

Informe
técnico

MAPA

DE PELIGROS DEL VOLCÁN AUQUIHUATO

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 AUQUIHUATO



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 Auqui huato
Informe técnico

Marco Rivera
David Valdivia
Juan Cuno
Lady Quispe
Katherine Vargas
Autores

Marco Rivera
Jorge Concha
Edición de contenido

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Carátula: Vista del volcán Auqui huato

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 Auqui huato, ayudará a que cada persona comprenda mejor la amenaza que enfrenta en su entorno, y que la prevención debe estar basada en información científica oficial, confiable y oportuna. Esta es nuestra labor en el IGP, hacer «ciencia para protegernos, ciencia para avanzar».

RESUMEN

El volcán Auquihuato, ubicado a 28 km al noreste de la ciudad de Pausa (Ayacucho), es un volcán potencialmente activo que presentó actividad eruptiva en el Pleistoceno superior e inicios del Holoceno. Con base en estudios previos sobre su actividad eruptiva pasada y en el comportamiento de volcanes peruanos "análogos", se consideran cinco escenarios eruptivos en caso de una nueva erupción del volcán Auquihuato: 1) una erupción explosiva de tipo vulcaniano, con un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 1–2; 2) una erupción efusiva con emisión de flujos de lava; 3) una erupción con crecimiento de domo; 4) una erupción explosiva de tipo subpliniano (IEV 3); y 5) el colapso de flanco con emplazamiento de avalanchas de escombros.

Además, con base en estudios previos y el modelamiento de procesos volcánicos se han elaborado cuatro mapas de peligros que se presentan 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, caída de proyectiles balísticos y avalanchas de escombros. 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 extiende a una distancia de 26 km al oeste y 22 km al este del volcán Auquihuato. 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 23 km a 87 km al noroeste, y de 21 km a 98 km al sureste del volcán Auquihuato. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza, que formarían una capa de pocos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, y se extiende de 87 km a 160 km al noreste, y de 98 km a 269 km al sureste del volcán Auquihuato. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor. c) Mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción subpliniana

(IEV 3), en la cual la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se prolonga hasta 57 km al noroeste, y 63 km al sureste del volcán Auquihuato. Esta zona 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, y tiene una configuración elíptica alrededor del volcán, con una distancia de 57 km a 122 km al noroeste, y de 63 km a 117 km al sureste del volcán Auquihuato. Esta 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 extiende entre 122 km y 337 km al noroeste, y entre 117 km y 608 km al sureste del volcán Auquihuato. En esta zona podría depositarse una capa de ceniza de hasta algunos milímetros 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 IEV (1–2) o lluvias intensas. La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de moderado volumen (350 000 m³), mientras que 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 volcán Auquihuato, las zonas más propensas a ser afectadas por los productos volcánicos, como caídas de cenizas y eventuales lahares, corresponden al valle del río Oyolo, río Huanca Huanca y la altiplanicie volcánica, donde se localizan poblados, caseríos/parajes, empresas mineras, terrenos de pastizales y obras de infraestructura. Asimismo, se vería afectado el ganado 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 Auqui huato
19	Historia eruptiva
20	Actividad volcánica reciente
21	Datos y metodología para la elaboración de mapas
21	Metodología para la elaboración de mapas
21	<i>Softwares</i> empleados
23	Escenarios eruptivos considerados
27	Resultados: mapas de peligros del volcán Auqui huato
27	Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal
29	Mapa de peligros por caídas de cenizas durante una erupción vulcaniana (IEV 1–2)
30	Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción subpliniana (IEV 3)
34	Mapa de peligros por lahares
34	Conclusiones
35	Referencias

AUQUIHUATO



Elevación

4980 m s. n. m.



Región

Ayacucho



Provincia

Páucar del Sara Sara



Última erupción

No se tiene registro



Población en un radio de 30 km

10 404 personas



Inicio de vigilancia en tiempo real

2019



Instrumentos y técnicas de vigilancia

1 estación sísmica

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 generó la existencia de una cadena de volcanes emplazados a lo largo de la cordillera occidental de los Andes durante el Pliocuatnario. Esta cadena volcánica, que forma parte de la denominada Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC; De Silva & Francis, 1991) está ubicada a aproximadamente 240 km al este del borde occidental de la placa sudamericana, paralela a la fosa Perú-Chile.

