y suroeste del Sabancaya, se distinguen secuencias de lahares con espesores centimétricos a decimétricos.

En caso de una erupción del Sabancaya, los lahares pueden descender por las quebradas que drenan por el volcán e, incluso, por quebradas que drenan por los volcanes Ampato y Hualca Hualca. Los lahares causarían graves daños en terrenos de cultivo, carreteras, puentes, especialmente si descienden del volcán Hualca Hualca.

Durante erupciones vulcanianas ligeramente explosivas (IEV 2), también podrían generarse flujos piroclásticos de poco volumen y limitado alcance (Sigurdsson et al., 2000). Por ejemplo, en las erupciones vulcanianas con IEV 2 del volcán Reventador de 1976, o del volcán Tungurahua (Ecuador) en 2006, 2010, se generaron flujos piroclásticos que descendieron a más de 4 km de los cráteres de los volcanes (Aguilera et al., 1988; Hall et al., 2013).

4.3.2 Erupción de tipo efusiva con emisión de lavas

Durante los últimos 10 000 años, las erupciones efusivas en el volcán Sabancaya han sido recurrentes, ya que este edificio está constituido principalmente de lavas. Los flujos de lava emitidos por el volcán han alcanzado distancias de hasta 7 km de la fuente. En el futuro, es posible el emplazamiento de flujos de lava. Por esta razón, la probabilidad de ocurrencia de una erupción efusiva es baja a moderada. El emplazamiento de 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 otras.

4.3.3 Erupción con crecimiento de domo

En el Sabancaya es probable la formación de un domo de lava. Dicho domo se forma cuando

la lava por extrusión del conducto volcánico es demasiado viscosa para fluir más de uno o varios cientos de metros de distancia (Francis, 1993). Durante el crecimiento del domo, los extremos de dicho domo vienen a ser inestables y pueden caer o colapsar dando lugar a la formación de flujos piroclásticos.

El escenario que describe una futura erupción con el crecimiento y colapso de un domo de lava está basado en la presencia de domos de lava en el cráter del volcán Sabancaya, ligado a la actividad vulcaniana que desarrolla dicho volcán desde el año 2016 hasta la actualidad. En efecto, desde el 2017 hasta la fecha, se ha venido produciendo el crecimiento de domos de lava en el volcán Sabancaya (Machacca et al., 2023), los cuales fueron destruidos por las constantes explosiones que presenta dicho volcán. Eventualmente, el colapso o derrumbe progresivo de dicho domo de lava puede dar lugar a la generación de depósitos de flujos de bloques y cenizas que pueden recorrer distancias de más de 6 km de la cima del volcán. Aunque en el Sabancaya no se han identificado depósitos de flujos piroclásticos asociados a dicho evento o eventos pasados, existe una gran probabilidad de que se generen dichos depósitos.

La mayor amenaza asociada a la presencia de domos de lava radica en generar una explosión lateral dirigida (“blast”). Estos son fenómenos complejos que comparten características de flujos y oleadas piroclásticas, ya que pueden afectar amplios sectores de un volcán, de hasta 180 grados alrededor del cráter, y alcanzar distancias de decenas de kilómetros. Un ejemplo de ello ocurrió en 1980 en el Mount St. Helens en EE. UU. (Decker y Decker, 1989), donde un cuerpo magmático estuvo en crecimiento dentro del volcán por un periodo de 52 días. El crecimiento de dicho cuerpo provocó el “hinchamiento del volcán”. Un sismo subsecuente generó una avalancha de escombros, producto de la despresurización del cuerpo magmático, produciéndose una explosión lateral dirigida. Los depósitos de avalancha y los flujos piroclásticos generados por dicha explosión viajaron alrededor de 28 km de distancia desde el cráter. Desde aquel entonces se sabe que las grandes explosiones dirigidas resultan de la despresurización repentina del sistema magmático o hidrotermal dentro del volcán por el deslizamiento de una parte del flanco.

Aunque en la historia eruptiva del volcán Sabancaya no se ha registrado tal evento, no se descarta que en un futuro pueda producirse. Este se generaría por el colapso de un flanco del

volcán y por la intrusión de un domo de lava. Los flujos piroclásticos recorrerían los diversos flancos y cubrirían las lomas y laderas localizadas en los alrededores del volcán Sabancaya, hasta una distancia mayor de 6 km del volcán.

4.3.4 Erupción de tipo subpliniana (IEV 3)

Durante las erupciones de tipo subpliniana, con IEV 3, las columnas de ceniza alcanzan entre 3 km y 15 km de altura sobre el cráter y generan depósitos de caída de ceniza y flujos piroclásticos (Sigurdsson et al., 2000). La ceniza puede ser dispersada a varias decenas de kilómetros de distancia e, incluso, sobrepasar fácilmente los 50 km, como ocurrió durante la erupción del volcán Nevado del Ruiz (1985, IEV 3), donde las isópacas de 1 cm alcanzaron hasta 35 km de distancia de la fuente (Naranjo et al., 1986). En este tipo de erupciones se pueden generar flujos piroclásticos de pómez y ceniza que serían canalizados en quebradas y valles aledaños al volcán.

La mayoría de volcanes del sur del Perú han presentado este tipo de actividad. En inmediaciones del volcán Yucamane se ha encontrado un depósito de caída de lapilli de pómez asociado a una erupción subpliniana con IEV 3, ocurrido hace ~3270 años AP (Rivera et al., 2020). Este depósito de caída de lapilli de pómez tiene 50 cm de espesor a 2 km al pie del flanco sureste y este del volcán. En el volcán Sabancaya no se han encontrado depósitos asociados a erupciones subplinianas o vulcanianas con IEV 3, por lo que la probabilidad de ocurrencia de estas erupciones es moderada a baja.

Los flujos piroclásticos también pueden ser producidos por este tipo de actividad. Varios ejemplos sustentan esta afirmación; por ejemplo, en la erupción del año 1667 d. C. del volcán Ubinas, que tuvo un IEV 3 (Rivera et al., 1998; 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. Durante la erupción subpliniana (IEV 3) presentada por el volcán Yucamane hace aproximadamente 3270 años AP, se emitieron flujos de pómez y ceniza que se emplazaron hasta 6 km al noreste de su cráter, donde actualmente se observan depósitos que tienen 7 m de espesor (Rivera et al., 2020).

Las erupciones subplinianas (IEV 3) también pueden generar lahares, especialmente si los flujos piroclásticos se emplazan sobre casquetes glaciares y originan la fusión de hielo y nieve (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). Un fenómeno similar puede ocurrir debido al emplazamiento de depósitos piroclásticos sobre el casquete glaciar del volcán Sabancaya, durante una erupción con IEV 3. También, se pueden originar lahares durante fuertes precipitaciones en los flancos de los volcanes Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca.

