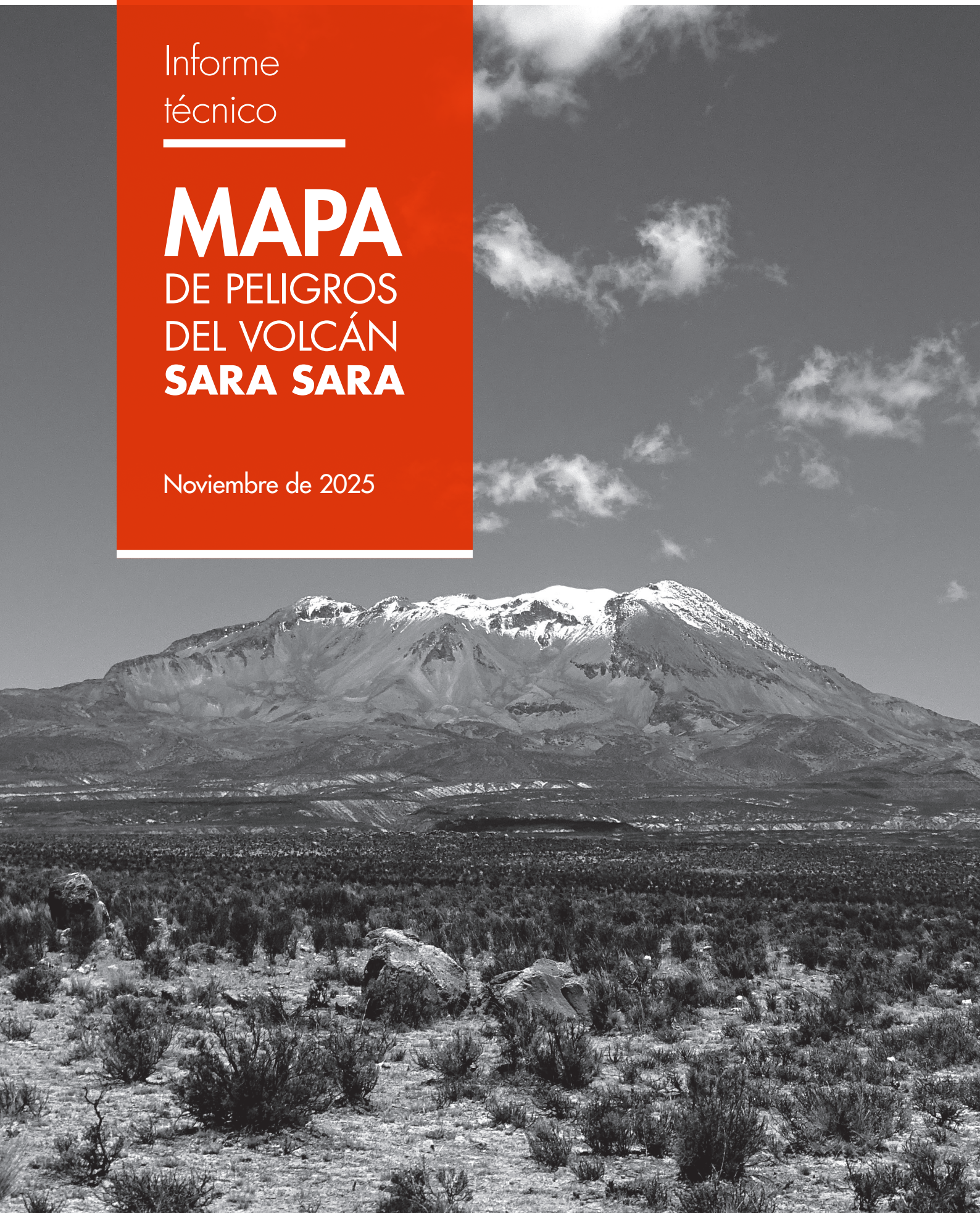


Informe
técnico

MAPA

DE PELIGROS DEL VOLCÁN SARA SARA

Noviembre de 2025



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

ESTUDIOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

Actividad
Generación de información y monitoreo de peligro volcánico

INFORME TÉCNICO MAPA DE PELIGROS DEL VOLCÁN SARA SARA



Lima, Perú
Noviembre de 2025

CRÉDITOS

Miguel Ángel Espichán Mariñas
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Jefe institucional del IGP

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

Mapa de peligros del volcán Sara Sara
Informe técnico

Marco Rivera
David Valdivia
Juan Cuno
Lady Quispe
Autores

Marco Rivera
Jorge Concha
Edición de contenido

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Carátula: Vista del volcán Sara Sara

cenvul@igp.gob.pe
<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/>
A. H. José María Arguedas, mz. D, lt. 8, Sachaca, Arequipa
Teléfono: +5154369212
Contacto

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

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



Lima, noviembre de 2025

PRESENTACIÓN



Dr. Hernando Tavera
Jefe institucional
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 Sara Sara, 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 Sara Sara es un volcán potencialmente activo ubicado a 12 km al suroeste de la localidad de Pausa (provincia de Páucar del Sara Sara, región Ayacucho). A lo largo de su evolución, este volcán ha presentado erupciones explosivas importantes. Al final de su última etapa evolutiva, hace aproximadamente 14 000 años AP, emitió flujos de lava dacíticos, los cuales recorrieron una distancia aproximada de 15 km al este del volcán. Con base en estudios previos sobre la actividad pasada del volcán Sara Sara y el comportamiento de volcanes peruanos "análogos", se consideran seis escenarios eruptivos en caso de una eventual erupción del volcán Sara Sara: el primero considera una erupción efusiva con emisión de lavas; el segundo, una erupción de tipo vulcaniano (IEV 1–2); el tercero, una erupción con crecimiento y destrucción de domo de lava; el cuarto, una erupción de tipo subpliniano (IEV 3–4); el quinto, una erupción de tipo pliniano (IEV 5); y el sexto, al colapso de un flanco y emplazamiento de avalancha de escombros.

Además, con base en estudios previos y modelamiento de procesos volcánicos, se han elaborado cinco mapas de peligros: 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 el cual la zona de alto peligro (rojo) es la zona proximal que se extiende a 18 km al sureste y 19 km al noroeste del volcán Sara Sara, la cual puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de más de 1 cm de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se halla entre 18 km a 82 km al sureste y 19 km a 80 km al noroeste del volcán Sara Sara. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de varios milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, con distancias de entre 82 km a 259 km al sureste y 80 km a 151 km al noroeste. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor. c) Mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción subpliniana (IEV 3–4), en el cual, la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se prolonga hasta 77 km al noroeste y 76 km al sureste del volcán Sara Sara. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez que formarían una capa de varios decímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se prolonga a una distancia de entre 77 km a 215 km al noroeste, y de 76 km a 342 km

al sureste del volcán Sara Sara. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de varios centímetros a milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) se prolonga a una distancia de entre 215 km a 478 km al noroeste y a más de 480 km al sureste. Esta zona puede ser afectada con cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de varios milímetros de espesor. d) Mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción pliniana (IEV 5), en el cual la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se prolonga hasta 133 km al oeste y 143 km al este del volcán Sara Sara. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez que formarían una capa de algunos metros a varios centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se prolonga a una distancia de entre 133 km a 368 km al noroeste y 143 km a 551 km al sureste del volcán Sara Sara. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de varios decímetros a milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, y se halla a más de 368 km de distancia al noroeste y a más de 551 km al sureste del volcán Sara Sara. Esta zona puede ser afectada por la caída de cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor. e) Mapa de peligros por lahares, donde la zona roja es considerada de alto peligro y corresponde al área de mayor posibilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos (150 000 m³), 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 (350 000 m³). La zona amarilla es considerada de bajo peligro o de menor posibilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos (500 000 m³). Los lahares voluminosos podrían estar asociados a lluvias muy intensas o erupciones de gran magnitud (IEV ≥ 3).

En un radio de 30 km se ubican aproximadamente 19 poblados, entre ellos Pausa (a 12.5 km al noreste del Sara Sara), capital de la provincia del Páucar del Sara Sara. También se encuentran los distritos de Sara Sara (Quilcata), localizado a 7 km al norte del volcán Sara Sara, además de Incuyo, ubicado a 14 km al noroeste del volcán, entre otros. En esta zona habitan más de 11 200 personas, las cuales podrían ser afectadas en caso de una eventual erupción volcánica.

Asimismo, en el área se ubican importantes obras de infraestructura (reservorios, canales de agua, carreteras) y terrenos de cultivo.

CONTENIDO

7	Presentación
8	Resumen
12	Introducción
13	Condiciones climatológicas
14	Aspecto socioeconómico
16	Los peligros volcánicos
16	Caída de piroclastos (tefras)
17	Flujos de lava
17	Flujos y oleadas piroclásticas
17	Lahares (flujos de lodo y escombros)
18	Avalanchas de escombros
18	Gases volcánicos
19	El volcán Sara Sara
19	Historia eruptiva
23	Datos y metodología para la elaboración de mapas
23	Metodología para la elaboración de mapas
23	<i>Softwares</i> empleados
25	Escenarios eruptivos considerados
31	Resultados: mapas de peligros del volcán Sara Sara
31	Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal
33	Mapa de peligros por caídas de ceniza durante una erupción vulcaniana (IEV 2)
35	Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción subpliniana (IEV 3–4)
36	Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción pliniana (IEV 5)
38	Mapa de peligros por lahares
40	Conclusiones
42	Referencias

SARA SARA



Elevación

5522 m s. n. m.



Región

Ayacucho



Provincia

Parinacochas-Páucar del Sara Sara



Última erupción

Hace 14 000 años aprox.



Población en un radio de 30 km

11 242 personas



Inicio de vigilancia en tiempo real

2018



Instrumentos y técnicas de vigilancia

2 estaciones sísmicas

1 cámara científica

1 inclinómetro

Sistemas satelitales



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 de volcanes activos y potencialmente, ubicados a lo largo de la cordillera occidental de los Andes, en las regiones Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna. Esta cadena volcánica, que forma parte de la denominada Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC; De Silva & Francis, 1991), está ubicada a aproximadamente 240 km al este del borde occidental de la placa sudamericana, paralela a la fosa Perú-Chile.

Los estudios geológicos, geofísicos y vulcanológicos efectuados en el sur del Perú han permitido visualizar la intensa actividad volcánica reciente manifestada por los volcanes activos, como Sabancaya, Sara Sara, Ubinas, Misti, Huaynaputina, Ticsani, Yucamane, Tutupaca y Chachani, ubicados dentro de la cadena volcánica del sur peruano. En épocas históricas, los

volcanes Sabancaya, Ubinas, Misti, Huaynaputina y Tutupaca causaron enormes estragos a varios poblados, terrenos de cultivo y obras de ingeniería localizados en sus inmediaciones. La reactivación sucesiva de los volcanes Sabancaya (1988–1998 y 2013–2025) y Ubinas (2006–2009; 2013–2017; 2019 y 2023–2024), 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 con el fin de elaborar mapas de peligros de los volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano.

En el sur peruano también existen volcanes potencialmente activos, como Sara Sara, Auqui huato, Chachani y otros que presentaron actividad eruptiva durante el Pleistoceno superior e inicios del Holoceno, es decir, hace miles a cientos de miles de años atrás. Desde entonces su actividad es mínima, y se manifiesta mediante una leve e incipiente actividad sísmica; no obstante, estos volcanes pueden volver a reactivarse en el futuro.

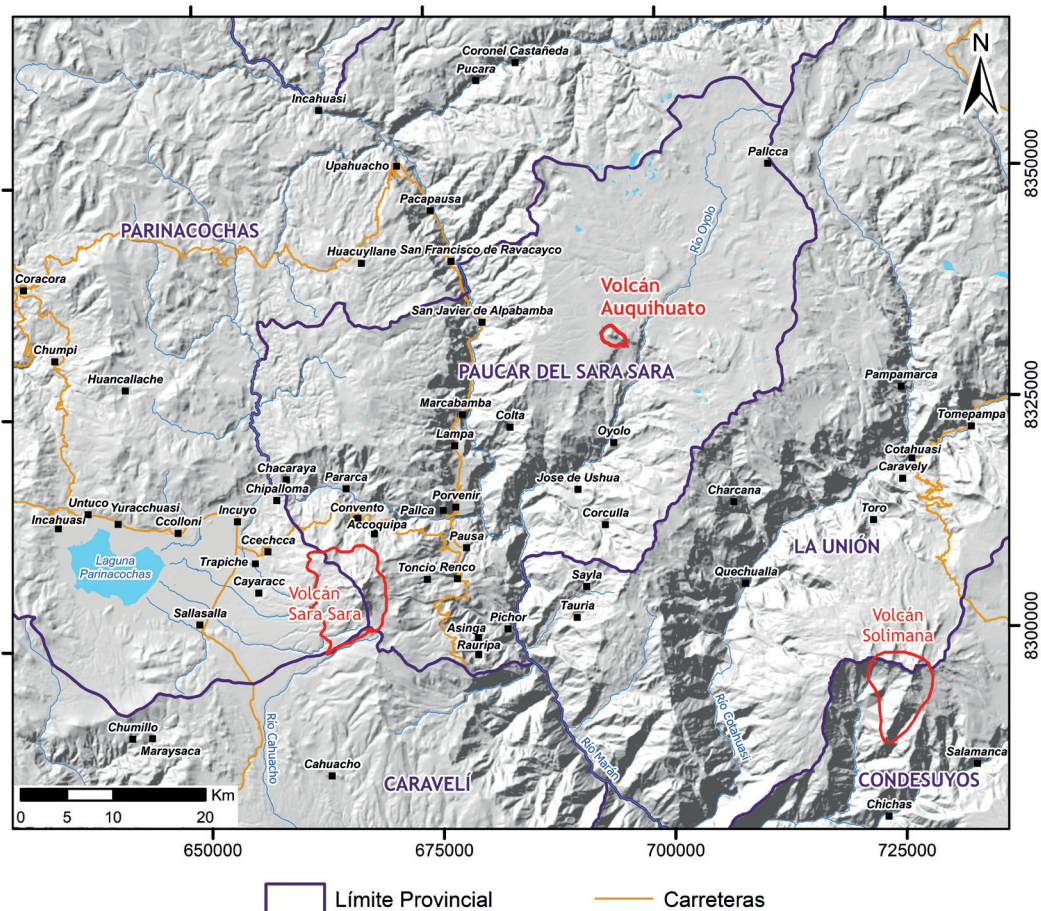


Figura 1. Mapa de ubicación del volcán Sara Sara, poblados y obras de infraestructura ubicados en sus inmediaciones.

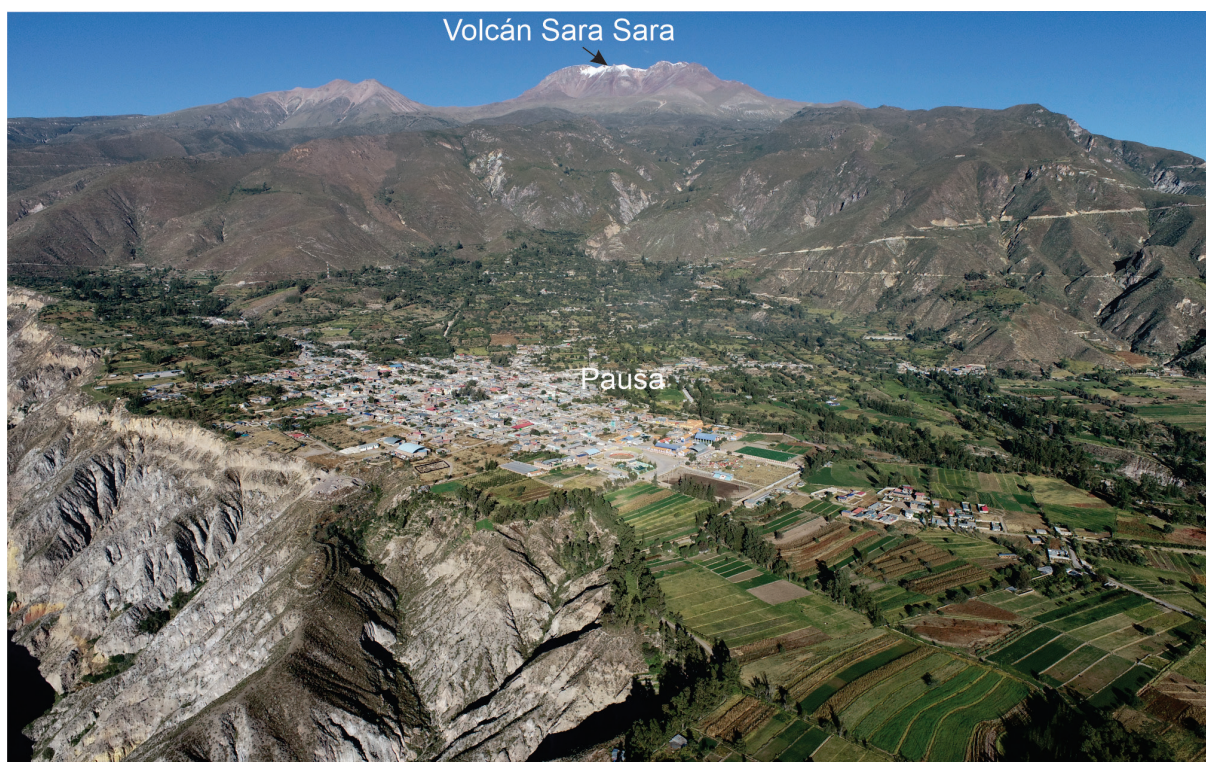


Figura 2. Vista del flanco este del volcán Sara Sara y la ciudad de Pausa, ubicada a 12.5 km al este de dicho macizo.