Los estudios geológicos, geofísicos y vulcanológicos efectuados en el sur del Perú desde la década de 1980 han permitido visualizar la intensa actividad volcánica reciente e histórica manifestada por los volcanes activos existentes dentro de la cadena volcánica: Sabancaya, Sara Sara, Ubinas, Misti, Huaynaputina, Ticsani, Yucamane, Tutupaca, Chachani, Purupuruni, Casiri. En épocas históricas, los volcanes Sabancaya, Ubinas, Misti, Huaynaputina y Tutupaca causaron enormes estragos a varios poblados, terrenos de cultivo y obras de ingeniería localizadas en sus inmediaciones. La reactivación sucesiva de los volcanes Sabancaya (1988–1998 y 2013–2025)

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 volcán 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 Perú también existen volcanes potencialmente activos, como los volcanes Sara Sara, Auquihuato, Chachani y otros, que presentaron actividad eruptiva durante el Pleistoceno superior e inicios del Holoceno, es decir, hace varios miles de años. Desde entonces, su actividad dinámica es mínima y se manifiesta únicamente a través de leve e incipiente actividad sísmica o fumarólica. No obstante, estos volcanes podrían reactivarse en el futuro.

El Auquihuato (15° 04' 21" S; 73° 11' 25" O; 4980 m s. n.m.), considerado como un volcán potencialmente activo, se ha edificado al borde de una altiplanicie volcánica a 4615 m s. n. m., y se ubica a 28 km al noreste de la ciudad de Pausa (Figuras 1 y 2), provincia de Páucar del Sara Sara, región Ayacucho. Este volcán está constituido por una sucesión de flujos de lava de composición andesítica que forman dos conos superpuestos.



Figura 1. Vista del flanco norte del volcán Auquihuato, ubicado en una altiplanicie volcánica.

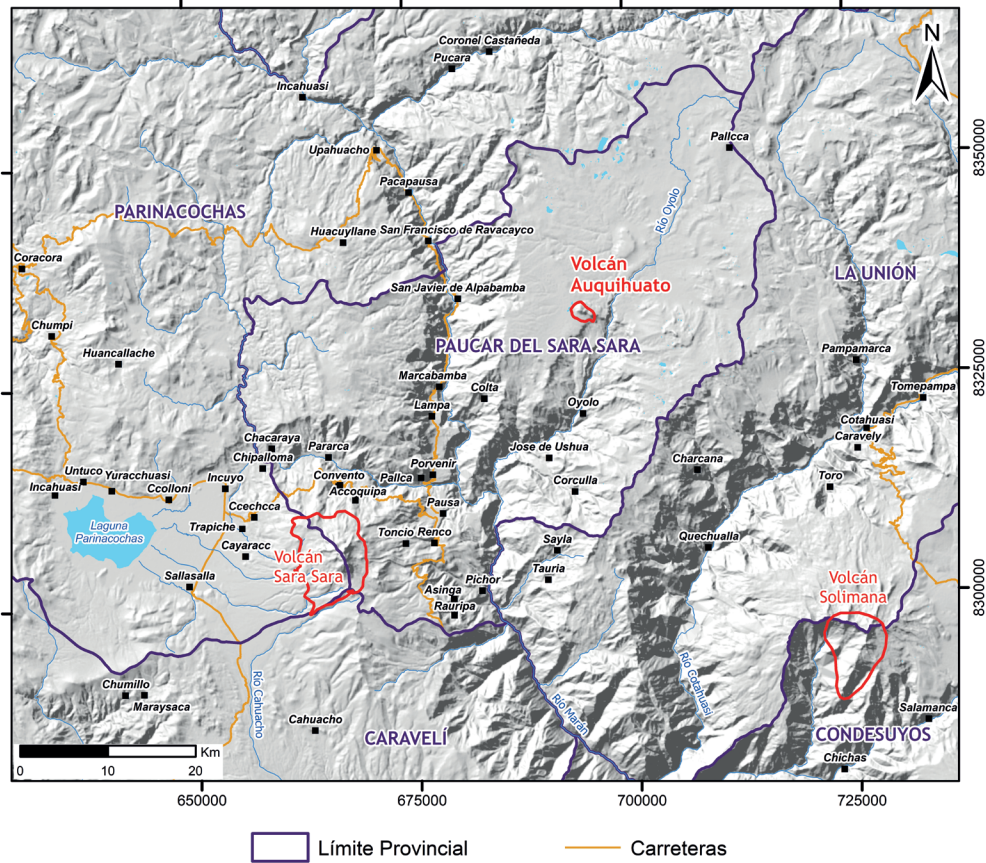


Figura 2. Mapa de ubicación del volcán Auqui huato y poblados aledaños.