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

4.3.5 Erupción de tipo pliniana (IEV 4-5)

Las erupciones plinianas son las erupciones explosivas más violentas, debido a que el magma, en la mayoría de los casos, es silíceo, viscoso y posee alto contenido de gases. En dichas erupciones, las columnas eruptivas pueden alcanzar alturas mayores a los 20 km y los materiales emitidos pueden afectar más de 800 km² (Cas y Wright, 1987). Durante estas erupciones se generan depósitos voluminosos de caída de lapilli de pómez y ceniza; asimismo, se pueden generar flujos piroclásticos de pómez y ceniza, y oleadas piroclásticas. También es frecuente encontrar lahares asociados a este tipo de erupciones, los mismos que discurren a lo largo de decenas a cientos de kilómetros.

En el sur del Perú, los volcanes Misti, Ubinas, Ticsani, Yucamane, Ampato, Sara y Chachani han presentado este tipo de erupciones (Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Mariño y Thouret, 2003; Samaniego et al., 2016; Rivera et al., 2020). La erupción de hace 2000 años AP del volcán Misti fue de tipo pliniana (IEV 5) y generó depósitos de caída de lapilli de pómez que afloran

en toda el área de Arequipa (Harpel et al., 2011). A más de 12 km del cráter del volcán, el depósito tiene entre 10 cm a 20 cm de espesor. Asimismo, la erupción generó flujos piroclásticos de pómez y ceniza que poseen espesores mayores a 3 m a más de 11 km del cráter. Igualmente, la erupción generó lahares que alcanzaron más de 20 km de distancia (Thouret et al., 2001). En el volcán Ubinas, la última erupción pliniana ocurrió hace 980 años AP, y emplazó depósitos de caída de lapilli de pómez de hasta 25 cm de espesor a más de 40 km del cráter (Rivera et al., 1998).

No se han encontrado depósitos asociados a erupciones plinianas del volcán Sabancaya; en consecuencia, la probabilidad de ocurrencia es muy baja, por lo cual no se ha considerado un escenario de este tipo en el presente estudio.

Las erupciones plinianas también pueden generar lahares, especialmente si los flujos piroclásticos se emplazan sobre casquetes glaciares y originan la fusión de hielo y nieve (Major y Newhall, 1989). Según Alcalá (2007), el volumen medio del casquete glaciar en los tres volcanes antes mencionados (Sabancaya, Ampato, Hualca Hualca) fue de 1.7 km³ durante el año 2000. Este volumen de glaciar es importante y fácilmente se pueden generar lahares durante una erupción pliniana. También se pueden originar lahares posteriores al emplazamiento de los depósitos piroclásticos, durante las temporadas de fuertes precipitaciones, que se dan entre los meses de diciembre y marzo en la región sur del Perú.

Durante una erupción pliniana, el alcance de los lahares sería regional, como ocurrió durante la erupción pliniana del volcán Huaynaputina del año 1600 d. C., donde los lahares llegaron hasta el océano Pacífico luego de recorrer más de 120 km de distancia (Thouret et al., 1999).

4.3.6 Colapso de flanco y emplazamiento de avalancha de escombros

No se han encontrado depósitos de avalanchas de escombros asociados al volcán Sabancaya. Sin embargo, depósitos de avalanchas de escombros se han identificado en varios volcanes del sur del Perú, como el Pichu Pichu, Ticsani, Misti y Ubinas (Mariño y Thouret, 2003; Rivera et al., 1998; Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005). El depósito de avalancha de escombros

del volcán Ticsani cubrió aproximadamente 70 km² y alcanzó cerca de 40 km de distancia, luego del cual se transformó (evolucionó) en lahar que se canalizó por el río Tambo hasta llegar al océano Pacífico, situado a más de 150 km de distancia (Mariño y Thouret, 2003). En el volcán Ubinas se han encontrado hasta dos depósitos de avalanchas de escombros emplazados durante el Pleistoceno superior (>340 ka) y Holoceno (3670 ± 60 años), que alcanzaron 10 km y 4.5 km de distancia, respectivamente (Rivera et al., 1998; Thouret et al., 2005).

Por las características geomorfológicas del edificio volcánico Sabancaya, es muy poco probable que ocurra una avalancha de escombros en este volcán; no obstante, este coloso presenta flancos de fuerte pendiente (20° a 50°), así como sectores con rocas bastante alteradas e hidrotermalizadas. En todo caso, la probabilidad de ocurrencia de avalanchas de escombros en el Sabancaya es baja, ya que no se han encontrado antecedentes en el registro geológico.

5. Resultados: mapas de peligros del volcán Sabancaya

Se han elaborado cuatro mapas de peligros que consideran una erupción del volcán Sabancaya. Estos mapas son 1) el mapa proximal para peligros múltiples; 2) el mapa de peligro por caída de ceniza para un escenario de erupciones leves a moderadas, de tipo vulcaniano (IEV 1-2); 3) el mapa de peligro por caída de tefras para un escenario de grandes erupciones explosivas, de tipo subpliniano (IEV 3-4); y 4) el mapa de peligro por lahares.

Todos estos mapas, a diferente escala, han sido integrados para una mejor visualización en un póster de 70 cm x 100 cm (ver mapa de peligro).

5.1 Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal

La zonificación de peligros del mapa proximal se realizó para peligros múltiples, es decir, para el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas de escombros, lahares y eyección de proyectiles balísticos. Las zonas de alto, moderado y bajo peligro determinadas para dichos peligros fueron integradas, producto del cual se tiene el mapa principal que considera peligros múltiples (Figura 9).

5.1.1 Zona de alto peligro (rojo)

Comprende un área proximal, ligeramente alargada de noroeste a sureste, que involucra el cono volcánico y diversas quebradas que drenan del volcán Sabancaya, las cuales pueden ser severamente afectadas por la ocurrencia de flujos piroclásticos, flujos de lava, proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares (flujos de lodo). Cualquier tipo de erupción puede afectar dicha área, inclusive las de baja magnitud (IEV 1-2), como las ocurridas durante el Holoceno.

En el volcán Sabancaya, la probabilidad de ocurrencia de erupciones vulcanianas es bastante alta, debido a que estas han ocurrido de manera recurrente durante el Holoceno y la época histórica. Incluso, la última erupción de 1988-

1998 y la actual erupción es de tipo vulcaniana (Gerbe & Thouret, 2004; Machacca et al., 2023).

Los límites de la zona de alto peligro se encuentran entre 2 km y 5 km de distancia del cráter del volcán Sabancaya (Figura 9). Las mayores distancias (3-5 km del cráter) se encuentran en los sectores noreste, este y sureste, mientras que las menores distancias (2 km del cráter) están al oeste del volcán Sabancaya.