El volcán Sara Sara ($15^{\circ}18' S$, $73^{\circ}27' O$, 5522 m s. n. m.) se ha edificado en una zona de altiplanicie (Figura 1), al extremo occidental de la laguna Parinacochas, sobre una secuencia de lavas andesíticas del Mioceno y Plioceno. El volumen aproximado de este volcán es de 20–25 km³, y su edificio volcánico tiene una altura de 900 m. El volcán Sara Sara está constituido de secuencias de lavas andesíticas y dacíticas (Rivera et al., 2020a).

La joven morfología de las coladas de lava de este volcán, así como las dataciones radiométricas efectuadas por Rivera et al. (2020a) sobre algunas lavas, sugieren que su emplazamiento ocurrió durante el Pleistoceno medio y los inicios del Holoceno. Por otro lado, los estudios vulcanológicos señalan que, a lo largo de su evolución, el volcán Sara Sara ha generado erupciones explosivas de alto Índice de Explosividad Volcánica (IEV 4–5), así como erupciones efusivas, tal como lo mencionan Rivera et al. (2020a), Cueva (2016) y Soncco (2017).

El volcán Sara Sara puede reactivarse en el futuro y generar una erupción explosiva, cuyos productos podrían afectar las áreas aledañas, donde vive una población dedicada principalmente a la agricultura y ganadería (Figura 2).

El objetivo del presente estudio es presentar los

mapas de peligros del volcán Sara Sara, con el propósito de brindar a la sociedad, instituciones del SINAGERD (INDECI, CENEPRED, etc.) y a las autoridades locales y regionales (Gobierno Regional de Ayacucho, 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 en el Sara Sara.

1.1 Condiciones climatológicas

Para el análisis de la precipitación y la temperatura en áreas aledañas al volcán Sara Sara, se utilizó información del periodo 1963–2025, proveniente de tres estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), ubicadas en la cuenca alta del río Ocoña, en un radio de 50 km alrededor del volcán. Estas estaciones se encuentran en las localidades de Pausa, Lampa y Coracora (Tabla 1).

La estación meteorológica Lampa se encuentra ubicada a 20 km al noreste del volcán Sara Sara, mientras que la estación Pausa a 14 km al noreste. Por su parte, la estación meteorológica de Coracora está ubicada a 50 km al noroeste del volcán Sara Sara.

Tabla 1. Datos de estaciones meteorológicas localizadas en la cuenca alta del valle del río Ocoña, operadas por el SENAMHI.

Nombre	Coordenadas		Altitud (m s. n. m.)	Periodo de Registro	Cuenca
	Latitud	Longitud			
Pausa	15°16'31" S	73°20'28" O	2499	1963–2025	Ocoña
Lampa	15°11'4.85" S	73°20'5.31" O	2797	1965–2025	Ocoña
Coracora	15°0'43" S	73°46'5.01" O	3149	1963–2025	Yauca

1.1.1 Temperatura

Entre los años 2017 y 2025, la estación meteorológica de Pausa registró una temperatura máxima promedio de 24.3 °C y una temperatura mínima promedio de 8.5 °C. En tanto, la temperatura máxima registrada fue de 29.8 °C y la temperatura mínima de 1.8°C.

Por su parte, la estación meteorológica de Coracora, entre los años 1963 y 2025, registró una temperatura máxima promedio de 18.5 °C y una temperatura mínima promedio de 5.2 °C. La temperatura máxima fue de 28.2 °C y la temperatura mínima de -3.4 °C.

1.1.2 Precipitación

En el periodo 1964–2025, la estación meteorológica Pauza registró, entre los meses de diciembre y marzo, las mayores precipitaciones pluviales diarias, alcanzando valores de hasta 46.2 mm (Figura 3). En los meses de abril a noviembre, las precipitaciones fueron de menor intensidad, con máximos de hasta 25.6 mm; sin embargo, durante el mes de junio se presentaron lluvias inusuales que oscilaron entre 30 mm a 154 mm.

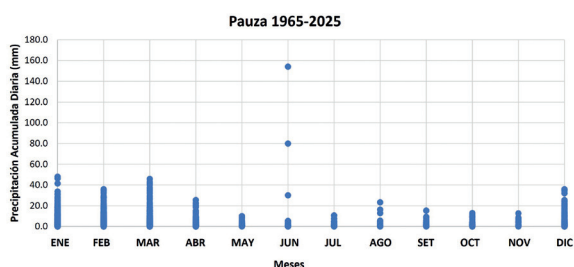


Figura 3. Precipitaciones acumuladas diarias registradas por la estación meteorológica Pauza en el periodo 1964–2025.

La estación meteorológica Lampa, en el periodo 1964–2025, y en especial entre los meses de diciembre a marzo, registró las mayores precipitaciones pluviales diarias, alcanzando valores de hasta 43 mm (Figura 4). Entre los meses de abril a noviembre, las precipitaciones fueron de menor intensidad con máximos de hasta 19 mm. Durante este periodo, en el mes de agosto se registraron precipitaciones mínimas y escasas.

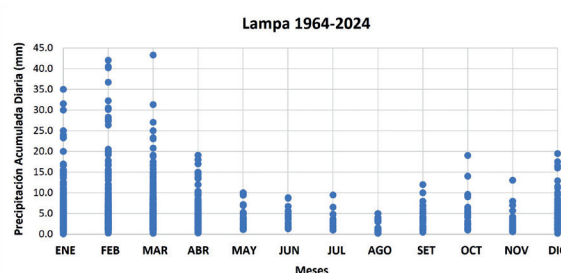


Figura 4. Precipitaciones acumuladas diarias registradas por la estación meteorológica Lampa en el periodo 1964–2024.

1.2 Aspecto socioeconómico

1.2.1 Dato poblacional

El volcán Sara Sara se ubica en el límite del área de amortiguamiento de la subcuenca del Cotahuasi, entre los distritos de Puyusca, Pausa y Sara Sara, provincias de Páucar del Sara Sara y Parinacochas (región Ayacucho). En un radio de 30 km del volcán Sara Sara viven alrededor de 11 239 personas, en 174 centros poblados, distribuidas en 15 distritos (Tabla 2). Asimismo, existe un total de 3880 viviendas, de las cuales el 93 % cuenta con acceso a agua potable (INEI, 2018).

Dentro del mismo perímetro, existe una población escolar de 3490 alumnos y 218 instituciones

educativas en el entorno del volcán Sara Sara (MINEDU, 2024), así como 21 centros de salud e importantes comunidades campesinas, entre ellas Maraycasa Tambo Caylla, Sondor y Ayroca (Ministerio de Cultura, 2025).

Tabla 2. Población asentada en un radio de 30 km del volcán Sara Sara.

Distrito	Provincia	Región	Altura (m s. n. m.)	Población en 30 km
Cahuacho	Caravelí	Arequipa	3423	591
Quicacha	Caravelí	Arequipa	2850	159
Sayla	La Unión	Arequipa	3544	319
Tauria	La Unión	Arequipa	2850	297
Puyusca	Parinacochas	Ayacucho	2772	1992
Colta	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	3267	447
Corculla	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	3503	445
Lampa	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	2809	1953
Marcabamba	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	2615	611
Oyolo	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	3410	9
Pararca	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	3047	419
Pausa	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	2536	3231
San Javier de Alpabamba	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	2494	31
San José de Ushua	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	3034	221
Sara Sara	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	3305	514
TOTAL				11 239

En cuanto a la actividad económica, las poblaciones ubicadas dentro del radio de 30 km del volcán Sara Sara basan su economía principalmente en la actividad agrícola, ganadera, comercio, explotación minera (distritos de Oyolo y San Francisco de Ravacayco), así como en la industria de la construcción y el transporte (Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo-MTPE, 2020).

Además, en áreas aledañas al volcán existen obras civiles importantes que podrían ser afectados en caso de una importante erupción volcánica:

- Unidad Minera Carpiza-Pajonal, proyectos mineros Pirca, Luicho, Colpar y prospecto Cresta de Gallo.
- Unidad minera Inmaculada: mina subterránea de oro y plata operada por Hochschild Mining. Abarca 20 000 hectáreas y consta de 40 concesiones mineras.

- Red vial con aproximadamente 681 km de carreteras.
- Zona agrícola con aproximadamente 24 088 ha.

Finalmente, en un radio de 30 km alrededor del volcán Sara Sara existe una importante variedad de ecosistemas (Ministerio del Ambiente-MINAM, 2016) y diversidad biológica (Ministerio del Ambiente-MINAM, 2019) (Tabla 3).

Tabla 3. Ecosistemas y especies animales presentes en el ámbito del volcán Sara Sara.

Ecosistemas
• Bofedales
• Periglaciares
• Matorral andino
• Bosque relicto altoandino (queñoal, otros)
Especies
• <i>Falco peregrinus</i>
• <i>Opuntia soehrensii</i>
• <i>Hippocamelus antisensis</i>
• <i>Corrycactus brevistylus</i>

2. Los peligros volcánicos

Diversos estudios vulcanológicos efectuados hasta el presente han compilado los principales peligros que pueden generar los volcanes en caso de una erupción, los cuales 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 5. A continuación se describen estos fenómenos para el caso del volcán Sara Sara.

2.1 Caída de piroclastos (tefras)

Las erupciones explosivas emiten fragmentos de roca o piroclastos hacia la atmósfera en forma de una columna eruptiva o pluma volcánica densa que, a veces, puede alcanzar varios kilómetros de altura. Posteriormente, la columna es transportada y dispersada por los vientos a distancias kilométricas. En ese sentido, 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

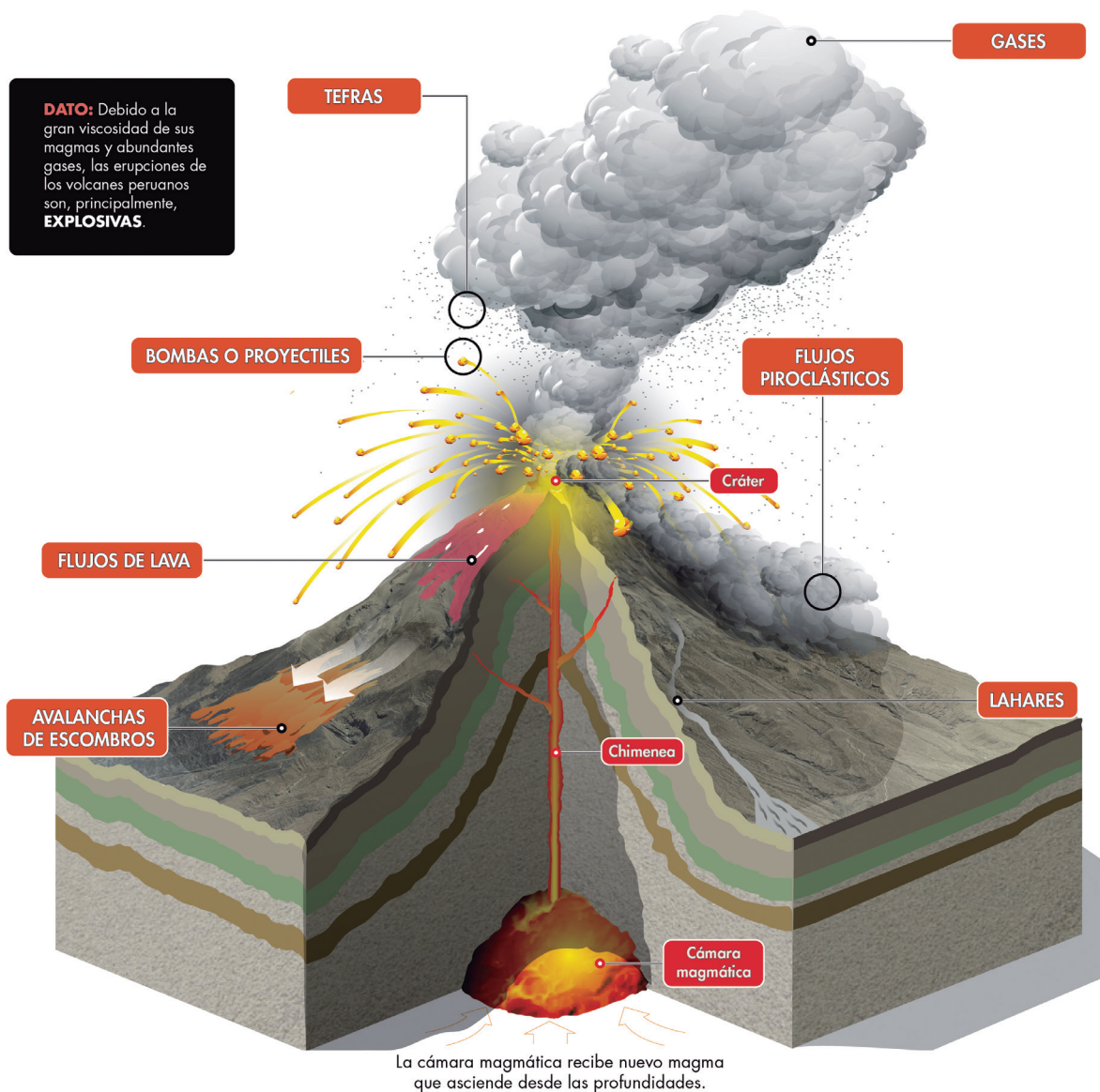


Figura 5. Tipos de peligros volcánicos que puede presentar un volcán como el Sara Sara.

dependerá de la magnitud de la erupción, la densidad de los fragmentos y la velocidad del viento al momento de la erupción. Las partículas pueden cubrir y afectar extensas áreas, de algunas centenas a varios cientos de km² (Cas & Wright, 1987).

Estas partículas pueden causar problemas de salud en las personas, contaminar fuentes de agua, colapsar los techos de edificaciones por el peso acumulado, afectar cultivos, interrumpir el tráfico aéreo, entre otros (Tilling, 1989).

En el sur peruano, todos los volcanes activos y potencialmente activos, como el volcán Sara Sara 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 las erupciones recientes han afectado poblados, obras de infraestructura y el medio ambiente. Son ejemplos del impacto de este tipo de actividad los efectos nocivos provocados por la gran erupción pliniana del volcán Huaynaputina, ocurrida en el año de 1600 d. C. (Thouret et al., 1999), que afectó todo el sur peruano, así como los efectos ocasionados por la actividad explosiva moderada e intermitente que vienen presentando los volcanes Ubinas (Moquegua) y Sabancaya (Arequipa) durante las últimas décadas.

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 de un volcán. Pueden fluir por el fondo de los valles y alcanzar varios kilómetros de distancia, recorriendo raramente más de 8 km desde el centro de emisión (Francis, 1993). Los volcanes del sur peruano han emitido lavas viscosas de composición dacítica y andesítica que recorren algunos kilómetros de distancia, mientras que otras se enfrían en la zona del cráter y forman domos de lava (volcán Sabancaya en 2017–2024).

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), lo cual da tiempo para evacuar o escapar. Sin embargo, si interactuará con la nieve que permanece en la cima del volcán podría generar lahares o flujos de lodo que descenderían por los flancos y quebradas que drenan de un volcán.

En el sur peruano, todos los volcanes activos y potencialmente activos, como el volcán Sara Sara a lo largo de su evolución, han presentado actividad efusiva con la emisión de flujos de lava que contribuyeron a la formación de su cono actual. Al pie del flanco este del volcán Sara Sara, se distingue un flujo de lava dacítico emplazado hace aproximadamente 14 000 años AP, el cual ha recorrido 15 km de distancia (Rivera et al., 2020a).

2.3 Flujos y oleadas piroclásticas

Las erupciones explosivas importantes pueden generar flujos piroclásticos, ahora denominados corrientes de densidad piroclásticas. Estos corresponden a mezclas de ceniza, fragmentos de roca y gases calientes (300 °C a 800 °C) (Nakada, 2000). Los flujos piroclásticos descienden por los flancos de un volcán a ras de la superficie y a grandes velocidades, comprendidas entre 100 m/s y 300 m/s (Hoblitt et al., 1995). Poseen, por lo general, 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 fácilmente sale del valle, sobrepasando relieves importantes como lomas o cerros, y afectando áreas considerables. Estos flujos y oleadas destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso (Tilling, 1989).

Los estudios vulcanológicos realizados durante los últimos 30 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 de volúmenes variables, los cuales 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, 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 y la fusión de una parte del casquete glaciar de dicho volcán (Naranjo et al., 1986) que dio lugar a la generación de lahares. El área inundada o afectada por el desborde de los lahares 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 y pueden alcanzar grandes distancias (>100 km), e incluso generar inundaciones cerca al cauce de ríos y quebradas (Tilling, 1989).

