

Informe
técnico

MAPA DE PELIGROS DEL VOLCÁN **CASIRI** **PAUCARANI**

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 CASIRI-PAUCARANI



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 Casiri-Paucarani
Informe técnico

Marco Rivera
David Valdivia
Juan Cuno
Katherine Vargas
Lady Quispe
Autores

Marco Rivera
Jorge Concha
Edición de contenido

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Carátula: Vista del volcán Casiri-Paucarani

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/>



REGEN

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 Casiri-Paucarani, 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

Casiri-Paucarani es un complejo volcánico activo que se ubica a 37 km al noreste de la localidad de Palca (Tacna), y a 75 km al noreste de la ciudad de Tacna. Con base en datos de campo y estudios previos sobre la actividad pasada de dicho complejo volcánico, así como del comportamiento de volcanes peruanos "análogos", en caso ocurra una erupción del volcán Casiri-Paucarani se consideran cinco escenarios eruptivos: 1) el primer escenario está asociado a una erupción efusiva con emisión de lavas; 2) el segundo, a una erupción explosiva de tipo vulcaniano (Índice de Explosividad Volcánica: IEV 1–2); 3) el tercero, a una erupción con crecimiento de domo; 4) el cuarto, a una erupción explosiva de tipo subpliniana (IEV 3–4); y 5) el quinto, al colapso de flanco y emplazamiento de avalancha de escombros.

Además, con base en estudios previos y modelamiento de procesos volcánicos se han elaborado cuatro mapas de peligros, presentados en un solo póster: a) Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal, que considera la ocurrencia de flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares, avalanchas de escombros y caída de proyectiles balísticos. Cabe recalcar que las emisiones de lava son las más propensas a ocurrir. b) Mapa de peligros por caídas de cenizas asociadas a una erupción vulcaniana (IEV 1–2), en la cual la zona de alto peligro (rojo) se prolonga a 16 km hacia el sureste y 18 km hacia el noroeste del volcán Casiri-Paucarani. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de algunos centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se extiende de 16 km a 86 km hacia el sureste y de 18 km a 78 km hacia el noroeste del volcán Casiri-Paucarani. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de pocos centímetros a milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, con distancias de 78 km a 168 km hacia el noroeste, y se prolonga a más de 86 km con dirección hacia el sureste del volcán Casiri-Paucarani, traspasando la frontera Perú-Bolivia. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza de menos de 1 mm de espesor. c) Mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción subpliniana (IEV 3–4),

en la cual la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se extiende aproximadamente a 91 km al este, 88 km al oeste, 71 km al norte y 77 km al sur del volcán Casiri-Paucarani. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez que formarían una capa de varios centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro; esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del volcán, con una distancia de 91 km a 389 km al este, de 88 km a 291 km al oeste, de 71 km a 211 km al norte, y más de 230 km al sur del volcán Casiri-Paucarani, sobrepasando la frontera Perú-Chile. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de algunos centímetros a milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) se prolonga a una distancia de más de 389 km al este, más de 291 km al oeste, más de 230 km al sur y entre 211 km a 550 km al norte del volcán Casiri-Paucarani. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor. d) 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 bajo a moderado Índice de Explosividad Volcánica (IEV 1–2) o lluvias intensas. La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de moderado volumen (350 000 m³), y, finalmente, 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 erupciones de gran magnitud (IEV ≥ 3) o lluvias muy intensas.

En caso de una eventual erupción del complejo volcánico Casiri-Paucarani, las zonas más propensas a ser afectadas por los productos volcánicos, como caídas de cenizas y flujos de lava, corresponden a una zona de altiplanicie volcánica, donde se localizan poblados, caseríos/parajes, terrenos de pastizales, obras de infraestructura (represas, canales de agua), lagunas, etc. Asimismo, se vería afectado el ganado camélido que habita la zona.

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 Casiri-Paucarani
19	Morfología actual
19	Historia eruptiva
22	Datos y metodología para la elaboración de mapas
22	Metodología para la elaboración de mapas
22	<i>Softwares</i> empleados
24	Escenarios eruptivos considerados
29	Resultados: mapas de peligros del volcán Casiri-Paucarani
29	Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal
31	Mapa de peligros por caídas de cenizas durante una erupción vulcaniana (IEV 1–2)
33	Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción subpliniana (IEV 3–4)
35	Mapa de peligros por lahares
37	Conclusiones
38	Referencias

CASIRI-PAUCARANI



Elevación

5650 m s. n. m.



Región

Tacna



Provincia

Tacna



Última erupción

Hace 2600 años aprox.



Población en un radio de 30 km

5860 personas



Inicio de vigilancia en tiempo real

2019



Instrumentos y técnicas de vigilancia

1 estación sísmica
2 receptores GNSS
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 formación, durante el Pliocuaternario, de una cadena de volcanes activos y potencialmente activos emplazados a lo largo de la cordillera occidental de los Andes. 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.

En las últimas décadas, los estudios geológicos, geofísicos y vulcanológicos efectuados en el sur del Perú han permitido visualizar las características de la actividad volcánica reciente manifestada por los volcanes activos y potencialmente activos existentes a lo largo de la cadena volcánica: Sabancaya, Sara Sara, Ubinas, Misti,

Huaynaputina, Ticsani, Yucamane y Tutupaca. En épocas históricas, estos volcanes causaron enormes estragos a varios poblados, terrenos de cultivo y obras de ingeniería 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 del país también existen volcanes activos y potencialmente activos, como los volcanes Casiri-Paucarani, Sara Sara, Auqui huato, Chachani y otros, que presentaron actividad eruptiva durante el Pleistoceno superior y Holoceno, es decir, hace varios miles de años atrás. Desde aquel entonces, la actividad de dichos volcanes ha sido mínima y solo se detecta leve e incipiente actividad

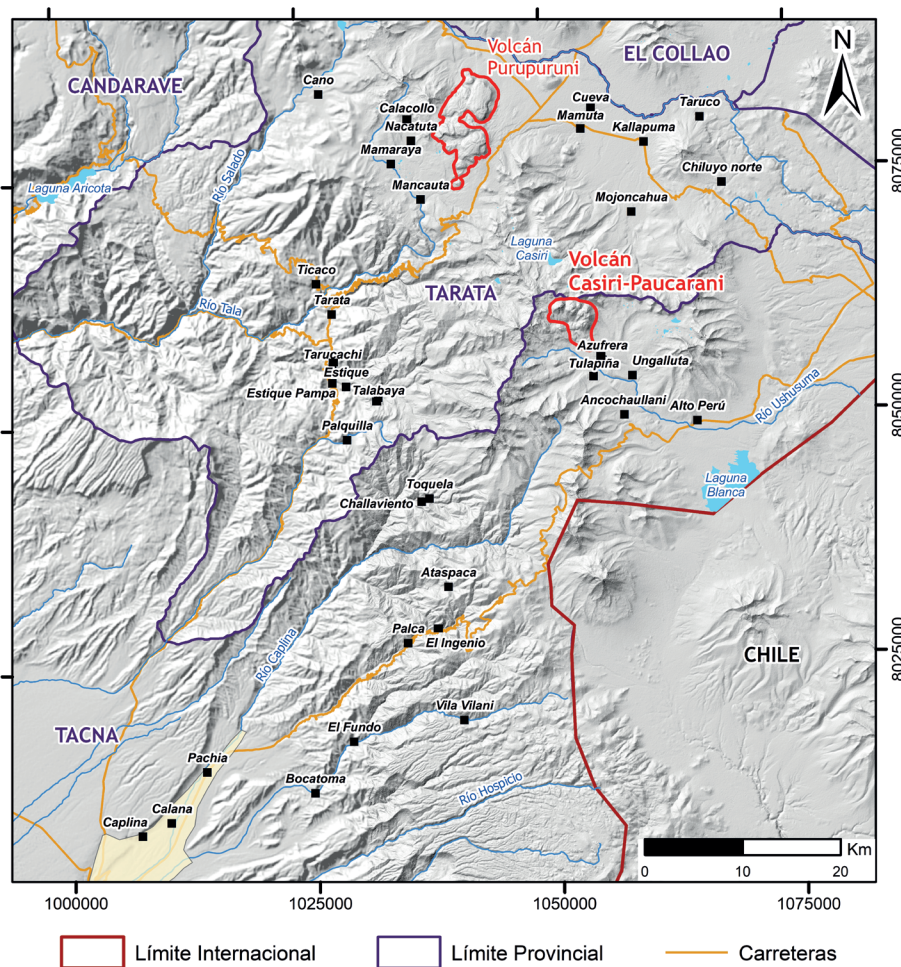


Figura 1. Mapa de ubicación del volcán Casiri-Paucarani poblados y obras de infraestructura ubicados en sus inmediaciones.



Figura 2. Vista del flanco sur del volcán Casiri-Paucarani, los centros poblados y la represa Paucarani ubicados en inmediaciones de dicho volcán.

sísmica; no obstante, estos volcanes pueden volver a reactivarse en el futuro.

El complejo volcánico Casiri-Paucarani ($15^{\circ} 04' S$; $73^{\circ} 11' O$; 5327 m s. n. m.), considerado como un volcán activo, se ha edificado al extremo noreste de la cadena volcánica del Mioceno-Pleistoceno, conocida como la cordillera del Barroso (Acosta et al., 2010). Dicho complejo está ubicado a 37 km al noreste de la localidad de Palca (Figura 1), provincia de Tacna (región Tacna), y está constituido por un conjunto de conos de lava, domos andesíticos y dacíticos (Manrique et al., 2023).

El volcán Casiri-Paucarani puede reactivarse en el futuro y generar una erupción cuyos productos pueden afectar áreas aledañas donde existen importantes fuentes hídricas, carreteras de tránsito internacional y población dedicada principalmente a la ganadería (Figura 2). El objetivo central

del presente informe es presentar los mapas de peligros del volcán Casiri-Paucarani, con el propósito de brindar a la sociedad, instituciones del SINAGERD (INDECI, CENEPRED, etc.), así como autoridades locales y regionales (Gobierno Regional de Tacna, municipalidades provinciales y distritales, etc.), un documento oficial que permita efectuar una adecuada formulación de proyectos de desarrollo, la elaboración de planes de prevención y el manejo de una eventual crisis volcánica del Casiri-Paucarani.

1.1 Condiciones climatológicas

Para el análisis climatológico del área de estudio, se han considerado datos estadísticos de la estación meteorológica del SENAMHI, denominada Paucarani (Tabla 1), ubicada a 4.5 km al sureste del volcán Casiri-Paucarani.

Tabla 1. Ubicación de la estación meteorológica Paucarani, ubicada en inmediaciones del volcán Casiri-Paucarani y operada por el SENAMHI.

Nombre	Coordenadas		Altitud (m s. n. m.)	Periodo de Registro	Cuenca
	Latitud	Longitud			
Paucarani	-17.5250	-69.7794	4625	1964–2025	Ushusuma

1.1.1 Temperatura

De acuerdo con los registros de la estación meteorológica Paucarani, ubicada a 4625 m s. n. m., la temperatura máxima promedio registrada entre los años 2020 y 2025 fue de 12.8 °C, mientras que la temperatura mínima promedio fue de -4.8 °C. Por su parte, la temperatura máxima alcanzó los 19.6 °C y la temperatura mínima fue -16.4 °C.

Es decir, en esta zona, la temperatura diurna está por encima de los 4.3 °C; sin embargo, por las noches, casi siempre es inferior a 0 °C. Como consecuencia, se torna difícil la vida del hombre, animales y plantas. En los meses de junio, julio y agosto, las aguas de los manantiales y riachuelos se congelan superficialmente formando capas de hielo.

1.1.2 Precipitación

De acuerdo con los registros de la estación meteorológica Paucarani, entre los años 1964–2025, especialmente entre los meses diciembre y marzo, ocurrieron las precipitaciones diarias más intensas (de hasta 38 mm); entanto, entre los meses de abril y noviembre, las precipitaciones llegaron hasta 20 mm. Las precipitaciones de 30 mm fueron escasas (Figura 3).