Los límites de la zona de alto peligro coinciden con el alcance de un gran número de flujos de lavas del Sabancaya, que se encuentran entre los 2 y 5 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. Además, un eventual colapso o derrumbe de un flanco del volcán puede generar avalanchas de escombros que afectarían dicha zona.

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

5.1.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona comprende el cono inferior del Sabancaya y un sector de la altiplanicie volcánica. Esta zona se extiende entre 5 km y 8 km de distancia al sur del cráter del volcán Sabancaya. Asimismo, se extiende de 2 km y 4 km de distancia al oeste, y de 3 km a 5 km al este y norte de dicho volcán (Figura 9). Esta zona puede ser cubierta por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares, proyectiles balísticos y avalanchas de escombros, en caso de que la erupción explosiva sea moderada a alta (IEV 3).

Se consideró este escenario ya que este tipo de erupciones vulcanianas o subplinianas han sido frecuentes en algunos volcanes del sur peruano, como la erupción del volcán Ubinas del año 1667 d. C., que emplazó flujos de escoria (IEV 3, Rivera et al., 1998; Thouret et al., 2005).

Los límites de la zona de moderado peligro también coinciden con el alcance de algunos

flujos de lava emitidos por el volcán Sabancaya, que se encuentran entre 6 km y 8 km de distancia desde su punto de emisión.

Por otro lado, el alcance máximo de proyectiles balísticos se encuentra dentro de un radio menor a 4 km, según datos tomados de Blong (1984).

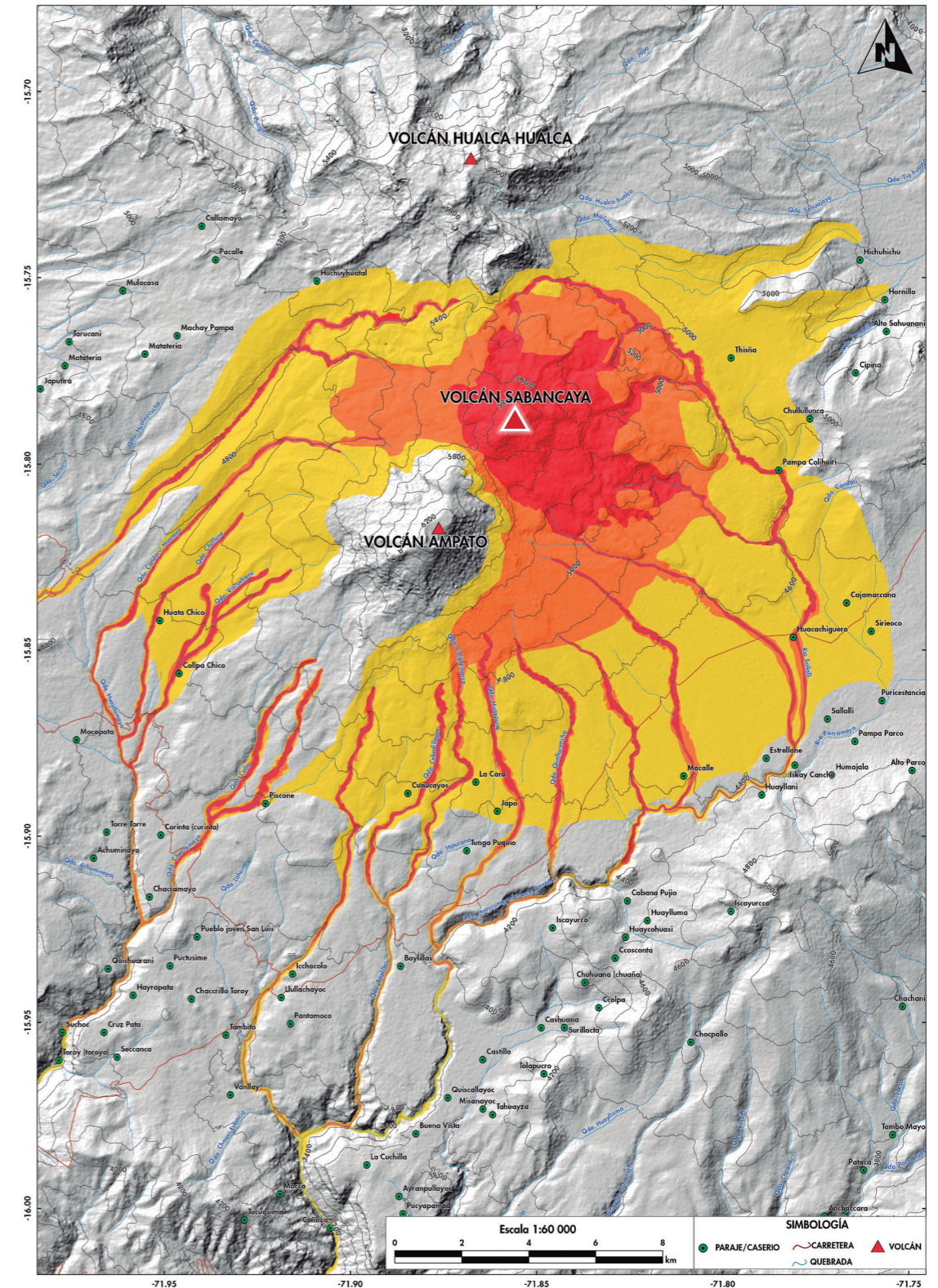


Figura 9. Mapa proximal de peligro múltiples en el cual se muestran las zonas de peligro por el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas de escombros, lahares y eyección de proyectiles balísticos. De color rojo se representa la zona de alto peligro; de naranja, la zona de moderado peligro y, de amarillo, la zona de bajo peligro.

Esta distancia se encuentra dentro de los límites de la zona de moderado peligro. Además, un eventual colapso o derrumbe importante de un flanco del volcán puede generar avalanchas de escombros que afectarían dicha zona. Asimismo, durante lluvias intensas o fusión del casquete glaciar presente en la cima del Sabancaya, pueden generarse lahares que pueden afectar la zona.

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, proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares.

5.1.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

Esta zona se proyecta entre 8 km y 13 km hacia los sectores sur y sureste del cráter del volcán Sabancaya, y entre 5 km y 11 km hacia el sector este de dicho volcán. Asimismo, la zona de bajo peligro se proyecta entre 5 km y 13 km al oeste y suroeste del cráter del Sabancaya, y de 3 km a 4 km al norte de dicho volcán, esta último debido a la presencia del volcán Hualca Hualca que actúa como "barrera" topográfica que impediría el paso de flujos piroclásticos, flujos de lava y avalanchas de escombros. La zona de bajo peligro puede ser afectada por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares (flujos de barro) y avalanchas de escombros, en caso de que la erupción explosiva sea muy importante (IEV > 3).