El volcán Auqui huato podría reactivarse en el futuro y generar una erupción cuyos productos pueden afectar áreas aledañas donde se ubican poblaciones dedicadas principalmente a la agricultura, la ganadería y actividades mineras. En ese sentido, el objetivo central del presente estudio es presentar los mapas de peligros del volcán Auqui huato, con el propósito de brindar a la sociedad, instituciones del SINAGERD (INDECI, CENEPRED, etc.) y autoridades locales y regionales (Gobierno Regional de Ayacucho, municipalidades provinciales y distritales, etc.) un documento oficial que permita efectuar la elaboración de planes de prevención, la formulación de proyectos de desarrollo y el manejo

de una eventual crisis volcánica del Auqui huato.

1.1 Condiciones climatológicas

En este estudio se presentan datos de temperatura y precipitación del área circundante al volcán Auqui huato. Los datos corresponden a tres estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), denominadas Cotahuasi, Lampa y Puica (Tabla 1), las cuales son las más cercanas al volcán Auqui huato. Los datos corresponden al periodo 1963–2024.

Tabla 1. Datos de las estaciones meteorológicas de Cotahuasi, Lampa y Puica, operadas por SENAMHI, ubicadas en inmediaciones del volcán Auqui huato.

Nombre	Coordenadas		Altitud (m s. n. m.)	Periodo de Registro	Cuenca
	Latitud	Longitud			
Cotahuasi	-15.2077	-72.8908	2683	1963–2024	Ocoña
Lampa	-15.1833	-73.3333	2750	1964–2025	Ocoña
Puica	-15.0666	-72.6666	3362	1963–2024	Ocoña

1.1.1 Temperatura

De acuerdo con los registros de la estación meteorológica de Puica, ubicada a 56 km al sureste del volcán Auqui huato, entre los años 2021 y 2025 se registró una temperatura máxima promedio de 19.3°C y una temperatura mínima promedio de 1.7 °C. La temperatura máxima fue 24.8 °C y la temperatura mínima fue -2.8 °C.

1.1.2 Precipitación

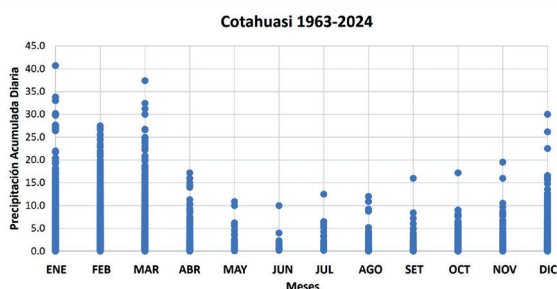


Figura 3. Precipitación acumulada diaria de la estación meteorológica Cotahuasi, ubicada a 35 km al sureste del volcán Auqui huato, periodo enero de 1963-enero de 2024 (SENAMHI, 2025).

De acuerdo con los registros de la estación meteorológica de Cotahuasi, ubicada a 35 km al sureste del volcán Auqui huato, en el periodo 1963–2024 se han registrado precipitaciones entre diciembre y marzo que alcanzaron hasta 41 mm, mientras que entre los meses de abril y noviembre alcanzaron hasta 20 mm (Figura 3).

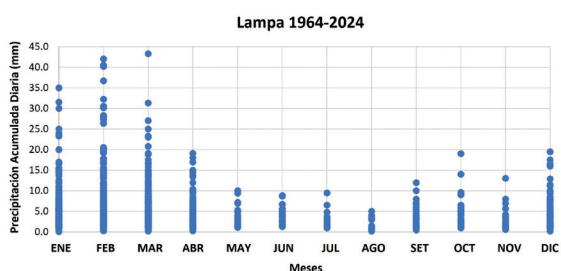


Figura 4. Precipitación acumulada diaria registrada en la estación meteorológica Lampa entre enero de 1964 y enero de 2024 (SENAMHI, 2025).