La mayoría de los volcanes activos o potencialmente activos ubicados en los Andes peruanos, como Misti, Ubinas, Yucamane, Ticsani, Sara Sara, Huaynaputina, Coropuna y otros, presentan este tipo de peligro, sobre todo en periodos de lluvia (diciembre a marzo), durante los cuales ocurren lluvias intensas que caen en sus laderas o cumbres generando lahares. El volumen y distancia que recorre el lahar está 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 de un volcán. Se originan debido a factores de inestabilidad, tales como la elevada pendiente del volcán, la presencia de fracturas o fallas tectónicas, los movimientos sísmicos fuertes y explosiones volcánicas. Las avalanchas de escombros ocurren con poca frecuencia y, comúnmente, pueden alcanzar decenas de kilómetros de distancia. Se desplazan a gran velocidad; por ejemplo, en el caso del Monte St. Helens (EE. UU.), cuyo lahar estuvo asociado a una erupción lateral dirigida, se estimaron velocidades del orden de 240 km/h (Glicken, 1996).

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).

En el sur del Perú, varios volcanes activos y potencialmente activos, como el Misti, Ticsani, Tutupaca, Ubinas, Sara Sara y otros, han presentado derrumbes de flanco que han generado depósitos de avalanchas de escombros distribuidos en áreas aledañas (Thouret et al., 2001; Mariño & Thouret, 2003; Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2015, Rivera et al., 2020a).

2.6 Gases volcánicos

Antes y 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 Sara Sara

3.1 Historia eruptiva

El Sara Sara es un estratovolcán parcialmente erosionado que se ha construido sobre lavas andesíticas del Mioceno-Plioceno, algunas de ellos alteradas e hidrotermalizadas. Su estructura cónica, alargada en dirección norte-sur (6.8 x 3.6 km), ha sido modificada por colapsos sectoriales de flanco, erupciones explosivas y procesos glaciológicos ocurridos durante el Pleistoceno medio y el Holoceno. Según Rivera et al. (2020a), su evolución se habría desarrollado en cuatro etapas principales (Figura 6):

3.1.1 Sara Sara I (Pleistoceno medio)

Durante esta etapa temprana, el volcán emitió flujos de lavas dacíticas que conforman la base del edificio volcánico. Posteriormente, ocurrieron erupciones explosivas que generaron flujos piroclásticos. Las dataciones radiométricas realizadas en productos volcánicos indican una actividad anterior a los 300 000 años AP (Rivera et al., 2020a).

Entre los productos de esta fase destacan el depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza "Capachico", de composición riolítica (73 wt.% SiO₂), que aflora a 7 km al noroeste del volcán Sara Sara, y una secuencia volcanoclástica sobrepuesta, compuesta por depósitos de lahares y sedimentos lacustres. Estos últimos presentan un alto grado de alteración, posiblemente vinculados a la antigua presencia de la laguna Parinacochas o a la cercanía con la caldera Incahuasi, donde aún persiste actividad hidrotermal (Rivera et al., 2020a; Le Penneec et al., 2016).

3.1.2 Sara Sara II (Pleistoceno medio-superior)

Durante esta etapa, el volcán Sara Sara desarrolló erupciones explosivas de gran magnitud, principalmente plinianas, que emitieron voluminosos depósitos de caída de tefras, flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas visibles en las quebradas que drenan de los flancos norte, oeste y suroeste del cono volcánico.

Existen varios depósitos de flujos piroclásticos de composición riolítica a dacítica que afloran en inmediaciones del volcán Sara Sara, emplazados durante importantes erupciones explosivas generadas por dicho volcán. Entre estos depósitos destacan "Getcha", "Jatunsora", "Huacachipa",

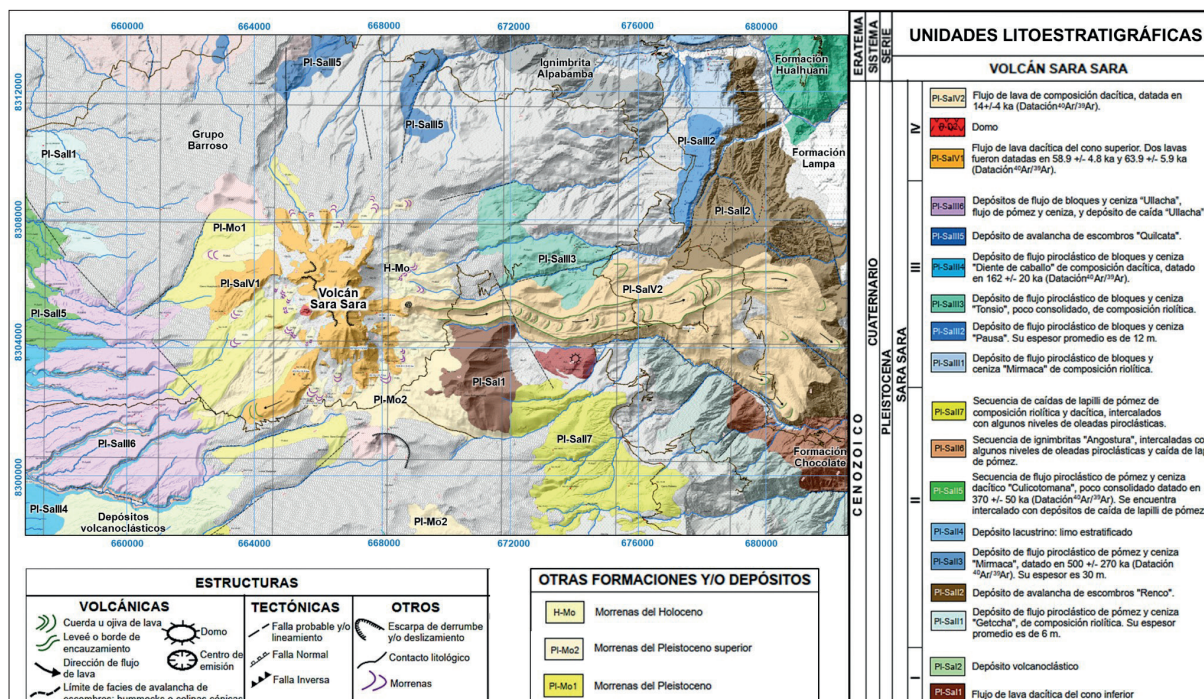


Figura 6. Mapa geológico del volcán Sara Sara (Rivera et al., 2020a).

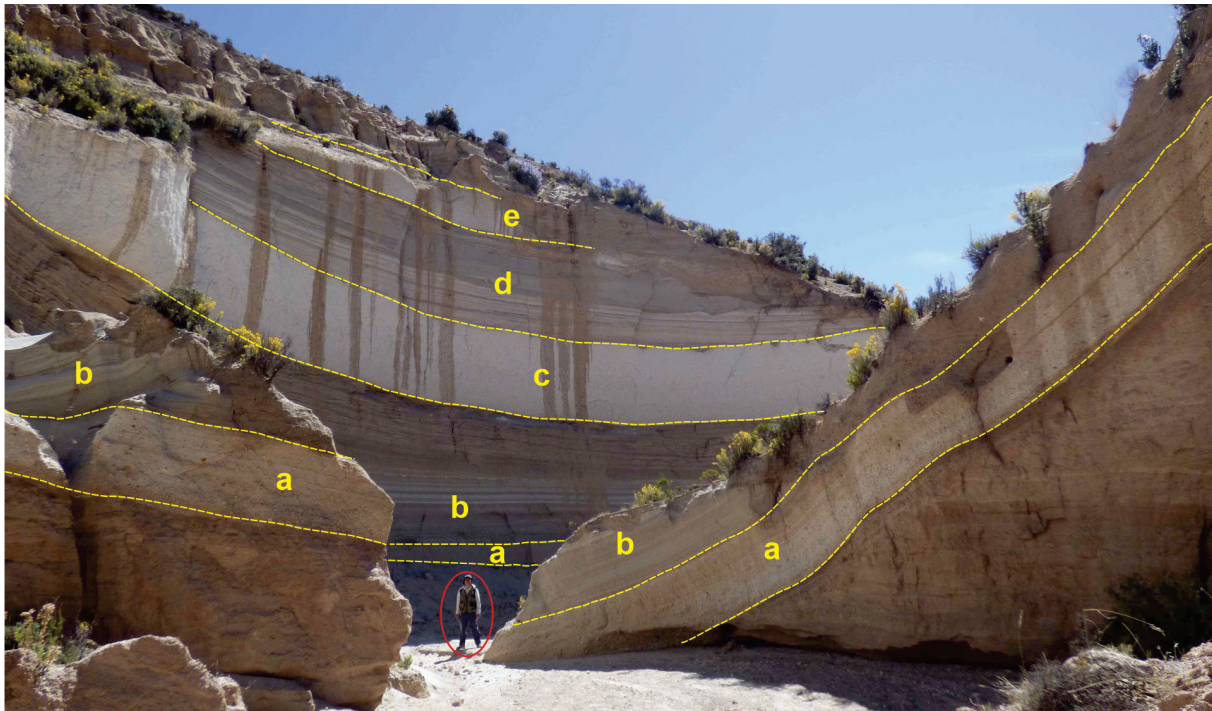


Figura 7. Depósitos de caída de lapilli de pómez y flujos piroclásticos que afloran a 8 km al sureste del volcán Sara Sara: a) depósito de caída "Potrero"; b) depósito de oleada piroclástica "inferior"; c) depósito de caída "Llique I"; d) depósito de oleada piroclástica "superior"; y e) depósito de caída "Llique II" (tomado de Rivera et al., 2020a).

"Mirmaca", "Culicotomana" y "Angostura", los cuales contienen lapilli y bloques de pómez con contenido variable de cristales (plagioclasa, biotita, cuarzo y anfíbol) incluidos dentro de una matriz de ceniza. Estos depósitos, de espesores entre 2.4 m y 30 m, son masivos, endurecidos a moderadamente consolidados que reflejan una importante y recurrente actividad explosiva del volcán Sara Sara ocurrida desde hace más de 200 000 años (Rivera et al., 2020a).

También se distingue el depósito de avalancha de escombros "Renco", que aflora a 11.5 km al noreste del volcán, y sobre el cual se asienta la localidad de Pausa. Este depósito tiene poco más de 200 m de espesor y cubre una superficie de 14 km² a 16 km². Este depósito sugiere un colapso parcial del flanco noreste del volcán (Rivera et al., 2020a).

La unidad también incluye depósitos de caída de lapilli de pómez riolíticos, asociados a erupciones plinianas, que afloran en áreas aledañas, como los depósitos "Basal", "Cayarac", "Angostura", "Potrero", "Llique I", "Llique II" (Figura 7) y "Huancara". El más destacado es el depósito "Cayarac", que presenta hasta 4 m de espesor a 12.5 km del cráter y un volumen estimado de 2×10^9 m³, correspondiente a una erupción pliniana con un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 5 (Rivera et al., 2020a).

En resumen, los depósitos asignados a la unidad "Sara Sara II" revelan un periodo de gran explosividad del volcán Sara Sara, dominado por erupciones plinianas que generaron depósitos de tefras, flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas que remodelaron ampliamente el paisaje durante el Pleistoceno medio a superior.

3.1.3 Sara Sara III (Pleistoceno superior)

Esta etapa se caracteriza por la ocurrencia de erupciones explosivas, así como por el crecimiento y colapso de domos y los derrumbes de flancos del volcán los cuales generaron depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza, oleadas piroclásticas, caídas de lapilli de pómez, flujos piroclásticos de pómez y ceniza, y avalanchas de escombros, tal como lo describen Rivera et al. (2020a).

A 12 km al noreste del volcán Sara Sara aflora el depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza "Mirmaca", depósito masivo y poco consolidado que contiene bloques dacíticos porfiríticos. Por otro lado, en inmediaciones de la localidad de Pausa, se identificó el depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza "Pausa", que contiene bloques densos de composición dacítica. En las

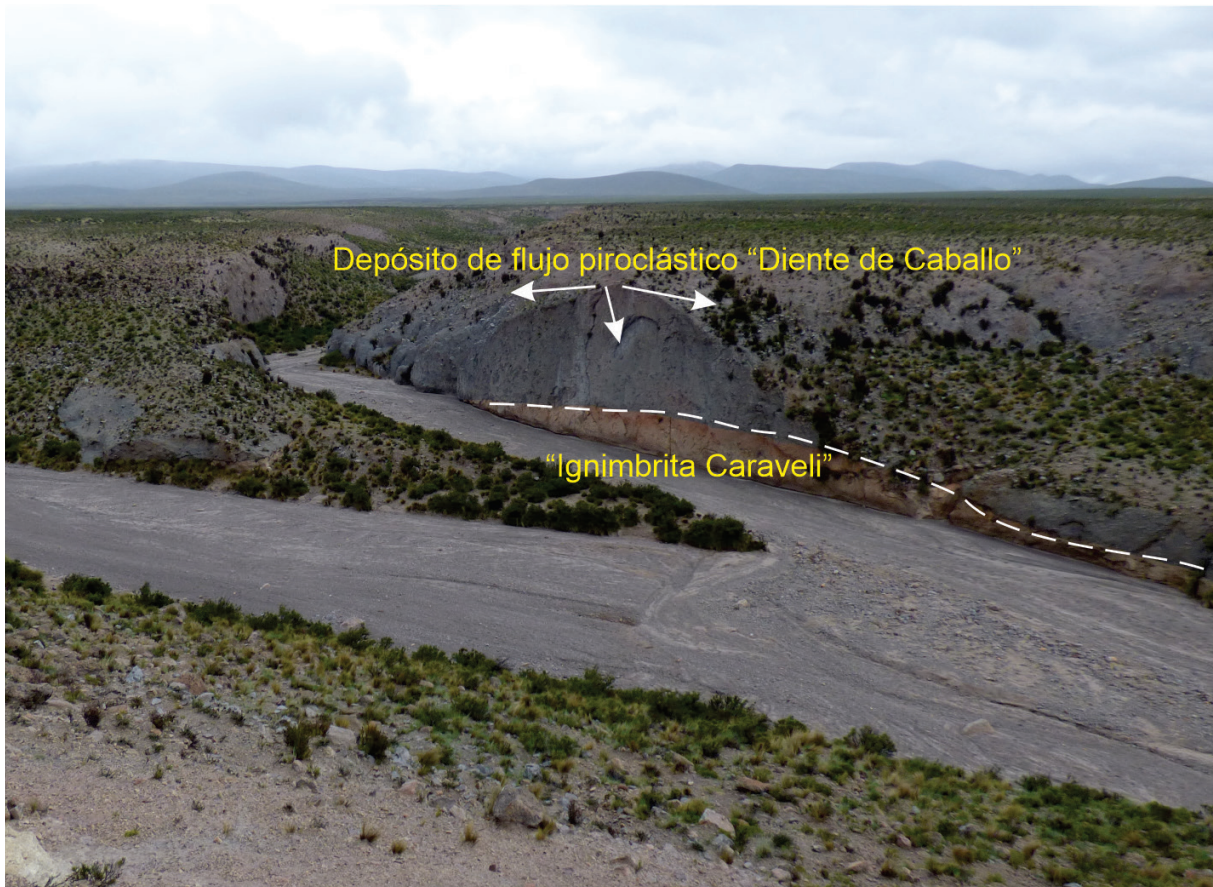


Figura 8. Depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza “Diente de Caballo” del volcán Sara Sara, datado en aproximadamente 162 000 años AP (Rivera et al., 2020a), que aflora a 15 km al suroeste de dicho volcán.

quebradas cercanas a la localidad de Tonsio, a 8 km al este del volcán Sara Sara, se emplazó el flujo piroclástico de bloques y ceniza “Tonsio”, de composición riolítica.

Asimismo, al pie del flanco occidental del volcán, entre 6 km y 9 km de la cumbre del Sara Sara, se preservan depósitos de oleada piroclástica con estratificación cruzada. Sobre dichos depósitos se observa un depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza denominado “Diente de Caballo”, de naturaleza riolítica (69–72 wt.% SiO₂). Esta unidad aflora a más de 18 km hacia el oeste, ha sido datada en 162 ± 20 ka (datación ⁴⁰Ar/³⁹Ar) y presenta características compatibles con una erupción lateral dirigida (Rivera et al., 2020a). Este depósito aflora a unos 15 km al oeste del volcán sobre el depósito de ignimbrita “Caraveli” (Figura 8), datado por Thouret et al. (2016) en 9.4–8.97 Ma.

En este periodo también se emplazó el depósito de avalancha de escombros “Quilcata”, visible a 8 km al noreste de la cima del volcán Sara Sara, en inmediaciones de las localidades de Acoquipa

y Quilcata. Este depósito se caracteriza por contener facies de matriz fina oxidada y facies de bloques andesítico-dacíticos alterados, algunos con fracturas en rompecabezas.

También se emplazó el depósito de caída de lapilli de pómez “Ullacha”, de composición riolítica (71.6 wt.% SiO₂), que aflora al pie del flanco occidental del Sara Sara, cuya área de dispersión define un patrón de erupción subpliniana (IEV 4), con un volumen estimado de 3.1 × 10⁹ m³ (Rivera et al., 2020a).

Igualmente, en la etapa “Sara Sara III” se emplazó el depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza “Angostura superior”, visible a 8 km al oeste del volcán Sara Sara, en la quebrada del mismo nombre. El depósito tiene más de 12 m de espesor, es de naturaleza masiva, endurecida, y sobreyace al depósito de flujo piroclástico “Diente de Caballo”. La secuencia culmina con el depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza “Ullacha”, ubicado a 7 km al suroeste del Sara Sara, el cual está compuesto por bloques dacíticos densos englobados dentro de una matriz de ceniza poco consolidada.