Los alcances antes descritos coinciden con el alcance del flujo piroclástico de pómez y ceniza de la erupción del volcán Misti de hace 2000 años AP, que tuvo un IEV 5, y que alcanzaron alrededor de 12 km de distancia desde la cima del volcán (Thouret et al., 2001). Asimismo, coincide con el alcance de algunos flujos de lava emitidos por el volcán Sabancaya que se encuentran entre 8 km y 9 km de distancia de la cima del volcán. Además, un eventual colapso o derrumbe importante de un flanco del volcán puede generar avalanchas de escombros que afectarían dicha zona. Durante lluvias intensas o fusión del casquete glaciar presente en la cima del Sabancaya pueden generarse lahares que pueden afectar la zona.

En resumen, la zona de bajo peligro (amarillo), puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones plinianas (IEV 4-5). Igualmente, puede ser afectada por flujos de lava, avalanchas de escombros y lahares voluminosos. La probabilidad de ocurrencia de erupciones plinianas en el Sabancaya es muy baja.

5.2 Mapa de peligros por caídas de ceniza durante erupción vulcaniana (IEV 1-2)

El mapa de peligros por caídas de cenizas para un escenario de erupción vulcaniana del volcán Sabancaya se ha dividido en tres zonas: zona de alto peligro (color rojo), zona de moderado peligro (color naranja) y zona de bajo peligro (color amarillo) (Figura 10).

5.2.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal y se halla aproximadamente dentro de un radio de entre 39 km y 44 km de distancia del volcán Sabancaya (Figura 10). Durante erupciones vulcanianas con IEV 2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. El mapa está basado en la dispersión de cenizas de erupciones vulcanianas de los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti.

5.2.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Los límites de la zona de moderado peligro se hallan aproximadamente entre 84 km y 100 km al este, y entre 155 km y 184 km al oeste del cráter del volcán Sabancaya (Figura 10). Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de varios milímetros de espesor. Esta hipótesis está basada 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 (Thouret et al., 1994). Asimismo, está basado en la dispersión de cenizas de la erupción actual del volcán Sabancaya (2016-actualidad) que presenta depósitos de ceniza de 1 mm de espesor a 20 km al este del cráter del volcán.

5.2.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro tiene una configuración elíptica, con una distancia de más de 400 km al este, 320 km al oeste y 100 km al sur del volcán Sabancaya (Figura 10). Durante erupciones

vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de menos de 1 mm de espesor. Además, este escenario está basado en la erupción actual del volcán Sabancaya

(2016-actualidad), durante la cual caídas de ceniza de menos de 1 mm de espesor alcanzaron distancias de más de 30 km del cráter en dirección este del volcán.

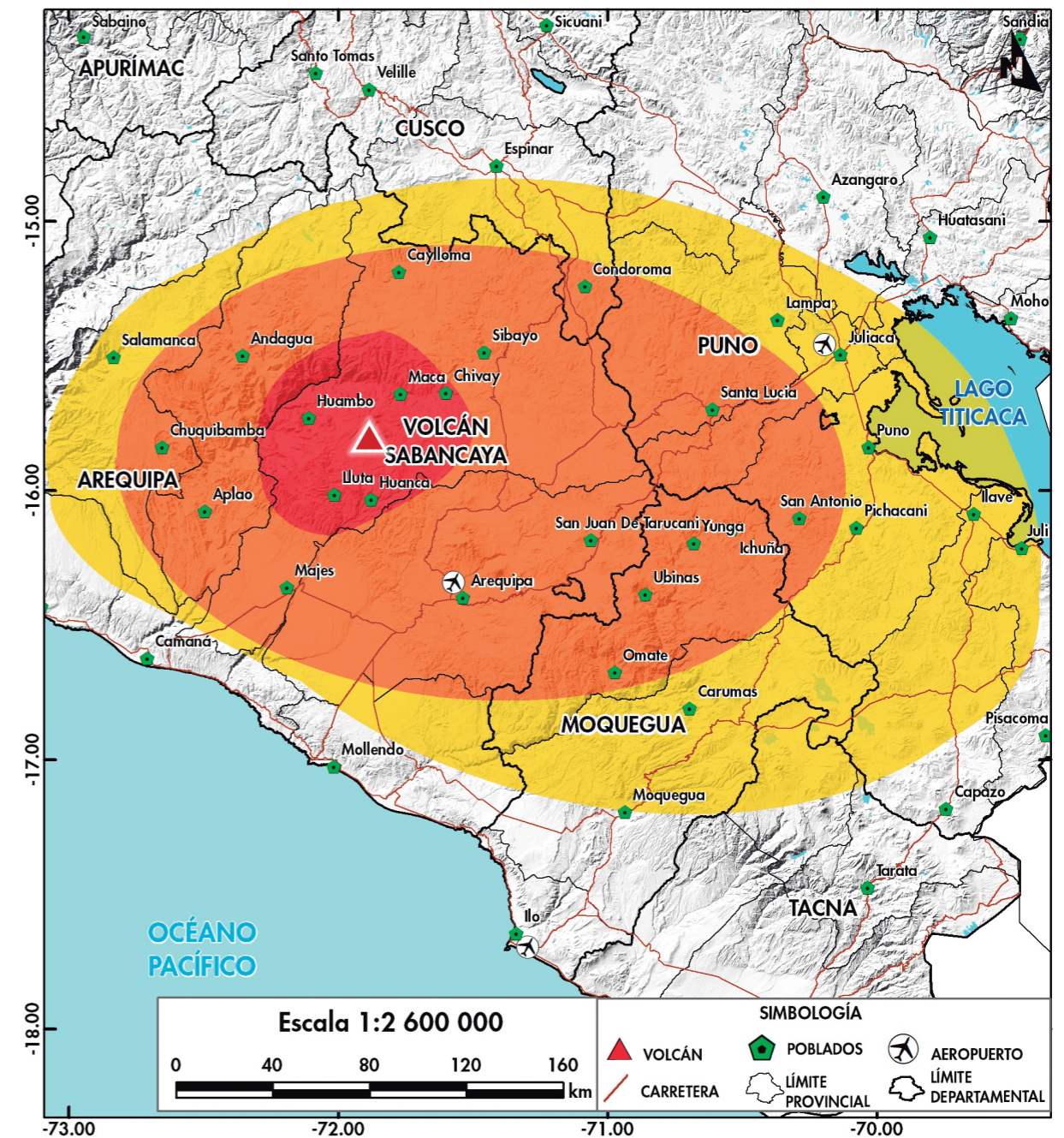


Figura 10. Mapa de escenario de peligro por caída de ceniza del volcán Sabancaya para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano con IEV 1-2 (simulación USGS, 2023).