De acuerdo con los registros de la estación pluviométrica Lampa, ubicada a 20 km al suroeste del volcán Auqui huato, en el periodo 1964–2024, las precipitaciones ocurrieron entre los meses de diciembre y marzo, registrándose

hasta 43 mm; en tanto, entre los meses de abril y noviembre llegaron hasta 19.0 mm (Figura 4).

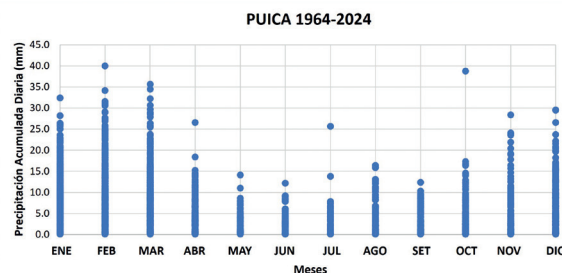


Figura 5. Precipitación acumulada diaria registrada por la estación meteorológica Puica, entre enero de 1964 y enero de 2024 (SENAMHI, 2025).

Según los datos de la estación meteorológica Puica, ubicada a 56 km al sureste del volcán Auqui huato, las mayores precipitaciones ocurren en los meses de noviembre y marzo, alcanzando valores diarios de hasta 40 mm, mientras que en los meses de abril y octubre las precipitaciones registradas fueron de hasta 18.4 mm. En este periodo, se registraron precipitaciones inusuales de entre 26.6 mm y 38.8 mm (Figura 5).

1.2 Aspecto socioeconómico

1.2.1 Dato poblacional

El volcán Auqui huato se ubica en la provincia de Páucar del Sara Sara, sobre la zona de amortiguamiento de la subcuenca del Cotahuasi, en el límite de los distritos de Colta y Oyolo. Según el INEI (2018), en un radio de 30 km del volcán Auqui huato viven aproximadamente 10 404 personas en 223 centros poblados, pertenecientes a 17 distritos (Tabla 2). Asimismo, existe un total de 3373 viviendas, de las cuales el 89 % cuenta con acceso a agua potable (INEI, 2018).

Dentro del mismo perímetro existe una población escolar de 2971 alumnos y 179 instituciones educativas (MINEDU, 2024), 19 centros de salud e importantes comunidades campesinas, como Ampí, Huayta, Pucara, Sauricay, Ccalaccapcha y Huarhua (Ministerio de Cultura, 2025).

En cuanto a la actividad económica, las poblaciones ubicadas dentro del radio de 30 km del volcán Auqui huato basan su actividad económica principalmente en la agricultura, la ganadería y la explotación minera (distritos de

Oyolo y San Francisco de Ravacayco), seguidas por la industria de la construcción (Oyolo) y el transporte (Pacapausa) (Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo-MTPE, 2020).

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

Distrito	Provincia	Región	Altura (m s. n. m.)	Población en 30 km
Tauria	La Unión	Arequipa	2850	4
Sayla	La Unión	Arequipa	3544	267
Quechualla	La Unión	Arequipa	1657	188
Charcana	La Unión	Arequipa	3432	577
Pampamarca	La Unión	Arequipa	3387	122
San Francisco de Ravacayco	Parinacochas	Ayacucho	2833	516
Pacapausa	Parinacochas	Ayacucho	2821	594
Upahuacho	Parinacochas	Ayacucho	3340	172
Coronel Castañeda	Parinacochas	Ayacucho	3622	24
Corculla	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	3503	445
Pausa	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	2536	2828
San José de Ushua	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	3034	221
Lampa	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	2809	1669
Marcabamba	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	2615	613
Colta	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	3267	468
San Javier de Alpbamba	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	2628	292
Oyolo	Páucar del Sara Sara	Ayacucho	3410	1404
TOTAL				10 404

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

- Unidades mineras Inmaculada y Picha.
- Prospectos mineros Jello Pata Norte, Jello Pata Sur, Cresta de Gallo y Colpar.
- Red vial, con aproximadamente 824 km de carreteras.
- Zona agrícola con aproximadamente 8728 ha.