3.1.4 Sara Sara IV (Pleistoceno superior)

Según Rivera et al. (2020a), durante esta etapa se produjo la construcción del cono medio-superior del volcán Sara Sara, constituido de flujos de lava dacíticas (65–68 wt.% SiO₂). Estas lavas recorrieron distancias de hasta 4.5 km en dirección radial y presentan pendientes menores de 40°. Las lavas son masivas, de textura porfirítica y de color gris, y muestran evidencias de erosión glaciar.

Al pie del flanco oriental, un evento eruptivo posterior generó flujos de lava dacítica (65–66 wt.% SiO₂) emitidos desde un ventó parásito (Figura 9). Estos flujos recorrieron aproximadamente 15 km de distancia en dirección este del Sara Sara hacia el río Marán. Uno de los flujos de lava datado por Rivera et al. (2020a) arrojó una edad de 14 000 años AP.

Respecto a la actividad volcánica histórica u ocurrida durante los últimos 500 años, no existen evidencias en campo ni archivos históricos que mencionen la ocurrencia de erupciones recientes o actividad alguna presentada por el volcán Sara Sara.

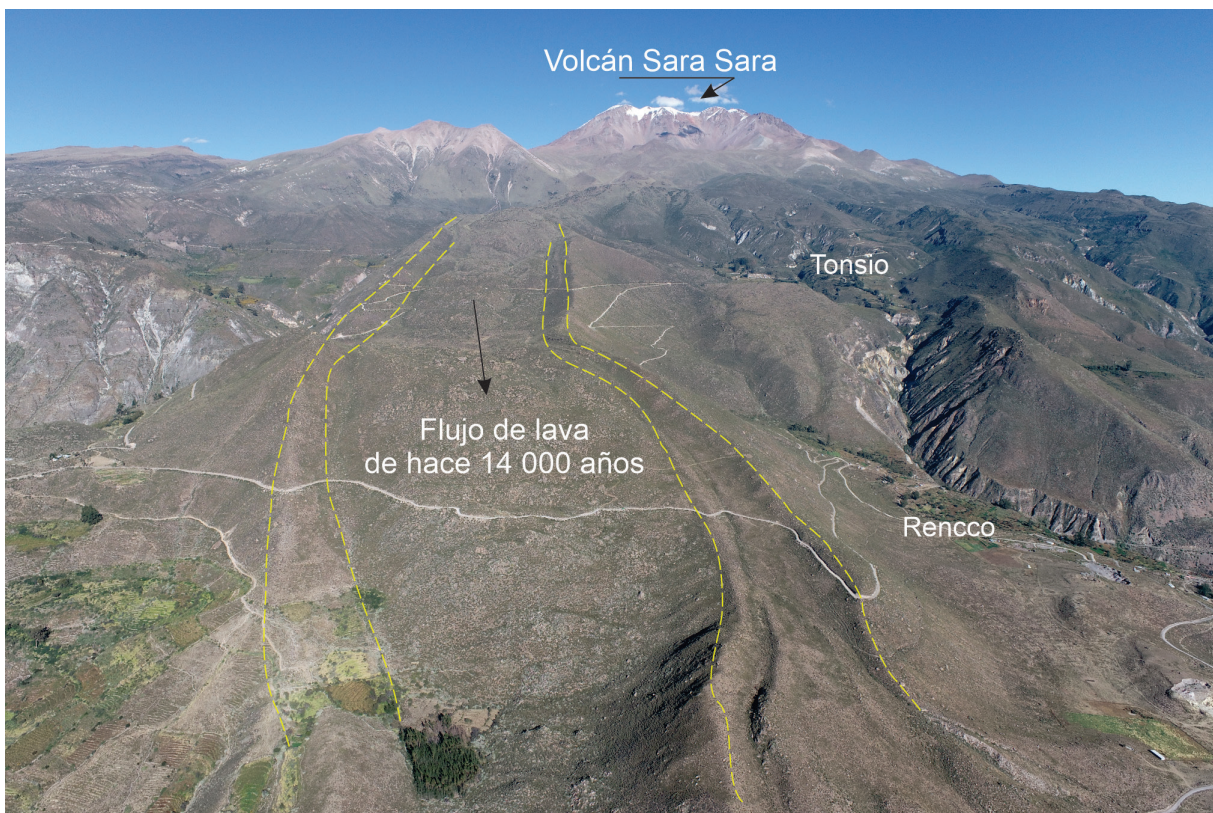


Figura 9. Flujo de lava en bloque de composición dacítica con bordes de encauzamiento, emitido desde un ventó situado en la base del flanco oriental del volcán Sara Sara.

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 relacionado a determinar características de las erupciones pasadas y la geología del volcán Sara Sara.
- Procesamiento de imágenes de satélite Landsat del volcán Sara Sara y sus alrededores.
- Elaboración de un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) a través de imágenes satelitales de alta resolución.
- Trabajos de campo para el reconocimiento de secuencias volcánicas emitidas en el pasado por el volcán Sara Sara.
- Modelamiento de procesos volcánicos con el software Ash3D (Mastin et al., 2009), VolcFlow (Kelfoun & Druitt, 2005) y LaharZ (Schilling, 1998).
- Elaboración de gráficos y tablas diversas.
- Elaboración de los mapas de peligros volcánicos del Sara Sara.

4.2 Softwares empleados

4.2.1 Modelo Ash3d

El Ash3D (Mastin et al., 2009) es un *software* que se basa en los principios eulerianos tridimensionales, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), cuyos 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 futuros de dispersión de ceniza en caso de erupciones volcánicas. 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 a través de una columna de células sobre el volcán y distribuye la masa verticalmente usando el sistema Suzuki (Suzuki, 1983; Carey, 1996). Posteriormente, se resuelve la ecuación de advección, difusión y sedimentación para simular el transporte y depósito de partículas de ceniza eyectadas a la atmósfera (Schwaiger et al., 2012). La advección del viento se calcula usando datos preexistentes que varían con el tiempo y métodos que usan volúmenes finitos de material. La velocidad de caída, distribución y duración del transporte están influenciadas por el tamaño de grano designado por el programa. La distribución vertical de la masa y elevación son calculadas usando la ecuación de Suzuki (1983).

El usuario ingresa variables a través de una plataforma virtual, como 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 (h), así como los aeropuertos afectados. Los parámetros eruptivos utilizados en el modelo Ash3D corresponden a tres escenarios de erupciones vulcanianas, subplinianas y plinianas.

• Parámetros utilizados en la simulación Ash3D

Para la simulación de depositación de cenizas del volcán Sara Sara, en el caso del escenario de erupciones explosivas de tipo vulcaniano (IEV 1–2), se consideró un volumen DRE de ceniza de 0.002 km^3 , volumen frecuente en erupciones explosivas de tipo vulcaniano como la presentada por el volcán Tungurahua el 14 de julio de 2006 (Bustillos & Samaniego, 2011) y por el volcán Ubinas durante los últimos 500 años (Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2020). También se consideró una altura de la pluma volcánica de 6.5 km.

Tabla 4. Parámetros eruptivos utilizados para la simulación de dispersión de ceniza con el código Ash3D, para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano de IEV 1–2.

Escenario eruptivo	IEV 1–2
Duración de la simulación	24 horas
Duración de la erupción	3 horas
Altura sobre el nivel del cráter	6.5 km
Altura sobre el nivel del mar	12 km
Volumen DRE (km ³)	0.002

Por otro lado, en la simulación para la depositación de cenizas del volcán Sara Sara para un escenario de erupción subpliniana (IEV 3–4), se consideró un volumen DRE de ceniza de 0.3 km³. Este y otros parámetros utilizados para la simulación de un escenario eruptivo de IEV 3–4 son presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros eruptivos utilizados para la simulación con el código Ash3D, para un escenario eruptivo de tipo subpliniana de IEV 3–4.

Escenario eruptivo	IEV 3–4
Duración de la simulación	24 horas
Duración de la erupción	7 horas
Altura sobre el nivel del cráter	15.2 km
Altura sobre el nivel del mar	20.7 km
Volumen DRE (km ³)	0.3

Por otro lado, en la simulación para la depositación de cenizas del volcán Sara Sara para un escenario de erupción pliniana (IEV 5), se consideró un volumen DRE de ceniza de 2.5 km³. Este y otros parámetros utilizados para la simulación de un escenario eruptivo de IEV 5 son presentados en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros eruptivos utilizados para la simulación con el código Ash3D, para un escenario eruptivo de tipo pliniano de IEV 5.

Escenario eruptivo	IEV 5
Duración de la simulación	24 horas
Duración de la erupción	10 horas
Altura sobre el nivel del cráter	23.5 km
Altura sobre el nivel del mar	29 km
Volumen DRE (km ³)	2.5

Una vez definidos los escenarios eruptivos se procedió a realizar 1080 simulaciones para cada escenario con los datos de viento registrados entre los años 2010 y 2024. En todos los casos se consideraron las direcciones predominantes del viento (sureste y suroeste de la cima del volcán Sara Sara). Los datos de vientos fueron tomados del Centro Nacional de Predicción Ambiental de los EE. UU.

4.2.2 Modelo LaharZ

LaharZ es un programa que permite delimitar las zonas de inundación por lahares (flujos de lodo y escombros) que se originan en los drenajes que nacen en los flancos de un volcán (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998). El programa se basa en una correlación empírica entre el volumen de un evento lahárico y el área planimétrica en sección transversal inundada por dicho lahar (Figura 10). Con base en la recopilación de datos de campo de 27 eventos laháricos bien estudiados alrededor del mundo, Iverson et al. (1998) dedujeron dos ecuaciones que relacionan los volúmenes con las áreas mencionadas anteriormente.

$$A = 0.05V^{2/3}$$

$$B = 200V^{2/3}$$

En donde A es el área transversal máxima inundada por el lahar, B es el área planimétrica total inundada y V es el volumen del lahar

(Figura 10). El programa LAHARZ fue diseñado para ejecutarse dentro de un sistema de información geográfica (ArcGIS) que emplea las ecuaciones anteriores, un modelo digital de elevación (DEM) y los volúmenes de los lahares, previamente definidos por el usuario para delimitar zonas potenciales de inundación, de manera automatizada y rápida. El DEM empleado ha sido elaborado con base en imágenes satelitales.

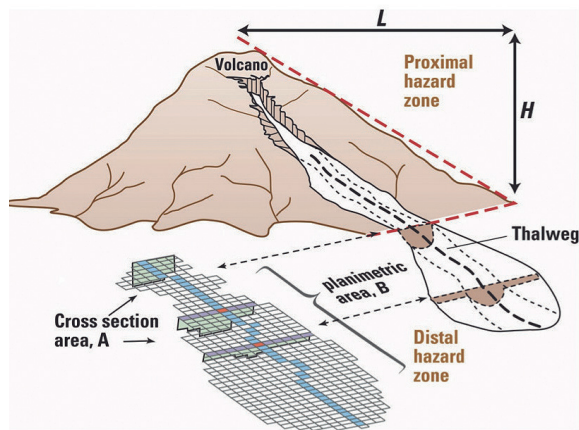


Figura 10. Relaciones entre la distancia (L) y la altura (H) por donde recorrerían los lahares, así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B) inundadas por un lahar (Schilling, 1998).

Además, para delimitar las zonas de 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 avalancha de escombros es 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 10). 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.

4.2.3 Programa VolcFlow

VolcFlow es un código euleriano de diferencias finitas escrito en el programa MATLAB. Este

código determinista se basa en la conservación de ecuaciones de masa y momento para simular fluidos newtonianos o de Bingham bajo ciertos criterios reológicos (Kelfoun & Druitt, 2005). Utiliza parámetros de flujo reológico, como viscosidad, densidad, cohesión, ángulos de fricción interna y basal. El código VolcFlow resuelve ecuaciones en un sistema de coordenadas local relacionado con la topografía del terreno, con x y y paralelas a la superficie topográfica y h (profundidad) perpendicular a estas. El código VolcFlow se ha utilizado ampliamente para simular diferentes flujos gravitacionales, como lahares y avalanchas de escombros, especialmente en volcanes (Kelfoun & Druitt, 2005; Cárdenas et al., 2013; Gueugneau, 2014; Vásconez et al., 2019; Kelfoun & Vallejo, 2015; Warwick et al., 2022). Detalles sobre el código VolcFlow y sus aplicaciones para simulaciones de lahares se pueden encontrar en Cárdenas et al. (2013) y Vásconez et al. (2019).

4.3 Escenarios eruptivos considerados

Para establecer los tipos de escenarios eruptivos futuros, se han considerado los distintos tipos de erupciones presentadas en el pasado por el volcán Sara Sara, ligadas a la presencia de diversos depósitos descritos en los estudios geológicos efectuados por Rivera et al. (2020a), Cueva (2016) y Soncco (2017), así como el estado y la morfología actual del volcán, entre otros aspectos descritos a continuación:

- La magnitud de las erupciones establecida en función del trabajo de campo y de la distribución de los productos volcánicos.
- Los dinamismos eruptivos futuros, es decir, los tipos de erupciones que podría presentar dicho volcán.
- El comportamiento de otros volcanes peruanos considerados como «análogos» al Sara Sara, tales como el volcán Misti.

Adicionalmente, se consideró la presencia de una cobertura de hielo y nieve en las partes altas del volcán Sara Sara, a partir de la cual se podrían generar lahares durante una erupción volcánica. La presencia de nieve ocurre principalmente durante el periodo de lluvias, entre los meses de diciembre a marzo, y de manera eventual en junio.

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

4.3.1 Erupción de tipo efusiva con emisión de lavas

Una erupción efusiva consiste en la emisión pasiva de flujos de lava, los cuales descienden por los flancos y quebradas que surcan el cono volcánico siguiendo la pendiente del terreno. Un ejemplo de este tipo de actividad es el volcán Pacaya (Guatemala), el cual, entre el 5 de febrero y el 23 de abril de 2021, presentó emisiones de flujo de lava (Figura 11).

Durante los últimos 60 000 años, el volcán Sara Sara ha presentado de manera recurrente erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava dacíticos y andesíticos, los cuales han alcanzado distancias de hasta 15 km desde el volcán (Rivera et al., 2020a). En el futuro, es posible que el volcán Sara Sara presente emisiones de flujos de lava que podrían cubrir y afectar áreas aledañas al cono volcánico. El emplazamiento de lava podría fundir la capa de

hielo y nieve que existe en la cumbre del volcán Sara Sara y producir lahares o flujos de lodo 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 en dirección del río Marán, las localidades de Salla Salla, Quilcata y otros.

4.3.2 Erupción de tipo vulcaniano (IEV 1–2)

Las erupciones vulcanianas son las más explosivas y violentas, debido a que emiten ingentes cantidades de ceniza, bloques, bombas, escorias y, eventualmente, pómez hacia la atmósfera. Las explosiones se dan en intervalos de minutos a horas e incluso días. Como resultado de estas explosiones se generan plumas volcánicas o columnas eruptivas de menos de 20 km de altura (Sigurdsson et al., 2000).

En inmediaciones del volcán Sara Sara afloran algunos depósitos de caídas de ceniza ligados a erupciones vulcanianas (IEV 1–2). Por ello, en caso de una eventual erupción, es probable que el volcán presente actividad de tipo vulcaniano,



Figura 11. Vista del volcán Pacaya (Guatemala), el cual presentó actividad efusiva entre el 5 de febrero y el 23 de abril de 2021, emitiendo flujos de lava en bloques que han alcanzado aproximadamente 3.7 km de distancia desde la cima del volcán.

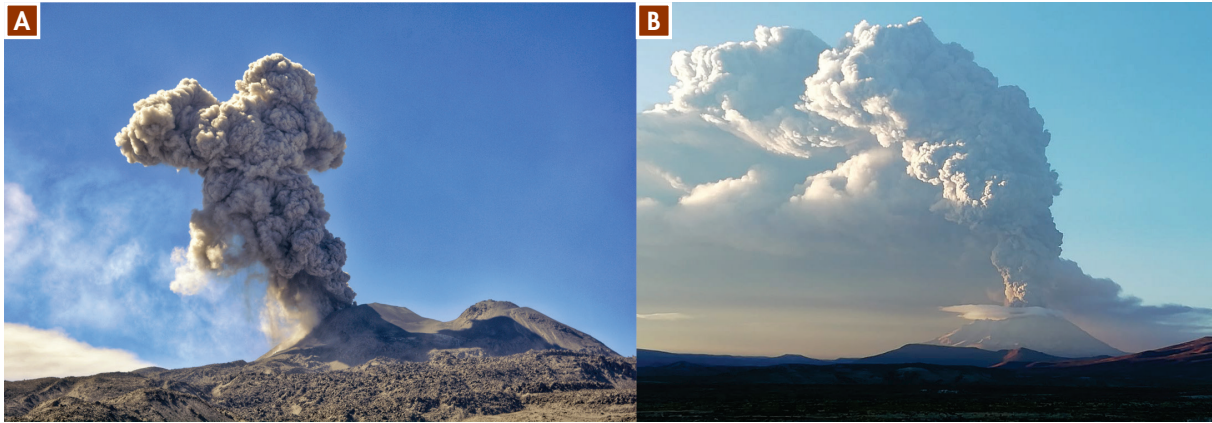


Figura 12. Vista de volcanes que presentaron erupciones vulcanianas de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 1–2: A) actividad explosiva de julio de 2024 del volcán Sabancaya. B) Erupción del 19 de julio de 2019 del volcán Ubinas.

caracterizada por erupciones explosivas discretas que emiten ceniza y bloques incandescentes hacia las áreas cercanas. Las cenizas pueden ser transportadas por el viento a varias decenas de kilómetros, mientras que los bloques caerán en áreas próximas al volcán. Este tipo de erupciones también puede generar flujos piroclásticos poco voluminosos (Sigurdsson et al., 2000).