5.3 Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción subpliniana (IEV 3-4)

No se han encontrado depósitos asociados a erupciones subplinianas en inmediaciones del volcán Sabancaya. En tal sentido, la probabilidad de ocurrencia de erupciones subplinianas en el Sabancaya es muy baja, aunque por analogía con otros volcanes similares, la probabilidad de ocurrencia no puede ser excluida.

El mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de erupción subpliniana del volcán Sabancaya se ha dividido en tres zonas: zona de alto peligro (color rojo), zona de moderado peligro (color naranja) y zona de bajo peligro (color amarillo) (Figura 11).

5.3.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal y se halla a una distancia aproximada de más de 400 km al este, 320 km al oeste y 280 km al sur del volcán Sabancaya (Figura 11). Durante erupciones subplinianas con IEV 3, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez de varios centímetros de espesor. Como ejemplo, durante la erupción del volcán Tungurahua (Ecuador) de agosto de 2006, de IEV 3, se reportaron espesores de caídas de ceniza de entre 4 cm y 5 cm a 10 km de distancia del cráter (Eychenne et al., 2012).

Durante erupciones plinianas con IEV 4, esta área puede ser afectada por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor (Figura 11). Dicha hipótesis está basada en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Ticsani de hace 11 000 años AP (IEV 4) emplazó caídas de ceniza de alrededor de 3 m de espesor a 10 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).

5.3.2 Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de moderado peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona tiene una configuración

elíptica alrededor del cráter, con una distancia de 550 km a 642 km al este, de 255 km a 268 km al oeste y de más de 270 km al sur (Figura 11). Durante erupciones subplinianas con IEV 3, esta zona de moderado peligro puede ser afectada por caídas de ceniza de varios milímetros a algunos centímetros de espesor. Este modelamiento está basado en algunos ejemplos, como el caso de la erupción de noviembre de 1985 del volcán Nevado del Ruiz, durante la cual la ceniza alcanzó cerca de 2 cm de espesor a 30 km de distancia del volcán. En tanto, en el caso de la erupción del volcán Tungurahua de agosto de 2006 (IEV 3, Eychenne et al., 2012), se reportaron espesores de 0.7 a 0.8 cm a 20 km del volcán.

Durante erupciones plinianas con IEV 4, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez de varios decímetros de espesor (Figura 11). El modelamiento está basado en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Ticsani de hace 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).

5.3.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de moderado peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 825 km al este, de más de 341 km al oeste y de más de 371 km al sur (Figura 11). En esta zona se depositarían cenizas de menos de 1 mm de espesor. Los vientos van a influenciar la distribución de la caída de ceniza. El modelamiento 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 mm y 3 mm de espesor. Por su parte, luego de la erupción del volcán Tungurahua de agosto de 2006 (IEV 3, Eychenne et al., 2012), se reportaron espesores de ceniza de 6 mm a 10 km de distancia del volcán.

Durante erupciones plinianas con IEV 4, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor. El modelamiento 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).

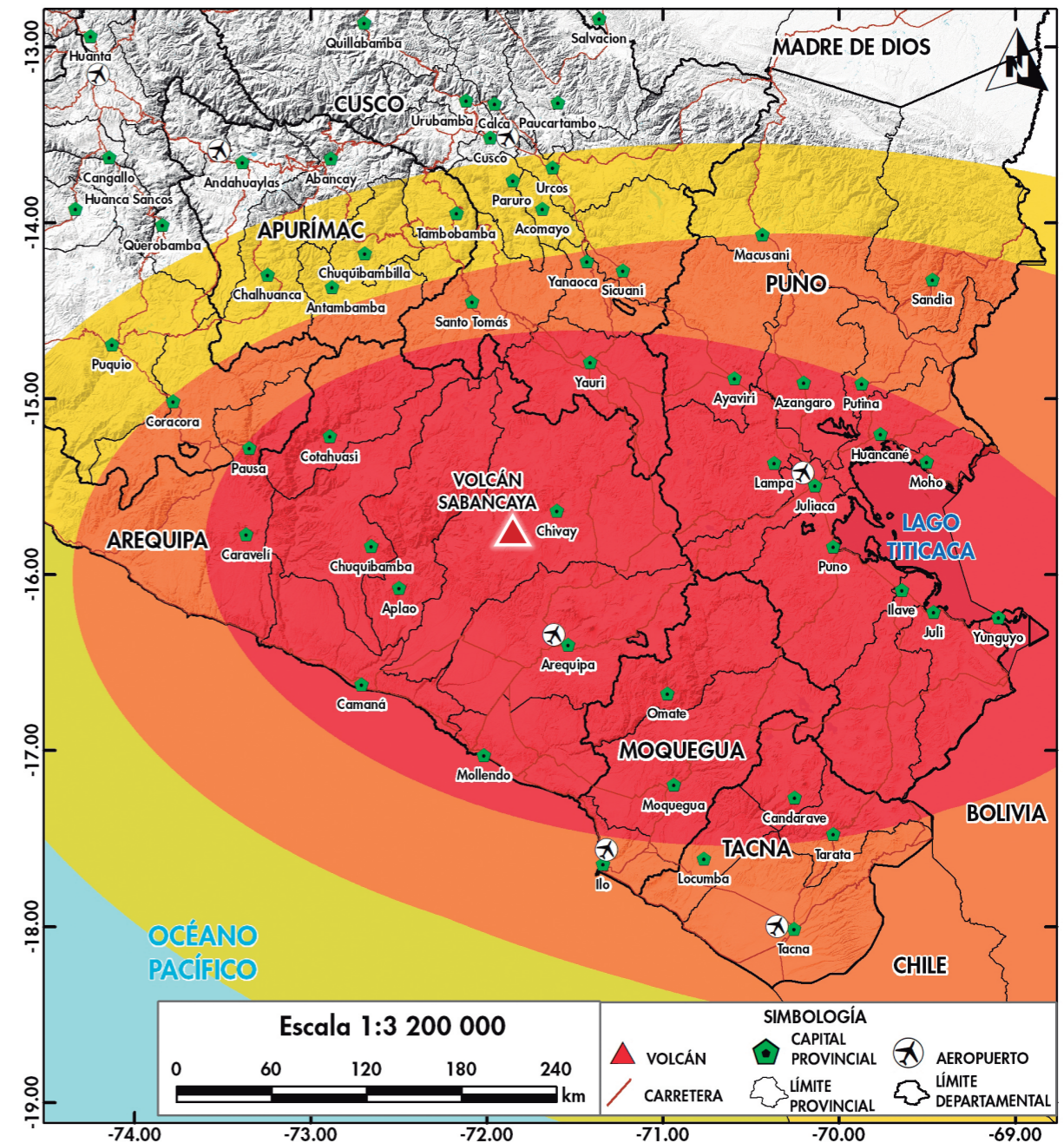


Figura 11. Mapa de escenario de peligro por caída de tefras del volcán Sabancaya para un escenario eruptivo tipo subpliniano con IEV 3-4 (simulación USGS, 2023).