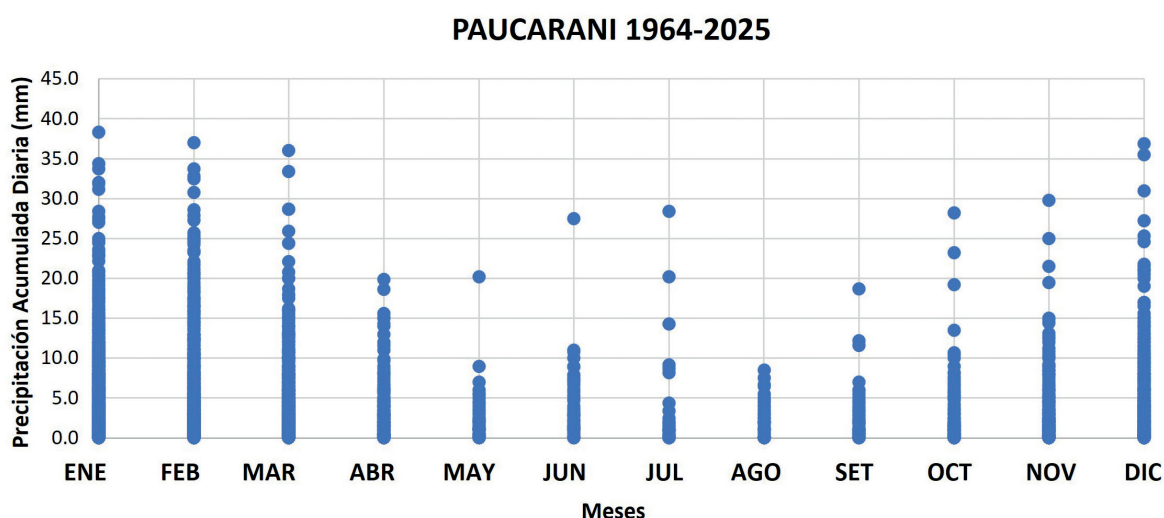


Figura 3. Precipitación acumulada diaria del periodo 1964–2025, registrada por la estación meteorológica Paucarani, ubicada a 4.5 km al sureste del volcán Casiri-Paucarani.

1.2 Aspecto socioeconómico

1.2.1 Dato poblacional

El volcán Casiri-Paucarani se ubica dentro del área de conservación regional Vilacota-Maure, en la provincia de Tacna, región Tacna, cerca del límite de los distritos de Palca y Tarata. En un radio de 30 km del centro volcánico, viven 5840 personas, en 167 centros poblados, distribuidos en 8 distritos (Tabla 2). Asimismo, en dichos poblados existen un total de 2015 viviendas, de las cuales el 69 % cuentan con acceso al agua potable (INEI, 2018).

Tabla 2. Población asentada en un radio de 30 km del volcán Casiri-Paucarani.

Distrito	Provincia	Región	Altura	Población en 30 km
Pachia	Tacna	Tacna	1087	340
Estique Pampa	Tarata	Tacna	3064	160
Estique	Tarata	Tacna	3149	240
Tarucachi	Tarata	Tacna	3054	295
Palca	Tacna	Tacna	2939	683
Tarata	Tarata	Tacna	3077	3573
Ticaco	Tarata	Tacna	3272	565
Capazo	El Collao	Puno	4402	4

Dentro del mismo perímetro, en el entorno del volcán Casiri-Paucarani, existe una población escolar de 1218 alumnos y 120 instituciones educativas (MINEDU, 2024), 14 centros de salud e importantes comunidades campesinas, como Ticaco, Tarucachi, Talabaya, Estique, Ancoma, Toquela, Challaviento, Vilavilani, Ataspaca, Caplina, Chiluyo y Pampa Huyune (Ministerio de Cultura, 2025).

En cuanto a la actividad económica, la población que vive dentro de un radio de 30 km del volcán Casiri-Paucarani basa su economía principalmente en la ganadería, agricultura, comercio, minería (distrito de Palca), seguido por la industria de la construcción y actividades inmobiliarias, empresariales y alquileres (distrito de Palca); en menor porcentaje, las actividades de hotelería, turismo y transporte (Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo-MTPE, 2020). La región Tacna es el primer productor de orégano (*Origanum vulgare L.*) del Perú con 2499 ha y una producción de 11 946 t, lo que representa el 65 % de la producción nacional (DRA-Tacna, 2018). Los distritos donde se siembra con mayor énfasis son Tarata, Ticaco y Pachia.

Adicionalmente, en áreas aledañas al volcán Casiri-Paucarani existen obras civiles importantes que podrían ser afectadas en caso de una erupción volcánica:

- Represas de Casiri, Paucarani, Jarumas (12.5 hm³) y Condorpico. La represa Paucarani es la más importante con la que cuenta la provincia de Tacna, ya que desde la parte altoandina abastece a los reservorios de Cerro Blanco ubicados en el distrito de Calana. Desde ahí se provee el agua a la EPS y agricultura de la ciudad. La represa tiene una capacidad de almacenaje de 10 millones de metros cúbicos.
- Unidad Minera Pucamarca (minera Minsur), ubicada en el distrito de Palca. Empresa peruana con producción de oro a través del tajo Checocollo.
- Proyectos mineros en fase exploratoria, como Baños del Indio, Atascapa y Huilacollo, Tambo Alto Perú.
- Tres subestaciones eléctricas transformadoras (SET), con tensiones de 33 000 voltios y 115 km de líneas de transmisión eléctricas (LT).

- Red vial, con aproximadamente 585 km de carreteras.
- Zona agrícola, con aproximadamente 4345 ha.

Finalmente, en las proximidades del volcán Casiri-Paucarani (alrededor de 30 km) existe una importante variedad de ecosistemas (MINAM, 2016) y diversidad biológica (MINAM, 2019) (Tabla 3):

Tabla 3. Ecosistemas y especies animales presentes en el ámbito del volcán Casiri-Paucarani.

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

2. Los peligros volcánicos

Diversos estudios vulcanológicos 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), representados en la Figura 4. A continuación, se describen estos fenómenos para el caso del volcán Casiri-Paucarani.

2.1 Caída de piroclastos (tefras)

Las erupciones explosivas emiten fragmentos de roca o piroclastos hacia la atmósfera, formando una columna eruptiva densa que, a veces, puede alcanzar varios kilómetros de altura. 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 y dispersadas por el viento a grandes distancias, para luego caer y formar una capa de varios milímetros o centímetros de espesor. La distancia alcanzada por los fragmentos de roca dependerá de la magnitud de la erupción, densidad de los fragmentos y de la

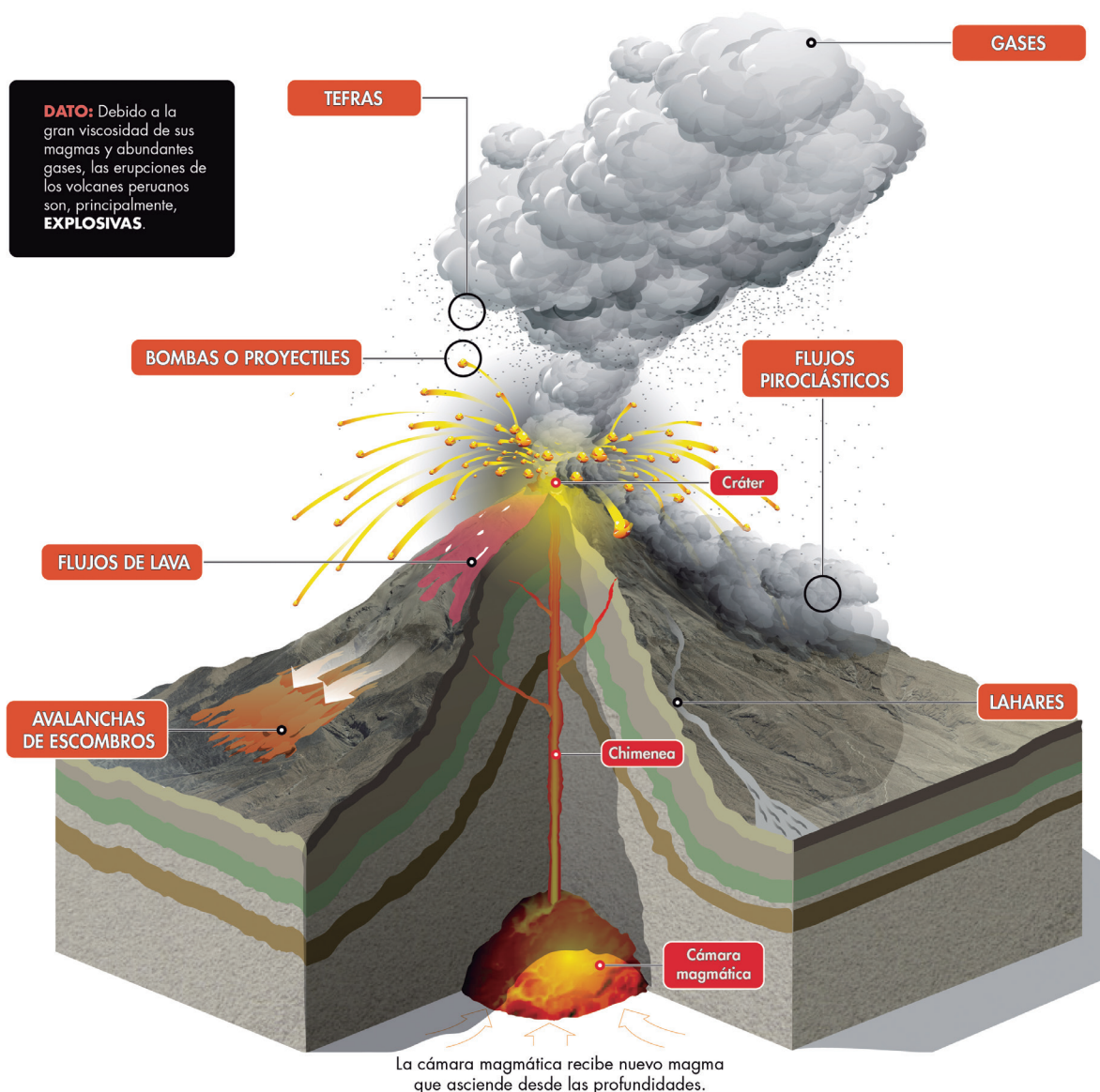


Figura 4. Tipos de peligros volcánicos que puede presentar un volcán como el Casiri-Paucarani.

velocidad del viento al momento de la erupción. Las partículas pueden cubrir y afectar extensas áreas, desde 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 por el peso acumulado, afectar terrenos de cultivos, interrumpir el tráfico aéreo, entre otros (Tilling, 1989).

En el sur peruano, todos los volcanes activos, a lo largo de su evolución, han presentado actividad explosiva, con emisión de volúmenes variables de ceniza, lapilli de pómez y escorias. Los productos de estas erupciones 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 del volcán Huaynaputina ocurrida en el año de 1600 d. C., que afectó sobremanera todo el sur peruano, así como los efectos ocasionados por la actividad explosiva moderada y recurrente de los volcanes Ubinas y Sabancaya durante las últimas décadas. En las inmediaciones del volcán Casiri-Paucarani solo se distinguen cenizas retrabajadas ligadas a su actividad eruptiva pasada ocurrida durante el Pleistoceno y Holoceno.

2.2 Flujos de lava

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida que son expulsadas por el cráter o fracturas existentes en los flancos de un volcán. Pueden recorrer por el fondo de los valles y quebradas, y alcanzar varios kilómetros de distancia. Rara vez recorren a más de 8 km de distancia del centro de emisión (Francis, 1993). Los volcanes del sur peruano han emitido lavas viscosas que han recorrido algunos kilómetros de distancia, mientras que otras se enfriaron en la zona del cráter y formaron domos de lava.