Otros volcanes activos del sur peruano, como Ubinas (2006–2009; 2013–2017; 2019; 2023–2024) y Sabancaya (1988–1998; 2016–2025), han presentado en las últimas décadas erupciones explosivas moderadas de tipo vulcaniano, con un IEV 2, que han generado principalmente la eyección de ceniza, bloques incandescentes y gases (Rivera et al., 2014; Gerbe & Thouret, 2004; Machacca et al., 2023).

En el caso del Sabancaya (Arequipa), durante su actividad eruptiva ocurrida entre los años 1988 y 1998, este volcán generó cenizas que fueron dispersadas por los vientos entre 20 km y 30 km de distancia (Guillande et al., 1992; Thouret et al., 1994). Posteriormente, en su proceso eruptivo 2016–2025, la ceniza viajó eventualmente a más de 40 km, principalmente en direcciones este, sureste y noreste del volcán (Figura 12).

Por otra parte, el volcán Ubinas, durante la erupción del 19 de julio de 2019, que tuvo un IEV 2, generó una columna de cenizas y gases de más de 5500 m de altura sobre la cima del volcán (Figura 12). Posteriormente, las cenizas fueron dispersadas por los vientos hacia zonas distales del volcán, en direcciones sur y sureste, afectando principalmente poblados cercanos del valle de Ubinas y algunas localidades de las regiones de Moquegua, Tacna, Puno, así como algunas ciudades de Bolivia, como La Paz. Durante la erupción del año 2019, se identificaron depósitos

de caídas de ceniza de 1 mm de espesor a 20 km de distancia al sureste del volcán Ubinas (Aguilar et al., 2019).

Durante erupciones vulcanianas (IEV 2) también podrían generarse flujos piroclásticos de poco volumen y limitado alcance (Sigurdsson et al., 2000). Por ejemplo, en la erupción vulcaniana de IEV 2 del volcán Reventador (Ecuador), en 1976, o del volcán Tungurahua (Ecuador), en 2006 y 2010, se generaron flujos piroclásticos que viajaron a más de 4 km del cráter de dichos volcanes (Aguilera et al., 1988; Hall et al., 2013).

Durante la ocurrencia de este tipo de erupciones es frecuente la formación de lahares, sobre todo en periodos de lluvia (diciembre a marzo). Los lahares generados pueden descender por las quebradas que drenan por el volcán y afectar terrenos de cultivo, carreteras, puentes, etc.

4.3.3 Erupción con crecimiento de domo

En una eventual reactivación y erupción del volcán Sara Sara es probable que se genere la formación o el ascenso de un domo de lava a la superficie. Un domo se forma cuando la lava, por extrusión en el conducto volcánico, es demasiado viscosa para fluir a 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 en el Sara Sara se basa en la presencia

de variados depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas que existen alrededor del volcán Sara Sara, los cuales fueron generados por el crecimiento y colapso de domos de lava en el pasado. Los flujos piroclásticos podrían emplazarse en el fondo de las quebradas aledañas a dicho volcán, alcanzando distancias de hasta 15 km alrededor del volcán, y afectar los terrenos de cultivo, carreteras, puentes, etc.

La mayor amenaza asociada a domos de lava radica en generar una explosión lateral dirigida ("blast"). Estos son fenómenos complejos que comparten características de flujos y oleadas piroclásticas. Pueden afectar amplios sectores de un volcán, de hasta 180 grados alrededor del cráter, y alcanzar distancias de decenas de kilómetros. Un ejemplo de esto ocurrió en 1980 en el Monte Saint Helens en EE. UU. (Decker & 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, originando 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.

El escenario que describe una erupción lateral dirigida en el volcán Sara Sara se basa en la existencia de un depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas, denominado "Diente de Caballo", que aflora a más de 18 km al suroeste y oeste del volcán Sara Sara. Este tiene más de 3 m de espesor y fue originado por una explosión lateral dirigida hace aproximadamente 162 000 años AP.

4.3.4 Erupción de tipo subpliniano (IEV 3–4)

Durante erupciones subplinianas, con IEV 3 (Figura 13), las columnas de tefras (ceniza, lapilli de pómez y escorias) y gases alcanzan entre 3 km y 20 km de altura sobre la cima del volcán y generan depósitos de caída de tefras y flujos piroclásticos (Sigurdsson et al., 2000). La tefra, influenciada por los vientos, es dispersada a decenas y centenas de kilómetros de distancia del volcán.

Existen algunos ejemplos de erupciones subplinianas de IEV 3 ocurridas recientemente en el continente sudamericano. Por ejemplo, el volcán Nevado del Ruiz (Colombia) generó en 1985 una erupción subpliniana de IEV 3, que dejó un depósito de ceniza en las áreas aledañas. Las isópacas de 1 cm de espesor se midieron a 35 km de distancia del volcán Nevado del Ruiz (Naranjo et al., 1986).

El volcán Tungurahua (Ecuador), el 16 de agosto de 2006, desarrolló una erupción subpliniana de IEV 3 (Figura 13), produciendo una columna eruptiva de gases y ceniza de aproximadamente 18 km de altura. Posteriormente, las cenizas fueron dispersadas a varias decenas de kilómetros del volcán, principalmente en direcciones norte y oeste. Se midieron capas de caídas de ceniza de 4 cm y 5 cm de espesor a 10 km de distancia del cráter (Eycheche et al., 2012).

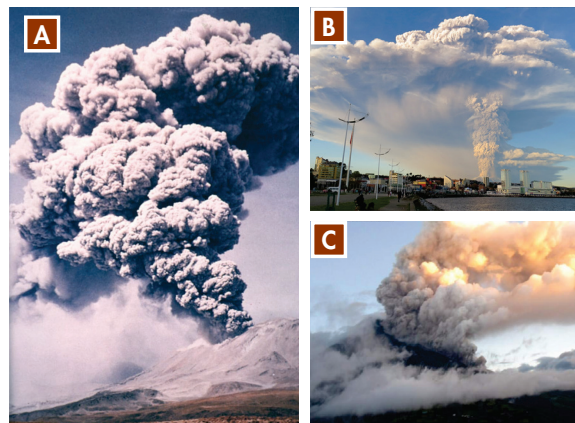


Figura 13. Vista de volcanes que presentaron erupciones explosivas subplinianas de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 3 y 4. A) Volcán Lascar: erupción del 19 de abril de 1993 (tomado de Ckelar Volcanes). B) Volcán Calbuco: erupción del 23 de abril de 2015 (fotografía: Barria C.). C) Volcán Tungurahua: erupción del 16 de agosto de 2006 (fotografía: Bustillos, J.).

Además, en la región Tacna, el volcán Yucamane, hace aproximadamente 3085 años AP, produjo una erupción subpliniana de IEV 3, con la generación de una columna eruptiva de aproximadamente 6 km a 7 km de altura sobre la cima del volcán. Esto dio lugar a un depósito de caída piroclástica de $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$, que tuvo un alcance de más de 30 km de distancia en dirección sureste. La erupción generó también un flujo piroclástico de $9 \times 10^6 \text{ m}^3$ que se extendió a 5 km al noreste del volcán (Rivera et al., 2020a).

Por otra parte, durante erupciones subplinianas de IEV 4, las columnas de tefras (ceniza, lapilli de pómez, etc.) y gases pueden alcanzar más de

20 km de altura sobre el cráter y generar depósitos de caída de tefra y flujos piroclásticos (Sigurdsson et al., 2000).

Existen algunos ejemplos de erupciones subplinianas de IEV 4 ocurridas recientemente en el continente sudamericano. Por ejemplo, al sur de Chile, el volcán Calbuco, durante los días 22 y 23 de abril de 2015 (Figura 13), produjo una erupción subpliniana de IEV 4 que generó una columna eruptiva de 15 km a 17 km de altura (Segura, 2016). El volumen de material emitido fue de 0.38 km³. Asimismo, se generaron flujos piroclásticos de 0.03 km³ que alcanzaron hasta 6 km de distancia al noreste del volcán (Castruccio et al., 2016; Romero et al., 2016).

El volcán Lascar (Chile), durante el 19 y 20 de abril de 1993 (Figura 13), generó una erupción subpliniana, de IEV 4, que produjo una columna eruptiva de lapilli de pómez, ceniza y gases de 25 km de altura, emitiendo un volumen total de 10⁸ m³ de magma (Pavez et al., 2006). Los flujos piroclásticos generados durante dicha erupción se emplazaron hasta 8.5 km de distancia al noroeste y 4 km al sureste de la cima del volcán (Spark et al., 1997). La pluma eruptiva fue arrastrada cientos de kilómetros de distancia hacia el sureste, llegando incluso hasta las costas atlánticas de Argentina y Brasil. Los máximos espesores medidos se encuentran en la ladera este del volcán Lascar, a 5 km del cráter, donde miden hasta 80 cm de espesor, con lapilli de pómez de hasta 0.4 m de diámetro. Los espesores medidos disminuyen rápidamente a medida que se alejan del cráter, alcanzando entre 3 cm y 5 cm de espesor en laguna Aguas Calientes, a 25 km al sureste del cráter; 1 cm a 3 cm en el Alto del Lari, a 45 km del volcán; y 1 cm en Paso de Sico, a 70 km al sureste del volcán Lascar (Viramonte et al., 1995).

También puede mencionarse la erupción del volcán Reventador (Ecuador) del 3 noviembre de 2002, la cual tuvo un IEV 4. Esta erupción generó una columna eruptiva de 17 km de altura. En esta ocasión, la ceniza llegó hasta Quito, a más de 80 km al oeste del volcán, dejando un depósito milimétrico y forzando el cierre por 10 días del antiguo aeropuerto Mariscal Sucre. Los flujos piroclásticos bajaron por las quebradas del volcán hasta el río Quijos y destruyeron partes del oleoducto en construcción. El volumen de la caída piroclástica fue de 0.3 km³ y el de los depósitos de flujos piroclásticos fue de 0.04 km³ (Le Pennec et al., 2003; Hall et al., 2004).

En el pasado, en la región Moquegua, los volcanes Ubina y Ticsani también presentaron erupciones subplinianas. La erupción subpliniana del volcán Ticsani, de IEV 4, emplazó depósitos de caída a más de 50 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003). En esa línea, el volcán Sara Sara puede eventualmente generar este tipo de erupción explosiva de IEV 4, cuyas cenizas podrían llegar a dispersarse a varias centenas de kilómetros de distancia respecto al volcán, como se detalla en el ítem 5.3.

Cabe mencionar que en un escenario eruptivo de IEV 3–4 también es posible el desarrollo de flujos piroclásticos o corrientes de densidad piroclástica (PDC) que serían canalizados en quebradas y valles aledaños al volcán. Además, los productos calientes emitidos durante una erupción explosiva de IEV 3–4 podrían interactuar con el casquete glaciar o la cobertura de nieve y generar lahares que descenderían por las quebradas que surcan el volcán.

4.3.5 Erupción de tipo pliniano (IEV 5)

Las erupciones plinianas son las más explosivas y violentas, debido a que el magma que las genera es silíceo, viscoso y posee alto contenido de gases. En dichas erupciones, las columnas eruptivas pueden alcanzar alturas mayores a 20 km y los materiales emitidos pueden caer y afectar más de 800 km² (Cas & 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, así como oleadas piroclásticas. También es frecuente encontrar lahares asociados a este tipo de erupciones, los mismos que alcanzan decenas a cientos de kilómetros de distancia respecto al volcán.

En el sur del Perú, los volcanes Misti, Ubina, Ticsani, Yucamane, Ampato, Sara Sara y Chachani han presentado en el pasado erupciones plinianas (Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Harpel et al., 2011; Mariño & Thouret, 2003; Samaniego et al., 2016; Rivera et al., 2020a; Aguilar et al., 2022). La erupción de hace 2000 años AP del volcán Misti fue de tipo pliniano (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. De igual manera, la erupción generó flujos piroclásticos de pómez y ceniza que poseen espesores mayores a 3 m, a más de 11 km del cráter (Cobeñas et al., 2012). Asimismo, la erupción produjo lahares que alcanzaron más de 20 km de distancia del volcán (Thouret et al., 2001).

En el pasado, hace más de 14 000 años, el volcán Sara Sara ha presentado recurrentemente erupciones plinianas, cuyos depósitos se distinguen en sus inmediaciones. En tal sentido, en el futuro, dicho volcán puede presentar una erupción pliniana de IEV 5 con emisión de tefras (lapilli de pómez y ceniza) y flujos piroclásticos. La tefra expelida viajaría cientos de kilómetros de distancia alrededor del volcán, causando impacto en los poblados, ganados, tierras de cultivo, obras de infraestructura (reservorios de agua, canales de agua, etc.), entre otros. Los poblados más afectados por la caída de cenizas y lapilli de pómez serían aquellos localizados en las provincias de Páucar del Sara Sara, Puyusca (Ayacucho) y La Unión (Arequipa). Por su parte, los flujos piroclásticos podrían afectar poblados como Cayarac, Huachipa, Huancara, Quilcata, Acoquipa, Pausa, Tonsio, Casire, Huancara, Marán y otros poblados menores localizados entre 6 km y 12 km del Sara Sara, así como obras de infraestructura (canales de agua, carreteras, etc.) y terrenos de cultivos ubicados cerca del volcán.

Una erupción pliniana del Sara Sara también puede generar lahares, especialmente si los flujos piroclásticos se emplazan sobre la cobertura de hielo y nieve, lo que originaría la fusión de hielo y nieve que gran parte del año yacen en la cima y las laderas del volcán. Los lahares también podrían ocurrir luego de la erupción, ligados a lluvias intensas que descenderían por las diversas quebradas que surcan los flancos del volcán, sobre todo por aquellos ubicados al oeste, suroeste, este y sureste, causando graves daños a los terrenos de cultivo, carreteras, puentes, etc. Durante una erupción pliniana, el alcance de los lahares sería mayor de 20 km.

Esta versión se basa en la presencia de los diversos depósitos de lahares que se encuentran en las quebradas localizadas en el flanco oeste del volcán Sara Sara (quebradas Putaca, Angostura, Cule, Ullacha, etc.). El alcance de los lahares sería de varias decenas de kilómetros de distancia. Por ejemplo, el lahar de la erupción pliniana del volcán Misti, de hace 2000 años AP, tiene casi 1 m de espesor a 16 km al suroeste de la cima del volcán Misti (Harpel et al., 2011).

4.3.6 Colapso de flanco y emplazamiento de avalancha de escombros

Diversos depósitos de avalanchas de escombros se han identificado en varios volcanes del sur del Perú, como en el Pichu Pichu, Ticsani, Misti, Tutupaca, Yucamane y Ubinas (Mariño & Thouret, 2003; Rivera et al., 1998; Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2015; Rivera et al., 2020b).

El volcán Ticsani, en el Pleistoceno superior, colapsó y dio lugar a un depósito de avalancha de escombros que se canalizó a lo largo del río Putina. Este flujo habría alcanzado cerca de 40 km de distancia, tras lo cual se transformó en lahar, canalizándose por el río Tambo hasta llegar al océano Pacífico, situado a más de 150 km de distancia (Mariño & Thouret, 2003).

El volcán Sara Sara presenta al menos tres depósitos de avalanchas de escombros ubicados en su entorno. Uno de ellos, ligado a una explosión lateral dirigida, ocurrió hace 162 ± 20 ka AP. Dicha explosión generó el colapso del sector occidental del volcán y, a la vez, un depósito de flujos de bloques y ceniza denominado "Diente de caballo". Dicho depósito alcanzó una distancia de más de 18 km al suroeste y oeste del volcán Sara Sara. Este depósito mide 20 m de espesor a más de 12 km al oeste del volcán. Asimismo, se distingue el depósito de avalancha "Renco", a 12 km al noreste del volcán, sobre el cual se halla asentada la localidad de Pausa.

Durante una erupción explosiva importante puede ocurrir el colapso o derrumbe de un sector del volcán Sara Sara. Si colapsara el flanco noreste o este, las avalanchas viajarían hasta 13 km de distancia en dirección al río Marán. Si el colapso fuera del flanco oeste, las avalanchas viajarían poco más de 9 km de distancia, mientras que, si el colapso fuese del flanco norte, la avalancha alcanzaría los 10 km de distancia, aproximadamente. Finalmente, si el colapso fuese del sector sur, la avalancha recorrería entre 4 km y 6 km de distancia respecto al volcán Sara Sara.