5.4 Mapa de peligros por lahares

En el sur del Perú se han realizado pocas estimaciones de volúmenes de lahares. Solo se tienen cálculos para quebradas que descienden por los flancos del volcán Misti, además del río Chili que discurre entre los volcanes Misti y Chachani (Delaite et al., 2005). En dicho volcán, volúmenes máximos de lahares del orden de 1.5 a 4 millones de m³ estarían asociados a erupciones moderadas (IEV 1-2). Lahares con volúmenes máximos del orden de 9 a 10 millones de m³ son

menos frecuentes, ocurren cada 1000 a 5000 años, y estarían asociados a erupciones grandes (IEV ≥ 3 ; Delaite et al., 2005; Vargas-Franco et al., 2010).

Thouret et al. (2022), para la construcción de escenarios de peligros por descenso de lahares del volcán Misti (Arequipa), asociados a lluvias intensas, considera tres volúmenes de lahar: 500 000, 1 000 000 y 2 000 000 m³. Por otro lado, Alcalá (2007) estimó que, en el año 2000, el volumen del casquete glaciar de los volcanes Hualca Hualca, Ampato y Sabancaya era de 1.7 km³.

Tomando en consideración dichos datos y las condiciones climáticas de la zona, además de la existencia de un casquete glaciar, los volúmenes de los eventos laháricos escogidos fueron de 500 000 m³, para lahares de poco volumen (y que se estiman son más frecuentes), así como volúmenes de 1 Mm³ y 2 Mm³ para lahares de importante volumen, pero menos frecuentes. La zonificación de las áreas de inundación por flujos de lodo (lahares) para el volcán Sabancaya fue realizada utilizando el programa LAHARZ (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998).

En el mapa de peligros por lahares (Figura 12), la zona roja es considerada como zona de alto peligro, y corresponde a la zona de mayor probabilidad 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; finalmente, la zona amarilla es considerada de bajo peligro o de menor probabilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos. Los lahares voluminosos (1 y 2 millones de m³) podrían estar asociados a erupciones de gran magnitud (IEV ≥ 3). Se debe recalcar que la probabilidad de ocurrencia de tales erupciones es baja o muy baja.

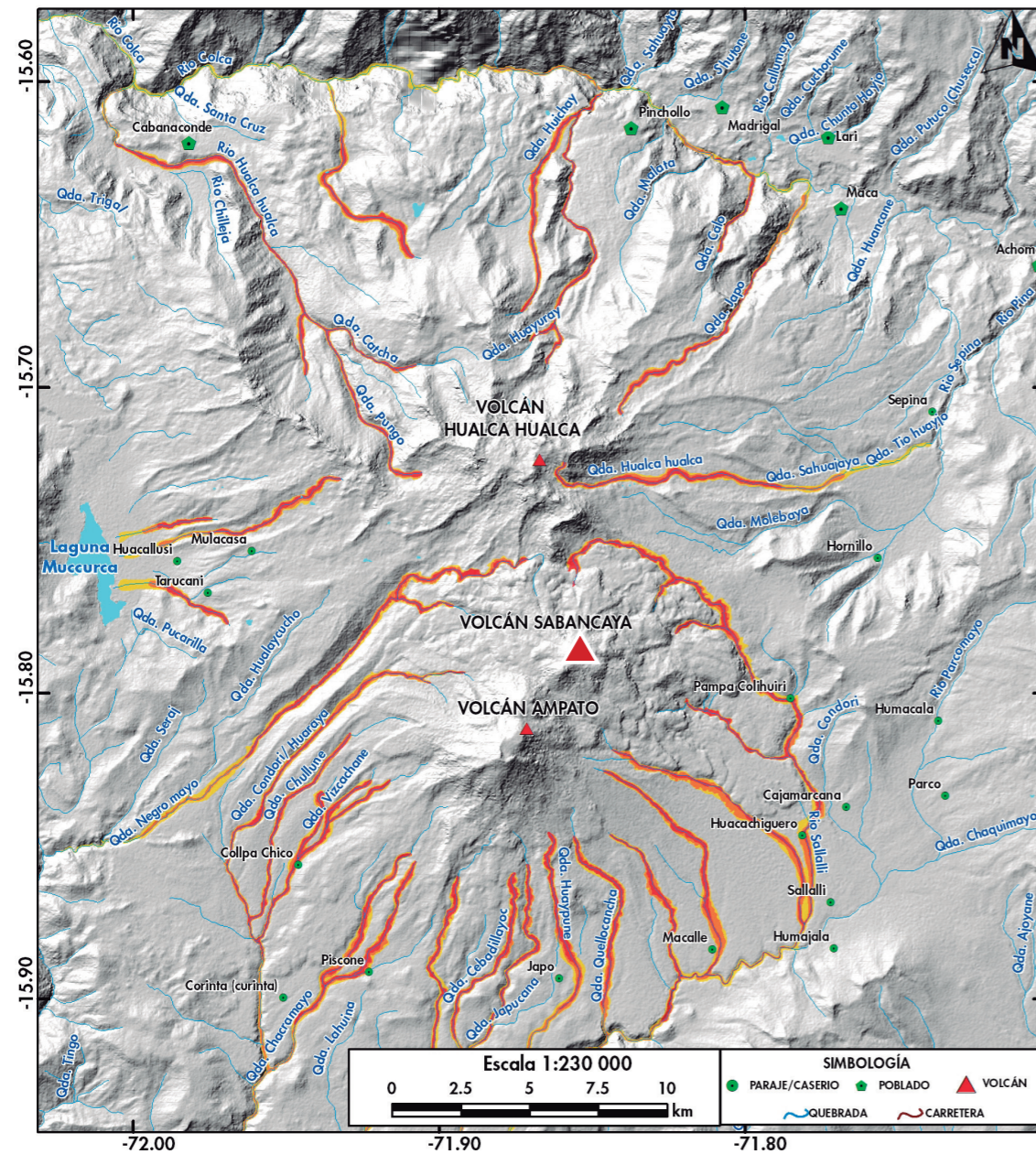


Figura 12. Mapa de escenario de peligro por caída de téfras del volcán Sabancaya para un escenario eruptivo tipo subpliniano con IEV 3-4 (simulación USGS, 2023).