En un radio de 30 km del volcán Auquihuato existe una importante variedad de ecosistemas (MINAM, 2016) y diversidad biológica (MINAM, 2019) que se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Ecosistemas, cobertura vegetal y especies animales presentes en el ámbito del volcán Auquihuato.

Ecosistemas
• Bofedales
• Periglaciares y glaciares
• Matorral andino
• Pajonal de puna seca
• Bosque relicto altoandino (queñoal, otros)
Especies
• <i>Opuntia soehrensii</i>
• <i>Hippocamelus antisensis</i>
• <i>Corryocactus brevistylus</i>
• <i>Echinopsis peruviana</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 (caída de tefras), 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 6. A continuación, se describen estos fenómenos para el caso del volcán Auquihuato.

2.1 Caída de piroclastos (tefras)

Las erupciones explosivas emiten fragmentos de roca o piroclastos hacia la atmósfera en forma de una columna eruptiva densa que, a veces, puede alcanzar varios kilómetros de altura. Posteriormente, los fragmentos volcánicos son transportados y dispersados por los vientos a distancias kilométricas. En ese sentido, los fragmentos más grandes y densos caen cerca del volcán y se denominan bombas o bloques (>64 mm), mientras que las partículas de menor tamaño, denominadas lapilli (2–64 mm) y ceniza (<2 mm), son llevadas por el viento a grandes distancias, para luego caer y formar una capa de varios milímetros o centímetros de espesor.