5. Resultados: mapas de peligros del volcán Sara Sara

Se presentan cinco mapas de peligros que consideran una erupción del volcán Sara Sara. Estos corresponden al mapa de peligros múltiples para la zona proximal; 2) mapa de peligros por caída de ceniza para un escenario de erupción explosiva leve a moderada, de tipo vulcaniano (IEV 1–2); 3) mapa de peligros por caída de tefras para un escenario de erupción explosiva de tipo subpliniano (IEV 3–4); 4) mapa de peligros por caída de tefras para un escenario de gran erupción explosiva de tipo pliniano (IEV 5); y 4) mapa de peligros por lahares.

Para una mejor visualización, cuatro de estos mapas, a diferente escala, han sido integrados en un solo formato (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 áreas que cubrirían dichos eventos fueron integradas, producto del cual se tiene el mapa principal que considera peligros múltiples (Figura 14). Además, las zonas de alto, moderado y bajo peligro fueron determinadas con base en escenarios eruptivos establecidos en función del Índice de Explosividad Volcánica (IEV).

5.1.1 Zona de alto peligro (rojo)

Comprende el área proximal, ligeramente alargada de norte a sur, que involucra el cono volcánico y diversas quebradas que drenan del volcán Sara Sara, 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, incluso las de bajo Índice de Explosividad Volcánica (IEV 1–2).

Los límites de la zona de alto peligro se prolongan hasta 5 km al oeste, 9 km al norte, 4 km al sur y 7 km al este del volcán Sara Sara (Figura 14). Las mayores distancias se encuentran en los sectores norte y noreste del volcán Sara Sara.

Los límites de la zona de alto peligro coinciden con el alcance de un gran número de flujos de lavas del Sara Sara que se encuentran entre 1 km y 5 km de distancia desde su punto de emisión. Por otro lado, en varios volcanes del sur del Perú, como el Ubinas o Sabancaya, los proyectiles balísticos emitidos durante erupciones vulcanianas (IEV 1–2) recientes han alcanzado distancias limitadas a las zonas muy proximales al cráter, típicamente menores a 3 km. Además, en una eventual erupción explosiva de tipo vulcaniano pueden generarse flujos piroclásticos que cubrirán la zona de alto peligro. El 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, flujos de lava, proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares generados durante erupciones de bajo Índice de Explosividad Volcánica (IEV 1–2).

5.1.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Comprende los flancos del volcán Sara Sara, zonas de laderas, quebradas y los valles de los ríos Pararca y Marán. Esta zona de peligro se extiende hasta 4 km a 5 km de distancia al sur del volcán Sara Sara; 5 km a 11 km de distancia al oeste, 7 km a 18 km al este y 9 km a 10 km al norte de dicho volcán (Figura 14). Esta zona puede ser cubierta por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares y avalanchas de escombros en caso de una erupción explosiva de tipo subpliniano (IEV 3–4).

Se consideró este escenario debido a que erupciones subplinianas han ocurrido previamente en el volcán Sara Sara. Además, en las últimas décadas han ocurrido erupciones subplinianas de IEV 4 en el continente sudamericano, como la presentada por el volcán Lascar (Chile) en abril de 1993, durante la cual se generaron flujos piroclásticos que viajaron hasta 8.5 km de

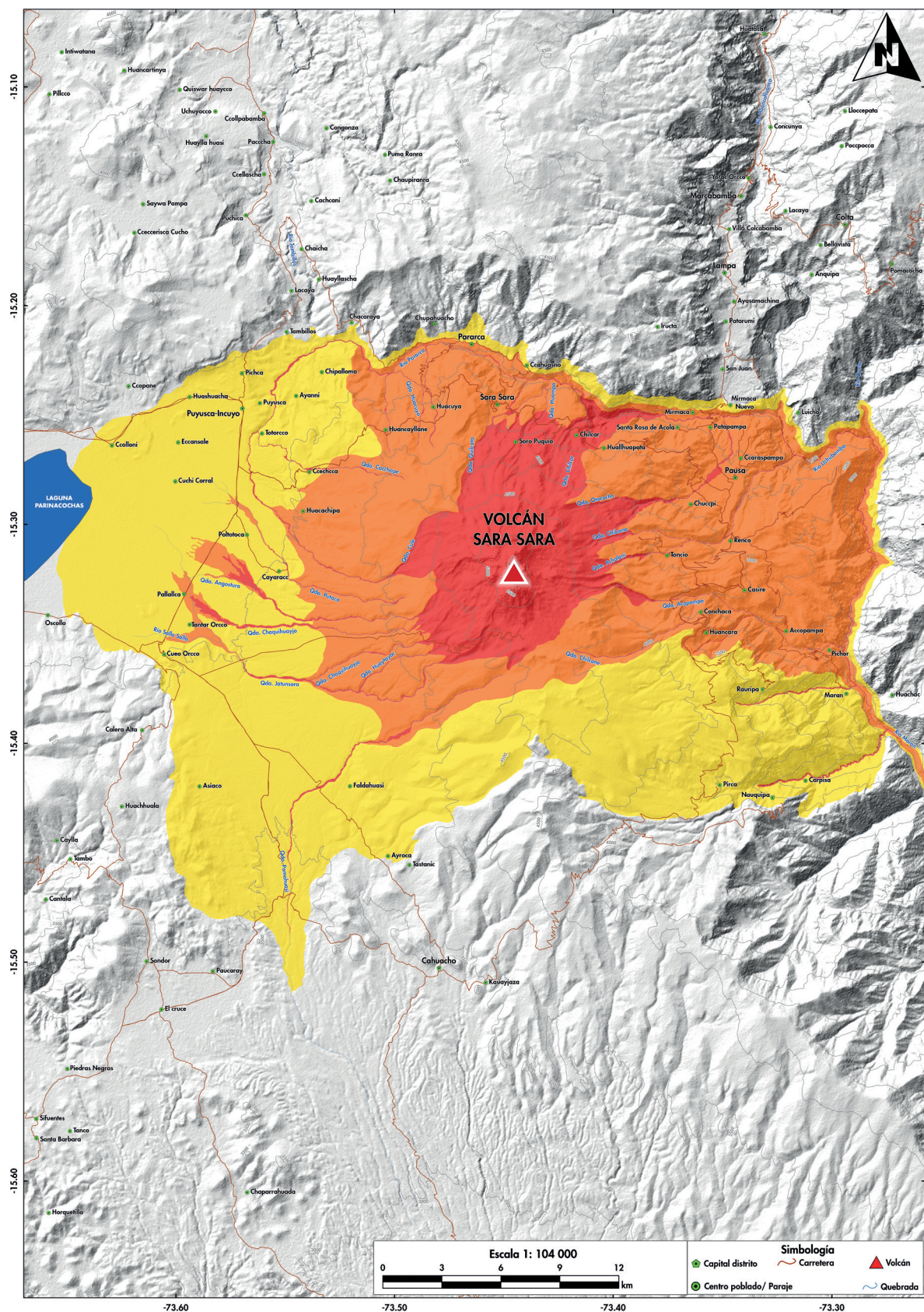


Figura 14. Mapa de peligro múltiple del volcán Sara Sara para la zona proximal, en el cual se muestran las zonas de peligro que pueden ser afectadas por el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas de escombros, lahares y eycción de proyectiles balísticos.

distancia al noroeste y 4 km al sureste de la cima del volcán (Spark et al., 1997). En tal sentido, los límites obtenidos mediante la simulación y estudios de campo coinciden con el alcance de flujos piroclásticos reales.

Los límites de la zona de moderado peligro también coinciden con el alcance de algunos flujos de lava emitidos por el volcán Sara Sara, que se encuentran entre 6 km y 15 km de distancia desde su punto de emisión.

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 de la nieve que eventualmente se encuentra en la cima del volcán Sara Sara podrían generarse lahares que afectarían las partes bajas de la zona.

En resumen, la zona de moderado peligro (naranja) puede ser afectada por flujos piroclásticos, avalanchas de escombros y lahares generados durante erupciones explosivas de IEV 3–4, al igual que por flujos de lavas.

5.1.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro se proyecta entre 10 km y 11 km de distancia hacia el norte, 18 km y 19 km al este, 11 km y 21 km al oeste, y 5 km y 7 km al sur del volcán Sara Sara. La zona de bajo peligro puede ser afectada por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares y avalanchas de escombros, en caso de que la erupción explosiva sea muy importante o de tipo pliniano (IEV 5).

Los alcances antes descritos coinciden con el alcance de algunos flujos piroclásticos emitidos por el volcán Sara Sara, como el depósito de flujo piroclástico “Diente de caballo” que se encuentra a 15 km al oeste del volcán Sara Sara, donde mide 5 m de espesor. Asimismo, coincide con el alcance de flujos piroclásticos que se distinguen en la zona de Mirmaca, a 13 km del volcán, donde miden 4 m de espesor (Rivera et al., 2020a). Un eventual colapso o derrumbe de un sector del flanco del volcán puede generar avalanchas de escombros que afectarían dicha zona. De igual forma, durante lluvias intensas o fusión de la nieve presente en la cima del Sara Sara podrían generarse lahares que afectarían esta zona.

En resumen, la zona de bajo peligro (amarillo) puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante una erupción importante

de tipo pliniano (IEV 5). Igualmente, puede ser afectada por avalanchas de escombros y lahares voluminosos. La probabilidad de ocurrencia de una erupción pliniana en el Sara Sara es baja.

5.2 Mapa de peligros por caídas de cenizas durante una erupción vulcaniana (IEV 1–2)

El mapa de peligros por caídas de ceniza para un escenario de erupción vulcaniana del volcán Sara Sara 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 (Figura 15). Los límites de las zonas se basan en los resultados obtenidos de 1080 simulaciones de dispersión de tefras para un escenario de erupción de tipo vulcaniano.

5.2.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal y tiene forma elíptica. Se extiende a 18 km al sureste y 19 km al noreste del volcán Sara Sara (Figura 15). Durante erupciones vulcanianas de IEV 2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros a varios milímetros de espesor.

El área de alto peligro es consistente con la zona cubierta por cenizas del volcán Sabancaya, el cual, entre los años 1988–1998, presentó actividad eruptiva de tipo vulcaniano de IEV 1–2 que emitió ceniza a la atmósfera, la cual posteriormente cayó y formó una capa de ceniza varios milímetros de espesor a menos de 20 km al este del volcán. Esta delimitación se basa en la dispersión de cenizas de la erupción actual del volcán Sabancaya (2016–2025), cuyos depósitos alcanzan espesores de 1 mm a 20 km al este del cráter.

5.2.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Esta zona tiene una configuración elíptica. Los límites de la zona de moderado peligro se hallan entre 18 km a 82 km al sureste, y 19 km a 80 km al noroeste del volcán Sara Sara (Figura 15). Durante erupciones vulcanianas de IEV 1–2, esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de varios milímetros de espesor.

El área de moderado peligro es consistente con la zona cubierta por cenizas del volcán Sabancaya, el cual presentó, entre los años 1988–1998, actividad eruptiva de tipo vulcaniano (IEV 2) que emplazó una capa de ceniza de 1 mm de espesor a 30 km al este del volcán (Thouret et al., 1994). Asimismo, se basa en la dispersión de cenizas de la erupción actual del volcán Sabancaya (2016–2025) que presenta depósitos de ceniza de 1 mm de espesor a 20 km al este del volcán.

5.2.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro tiene una configuración elíptica respecto al volcán Sara Sara. Los límites se hallan entre 82 km a 259 km al sureste, y 80 km a 151 km al noreste del volcán Sara Sara (Figura 15). Durante erupciones vulcanianas de IEV 1–2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de hasta 1 mm de espesor.

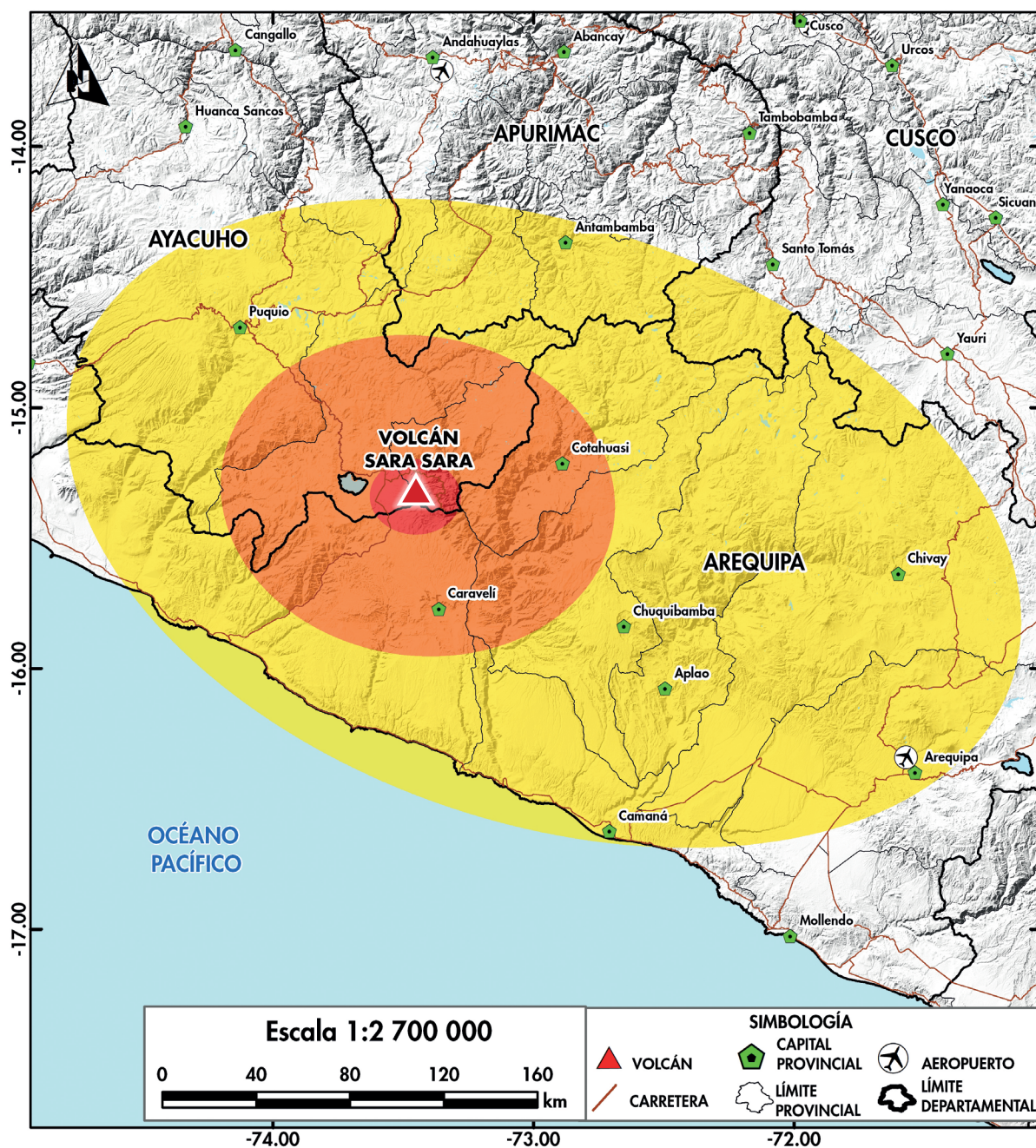


Figura 15. Mapa de peligros por caída de ceniza del volcán Sara Sara para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano de IEV 1–2 (simulación USGS, 2025).

Dichas estimaciones son coherentes con los espesores de ceniza del volcán Ubinas luego de la erupción del 19 de julio de 2019. En aquel entonces, se midió una capa de ceniza de 1 mm de espesor a 20 km al sureste del cráter de dicho volcán (Aguilar et al., 2019). Durante dicha erupción, las cenizas viajaron a más de 250 km de distancia en direcciones este y sureste, atravesando la frontera Perú-Bolivia.

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

El mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de erupción subpliniana del volcán Sara Sara, 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 (Figura 16). Los límites se basan en los resultados obtenidos de 1080 simulaciones de dispersión de tefras para un escenario de erupción de tipo subpliniano.

5.3.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro tiene una configuración elíptica y comprende toda el área ubicada en las proximidades del volcán Sara Sara. Dicha zona se prolonga hasta 77 km al noroeste y 76 km al sureste de la cima del volcán (Figura 16). Durante una erupción subpliniana de IEV 3–4, esta zona de alto peligro podría ser afectada por la caída de ceniza y lapilli de pómez que formarían una capa que podría superar los 30 cm de espesor.

Dicha estimación es similar a la erupción subpliniana de IEV 3 del volcán Tungurahua (Ecuador) de agosto de 2006. En aquel entonces, 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).

Por otro lado, las tefras generadas durante una erupción subpliniana de IEV 4 podrían afectar esta zona de alto peligro y formarían una capa de lapilli de pómez de varios centímetros a algunos metros de espesor (Figura 16). Dicha hipótesis se basa en los espesores de caídas piroclásticas dejadas por la erupción subpliniana de IEV 4 del volcán Lascar (Chile), ocurrida en abril de 1993, luego de la cual se midió una capa de 80 cm de espesor a 5 km del cráter, donde se

midieron también bloques de pómez de hasta 40 cm de diámetro. Los espesores de ceniza medidos disminuyen a medida que se alejan del cráter, alcanzando entre 3 cm y 5 cm de espesor a 25 km al sureste del cráter; 1 cm a 3 cm a 45 km del volcán; 1 cm a 70 km al sureste del volcán Lascar (Viramonte et al., 1995).