Los flujos de lava calcinan, sepultan y destruyen todo a su paso; sin embargo, en los Andes, principalmente en el sur peruano, no representan un peligro para las personas debido a su baja velocidad de desplazamiento (Tilling, 1989). El volcán Casiri-Paucarani, durante el Pleistoceno superior y Holoceno, ha emitido flujos de lava en bloques de composición andesíticos y dacíticos. Según Bromley et al. (2019), durante los últimos 6000 años, ha emitido tres flujos de lava que afloran al pie de los flancos oeste y suroeste del cono reciente. Dichas lavas viajaron a más de 2.4 km de distancia respecto a la cima del volcán.

2.3 Flujos y oleadas piroclásticas

Las erupciones explosivas importantes pueden generar flujos piroclásticos, ahora denominados corrientes de densidad piroclástica. Estos están conformados por una mezcla de ceniza, fragmentos de roca y gases calientes (300 °C a 800 °C) (Nakada, 2000). Estos flujos descienden por los flancos de un volcán a ras de la superficie del suelo, y a grandes velocidades, comprendidas entre 100 m/s y 300 m/s (Hoblitt et al., 1995). Poseen generalmente una parte inferior densa que se encauza y desplaza por el fondo de las quebradas o valles, y otra superior, menos densa, denominada oleada piroclástica, compuesta por una nube turbulenta de gases y ceniza que con facilidad sale del valle, 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 las últimas décadas muestran que la gran mayoría de los volcanes activos del sur peruano, como Misti, Ubinas, Yucamane, Tutupaca, Ticsani, Chachani 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, los cuales yacen en sus alrededores. Sin embargo, en inmediaciones del volcán Casiri-Paucarani no se distinguen flujos piroclásticos ligados a una actividad eruptiva de tipo explosiva ocurrida en el pasado.

2.4 Lahares (flujos de lodo y escombros)

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

Eventualmente, los lahares pueden salir de los cauces en las zonas de abanicos de inundación, como ocurrió con los flujos que destruyeron la ciudad de Armero en Colombia, luego de la

erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985 (Naranjo et al., 1986). El área inundada o afectada por los lahares depende del volumen de agua y de materiales sueltos disponibles, así como de la pendiente y topografía de los valles o quebradas. Generalmente, destruyen todo a su paso y pueden alcanzar grandes distancias (>100 km), e incluso generar inundaciones cerca al cauce de los ríos y quebradas (Tilling, 1989).

La mayoría de los volcanes activos en los Andes del sur peruano presentan este tipo de peligro, sobre todo en periodos de lluvia (diciembre a marzo), durante los cuales ocurren lluvias en sus laderas o cumbres. 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. Sin embargo, en el volcán Casiri-Paucarani es poco frecuente la ocurrencia de lahares.

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, presencia de fracturas o fallas tectónicas, 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.), asociada a una erupción lateral dirigida, se estimaron avalanchas de escombros de velocidades del orden de 240 km/h (Glicken, 1996).

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

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

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 que se han distribuido en áreas aledañas (Thouret et al., 2001; Mariño & Thouret, 2003; Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2015; Rivera et al., 2020a). Sin embargo, en el volcán Casiri-Paucarani no se distinguen depósitos de avalanchas de escombros.

2.6 Gases volcánicos

Antes y durante una erupción volcánica 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 Casiri-Paucarani

3.1 Morfología actual

Casiri-Purupuruni es un complejo volcánico que está constituido por un grupo de ocho conos de lava y domos ligeramente alineados en dirección noroeste-sureste. Estos conos de lava y domos tienen entre 400 m a 600 m de alto, y de 600 a 1800 m de diámetro, cuya principal actividad eruptiva, según el estado de erosión de sus depósitos y dataciones radiométricas realizadas por Bromley et al. (2019), se desarrolló en el Pleistoceno y Holoceno. El complejo volcánico Casiri-Paucarani se emplaza sobre secuencias lávicas alteradas del Mioceno-Pleistoceno.

En la cima del cono reciente "Paucarani", ubicado en el extremo sureste del complejo volcánico Casiri-Paucarani, existe un domo de lava andesítico de aproximadamente 100 m de altura y 250 m de diámetro, emplazado en medio de un cráter con forma de herradura abierto hacia el sur. Este domo presenta una superficie de crestas, poco afectada por procesos de meteorización, lo que indica un origen reciente, probablemente durante el Holoceno (Bromley et al., 2019).

3.2 Historia eruptiva

Los tipos de materiales emitidos por el complejo volcánico Casiri-Paucarani revelan una evolución compleja, marcada por múltiples eventos efusivos con emisiones de lava y crecimiento de domos que configuran su actual morfología.

Según el estudio estratigráfico realizado, este volcán se emplazó, al menos, en tres etapas: 1) En una primera etapa se emplazaron los cuatro conos de lava, domo andesíticos y dacíticos que yacen en su sector central, seguido de los conos del sector oriental (Figura 5). 2) En una segunda etapa se emplazaron los tres conos de lava del sector central y occidental del complejo volcánico (Figura 6). 3) En una última etapa se emplazó el cono de lava reciente "Paucarani", que aflora en el extremo sureste del complejo volcánico (Figura 7). Posteriormente, se emplazaron al menos cuatro flujos de lava en bloques andesíticos y dacíticos, de corto recorrido, visibles en los extremos oeste y suroeste del complejo volcánico. Estos flujos tienen entre 50 m y 150 m de altura, exhiben una topografía rugosa, y forman grandes lóbulos en forma de cuerda que alcanzan hasta 500 m de ancho y 130 m de longitud. Estos flujos, que fueron emitidos desde el cono reciente "Paucarani", fueron datados por Bromley et al. (2019) mediante el método cosmogénico ³⁶Cl. El flujo de lava en bloques que aflora al extremo

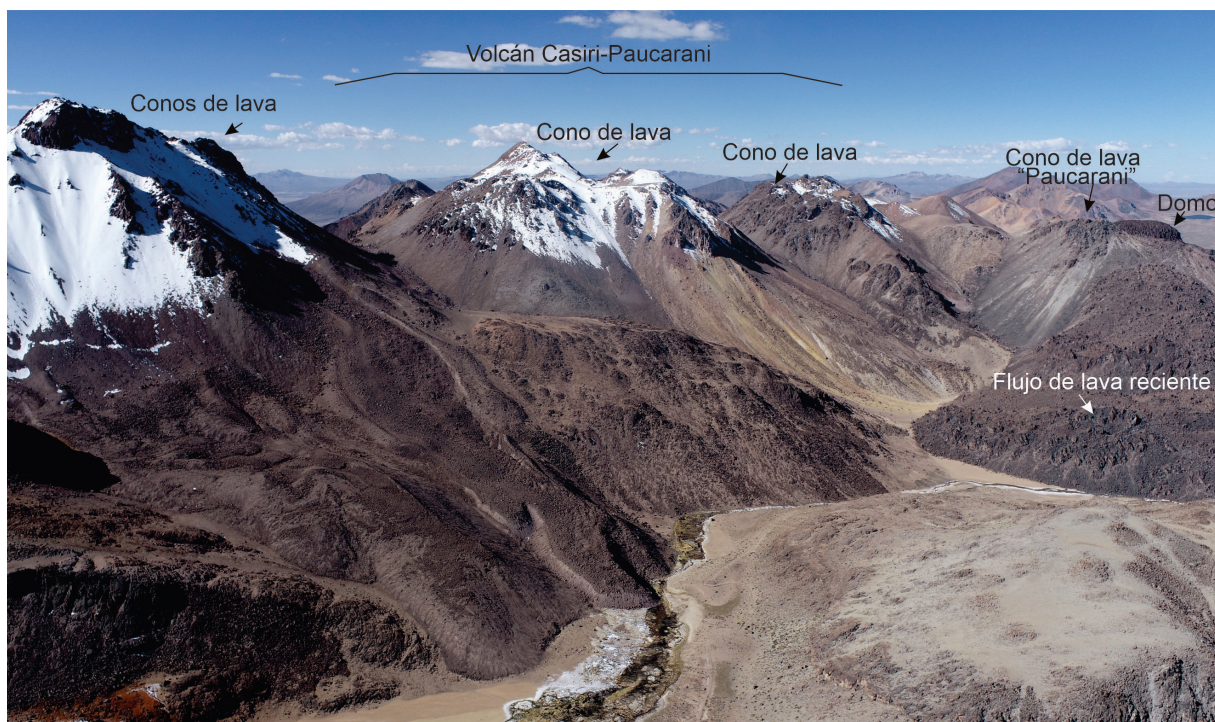


Figura 5. Vista de la parte central del complejo volcánico Casiri-Paucarani, constituido de conos de lava y domos.

suroeste fue datado en aproximadamente 2600 ± 400 años antes del presente (AP), mientras que el flujo del sector sur tiene una antigüedad de 6000 ± 900 años AP (Figura 7).

La presencia de un domo tapón en la cima del cono más reciente, además de la ausencia de procesos erosivos significativos, confirman la actividad

volcánica ocurrida en tiempos recientes (Figura 7).

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

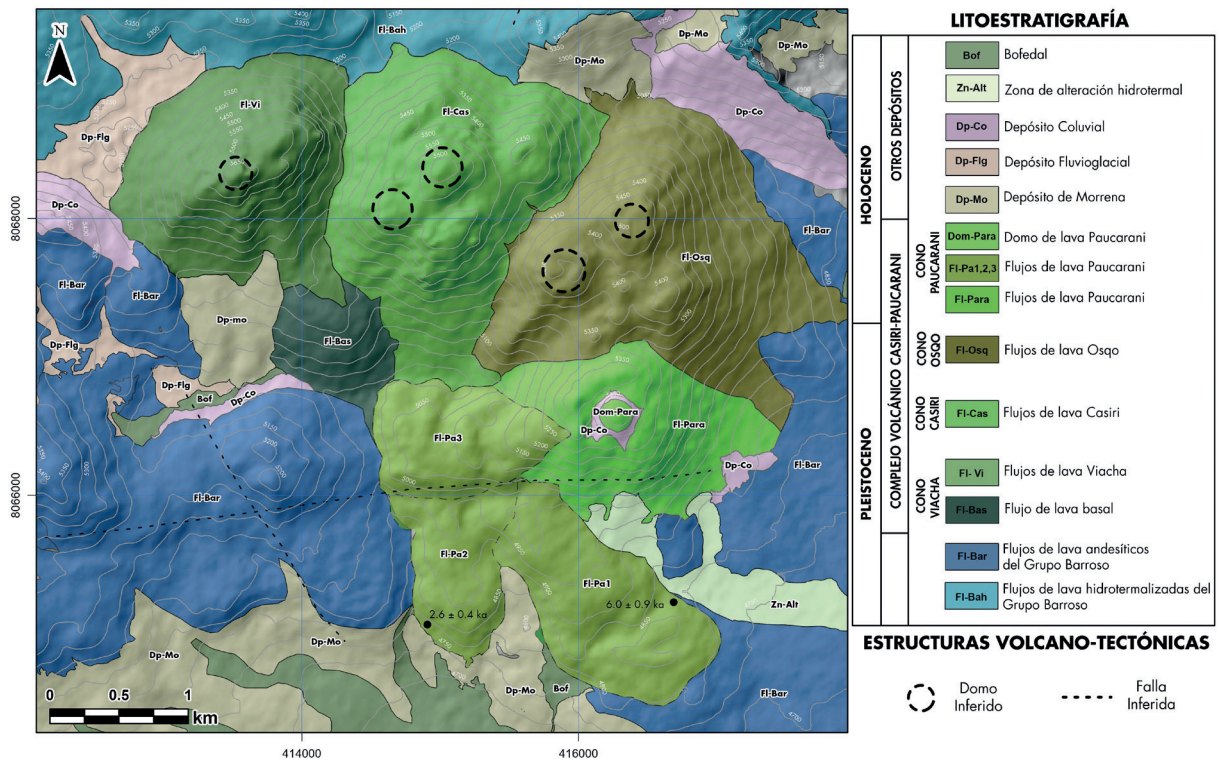


Figura 6. Mapa geológico del volcán Casiri (modificado de Vargas, 2024).