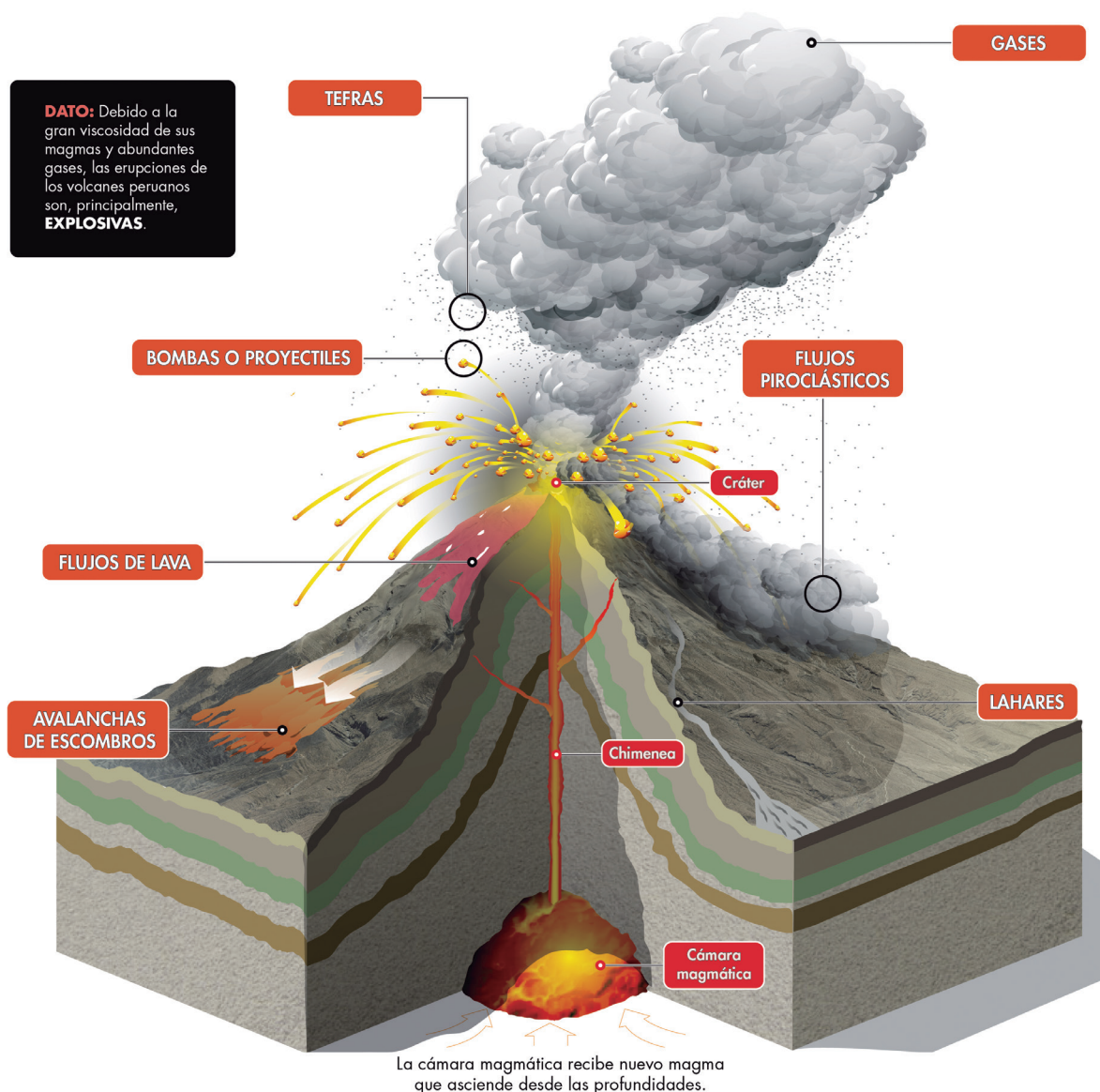


Figura 6. Tipos de peligro volcánico que puede presentar un volcán como el Auquihuato.

La distancia alcanzada por los fragmentos de roca dependerá de la magnitud de la erupción, densidad de los fragmentos y de la 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).

Las cenizas volcánicas adheridas a gases volcánicos pueden causar problemas de salud en las personas, contaminar las fuentes de agua, colapsar los techos por el peso acumulado, afectar cultivos, interrumpir el tráfico aéreo, entre otros (Tilling, 1989).

En el sur peruano, todos los volcanes activos y potencialmente activos, como el Misti, Ubinas, Sabancaya, Tutupaca y otros, a lo largo de su evolución, han presentado actividad explosiva con emisión de volúmenes variables de ceniza, lapilli de pómez, escorias y flujos piroclásticos. Los productos de estas erupciones han afectado poblados, obras de infraestructura y el medio ambiente. 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 e intermitente de los volcanes Ubinas y Sabancaya ocurridas en las últimas décadas.

Aunque el volcán Auqui huato, a lo largo de su evolución, ha presentado relativamente pocas erupciones explosivas, en caso de una eventual reactivación volcánica dicho volcán puede presentar actividad explosiva con emisión de tefras que pueden afectar poblados, terrenos de cultivos, terrenos de pastizales, proyectos mineros y otros, ubicados en áreas aledañas a dicho volcán.

2.2 Flujos de lava

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

Los flujos de lava calcinan y destruyen todo a su paso; sin embargo, no representan un peligro

para las personas debido a su baja velocidad de desplazamiento (Tilling, 1989).

En el sur peruano todos los volcanes activos y potencialmente activos, como el volcán Auqui huato, a lo largo de su evolución, han presentado actividad efusiva con la emisión de flujos de lava que han contribuido a formar su cono actual. Al pie del flanco suroeste del volcán Auqui huato se distingue un flujo de lava dacítico que viajó más de 12 km de distancia respecto al volcán.

2.3 Flujos piroclásticos

Las erupciones explosivas importantes o de alto Índice de Explosividad Volcánica (IEV) pueden generar flujos piroclásticos o 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 descenden por los flancos de un volcán a ras de la superficie y a grandes velocidades, comprendidas entre 100 m/s y 300 m/s (Hoblitt et al., 1995). Poseen, por lo general, una parte inferior densa que se encauza y desplaza por el fondo de las quebradas o valles, y otra superior, menos densa, denominada oleada piroclástica, compuesta por una nube turbulenta de gases y ceniza que con facilidad sale del valle, sobrepasando relieves importantes como lomas o cerros, y afecta áreas considerables. Estos flujos y oleadas destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso (Tilling, 1989).