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 Sara Sara, y se prolonga de 77 km a 215 km al noroeste, y 76 km a 342 km al sureste de la cima del volcán Sara Sara (Figura 15). Durante erupciones subplinianas de IEV 3–4, esta zona de moderado peligro puede ser afectada por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor.

Dicha estimación es similar al área afectada por las cenizas emitidas por el volcán Lascar (Chile), durante la erupción subpliniana (IEV 4) ocurrida en abril de 1993. En aquel entonces, las cenizas fueron arrastradas a cientos de kilómetros de distancia hacia el sureste, llegando incluso hasta las costas atlánticas de Argentina y Brasil. Se reportó una capa de 1 cm de ceniza en Paso de Sico, a 70 km al sureste del volcán Lascar (Viramonte et al., 1995).

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 volcán, y se prolonga de 215 km a 478 km al noroeste y más de 480 km al sureste, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia (Figura 16). Los vientos influenciarían en la distribución de la caída de ceniza. En la zona de bajo peligro podrían depositarse cenizas de algunos milímetros de espesor.

Esta estimación es similar a lo ocurrido el 4 de abril de 1993 durante la erupción subpliniana de IEV 4 del volcán Lascar (Chile), durante la cual las cenizas emitidas fueron arrastradas por los vientos a cientos de kilómetros de distancia hacia el sureste, llegando incluso hasta las costas atlánticas de Argentina y Brasil. Se reportó 1 cm de ceniza en Paso de Sico, a 70 km al sureste del volcán Lascar (Viramonte et al., 1995).

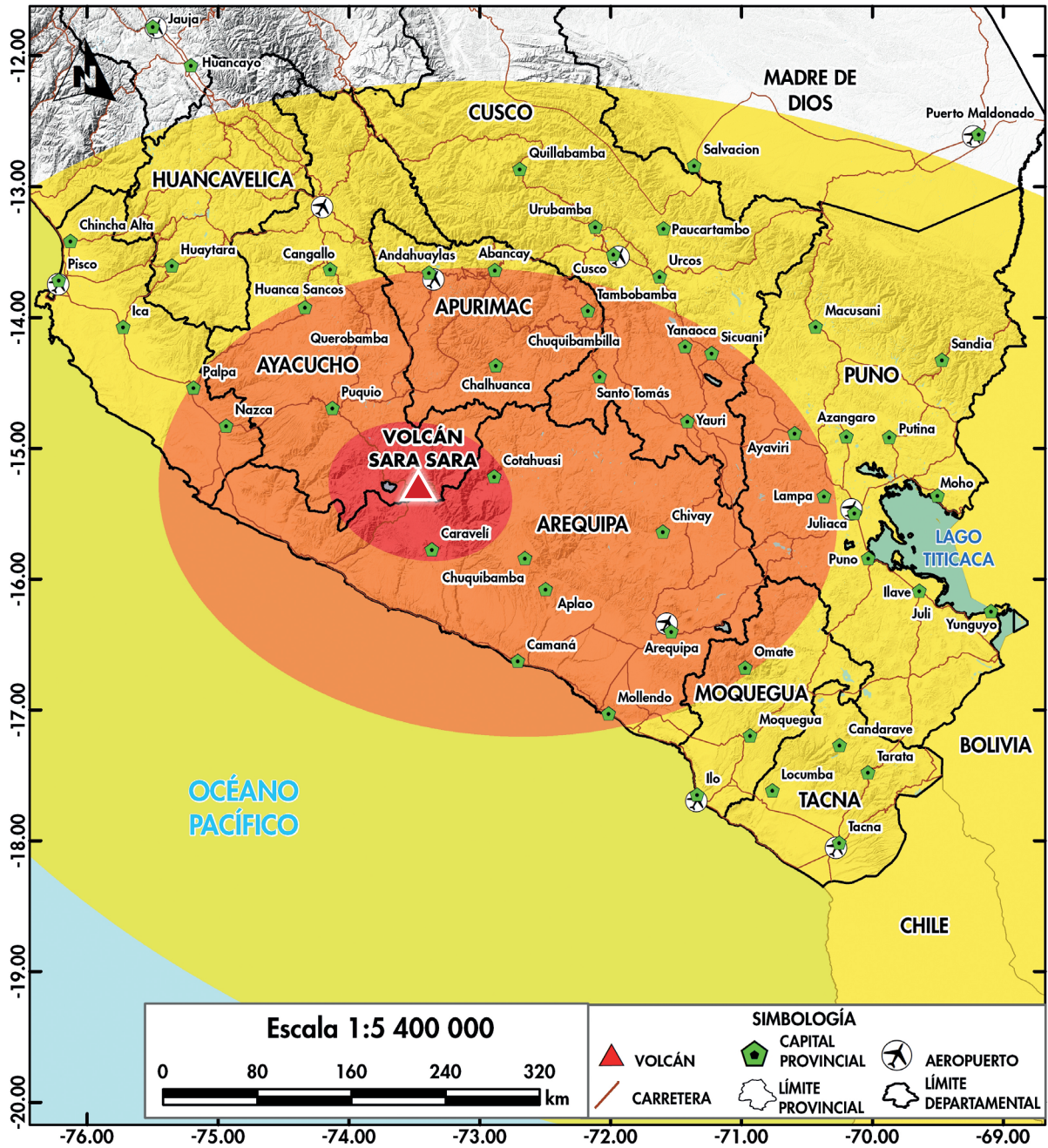


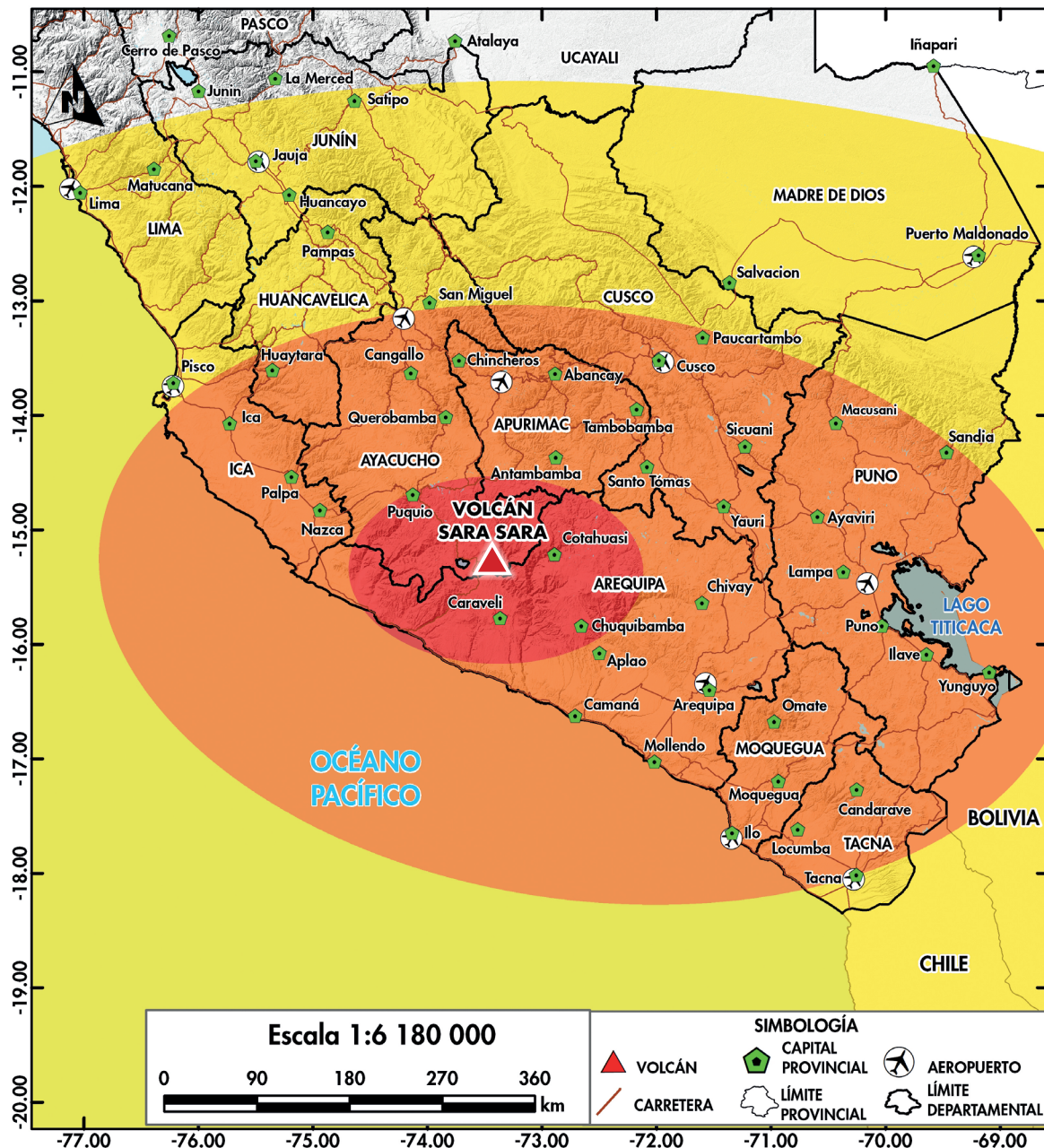
Figura 16. Mapa de peligro por caída de tefras del volcán Sara Sara para un escenario eruptivo de tipo subpliniano de IEV 3-4 (simulación USGS, 2025).

5.4. Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción pliniana (IEV 5)

En inmediaciones del volcán Sara Sara se encuentran depósitos asociados a erupciones plinianas, con espesores entre 6 m y 7 m. Aunque en la actualidad el Sara Sara registra incipiente

actividad volcánica, la posibilidad de ocurrencia de una erupción de tal magnitud en el mediano o largo plazo es muy baja.

El mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de erupción pliniana del volcán Sara Sara 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 (Figura 17).



5.4.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro tiene forma elíptica y corresponde al área proximal. Se prolonga hasta una distancia de 133 km al oeste y 143 km al este del volcán Sara Sara (Figura 17). Durante erupciones plinianas de IEV 5, esta área puede ser afectada por caídas de lapilli de pómez que formarían una capa de algunos metros a decímetros de espesor. Este escenario puede ser similar a la depositación de lapilli de pómez presentada por el volcán Sara Sara en el

Pleistoceno superior y por el volcán Misti hace 2000 años AP. En efecto, en la última erupción pliniana de IEV 5 del volcán Misti, ocurrida hace 2000 años, se depositó una capa de lapilli de pómez de 70 cm de espesor a 7 km al suroeste del coloso (Harpel et al., 2011).

5.4.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Los límites de la zona de moderado peligro

se hallan aproximadamente entre 133 km a 368 km de distancia al noroeste del volcán, y 143 km a 551 km al sureste de la cima del Sara Sara (Figura 17). Durante erupciones plinianas de IEV 5, esta área puede ser afectada por una capa de lapilli de pómez y ceniza de más de 10 cm de espesor, pero no mayores a lo estimado en el escenario de alto peligro.

Este escenario podría ser similar a la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace 2000 años A., la cual dejó depósitos de caída de lapilli de pómez de 20 cm a una distancia de 13.5 km al suroeste del cráter (Cobeñas et al., 2012).

5.4.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro tiene una configuración elíptica y se halla a más de 368 km de distancia al noroeste y más de 551 km al sureste de la cima del volcán Sara Sara, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia (Figura 17). Por el norte, dicha zona se extiende de 254 km a 470 km de distancia del volcán Sara Sara. Durante una erupción pliniana de IEV 5, esta área puede ser afectada por caídas de lapilli de algunos centímetros a varios milímetros de espesor.

Esta estimación es similar a la zona afectada durante la erupción pliniana de IEV 5 del volcán Mount Saint Helens (Washington, EE. UU.) de 1980, que generó una columna de lapilli de pómez de aproximadamente 19 km de altura. Posteriormente, el lapilli de pómez y la ceniza viajaron hacia el este del volcán, a través de los Estados Unidos, y causaron oscuridad total en Spokane, Washington, a 400 km del volcán. Se reportó 1.3 cm de espesor de ceniza a 480 km del volcán (Harris, 1988).

5.5 Mapa de peligros por lahares

En el sur del Perú se han realizado pocas estimaciones de volúmenes de lahares; por ello, solo se cuenta con valores correspondientes a los lahares que descienden por las quebradas que surcan los flancos del volcán Misti, así como del río Chili, que discurre entre los volcanes Misti y Chachani (Delaite et al., 2005). En este volcán, volúmenes máximos de lahares del orden de 1.5 a 4 millones de m^3 estarían asociados a erupciones explosivas de tipo vulcaniano (IEV 1–2), mientras que lahares con volúmenes del orden de 9 a 10 millones de m^3 estarían

relacionados a erupciones explosivas de alto Índice de Explosividad Volcánica (IEV ≥ 3), las cuales son menos frecuentes y ocurren cada 1000 a 5000 años (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, asociados a lluvias intensas, considera tres volúmenes de lahar de 150 000 m^3 , 350 000 m^3 y 500 000 m^3 .

Tomando en consideración dichos datos y las condiciones meteorológicas que imperan en la zona del volcán Sara Sara, así como la existencia de una cobertura de hielo y nieve en gran parte del año, los volúmenes de los eventos laháricos escogidos fueron de 150 000 m^3 para lahares de poco volumen, y que estimamos son más frecuentes, además de volúmenes de 350 000 m^3 y 500 000 m^3 para lahares de importante volumen, pero menos frecuentes.

En el mapa de peligros por lahares (Figura 18), la zona roja es considerada como zona de alto peligro y corresponde a la zona de mayor posibilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos (150 000 m^3), 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 (350 000 m^3). La zona amarilla es considerada de bajo peligro o de menor posibilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos (500 000 m^3). Los lahares voluminosos (350 000 m^3 y 500 000 m^3), en la mayoría de los casos, podrían estar asociados a erupciones de moderado o alto Índice de Explosividad Volcánica (IEV ≥ 3). Se debe recalcar que la posibilidad de ocurrencia de tales erupciones es baja.

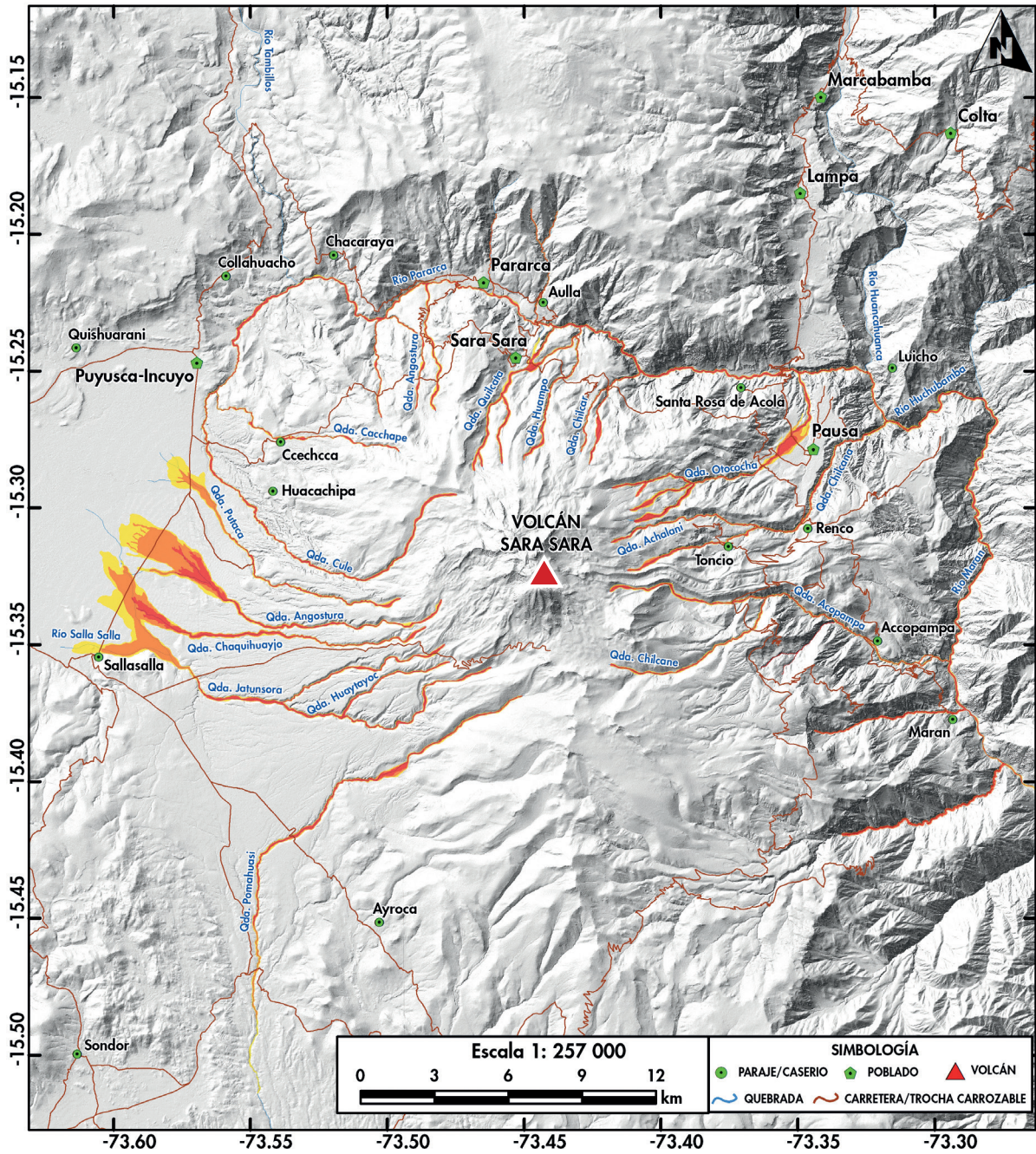


Figura 18. Mapa de peligro de lahares del volcán Sara Sara que considera tres tipos de peligro: alto (rojo), moderado (naranja) y bajo (amarillo).