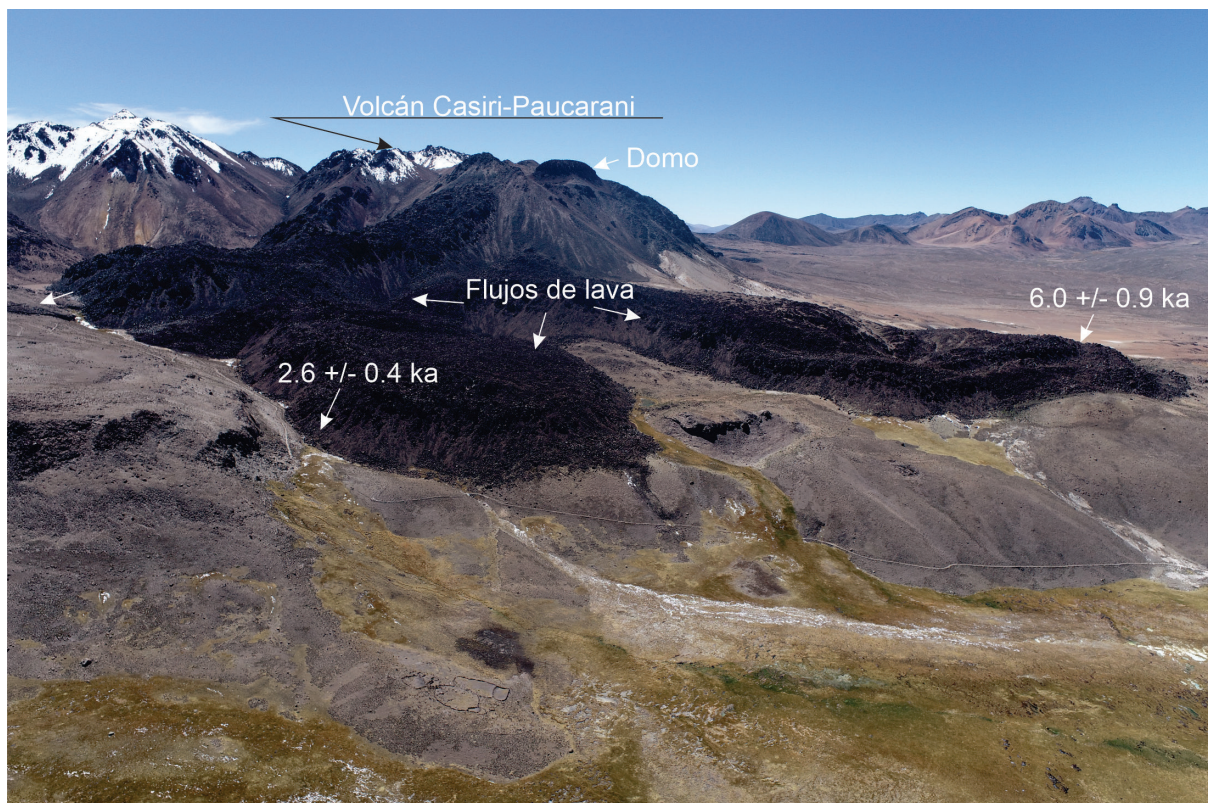


Figura 7. Vista del flanco sur del del complejo volcánico Casiri-Paucarani, donde se resaltan el cono y las lavas emplazadas en el pasado reciente (edades tomadas de Bromley et al., 2019).

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 históricas y la geología del volcán Casiri-Paucarani.
- Procesamiento de imágenes de satélite Landsat del volcán Casiri 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 Casiri-Paucarani.
- 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 Casiri-Paucarani.

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 los dos escenarios de erupciones vulcanianas y subplinianas.

• Parámetros utilizados en la simulación Ash3D

Para la simulación de depositación de cenizas del volcán Casiri-Paucarani, en caso de un escenario de erupciones explosivas de tipo vulcaniano (IEV 1–2), se consideró un volumen DRE de ceniza de 0.002 km^3 (Tabla 4), volumen frecuente en erupciones explosivas de tipo vulcaniano como la presentada por el volcán Tungurahua (Ecuador) 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 deposición de cenizas del volcán Casiri-Paucarani, para un escenario de erupción de tipo subpliniana (IEV 3–4), se consideró un volumen subpliniano 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 el escenario eruptivo de tipo subpliniano 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	14.4 km
Altura sobre el nivel del mar	20 km
Volumen DRE (km ³)	0.3

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 consideró la dirección del viento predominante (SE y SO de la cima del volcán Casiri). 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 8). 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 8). 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.

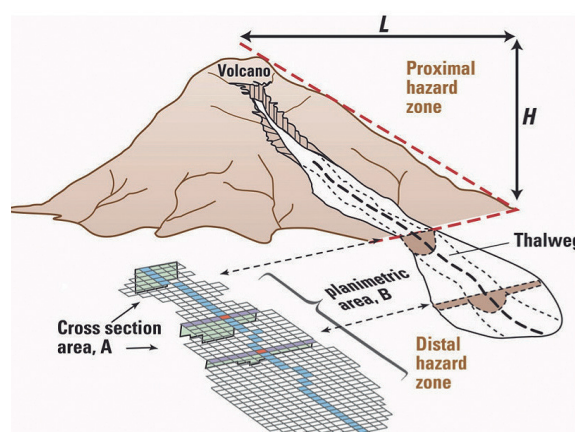


Figura 8. Relaciones entre la distancia (L) y la altura (H) por donde recorrerían los lahares, así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B) inundadas por un lahar (Schilling, 1998).

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 8). La relación H/L es un indicador de la movilidad del flujo. Así, para una relación H/L cercana a 0.1, los flujos poseen gran movilidad y, por tanto, alcanzan mayor distancia, mientras que para una relación H/L cercana a 0.3 poseen poca movilidad. Los alcances de los flujos piroclásticos y avalanchas de escombros fueron delimitados con el programa LAHARZ_py.

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). 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 escenarios eruptivos futuros que podría presentar el volcán Casiri-Paucarani, se han considerado datos de campo y los estudios geológicos realizados sobre dicho volcán (Bromley et al., 2019), así como el estado y la

morfología que presenta dicho volcán y otros aspectos descritos a continuación:

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

Adicionalmente, se consideró la presencia de nieve, especialmente durante la estación lluviosa que tiene lugar entre los meses de diciembre y marzo, a partir de la cual se podrían generar lahares durante una erupción volcánica.

Se definieron cinco escenarios eruptivos ante una posible erupción del volcán Casiri-Paucarani, los cuales se detallan a continuación.

4.3.1 Erupción de tipo efusiva con emisión de lavas

Durante los últimos 10 000 años, las erupciones efusivas en el volcán Casiri han sido poco recurrentes. Solo al pie del flanco sur de este volcán se distinguen algunos flujos de lava datados por Bromley et al. (2019) en aproximadamente 2600 y 6000 años AP, los cuales han alcanzado distancias de hasta 2.5 km desde la cima del cono reciente. En el futuro, es posible que el Casiri-Paucarani genere una erupción efusiva con la emisión de flujos de lava, los cuales alcanzarían distancias similares a lo ocurrido en erupciones pasadas, es decir, hasta 3 km o 4 km respecto a la cima del cono reciente “Paucarani”, pudiendo alcanzar eventualmente la zona de Azufrera, donde habitan algunas familias; sin embargo, dado que las lavas viajan a pocos metros por día, esto daría tiempo para evacuar la zona. Por otro lado, el emplazamiento de flujos de lava puede fundir la capa de hielo y nieve que existe en la cumbre del volcán Casiri en periodos de lluvia y producir lahares que descenderían por las quebradas que surcan el cono volcánico. Los lahares causarían daños en terrenos de pastizales, bofedales, sobre todo si descienden por el flanco sur, donde puede afectar la represa de Paucarani.

4.3.2 Erupción de tipo vulcaniano (IEV 1–2)

Las erupciones vulcanianas son erupciones explosivas violentas que emiten ceniza, bloques, bombas, escorias y, eventualmente, pómez. Las explosiones se dan en intervalos de minutos a horas e incluso días. Como resultado de estas explosiones se generan columnas eruptivas de gases y cenizas de menos de 20 km de altura (Sigurdsson et al., 2000).

En el Casiri no se han distinguido capas de ceniza ligadas a erupciones explosivas, solo ceniza retrabajada en el suelo que sugiere actividad explosiva leve a moderada en el pasado. Dado que es un volcán activo, es probable que en el futuro pueda generar erupciones explosivas de tipo vulcaniano, como las erupciones recientes de los volcanes Sabancaya y Ubinas. En efecto, el volcán Sabancaya, entre los años 1988 y 1998, generó erupciones vulcanianas. En aquel entonces, la ceniza fue dispersada hasta 30 km de distancia al este del volcán. Asimismo, fueron expulsados proyectiles balísticos que alcanzaron hasta un radio de 2 km alrededor del cráter (Guillande et al., 1992; Thouret et al., 1994). Posteriormente, entre los años 2016 y 2025, el Sabancaya presentó un proceso eruptivo caracterizado por la ocurrencia de explosiones y la formación de columnas de gases y cenizas que ascendieron a más de 5 km de altura (Figura 9). Dicho material fue dispersado a más de 30 km de distancia, afectando principalmente áreas aledañas.

Por otra parte, el volcán Ubinas, durante la erupción del 19 de julio de 2019, de IEV 2, generó una columna de cenizas y gases de más

de 5500 m de altura sobre la cima del volcán (Figura 9). Las cenizas emitidas 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 de 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).

Cabe mencionar que durante o después de una erupción vulcaniana es frecuente la formación de lahares, sobre todo si la erupción ocurre en periodos de lluvia (diciembre a marzo). En caso de una erupción del Casiri, los lahares pueden descender por las quebradas que drenan del volcán Casiri.

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) de 1976, o del volcán Tungurahua (Ecuador) en 2006 y 2010, se generaron flujos piroclásticos que viajaron a más de 4 km de distancia del cráter del volcán (Aguilera et al., 1988; Hall et al., 2013).

4.3.3 Erupción con crecimiento de domo

En el Casiri-Paucarani es probable que durante una eventual erupción se forme un domo de lava. Dicho domo se generaría cuando la lava, por extrusión a través del conducto volcánico, es

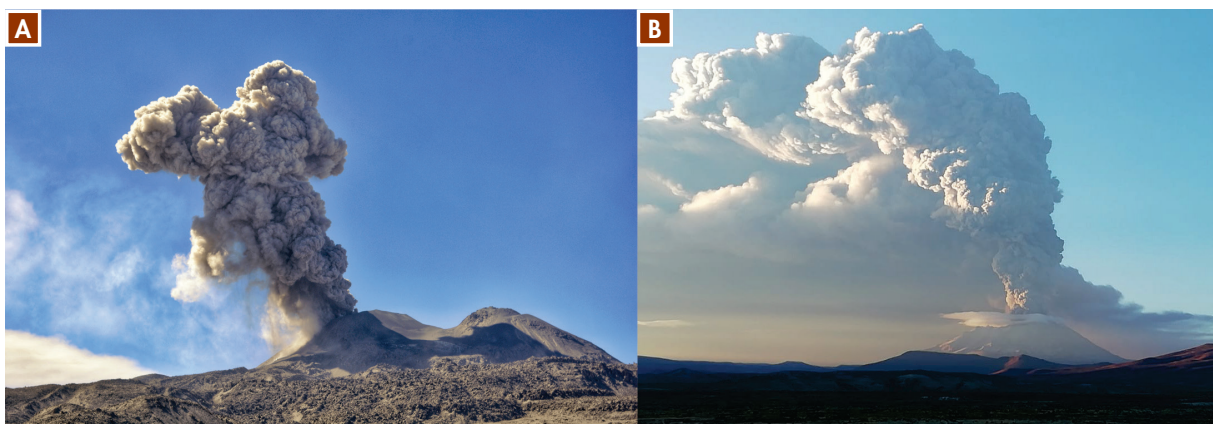


Figura 9. Vista de volcanes que presentaron erupciones vulcanianas de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 1–2: A) Actividad explosiva de julio de 2024 del volcán Sabancaya. B) Erupción del 19 de julio de 2019 del volcán Ubinas.

demasiado viscosa para fluir más de uno o varios cientos de metros de distancia (Francis, 1993). Durante el crecimiento del domo, sus extremos vienen a ser inestables y pueden caer o colapsar dando lugar a la formación de flujos piroclásticos o corrientes de densidad piroclástica.