Los estudios vulcanológicos realizados durante los últimos 20 años muestran que la gran mayoría de los volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano, como Misti, Ubinas, Yucamane, Tutupaca, Ticsani, Sara Sara y Chachani (Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Mariño & Thouret, 2003; Samaniego et al., 2015; Rivera et al., 2020a; Rivera et al., 2020b; Aguilar et al., 2022), presentaron durante su evolución erupciones explosivas con emisiones de flujos piroclásticos, los cuales yacen en sus alrededores. En inmediaciones del volcán Auqui huato no se han distinguido flujos piroclásticos ligados a su actividad eruptiva.

2.4 Lahares (flujos de lodo y escombros)

Los lahares o flujos de lodo y escombros son mezclas de partículas volcánicas de tamaños

diversos movilizados por el agua, que fluyen rápidamente (20–60 km/h) por valles y quebradas originadas en los volcanes. Se generan en periodos de erupción o de tranquilidad volcánica, principalmente ligados a lluvias intensas (Tilling, 1989), aunque también pueden provenir de la fusión de hielo o nieve debido a la interacción de productos volcánicos calientes, como los flujos piroclásticos.

Los lahares, eventualmente, pueden salir de sus cauces y afectar áreas urbanas, como ocurrió con los lahares que destruyeron la ciudad de Armero en Colombia, luego de la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985 (Naranjo et al., 1986). El área inundada o afectada por un lahar 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 ríos (Tilling, 1989).

La mayoría de los volcanes activos en los Andes peruanos presentan este tipo de peligro, sobre todo en periodos de lluvia (diciembre a marzo), durante los cuales las lluvias que caen en sus laderas o cumbres erosionan y transportan los materiales volcánicos sueltos denominados lahares. El volumen y distancia que recorre un lahar está en función del volumen de agua, el volumen del material suelto, la sinusidad del cauce y la pendiente del volcán.

2.5 Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros se generan por el derrumbe o colapso de un sector o la cima de un volcán. Se originan debido a factores de inestabilidad, tales como la elevada pendiente del volcán, la presencia de fracturas o fallas tectónicas en el volcán, los movimientos sísmicos fuertes y las 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.), la avalancha generada estuvo asociada a una erupción lateral dirigida, cuya velocidad varió entre 113 km/h y 240 km/h (Brantley & Myers, 1997).

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, desde 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 y Sara Sara, han presentado derrumbes de flanco que generaron depósitos de avalanchas distribuidos en áreas aledañas (Thouret et al., 2001; Mariño & Thouret, 2003; Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2015; Rivera et al., 2020a).

2.6 Gases volcánicos

Durante las erupciones volcánicas se produce una importante liberación de gases, principalmente vapor de agua, pero también dióxido de carbono, dióxido de azufre, ácido clorhídrico, monóxido de carbono, ácido fluorhídrico, azufre, nitrógeno, cloro, flúor, etc. (Hoblitt et al., 1995).

Los gases volcánicos se diluyen y dispersan rápidamente; sin embargo, pueden alcanzar concentraciones altas en las zonas bajas o depresiones muy cercanas al volcán, donde pueden generar intoxicación y muerte de personas y animales. Los gases también pueden condensarse y adherirse a partículas de ceniza, así como reaccionar con las gotas de agua y provocar lluvias ácidas que generan corrosión, daños en los cultivos, además de contaminación de aguas y suelos. Frecuentemente, los efectos nocivos de los gases están restringidos a un radio menor de 10 km del volcán (Tilling, 1989).

3. El volcán Auqui huato

3.1 Historia eruptiva

El volcán Auqui huato corresponde a un cono de lavas de 200 m de altura, ligeramente alargado en dirección NNO-SSE, con pendientes inclinadas (20–30°). Se ha construido sobre lavas andesíticas y dacíticas subhorizontales visibles en la base del cono volcánico. En conjunto, dichas unidades reposan sobre secuencias de ignimbritas soldadas

dispuestas de manera subhorizontal, depositadas durante el Plioceno. La morfología actual Auqui huato revela una evolución marcada principalmente por múltiples etapas de actividad efusiva caracterizadas por la emisión de flujos de lava.