Conclusiones

- El volcán Sabancaya es el más joven de los volcanes activos del sur peruano. Entre los años 1988 y 1998 presentó una actividad explosiva de tipo vulcaniana. Recientemente, desde noviembre de 2016 hasta la actualidad, viene presentando un nuevo proceso eruptivo de tipo vulcaniano.
- En el volcán Sabancaya se han identificado cuatro escenarios eruptivos en caso de una reactivación. Los escenarios que tienen mayor probabilidad de ocurrir corresponden a erupciones vulcanianas (IEV 1-2) y erupciones efusivas.
- Sobre la base de los estudios efectuados se presentan cuatro mapas de peligro volcánico incluidos dentro de un solo póster. Estos mapas son el mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal, por emplazamiento de flujos de lava, flujos piroclásticos, proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares. Este mapa muestra una zona de alto peligro (rojo), ligeramente alargada de noroeste a sureste, que se encuentra entre 2 km y 5 km de distancia del cráter del volcán Sabancaya; la zona de moderado peligro (naranja) se encuentra inmediatamente colindante con la zona de alto peligro, entre 2 km y 8 km del volcán; y la zona de bajo peligro (amarillo) están entre 5 km y 13 km de distancia del Sabancaya.
- En el mapa de peligros por caídas de cenizas para el escenario de erupciones vulcanianas (IEV 1-2), la zona de alto peligro (rojo) se halla a una distancia de 39 km al este y 44 km al oeste del cráter del volcán Sabancaya. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se halla entre 39 km y 240 km al este, y entre 44 km y 125 km al oeste del cráter del volcán Sabancaya. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de pocos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, con distancias de más de 240 km al este, 125 km al oeste y 100 km al sur del volcán Sabancaya. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de menos de 1 mm de espesor.
- En el mapa de peligros por caídas piroclásticas para el escenario de erupciones subplinianas

(IEV 3), la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se halla aproximadamente hasta 380 km al este, 160 km al oeste y 200 km al sur. Durante erupciones subplinianas, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez de varios centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 380 km a 640 km al este, de 160 km a 260 km al oeste y de 270 km al sur. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) comprende una distancia de más de 640 km al este, de más de 260 km al oeste y de más de 370 km al sur del Sabancaya. En esta zona se depositaría cenizas de menos de 0.1 mm de espesor.

- En el mapa de peligros por lahares distales, la zona roja, considerada de alto peligro, puede ser afectada por lahares de hasta 500 000 m³; la zona naranja, de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de 1 millón de m³, mientras que la zona amarilla, de bajo peligro, puede ser afectada por lahares de 2 millones de m³.

Referencias

- Aguilera, E., Almeida, E., & Balseca, W. (1988). El Reventador: an active volcano in the sub-Andean zone of Ecuador. *Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia*, 43, 853-875.
- Alcalá, J. (2007). *La evolución de los glaciares en el complejo volcánico Ampato (Perú)*. Tesis de Diploma de Estudios Avanzados, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Bignami, C., Bosi, V., Costantini, L., Cristiani, C., Lavigne, F., & Thierry, P. (2012). *Handbook for volcanic risk management: prevention, crisis management, resilience*. MIAVITA Team, Orleans.
- Blong, R. (1984). *Volcanic Hazards: a Sourcebook on the effects of Eruptions*. Sydney: Academic Press Australia.
- Blong, R. (2000). *Volcanic hazard and risk management*. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer, & J. Stix, *Encyclopedia of volcanoes* (págs. 1215-1228). San Diego, CA: Academic Press.
- Bromley, G., Thouret, J., Schimmelpfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker, K., & ASTER-Team. (2019). In situ cosmogenic ³He and ³⁶Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. *Bulletin of Volcanology*, 64.
- Bulmer, M., Johnston, A., & Engle, F. (1998). *Analysis of Sabancaya volcano, southern Peru using RADARSAT and Landsat TM data*. Informe inédito, National Air and Space Museum, Smithsonian Institution, Center for Earth Planetary Studies.
- Carey, S. (1996). *Modeling of tephra fallout from atmospheric eruptions*. En L. Scarpa, & R. Tilling, *Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards* (págs. 429-463). Berlin: Springer Verlag.
- Cas, R., & Wright, J. (1987). *Volcanic successions, modern and ancient*. London: Allen & Unwin.
- De Silva, S., & Francis, P. (1991). *Volcanoes of the central Andes* (viii ed.). Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag. doi:10.1017/S0016756800008372
- Decker, R.; Decker, B., (1989). *Volcanoes: W.H. Freeman and Company, New York, 285 p.* (Revised edition)
- Delaite, G., Thouret, J., Sheridan, B., Labazury, P., Stinton, A., Souriot, T., & Van Westen, C. (2005). *Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars*. *Z. Geomorph. N.F.*, 209-231.
- Eychenne, J., Le Pennec, J.-L., Troncoso, L., Gouhier, M., & Nedelc, J.-M. (2012). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology*, 187-205.
- Francis, P. (1993). *Volcanoes: a planetary perspective*. New York: Oxford University Press.
- Gerbe, M., & Thouret, J. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 541-561.
- Glicken, H. (1996). *Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St Helens volcano*. Open-file Report 96-677, U.S. Geological Survey, Washington.
- Guillaude, R., Thouret, J., Huamán, D., Gourgaud, A., & 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.
- Hall, M., Steele, A., Mothes, P., & Ruiz, M. (2013). Pyroclastic density currents (PDC) of the 16-17 August 2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador: Geophysical registry and characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 78-93.
- Harpel, C., De Silva, S., & Salas, G. (2011). The 2 ka eruption of Misti Volcano, southern Peru—the most recent plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. *Geological Society of America, Special Papers*, 484, 1-72.
- Hayashi, J., & Self, S. (1992). A comparison of pyroclastic flow and debris avalanche mobility. *Journal of Geophysical Research*, 97, 9063-9071.
- Hoblitt, R., Walder, J., Driedger, C., Scott, K., Pringle, P., & Vallance, J. (1995). *Volcano Hazards from Mount Rainier*. OpenFile Report 95-273, U.S. Geological Survey, Department of the Interior, Washington.