El escenario que describe una futura erupción con el crecimiento y colapso de un domo de lava se basa en la presencia de un domo de lava en la cima del cono reciente del volcán Casiri-Paucarani. Aunque en el Casiri no se han identificado depósitos de flujos piroclásticos asociados a dicho evento o eventos pasados, existe una gran posibilidad de generar dichos depósitos ligados al crecimiento y colapso de domos.

La mayor amenaza asociada al crecimiento de 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 ocurrió en 1980 en el Mont St. 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, produciéndose una explosión lateral dirigida. Los depósitos de avalancha y los flujos piroclásticos generados por dicha explosión viajaron alrededor de 28 km del cráter. Desde aquel entonces se sabe que las grandes explosiones dirigidas resultan de la despresurización repentina del sistema magmático o hidrotermal dentro del volcán por el deslizamiento de una parte del flanco.

Aunque en la historia eruptiva del volcán Casiri-Paucarani no se ha registrado tal evento, en un futuro puede producirse una explosión lateral dirigida. Esta se generaría por la intrusión de un domo de lava al interior del volcán y el consecuente colapso de un sector del volcán. Los flujos piroclásticos generados en dicha explosión recorrerían por los diversos flancos a una distancia mayor a 8 km del volcán, cubriendo la zona de altiplanicie, lomas y laderas localizadas alrededor del volcán Casiri, como ocurrió en la erupción del volcán Tutupaca en el año de 1802 que tuvo un IEV 3, en la cual se generaron depósitos de avalancha de escombros y flujos piroclásticos que viajaron poco más de 10 km de distancia al noreste del volcán (Samaniego et al., 2015).

4.3.4 Erupción de tipo subpliniana (IEV 3–4)

Durante erupciones de tipo subpliniana de IEV 3 (Figura 12), las columnas de tefras (ceniza, lapilli de pómez y escorias) y gases ascienden entre 3 km y 20 km de altura sobre el cráter 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 recientes de IEV 3 ocurridas en el continente sudamericano. Por ejemplo, el volcán Nevado del Ruiz (Colombia) generó en 1985 una erupción subpliniana con IEV 3, la cual dejó un depósito de ceniza en áreas aledañas. Las isópacas de 1 cm de espesor se midieron a 35 km de distancia del volcán (Naranjo et al., 1986).

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

Además, en la región Tacna, el volcán Yucamane produjo hace 3085 años AP una erupción subpliniana de IEV 3, con una columna eruptiva

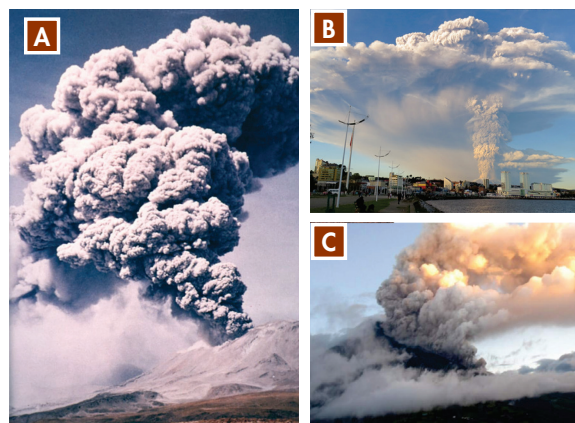


Figura 10. Vista de volcanes que presentaron erupciones explosivas subplinianas de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 3 y 4. A) Volcán Lascar: erupción del 19 de abril de 1993 (tomado de Ckelar Volcanes). B) Volcán Calbuco: erupción del 23 de abril de 2015 (fotografía: Barria C.). C) Volcán Tungurahua: erupción del 16 de agosto de 2006 (fotografía: Bustillos, J.).

de aproximadamente 11–12 km de altura sobre el nivel del mar, y un depósito de caída piroclástica de $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$. Las tefras se dispersaron a más de 30 km en dirección sureste. Dicha erupción generó un flujo piroclástico de $9 \times 10^6 \text{ m}^3$ que se extendió a 5 km al noreste del volcán (Rivera et al., 2020b).

Por otra parte, durante erupciones subplinianas con IEV 4, las columnas de tefra (ceniza, lapilli de pómez, etc.) y gases pueden sobrepasar los 20 km de altura sobre el cráter y generar depósitos de caída de tefras 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, produjo una erupción subpliniana de IEV 4, con un volumen de material piroclástico de 0.38 km^3 que generó una columna eruptiva de 15 km a 17 km de altura (Segura, 2015), lo que dio paso a flujos piroclásticos de 0.03 km^3 que alcanzaron hasta 6 km de distancia al noreste del volcán (Castruccio et al., 2016; Romero et al., 2016).

El volcán Lascar (Chile), durante los días 19 y 20 de abril de 1993 (Figura 6), 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 10^8 m^3 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 (Spark et al., 1997). La pluma eruptiva fue arrastrada cientos de kilómetros 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 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; 1 cm en Paso de Sico, a 70 km al sureste del volcán Lascar (Viramonte et al., 1995).

También podemos mencionar la erupción del volcán Reventador (Ecuador), del 3 noviembre de 2002, la cual tuvo un IEV 4. Dicha erupción generó una columna eruptiva de 17 km de altura. En esa ocasión, la ceniza llegó hasta Quito, ubicada a más de 80 km al oeste del volcán,

dejando un depósito milimétrico y forzando el cierre del antiguo aeropuerto Mariscal Sucre por 10 días. Los flujos piroclásticos descendieron por las quebradas del volcán hasta el río Quijos y destruyeron partes del oleoducto en construcción. El volumen del depósito de caída piroclástica fue de 0.3 km^3 , y el de los depósitos de corrientes de densidad piroclástica de 0.04 km^3 (Le Pennec et al. 2003; Hall et al. 2004).

En el pasado, en la región de Moquegua, los volcanes Ubinas y Ticsani también han presentado erupciones subplinianas. La erupción subpliniana del volcán Ticsani de IEV 4 emplazó depósitos de caída de tefras a más de 50 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003).

Las erupciones subplinianas (IEV 3–4) también pueden generar lahares, especialmente si los flujos piroclásticos se emplazan sobre casquetes glaciares y originan la fusión de hielo y nieve (Major & Newhall, 1989), como ocurrió durante la erupción del volcán Nevado del Ruiz (Colombia) en 1985, que tuvo un IEV 3 (Pierson et al., 1990). Los lahares generados en dicho volcán causaron la muerte de más de 23 000 habitantes de la ciudad de Armero.

En el volcán Casiri no se han encontrado depósitos asociados a erupciones subplinianas con IEV 3 o 4, por lo que la posibilidad de ocurrencia de tales erupciones es baja. Durante una erupción subpliniana del Casiri pueden emitirse flujos piroclásticos que podrían fundir la cobertura de nieve que yace en la cima del volcán durante periodos de lluvia e invierno, lo que desencadenaría lahares que descenderían por las quebradas que drenan del volcán. Los lahares causarían daños en terrenos de pastizales, bofedales y carreteras, sobre todo si descienden por el flanco sur, donde también podrían afectar la represa de Paucarani.

4.3.5 Colapso de flanco y emplazamiento de avalancha de escombros

Se han identificado depósitos de avalanchas de escombros ligados al derrumbe o colapso de conos volcánicos en varios volcanes del sur del Perú, como el Ticsani, Misti, Ubinas, Tutupaca, Sara Sara y otros (Mariño & Thouret, 2003; Rivera et al., 1998; Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2015; Rivera et al., 2020a). El depósito de avalancha de escombros

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

El volcán Casiri presenta flancos de fuerte pendiente (20° a 50°), así como sectores con rocas bastante alteradas e hidrotermalizadas. En tal sentido, en caso de una eventual erupción es probable que ocurra el colapso de un sector del volcán que daría lugar a la formación de avalanchas de escombros. La posibilidad de ocurrencia de avalanchas de escombros en el Casiri-Paucarani es baja a moderada.

5. Resultados: mapas de peligros del volcán Casiri-Paucarani

Se han elaborado cuatro mapas de peligros que consideran una eventual erupción del volcán Casiri-Paucarani. Estos corresponden al (1) mapa de peligros múltiples para la zona proximal; (2) mapa de peligros por caída de ceniza para un escenario de erupciones explosivas leves a moderadas, de tipo vulcaniano (IEV 1–2); (3) mapa de peligros por caída de tefras para un escenario de grandes erupciones explosivas, de tipo subpliniano (IEV 3–4); y (4) mapa de peligros por lahares.

Todos estos mapas, a diferente escala, han sido integrados para una mejor visualización 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 potencialmente afectadas por estos eventos fueron integradas para generar el mapa principal de peligros múltiples (Figura 11). Asimismo, 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 un área proximal, ligeramente alargada de noroeste a sureste, que incluye los conos volcánicos, la zona de altiplanicie y diversas quebradas que drenan el complejo volcánico Casiri-Paucarani, las cuales pueden ser severamente afectadas por la ocurrencia de flujos piroclásticos, flujos de lava, proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares (flujos de lodo). Cualquier tipo de erupción puede afectar dicha área, inclusive las erupciones de bajo Índice de Explosividad Volcánica (IEV 1–2).

Los límites de la zona de alto peligro se encuentran entre 2.5 km al sureste y 5 km al noroeste del cono reciente del volcán Casiri-Paucarani (Figura 11). Las mayores distancias (3 km y 5 km del cráter) se encuentran en los sectores oeste y noreste, mientras que las menores distancias (2.5 km del cono reciente) están al sur, sureste, este y noreste del volcán Casiri-Paucarani.

Los límites de la zona de alto peligro coinciden con el alcance de un gran número de flujos de lavas del volcán Casiri, que se encuentran entre los 2.5 km y 5 km de distancia desde su punto de emisión. Por otro lado, según datos de erupciones recientes presentados por otros volcanes activos, los proyectiles balísticos generados durante erupciones vulcanianas (IEV 1–2) han alcanzado distancias limitadas a las zonas proximales al cráter, típicamente menores a 3 km. Por otro lado, un eventual colapso o derrumbe de un flanco del volcán puede generar avalanchas de escombros que afectarían dicha zona. Además, flujos piroclásticos generados durante erupciones vulcanianas (IEV 1–2), al igual que lahares desarrollados durante erupciones o lluvias intensas, pueden alcanzar y afectar la zona de alto peligro.

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

5.1.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Es aquella que colinda inmediatamente con la zona de alto peligro. La zona de moderado peligro comprende áreas adyacentes al volcán Casiri y un sector de la altiplanicie volcánica. Esta zona se extiende entre 2.5 km y 6 km de distancia al sureste de la cima del cono reciente del volcán Casiri-Paucarani. Asimismo, se extiende a una distancia de 5 km a 6.5 km al noroeste, y de 3 km a 5.5 km al suroeste de dicho volcán (Figura 11). Esta zona puede ser cubierta por flujos piroclásticos y proyectiles balísticos, además de flujos de lava, lahares y avalanchas de escombros, en caso de que la erupción explosiva sea moderada a alta.