Conclusiones□

- El volcán Sara Sara es un volcán potencialmente activo, ubicado en la región Ayacucho, al extremo norte de la Zona Volcánica Central de los Andes, el cual ha presentado erupciones explosivas importantes de tipo vulcaniano, subpliniano y pliniano durante el Pleistoceno medio a superior. Al final de su última etapa evolutiva, hace aproximadamente 14 000 años AP, presentó actividad efusiva con la emisión de flujos de lava dacíticos que recorrieron una distancia aproximada de 15 km en dirección este del volcán.
- En el volcán Sara Sara se han identificado seis escenarios eruptivos en caso de una reactivación o erupción volcánica. Los escenarios que tienen mayor posibilidad de ocurrir corresponden a erupciones efusivas con emisiones de flujos de lava, erupción vulcaniana (IEV 1–2), erupción con crecimiento y colapso de domos, erupción subpliniana (IEV 3–4), erupción pliniana (IEV 5) y colapso de flanco y emplazamiento de avalancha de escombros.
- Sobre la base de los estudios efectuados se presentan cinco mapas de peligros. Cuatro de estos mapas de peligro volcánico son incluidos dentro de un solo póster. Estos corresponden al 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 norte a sur. Esta zona se prolonga hasta 5 km al oeste, 9 km al norte, 4 km al sur y 7 km al este del volcán Sara Sara. La zona de moderado peligro (naranja) se encuentra inmediatamente colindante con la zona de alto peligro, entre 4 km y 5 km al sur, 5 km y 11 km al oeste, 7 km y 18 km al este y 9 km a 10 km al norte del volcán. La zona de bajo peligro (amarillo) está entre 10 km y 11 km al norte, 18 km y 19 km al este, 11 km y 21 km al oeste, y 5 km y 7 km al sur del volcán Sara Sara.
- En el mapa de peligros por caídas de cenizas asociadas a una erupción vulcaniana (IEV 1–2), la zona de alto peligro (rojo) se halla aproximadamente, a 18 km al sureste y 19 km al noreste del volcán Sara Sara. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de más de 1 cm de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se halla de 18 km a 82 km al sureste y de 19 km a 80 km al noroeste del volcán Sara Sara. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de varios milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, con distancias de 82 km a 259 km al sureste, y 80 km a 151 km al noroeste. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor.
- En el mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción subpliniana (IEV 3–4), la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se prolonga hasta 77 km al noroeste y 76 km al sureste del volcán Sara Sara. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez que formarían una capa de hasta 30 cm de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) comprende una distancia entre 77 km a 215 km al noroeste y 76 km a 342 km al sureste del volcán Sara Sara. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza desde varios centímetros a milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) comprende una distancia de 215 km a 478 km al noroeste y más de 480 km al sureste, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Esta zona puede ser afectada por la caída de cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de varios milímetros de espesor.
- En el mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción pliniana (IEV 5), la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se prolonga hasta 133 km al oeste y 143 km al este del volcán Sara Sara. Esta área puede ser afectada por la caída de cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de algunos metros a varios centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) comprende una distancia de 133 km a 368 km al noroeste y de 143 km a 551 km al sureste del volcán Sara Sara. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de varios decímetros a milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, cuyos límites se hallan a más de 368 km de distancia al noroeste y más de 551 km al sureste de la cima del volcán Sara Sara, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Esta zona puede ser afectada con cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de menos de 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 150 000 m³; la zona naranja, de moderado peligro, por lahares de 350 000 m³; mientras que la zona amarilla, de bajo peligro, por lahares de 500 000 m³, siendo estos últimos los más voluminosos, cuyo origen estaría asociado a la ocurrencia de erupciones explosivas importantes y lluvias intensas.
- Los mapas de peligro volcánico presentados en este estudio constituyen documentos técnicos útiles para las instituciones del SINAGERD, autoridades locales y regionales (Gobierno Regional de Ayacucho, municipalidades provinciales y distritales, etc.) y población, pues contribuirá para una adecuada formulación de proyectos de desarrollo, la elaboración de planes de prevención y el manejo de una eventual crisis volcánica del Sara Sara.

Referencias □

- Aguilar, R., Ortega, M., Manrique, N., Apaza, F., Rivera, M., & Harpel, C. (2019). *Characteristics of the beginning of the 2019 eruptive crisis at Ubinas volcano (Peru)* [Poster]. AGU 2019 Fall Meeting, 9–13 December 2019, San Francisco, CA, USA.
- Aguilar, R., Thouret, J.-C., Samaniego, P., Wörner, G., Jicha, B., Paquette, J.-L., Suaña, E., & Finizola, A. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: The Chachani Volcano Cluster, Southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 426, 107539. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107539>
- 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.
- Bignami, C., Bosi, V., Costantini, L., Cristiani, C., Lavigne, F., & Thierry, P. (2012). *Handbook for volcanic risk management: Prevention, crisis management, resilience*. MIAVITA Team.
- Blong, R. (1984). *Volcanic hazards: A sourcebook on the effects of eruptions*. Academic Press Australia.
- Blong, R. (2000). Volcanic hazard and risk management. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 1215–1228). Academic Press.
- Bustillos, J., & Samaniego, P. (2011). *Volcán Tungurahua: Tamaño de las erupciones explosivas*. 7mas Jornadas de Ciencias de la Tierra, Escuela Politécnica Nacional.
- Cárdenas, E. A., Porras, P., & Morales, L. Y. (2013). Using VolcFlow software to simulate pyroclastic flows from the Cerro Machín volcano, Tolima, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(2), 157–172.
- Carey, S. (1996). Modeling of tephra fallout from atmospheric eruptions. En L. Scarpa & R. Tilling (Eds.), *Monitoring and mitigation of volcanic hazards* (pp. 429–463). Springer-Verlag.
- Cas, R., & Wright, J. (1987). *Volcanic successions: Modern and ancient*. Allen & Unwin.
- Castruccio, A., Clavero, J., Segura, A., Samaniego, P., Roche, O., Le Pennec, J.-L., & Droguett, B. (2016). Eruptive parameters and dynamics of the April 2015 sub-Plinian eruptions of Calbuco volcano (Southern Chile). *Bulletin of Volcanology*, 78, 62. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1048-1>
- Cobeñas, G., Thouret, J.-C., Bonadona, C., & Boivin, P. (2012). The c. 2030 yr BP Plinian eruption of El Misti volcano, Peru: Eruption dynamics and hazard implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 241–242, 105–120.
- Cueva, K. (2016). *Estudio geológico, petrográfico y geoquímico del volcán Sara Sara (Ayacucho)* [Tesis de Ingeniero Geólogo]. Universidad Nacional de San Agustín.
- Decker, R., & Decker, B. (1989). *Volcanoes* (2nd ed.). W. H. Freeman & Co. <https://doi.org/10.1017/S0016756800014540>
- De Silva, S., & Francis, P. (1991). *Volcanoes of the Central Andes* (8.º ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1017/S0016756800008372>
- Delaite, G., Thouret, J.-C., Sheridan, B., Labazuy, 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. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband*, 209–231.
- 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). *Bulletin of Volcanology*, 74(1), 187–205.
- Francis, P. (1993). *Volcanoes: A planetary perspective*. Oxford University Press.
- Gerbe, M., & Thouret, J.-C. (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*, 66, 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.
- Gueugneau, V. (2014). *Évaluation du logiciel VolcFlow pour la simulation numérique de lahars et application aux risques associés* [Tesis de maestría]. Université Blaise Pascal Clermont II.

- Guillaude, R., Thouret, J.-C., Huamán, D., Gourgaud, A., & Le Guern, H. (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. L., Ramón, P., Mothes, P., Le Pennec, J.-L., García, A., Samaniego, P., & Yepes, H. (2004). Volcanic eruptions with little warning: The case of Volcano Reventador's surprise November 3, 2002 eruption, Ecuador. *Revista Geológica de Chile*, 31, 349–358.
- 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*, 260, 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. En *Geological Society of America (Ed.), Special Papers (Vol. 484, pp. 1–72)*.
- Harris, S. L. (1988). *Fire mountains of the West: The Cascade and Mono Lake volcanoes*. Mountain Press Publishing Company.
- Hoblitt, R., Walder, J., Driedger, C., Scott, K., Pringle, P., & Vallance, J. (1995). *Volcano hazards from Mount Rainier* (Open-File Report 95-273). U.S. Geological Survey.
- INEI. (2018). *Censos Nacionales XII de Población y VII de Vivienda: Resultados definitivos*.
- Iverson, R., Schilling, S., & Vallance, J. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110, 972–984.
- Kelfoun, K., & Druitt, T. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 110, B12202. <https://doi.org/10.1029/2004JB003270>
- Kelfoun, K., & Vallejo, S. (2016). VolFlow capabilities and potential development for the simulation of lava flows. En A. J. L. Harris, G. De Michele, F. Garel, & S. A. Carn (Eds.), *Detecting, modelling and responding to effusive eruptions* (pp. 337–343). Geological Society.
- Le Pennec, J.-L., Hidalgo, S., Samaniego, P., Ramón, P., Yepes, H., & Eissen, J.-P. (2003). Magnitud de la erupción del 3 de noviembre del 2002 del volcán El Reventador. En *Memorias de las Quintas Jornadas en Ciencias de la Tierra* (pp. 97–99). Escuela Politécnica Nacional.
- Le Pennec, J.-L., Rivera, M., Rupelle, A., Cueva, K., Soncco, Y., & Vela, J. (2016). Discovery of a large resurgent caldera at Incahuasi, southern Ayacucho Province, Peru. *XVIII Congreso Peruano de Geología*.
- Machacca, R., Lesage, P., Tavera, H., Pesicek, J., Caudron, C., Torres, J., Puma, N., Vargas, K., Lazarte, I., Rivera, M., & Burgisser, A. (2023). The 2013–2020 seismic activity at Sabancaya Volcano (Peru): Long lasting unrest and eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 435, 107767.
- Malin, M., & Sheridan, M. (1982). Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 217(4560), 637–640.
- Mariño, J., & Thouret, J.-C. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 1–27. <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.
- Ministerio del Ambiente. (2016). *Definiciones conceptuales de los ecosistemas en el Perú*. https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/definiciones_ecosistemas_peru.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2019). *Sexto informe nacional sobre diversidad biológica: La biodiversidad en cifras*. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/281709-sexto-informe-nacional-sobre-diversidad-biologica>
- Ministerio de Cultura. (2025). *Base de datos de pueblos indígenas u originarios*. <https://bdpi.cultura.gob.pe/buscador-de-localidades-de-pueblos-indigenas>
- Ministerio de Educación. (2024). *Estadística de la calidad educativa*. <https://escale.minedu.gob.pe/padron-de-iiee>

- Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo. (2020). *Resultados de la Encuesta Nacional de Hogares sobre Condiciones de Vida y Pobreza (ENAHO) 2004–2020*. <https://www.gob.pe/institucion/mtpe/informes-publicaciones/3135305-informacion-estadistica-del-mercado-de-trabajo-de-regiones-mayo-2022>
- Nakada, S. (2000). Hazards from pyroclastic flows and surges. En H. Sigurdsson, B. F. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 945–955). Academic Press.
- Naranjo, J., Sigurdsson, 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.
- Pavez, A., Remy, D., Bonvalot, S., Diament, M., Gabalda, G., Froger, J.-L., Julien, P., Legrand, D., & Moisset, D. (2006). Insight into ground deformations at Láscar volcano (Chile) from SAR interferometry, photogrammetry, and GPS data. *Remote Sensing of Environment*, 100, 307–320.
- Rivera, M., Cueva, K., Le Pennec, J., Vela, J., Samaniego, P., Manrique, N., & Soncco, Y. (2020a). *Geología y evaluación de los peligros del volcán Sara Sara (Ayacucho)* [Boletín Serie C: Geología e Ingeniería Geológica, N.º 78]. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Rivera, M., Samaniego, P., Vela, J., Le Pennec, J.-L., Guillou, H., Paquette, J., & Liorzou, C. (2020b). 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, 106842.
- Rivera, M., Thouret, J.-C., Samaniego, P., & Le Pennec, J.-L. (2014). The 2006–2009 activity of Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge, and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 270, 122–141.
- Rivera, M., Thouret, J.-C., & Gourgaud, A. (1998). Ubinas, el volcán más activo del Perú desde 1550: Geología y evaluación de las amenazas volcánicas. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 88, 53–71.
- Romero, J. E., Morgavi, D., Arzilli, F., Daga, R., Caselli, A., Reckziegel, F., Naranjo, J. A., & Perugini, D. (2016). Eruption dynamics of the 22–23 April 2015 Calbuco volcano (Southern Chile): Analyses of tephra fall deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 317, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.02.002>
- 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. <https://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). <https://doi.org/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: Solid Earth*, 117. <https://doi.org/10.1029/2011JB008968>
- Segura, A. (2016). *Erupción subpliniana de abril de 2015 del volcán Calbuco, Andes del Sur: Génesis, dinámica y parámetros físicos de la columna eruptiva y depósitos piroclásticos de caída asociados* [Tesis de maestría]. Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142799>
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., & Stix, J. (Eds.). (2000). *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press.

- Soncco, Y. (2017). *Evaluación de peligros volcánicos del volcán Sara Sara* [Tesis de Ingeniero Geólogo]. Universidad Nacional de San Agustín.
- Spark, R. S. J., Gardeweg, M. S., Calder, E., & Matthews, S. J. (1997). Erosion by pyroclastic flows on Lascar Volcano, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 58(7), 557–565.
- Suzuki, T. (1983). A theoretical model for dispersion of tephra. En D. Shimozuru & I. Yokoyama (Eds.), *Arc volcanism: Physics and tectonics* (pp. 93–113). Terra Scientific Publishing Company.
- Thouret, J.-C., Jicha, B., Paquette, J.-L., & Cubukçu, E. (2016). A 25 Myr chronostratigraphy of ignimbrites in south Peru: Implications for the volcanic history of the Central Andes. *Journal of the Geological Society*, 173, 734–756.
- Thouret, J.-C., Rivera, M., Wörner, G., Gerbe, M., Finizola, A., Fornari, M., & Gonzales, K. (2005). Ubinas: The evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 67, 557–589.
- Thouret, J.-C., Arapa, E., Charbonnier, S., Guerrero, A., Kelfoun, K., Córdoba, 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. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.865989>
- 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., Guillaude, 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 de la Société Géologique de France*, 165(1), 49–63.
- Thouret, J.-C., Davila, J., & Eissen, J.-P. (1999). Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, A.D. 1600, southern Peru. *Geology*, 27, 435–438.
- Tilling, R. (1989). Volcanic hazards and their mitigation: Progress and problems. *Reviews of Geophysics*, 27(2), 237–269.
- Vargas-Franco, R., Thouret, J.-C., Delaite, G., van Westen, C., Sheridan, M. F., Siebe, C., & otros. (2010). Mapping and assessing volcanic hazards and risk in the city of Arequipa, Peru, based on GIS techniques. En G. Gropelli & L. Viereck-Goette (Eds.), *Stratigraphy and geology of volcanic areas* (pp. 265–280). Geological Society of America.
- Vásconez, F., Vásconez, R., & Mothes, P. (2019). Flujos de lodo del volcán Carihuairazo provocados por el terremoto de Ambato (Ecuador) en 1698 y su reconstrucción numérica con perspectivas a futuro. *Revista Geofísica*, 69, 11–29. <https://doi.org/10.35424/rgf.v0i69.823>
- Viramonte, J., Becchio, R., Bolli, M. I., Petrinovic, I., Seggiaro, R., & Tejada, A. (1995). *Informe sobre la erupción del volcán Lascar de abril de 1993*. Instituto Geonorte, UNSA.
- Warwick, R., Williams-Jones, G., Kelman, M., & Witter, J. (2022). A scenario-based volcanic hazard assessment for the Mount Meager Volcanic Complex, British Columbia. *Journal of Applied Volcanology*, 11(5). <https://doi.org/10.1186/s13617-022-00114-1>
- Ui, T., Takarada, S., & Yoshimoto, M. (2000). Debris avalanches. En H. Sigurdsson, B. F. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 617–626). Academic Press.

Información clave para ti

Puedes consultar el mapa de peligros del volcán Sara Sara, 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 IGP



REGEN

Volcán Sara Sara: vista de estación de monitoreo geofísico del IGP.







@igp.peru



@igp_peru



@igp.peru



@igp_videos



@institutogeofisicodelperu



@igp.peru