- INEI (2018). *Censos Nacionales XII de Población y VII de Vivienda, 22 de octubre del 2017, Perú: Resultados Definitivos*. Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- Iverson, R., Schilling, S., & Vallance, J. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 972-984.
- Juvigné, E., Thouret, J.-C., Gilot, J., Leclercq, E., & Gourgaud, A. (1998). L'activité du volcan Nevado Sabancaya (Pérou) au cours de l'Holocène [Activity of Nevado Sabancaya volcano (Peru) throughout the Holocene]. *Quaternaire*, 9(1), 45-51.
- Juvigné, E., Thouret, J.-C., Loutsch, I., Lamadon, S., Frechen, M., Fontugne, M., . . . Mariño, J. (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. doi:doi.org/10.4000/quaternaire.3362
- Machacca, R., Lesage, P., Tavera, H., Pesicek, J., Caudron, C., Torres, J., . . . Burgisser, A. (2023). The 2013–2020 seismic activity at Sabancaya Volcano (Peru): Long lasting unrest and eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 435(107767).
- Major, J., & Newhall, C. (1989). Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods. *Bulletin of Volcanology*, 52(1), 1-27.
- Malin, M., & Sheridan, M. (1982). Computer-Assisted Mapping of Pyroclastic Surges. *Science*, 217(4560), 637-640.
- Mariño, J., & Thouret, J. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 1-27. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12816/1261>
- Mastin, L., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., & Dean, K. (2009). A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186, 10-21.
- Nakada, S. (2000). Hazards from pyroclastic flows and surges. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 945-955.
- Naranjo, J., Sugurdsson, H., Carey, S., & Fritz, W. (1986). Eruption of the Nevado Del Ruiz Volcano, Colombia, on 13 November 1985: Tephra Fall and Lahars. *Science*, 233, 961-963.
- Norabuena, E., Dixon, T., Stein, S., & Harrison, C. (1999). Decelerating Nazca-South America and Nazca-Pacific plate motions. *Geophysical Research Letters*, 26(22), 3405-3408.
- Pierson, T., Janda, R., Thouret, J., & Borrero, C. (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(1-4), 17-66.
- Rivera, M., Cueva, K., Le Pennec, J., Vela, J., Samaniego, P., Manrique, N., & Soncco, Y. (2020). Geología y Evaluación de los peligros del volcán Sara Sara (Ayacucho). *Boletín serie C: Geología e Ingeniería Geológica N° 78*, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, Lima.
- Rivera, M., Mariño, J., Samaniego, P., Delgado, R., & Manrique, N. (2016). eología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa). *Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima.
- Rivera, M., Samaniego, P., Liorzou, C., Vela, J., & Nauret, F. (2016). *Procesos de generación y evolución de magmas emitidos por el complejo volcánico Yucamane-Calientes (Tacna)*. Congreso Peruano de Geología.
- Rivera, M., Samaniego, P., Nauret, F., Mariño, J., & Liorzou, C. (2023). Petrological and geochemical constraints on the magmatic evolution at the Ampato-Sabancaya compound volcano (Peru). *LITHOS*, 458-459.
- Rivera, M., Samaniego, P., Vela, J., Le Pennec, J., Guillou, H., Paquette, J., & Liorzou, C. (2020). The eruptive chronology of the Yucamane-Calientes compound volcano: A potentially active edifice of the Central Andes (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 393, 1-20.
- Rivera, M., Thouret, J., & Gourgaud, A. (1998). Ubinas, el volcán más activo del Perú desde 1550: geología y evaluación de las amenazas volcánicas. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, 88, 53-71.
- Samaniego, P., Rivera, M., Manrique, N., Schiavi, F., Nauret, F., Liorzou, C., & Ancellin, M.-A. (2020). Linking magmatic processes and magma chemistry during the post-glacial to recent explosive eruptions of Ubinas volcano (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407. doi:doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107095
- Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., . . . Scao, V. (2016). The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, 110-128.
- Samaniego, P., Valderrama, P., Mariño, J., Van Wyk de Vries, B., Roche, O., Manrique, N., . . . Malnati, J. (2015). The historical (218±14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru). *Bulletin of Volcanology*, 77(51), 1-18. doi:10.1007/s00445-015-0937-8
- Schilling, S. (1998). LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. Open-file Report 98-638, U. S. Geological Survey.
- Schwaiger, H., Denlinger, R., & Mastin, L. (2012). Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition. *Journal of Geophysical Research*, 117, 20. doi:10.1029/2011JB008968
- Siebert, L., Simkin, T., & Kimberley, P. (2010). *Volcanoes of the World* (University of California ed., Vol. Third Edition). California: Smithsonian Institution.
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., & Stix, J. (2000). *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press.
- Simkin, T., Siebert, L., McClelland, L., Bridge, D., Newhall, C., & Latter, J. (1981). *Volcanoes of the World*. Stroudsburg: Smithsonian Institution and Hutchinson Ross.
- Suzuki, T. (1983). A theoretical model for dispersion of tephra. En D. Shimozuru, & I. Yokoyama, *Arc Volcanism: Physics and Tectonics* (págs. 93-113). Tokyo: Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB).
- Thouret, J., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., & Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Boletín de la Sociedad Geológica de América*, 1593-1610.
- Thouret, J., Guillaude, R., Huaman, 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. *Bull. Soc. géol. France*, 165(1), 49-63.
- Thouret, J., Rivera, M., Wörner, G., Gerbe, M., Finizola, A., Fornari, M., & Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Perú. *Bulletin of Volcanology*, 67, 557-589.
- Thouret, J.-C., Arapa, E., Charbonnier, S., Guerrero, A., Kelfoun, K., Cordoba, G., . . . Santoni, O. (2022). Modeling tephra fall and sediment-water flows to assess their impacts on a vulnerable building stock in the city of Arequipa, Peru. *Frontiers in Earth Science*, 10. doi:10.3389/feart.2022.865989
- Tilling, R. (1989). Volcanic hazards and their mitigation: progress and problems. *Reviews of Geophysics*, 27(2), 237-269.
- Travada & Córdova, V. (1752). *El suelo de Arequipa convertido en cielo (Historia general de Arequipa)*. En Primer Festival del libro Arequipeño (Vol. edición 1958). 15Arequipa.
- Ui, T., Takarada, S., & Yoshimoto, M. (2000). Debris avalanches. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix, *Encyclopedia of volcanoes* (págs. 617-626). San Diego, CA: Academic Press.
- Vargas-Franco, R., Thouret, J.-C., Delaite, G., van Westen, C., Sheridan, M. F., Siebe, C., et al. (2010). "Mapping and Assessing Volcanic Hazards and Risk in the City of Arequipa, Peru, Based on GIS Techniques," in *Stratigraphy and Geology of Volcanic Areas*. Editors G. Gropelli and L. Viereck-Goette (Geol. Soc. Am. Spec Publ SPE464), 265–280.
- Zamácola, & Jaúregui. (1804). *Apuntes Para la Historia de Arequipa*, Año de 1804. 96.

Información clave para ti

Puedes consultar el mapa de peligros del volcán Sabancaya, las **alertas**, **reportes** y **boletines** vulcanológicos generados por el IGP a través de nuestros diferentes canales de comunicación.

RECUERDA: la primera acción de prevención es mantenerse al tanto de la actividad volcánica con la información oficial que genera el IGP.



APP **#IGP**



Web **CENVUL**



REGEN

Volcán Sabancaya: explosión con la expulsión de cenizas y gases volcánicos observada desde el sector sureste del volcán.





@igp.peru



@igp_peru



@igp.peru



@igp_videos



@institutogeofisicodelperu



@igp.peru