Durante eventuales erupciones efusivas, los

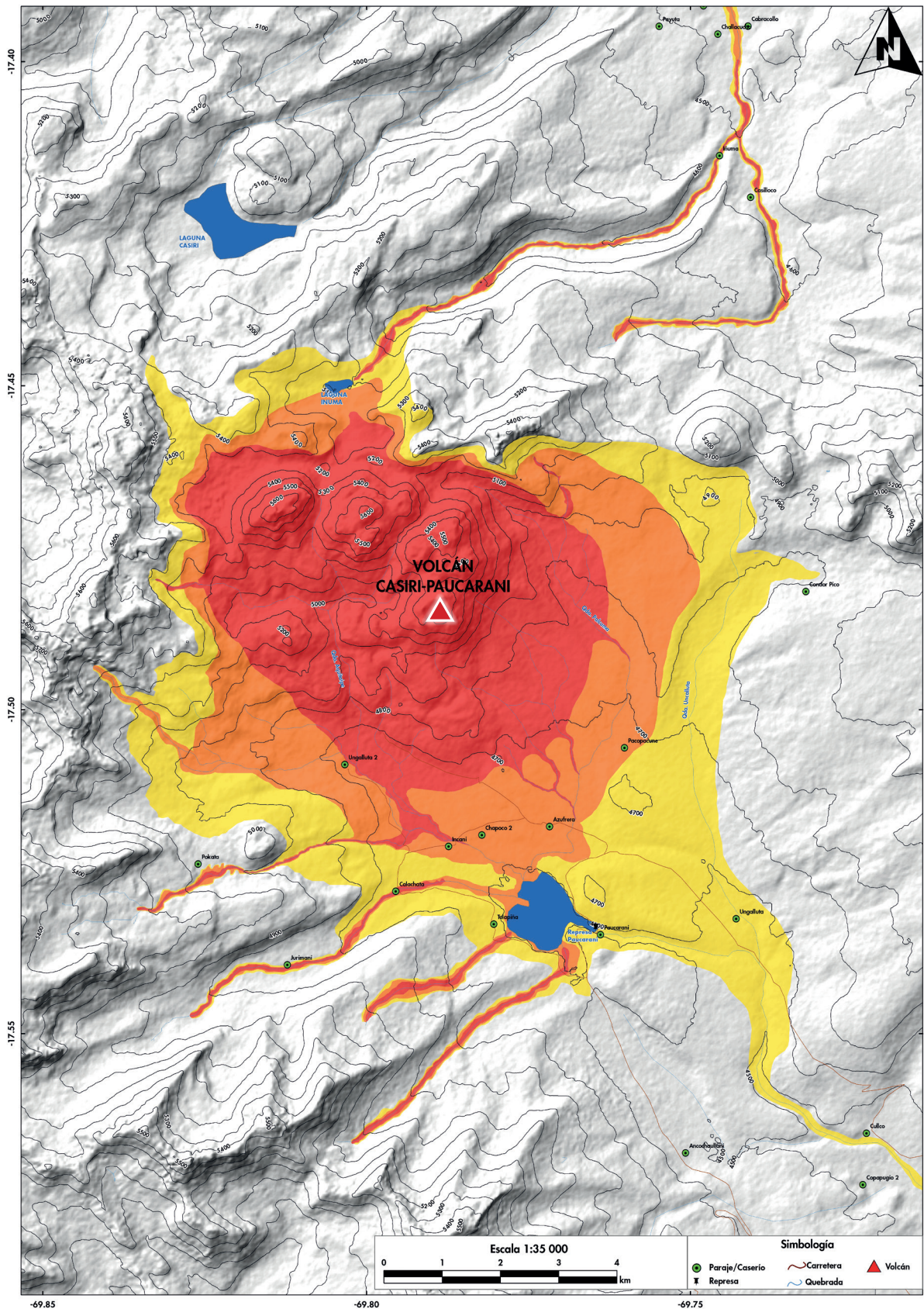


Figura 11. Mapa de peligro múltiples de la zona proximal del volcán Casiri-Paucarani, en el cual se muestran las zonas de peligro por el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas de escombros, lahares y eyección de proyectiles balísticos.

flujos de lava pueden alcanzar dicha zona. Por otro lado, el alcance máximo de proyectiles balísticos se encuentra dentro de un radio menor a 4 km, según datos tomados de Blong (1984). Esta distancia se encuentra dentro de los límites de la zona de moderado peligro. Además, un eventual colapso o derrumbe importante de un flanco del volcán puede generar avalanchas de escombros que afectarían la zona de moderado peligro. Igualmente, flujos piroclásticos generados durante erupciones explosivas de tipo vulcanianos a subplinianas (IEV 2–3), así como lahares, podrían afectar esta zona.

En resumen, la zona de moderado peligro (naranja) puede ser afectada por flujos piroclásticos, flujos de lavas, proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares.

5.1.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

Esta zona se proyecta entre 6.5 km y 7.5 km hacia el sector noroeste del volcán Casiri, y entre 5 km y 11 km hacia el sector sureste de dicho volcán. Asimismo, la zona de bajo peligro se proyecta entre 4 km y 6 km al noreste del cono reciente del volcán Casiri-Paucarani. La zona de bajo peligro puede ser afectada por flujos piroclásticos durante una erupción explosiva de tipo subpliniana (IEV 3). Igualmente, esta zona puede ser afectada por lahares y avalanchas de escombros.

Los alcances antes descritos coinciden con el alcance del flujo piroclástico de la erupción subpliniana de IEV 3 del volcán Tutupaca, ocurrida entre los años 1787 y 1802, los cuales se emplazaron entre 8 km y 10 km de distancia del volcán (Samaniego et al., 2015). Además, en un eventual colapso o derrumbe importante de un flanco del volcán pueden generarse avalanchas de escombros que afectarían dicha zona. Adicionalmente, durante lluvias intensas pueden generarse lahares que impactarían esta zona.

En resumen, durante erupciones subplinianas (IEV 3), la zona de bajo peligro (amarillo) puede ser afectada por flujos piroclásticos. De igual manera, puede ser afectada por avalanchas de escombros y lahares voluminosos. La probabilidad de ocurrencia de erupciones subplinianas en el Casiri es muy baja.

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

El mapa de peligros por caídas de cenizas para un escenario de erupción vulcaniana del volcán Casiri-Paucarani 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 12). 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 tiene una configuración elíptica (Figura 12), la cual se prolonga 16 km hacia el sureste, 18 km hacia el noroeste, 14 km hacia el sur y 16 km hacia el norte del volcán Casiri-Paucarani. Dicha zona representa las áreas potenciales a ser afectadas por la caída de cenizas que pueden formar una capa de varios centímetros de espesor durante una erupción vulcaniana (IEV 1–2).

Esta hipótesis también se basa en la erupción vulcaniana del volcán Sabancaya de los años 1990–1998 (IEV 2), durante la cual se midió una capa de ceniza de 1 cm de espesor a 10 km al este del cráter del volcán (Gerbe & Thouret, 2004).

5.2.2 Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de moderado peligro tiene una configuración elíptica que se prolonga de 16 km a 86 km hacia el sureste, 18 km a 78 km hacia el noroeste, 14 km a 62 km hacia el sur y de 16 km a 64 km al norte del volcán Casiri-Paucarani. Dicha zona puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían una capa de varios milímetros y algunos centímetros de espesor.

Esta hipótesis se basa en la dispersión de cenizas de la erupción vulcaniana del volcán Sabancaya de los años 1990–1998 (IEV 2), durante la cual se midió 1 mm de espesor de ceniza a 30 km al este del cráter (Thouret et al., 1994); asimismo,

en la dispersión de cenizas del proceso eruptivo reciente del volcán Sabancaya (2016–2025) que dejó depósitos de ceniza de 1 mm de espesor a 20 km al este del cráter del volcán.

Casiri-Paucarani. Dicha zona representa las áreas potenciales a ser afectadas por la caída de cenizas que puede formar una capa de algunos milímetros de espesor.

5.2.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro se prolonga a más de 86 km hacia el sureste, entre 78 km a 168 km hacia el noroeste, 62 km a 153 km hacia el sur, y de 64 km a 144 km al norte del volcán

Esta hipótesis se basa en la dispersión de cenizas de la erupción vulcaniana (IEV 2) del volcán Ubinas de julio de 2019, durante la cual se midió una capa de ceniza de 1 mm de espesor a 20 km al sureste del cráter. Asimismo, se registró la caída de cenizas en la mina Quellaveco, ubicada a 90 km al sureste del volcán (Aguilar et al., 2019).

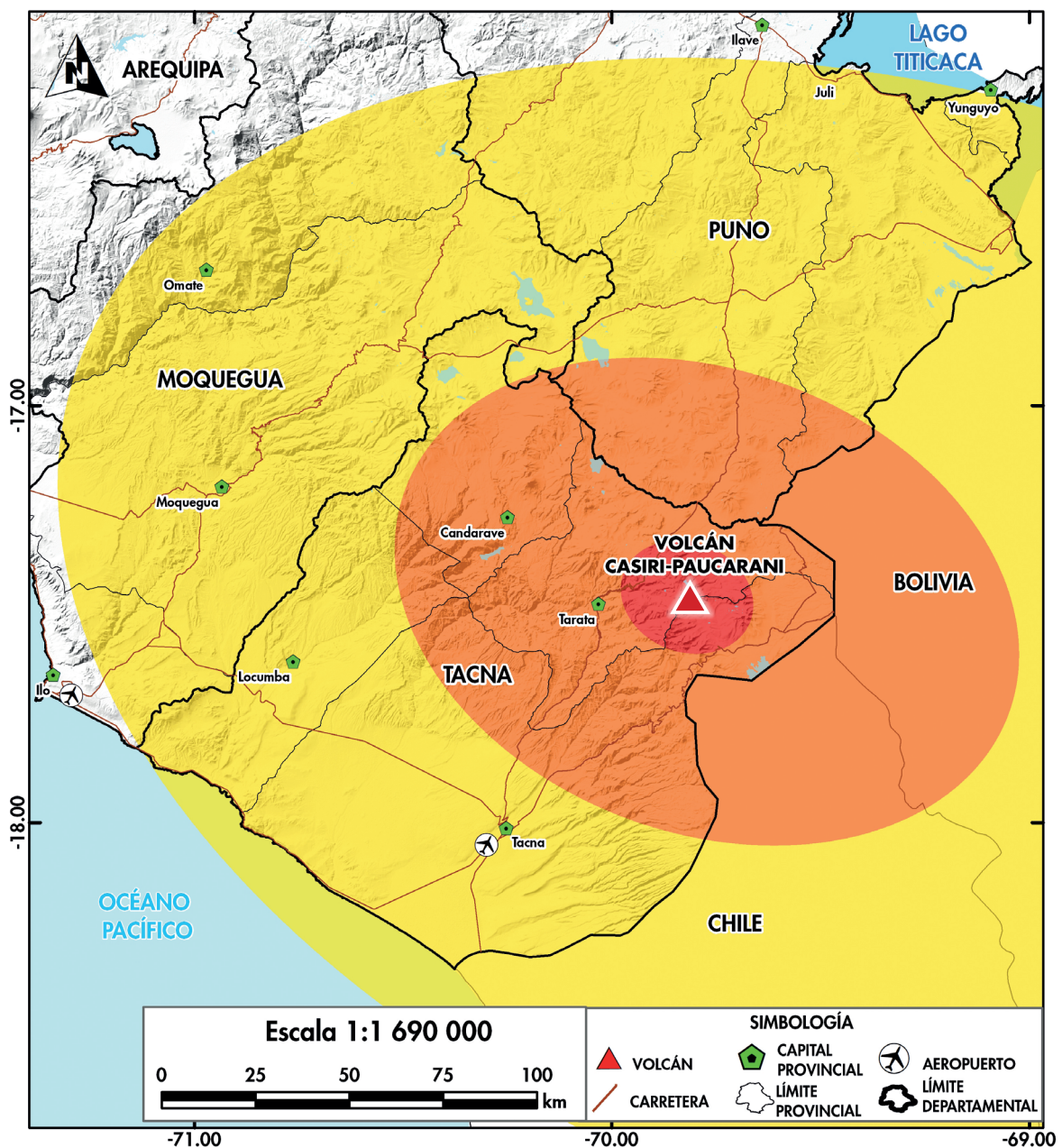


Figura 12. Mapa de peligro por caída de ceniza del volcán Casiri-Paucarani para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano, con IEV 1–2 (simulación USGS, 2025).

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 Casiri-Paucarani ha sido dividido en tres zonas: zona de alto peligro en rojo, zona de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo (Figura 13).

En las inmediaciones del volcán Casiri-Paucarani no se han encontrado depósitos asociados a erupciones subplinianas. En tal sentido, la posibilidad de ocurrencia de tales erupciones es muy baja; sin embargo, por analogía con otros volcanes similares, la posibilidad de ocurrencia no puede ser excluida.

5.3.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal y se prolonga a una distancia aproximada de 91 km al este, 88 km al oeste, 71 km al norte y 77 km al sur del volcán Casiri-Paucarani (Figura 13). Durante erupciones explosivas de tipo subpliniano con IEV 3, esta área puede ser afectada por caída de cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de varios centímetros de espesor. Este escenario se basa, por ejemplo, en la erupción del volcán Tungurahua (Ecuador) de agosto de 2006, que tuvo un IEV 3, durante la cual se reportaron espesores de caídas de ceniza de entre 4 cm y 5 cm a 10 km del cráter (Eychenne et al., 2012).

Durante erupciones subplinianas de IEV 4, esta área puede ser afectada por caídas de lapilli y bloques de pómez que formarían una capa de varios decímetros a algunos metros de espesor (Figura 13). Dicha hipótesis se basa en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Ticsani de hace 11 000 años AP (IEV 4) emplazó caídas de ceniza de alrededor de 3 m de espesor a 10 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003).

5.3.2 Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de moderado peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona

de alto peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de 91 km a 389 km al este, 88 km a 291 km al oeste, 71 km a 211 km al norte, y 230 km al sur del volcán Casiri-Paucarani, sobrepasando la frontera Perú-Chile (Figura 13). Durante erupciones subplinianas con IEV 3, esta zona de puede ser afectada por caídas de ceniza de varios milímetros a algunos centímetros de espesor, escenario que se basa en ejemplos como el caso de la erupción de noviembre de 1985 del volcán Nevado del Ruiz (Colombia), durante la cual la ceniza alcanzó cerca de 2 cm de espesor a 30 km de distancia del volcán, así como la erupción del volcán Tungurahua (IEV 3) de agosto de 2006 (Eychenne et al., 2012), en la que se reportaron espesores de 0.7 cm a 0.8 cm a 20 km del volcán.

Durante erupciones subplinianas con IEV 4, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez de varios decímetros de espesor (Figura 13). Este escenario se basa en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Ticsani de hace 11 000 años AP (IEV 4) emplazó caídas de ceniza de alrededor de 50 cm de espesor a 30 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003).

5.3.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de moderado peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 389 km al este, más de 291 km al oeste, más de 230 km al sur y entre 211 km a 550 km al norte del volcán Casiri-Paucarani (Figura 13). En esta zona, durante una erupción subpliniana de IEV 3, podrían depositarse cenizas de menos de 1 mm de espesor. Los vientos influirían en la distribución de la caída de ceniza. Este escenario se basa en las erupciones del volcán Nevado del Ruiz (Colombia) de noviembre de 1985, la cual emplazó a 50 km de distancia caídas de ceniza de entre 2 mm y 3 mm de espesor. Por otra parte, luego de la erupción del volcán Tungurahua (Ecuador) de agosto de 2006 (IEV 3, Eychenne et al., 2012) se reportaron espesores de ceniza de 6 mm a 10 mm de distancia del volcán.

Durante erupciones subplinianas de IEV 4, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de varios centímetros

de espesor. Esta hipótesis se basa en la erupción explosiva de IEV 4 del volcán Lascar (Chile), de abril de 1993, durante la cual la pluma eruptiva fue arrastrada cientos de kilómetros de distancia en dirección 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 a 25 km al sureste del cráter, 1 cm a 3 cm de espesor a 45 km del volcán, 1 cm a 70 km al sureste del volcán Lascar (Viramonte et al., 1995). Durante la erupción subpliniana (IEV 4) del volcán Calbuco en Chile, en 2015, las cenizas dejaron una capa de ceniza de menos de 1 mm de espesor a 510 km al noroeste del cráter, en la localidad de Neuquen, Argentina (Romero et al., 2016).

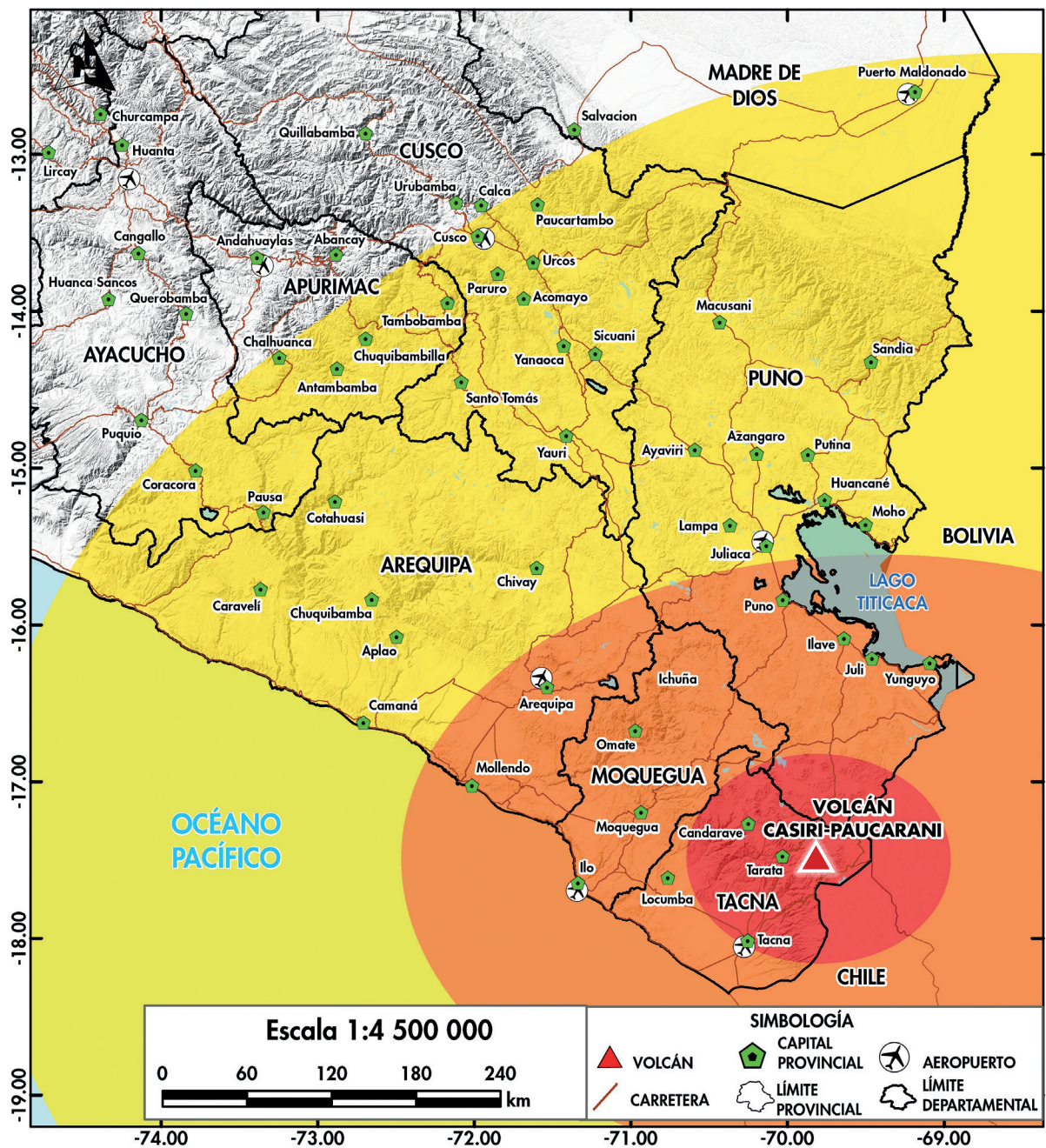


Figura 13. Mapa de peligro por caída de tefras del volcán Casiri-Paucarani para un escenario eruptivo de tipo subpliniano, con IEV 3-4 (simulación USGS, 2023).

5.4 Mapa de peligros por lahares

Se han realizado pocas estimaciones de volúmenes de lahares que descienden de los volcanes activos del sur del Perú. Los cálculos de volúmenes para lahares del volcán Misti (Delaite et al., 2005; Thouret et al., 2022) muestran que volúmenes máximos de lahares del orden de 1.5 a 4 millones de m³ estarían asociados a erupciones explosivas moderadas (IEV 1–2), mientras que lahares con volúmenes máximos del orden de 9 a 10 millones de m³ son menos frecuentes y ocurren cada 1000 a 5000 años. Estos últimos estarían asociados a erupciones explosivas importantes (IEV ≥ 3; Delaite et al., 2005; Vargas-Franco et al., 2010).

Thouret et al. (2022), para la construcción de

escenarios de peligros por descenso de lahares del volcán Misti (Arequipa), asociados a lluvias intensas, considera tres volúmenes de lahar de 150 000 m³, 350 000 m³ y 500 000 m³.

Tomando en consideración dichos datos y las condiciones meteorológicas que imperan en la zona del volcán Casiri-Paucarani, y a su vez la existencia de una cobertura de hielo y nieve en periodos de lluvia, los volúmenes de lahares escogidos fueron de 150 000 m³, (para lahares de poco volumen que estimamos son más frecuentes), 350 000 m³ y 500 000 m³ (para lahares de importante volumen, pero menos frecuentes).

En el mapa de peligros por lahares (Figura 14), la zona roja es considerada como zona de alto peligro, y corresponde al área con mayor

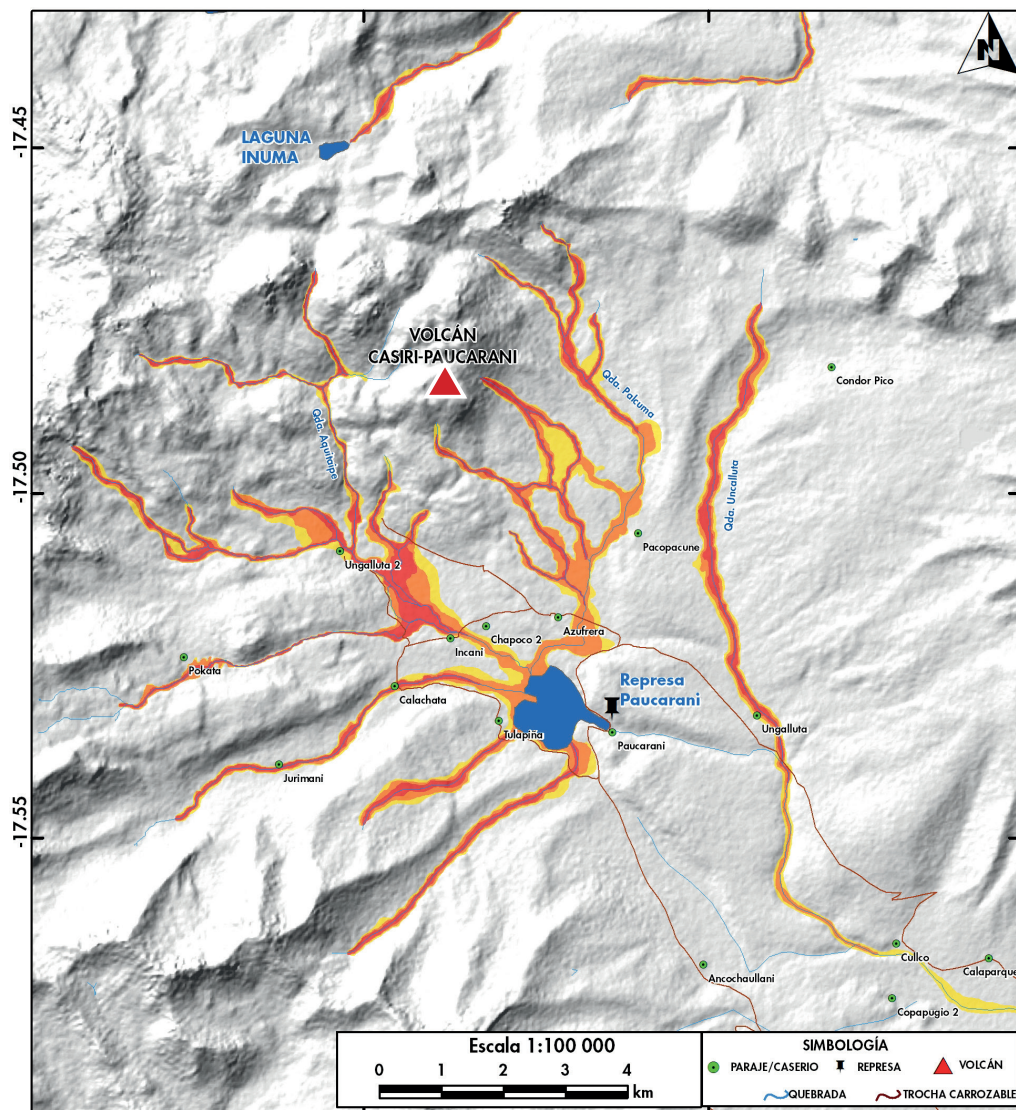


Figura 14. Mapa de peligro de lahares del volcán Casiri-Paucarani, donde se resaltan tres tipos de peligro: alto (rojo), moderado (naranja) y bajo (amarillo).

posibilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos ($150\,000\text{ m}^3$), 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 ($350\,000\text{ m}^3$) y, finalmente, la zona amarilla es considerada de bajo peligro o de menor posibilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos ($500\,000\text{ m}^3$). Los lahares voluminosos ($350\,000\text{ m}^3$ y $500\,000\text{ m}^3$) podrían estar asociados a erupciones explosivas de gran magnitud (IEV ≥ 3). Al respecto, se debe resaltar que la posibilidad de ocurrencia de tales erupciones del Casiri-Paucarani es baja o muy baja.

Conclusiones ▣

- El Casiri-Paucarani, ubicado en la zona altoandina de la región Tacna y en inmediaciones de la zona de frontera Perú-Chili-Bolivia, es un complejo volcánico activo que forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes. Según estudios previos, su última actividad eruptiva ocurrió entre 6000 y 4000 años antes del presente, asociada a actividad efusiva, con la emisión de flujos de lava que son visibles al pie de sus flancos sur y sureste.
- En el volcán Casiri-Paucarani se han identificado cuatro escenarios eruptivos en caso de una reactivación. Los escenarios que tienen mayor probabilidad de ocurrir corresponden a erupciones efusivas con la emisión de flujos de lava, erupciones vulcanianas (IEV 1–2) y erupciones subplinianas (IEV 3–4).
- Sobre la base de los estudios efectuados se presentan cuatro mapas de peligro volcánico incluidos dentro de un solo póster. Estos mapas corresponden al de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal por emplazamiento de flujos de lava, flujos piroclásticos, proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares. Este mapa muestra una zona de alto peligro (rojo), ligeramente alargada de noroeste a sureste, que se encuentra entre 2.5 km (al sureste) y 5 km (al noreste) de distancia del cono reciente del volcán Casiri. La zona de moderado peligro (naranja) se encuentra inmediatamente colindante con la zona de alto peligro, entre 2.5 km y 6 km de distancia del volcán. La zona de bajo peligro (amarillo) está aproximadamente entre 6 km y 11 km de distancia del Casiri.
- En el mapa de peligros por caídas de cenizas para el escenario de erupciones vulcanianas (IEV 1–2), la zona de alto peligro (rojo) se prolonga hasta una distancia aproximada de 16 km al sureste y 18 km al noroeste del volcán Casiri-Paucarani. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se sitúa entre 16 km y 86 km al sureste, y entre 18 km y 78 km al noroeste del volcán Casiri-Purupuruni. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de pocos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, con distancias de 78 km a 168 km hacia el noroeste y más de 86 km al sureste del volcán Casiri-Paucarani. Esta zona puede ser afectada por la caída de ceniza que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor.
- En el mapa de peligros por caídas piroclásticas para el escenario de erupciones subplinianas (IEV 3–4), la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se halla aproximadamente hasta 91 km al este, 88 km al oeste, 71 km al norte y 77 km al sur del volcán Casiri-Paucarani. Durante erupciones subplinianas, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez que formarían una capa de varios centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de 91 km a 389 km al este, 88 km a 291 km al oeste y más de 230 km al sur del volcán Casiri-Paucarani, sobrepasando la frontera Perú-Chile. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de algunos centímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) se prolonga a una distancia de más de 389 km al este, más de 291 km al oeste, más de 230 km al sur y entre 211 km a 550 km al norte del volcán Casiri-Paucarani. En esta zona se depositarían cenizas de menos de 0.1 mm de espesor.
- En el mapa de peligros por lahares, la zona roja, considerada de alto peligro, puede ser afectada por el descenso y desborde de lahares de hasta 150 000 m³; la zona naranja, de moderado peligro, puede ser afectada por lahares del orden de 350 000 m³; finalmente, la zona amarilla, de bajo peligro, puede ser afectada por lahares de 500 000 m³.
- Los mapas de peligro volcánico presentados en este estudio constituyen un documento técnico útil para las instituciones del SINAGERD, autoridades locales y regionales (Gobierno Regional de Tacna, municipalidades provinciales y distritales, etc.) y población, ya que contribuirán con una adecuada formulación de proyectos de desarrollo, la elaboración de planes de prevención y el manejo de una eventual crisis volcánica del Casiri-Paucarani.

Referencias□

- Acosta, H., Alván, A., Mamani, M., Oviedo, M., & Rodríguez, J. (2010). *Geología de los cuadrángulos de Pachía (36-V) y Palca (36-X), escala 1:50 000*. INGEMMET, Boletín Serie A: Carta Geológica Nacional, 139, 100 p., 7 mapas.
- 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.
- 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, Orléans.
- 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.
- Bromley, G., Thouret, J.-C., Schimmelpfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker, K., & ASTER Team. (2019). In situ cosmogenic ³He and ³⁶Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. *Bulletin of Volcanology*, 64.
- Bustillos, J., & Samaniego, P. (2011). *Volcán Tungurahua: Tamaño de las erupciones explosivas*. VII 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*, 3(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 eruption of Calbuco volcano (Southern Chile). *Bulletin of Volcanology*, 78.
- De Silva, S. & Francis, P. (1991). *Volcanoes of the Central Andes* (8th ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1017/S0016756800008372>
- Decker, R., & Decker, B. (1989). *Volcanoes* (Rev. ed.). W. H. Freeman and Company.
- Delaite, G., Thouret, J.-C., Sheridan, B., Labazury, P., Stinton, A., Souriot, T., & Van Westen, C. (2005). Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F.*, 209–231.
- DRA-Tacna. (2018). *Orégano: Producción y exportación*. Dirección Regional de Agricultura-Región Tacna.
- Eychenne, J., Le Pennec, J.-L., Troncoso, L., Gouhier, M., & Nedelc, J.-M. (2012). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology*, 187–205.
- Francis, P. (1993). *Volcanoes: A planetary perspective*. Oxford University Press.
- Gerbe, M., & Thouret, J.-C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990–1998 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 541–561.
- Glicken, H. (1996). *Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens volcano*. Open-file Report 96-677, U.S. Geological Survey.
- 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, F. (1992). L'activité

- éruptive actuelle du volcan Nevado Sabancaya (Sud du Pérou) et l'évaluation des menaces et des risques. *Géologie, cartographie et imagerie satellitaire*.
- Hall, M., Steele, A., Mothes, P., & Ruiz, M. (2013). Pyroclastic density currents (PDC) of the 16–17 August 2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 78–93.
 - 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 Reventador's surprise November 3, 2002 eruption, Ecuador. *Revista Geológica de Chile*, 31, 349–358.
 - 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 2017: Resultados definitivos*. Instituto Nacional de Estadística e Informática.
 - Iverson, R., Schilling, S., & Vallance, J. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 972–984.
 - Kelfoun, K., & Druitt, T. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 110, B12202.
 - Le Pennec, J.-L., Hidalgo, S., Samaniego, P., Ramón, P., Yepes, H., & Eissen, J.-P. (2003). Magnitud de la erupción del 3 de noviembre de 2002 del volcán El Reventador. *Memorias de las Quintas Jornadas en Ciencias de la Tierra*, 8–11 abril 2003, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 97–99.
 - Major, J., & Newhall, C. (1989). Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods. *Bulletin of Volcanology*, 52(1), 1–27.
 - Malin, M., & Sheridan, M. (1982). Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 217(4560), 637–640.
 - Mariño, J., & Thouret, J.-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-ieee>
 - Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo (MTPE). (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: Implications on volcano dynamics and future space monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 100, 307–320.
 - Pierson, T., Janda, R., Thouret, J., & Borrero, C. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of

- Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1–4), 17–66.
- Rivera, M., Cueva, K., Le Pennec, J., Vela, J., Samaniego, P., Manrique, N., & Soncco, Y. (2020a). Geología y evaluación de los peligros del volcán Sara Sara (Ayacucho). *Boletín Serie C: Geología e Ingeniería Geológica N.º 78*, INGEMMET, Lima.
 - Rivera, M., Samaniego, P., Vela, J., Le Pennec, J., 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, 1–20.
 - 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., Viramonte, J., Díaz-Alvarado, J., Palacci, M., Burton, M., & 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.2016.02.027>
 - 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, 107095. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107095>
 - Samaniego, P., Valderrama, P., Mariño, J., van Wyk de Vries, B., Roche, O., Manrique, N., Chédeville, C., Liorzou, C., Fidel, L., & Malnati, J. (2015). The historical (218 ± 14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru). *Bulletin of Volcanology*, 77, 51.
 - Schilling, S. (1998). *LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones*. Open-file Report 98-638, U.S. Geological Survey.
 - Schwaiger, H., Denlinger, R., & Mastin, L. (2012). Ash3D: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition. *Journal of Geophysical Research*, 117, 20. <https://doi.org/10.1029/2011JB008968>
 - Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., & Stix, J. (Eds.). (2000). *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press.
 - 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 (TERRAPUB).
 - 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. *Boletín de la Sociedad Geológica de América*, 1593–1610.
 - Thouret, J.-C., Guillande, R., Huamán, D., Gourgaud, A., Salas, G., & Chorowicz, J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): Reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 165(1), 49–63.
 - 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 Perú. *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>
 - Tilling, R. (1989). Volcanic hazards and their mitigation: Progress and problems. *Reviews of Geophysics*, 27(2), 237–269.
 - Ui, T., Takarada, S., & Yoshimoto, M. (2000). Debris avalanches. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 617–626). Academic Press.
 - Vargas, K. (2024). *Aplicación de las técnicas DInSAR y GNSS para el análisis de la deformación en el entorno de los volcanes Casiri y Purupuruni, Tacna, Perú (periodo 2020–2024)*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional de San

Agustín de Arequipa. <https://hdl.handle.net/20.500.12773/19831>

- Vargas-Franco, R., Thouret, J.-C., Delaite, G., Van Westen, C., Sheridan, M. F., & Siebe, C. (2010). Mapping and assessing volcanic hazards and risk in the city of Arequipa, Peru, based on GIS techniques. En G. Grippelli & L. Viereck-Goette (Eds.), *Stratigraphy and geology of volcanic areas* (Geological Society of America Special Publication SPE464, pp. 265–280).
- Vásquez, F., Vásquez, 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, Universidad Nacional de Salta, 13 p.

Información clave para ti

Puedes consultar el mapa de peligros del volcán Casiri-Paucarani, 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 Casiri-Paucarani: vista desde el sector sur de volcán.





@igp.peru



@igp_peru



@igp.peru



@igp_videos



@institutogeofisicodelperu



@igp.peru