Según el estudio estratigráfico realizado, este volcán se desarrolló en tres etapas de corta duración: 1) en una primera etapa se emplazaron las lavas de la base del volcán, que en total miden aproximadamente 80 m de espesor (Figura 7), de composición andesítica y de textura porfírica, constituidas por fenocristales de plagioclasa, piroxenos, anfíbol y biotita. Estas lavas descansan sobre las ignimbritas de la Formación Alpabamba, datada en 20–18 Ma (Thouret et al., 2016).



Figura 7. Vista del flanco sur del volcán Auqui huato, donde se distinguen lavas basales subhorizontales sobre las cuales se construyó el cono superior.

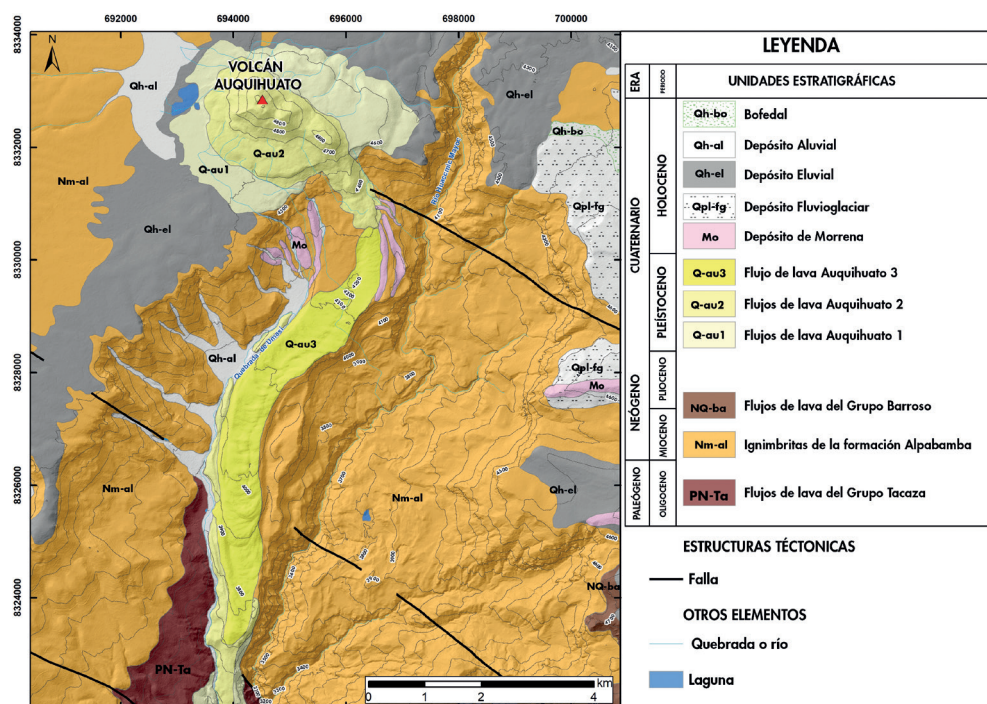


Figura 8. Mapa geológico del volcán Auqui huato (modificado de Thouret et al., 2016; Martínez & Cervantes, 2003).

2) En una segunda etapa se emplazaron las lavas del cono superior del volcán Auqui huato (Figura 8). Las lavas son de composición andesítica, de color gris y de textura porfirítica, y están constituidas de fenocristales de plagioclasa, piroxenos, anfíbol y óxidos de Fe-Ti. Este cono resalta sobre el paisaje de las pampas del Auqui huato, donde se han identificado depósitos eluviales y tefras retrabajadas. Según el grado de erosión de las rocas del volcán Auqui huato, y dado que yacen sobre ignimbritas consolidadas de la Formación Alpbamba del Mioceno, se asume que estas lavas fueron emplazadas durante el Pleistoceno superior (Thouret et al., 2016).

3) En una tercera etapa, posiblemente se emplazó la extensa colada de lava andesítica visible en el flanco suroeste del volcán Auqui huato (Figura 8), la cual supera los 12 km de longitud y presenta un ancho de hasta 1 km. Esta colada sigue una dirección predominante sureste, canalizada a lo largo de la quebrada Umasi, situada al norte del pueblo de Oyolo (Figura 8). Además, remanentes de esta colada de lava pueden observarse en la margen izquierda del río Oyolo, específicamente en las zonas de Mataya y el poblado de San José de Ushua.

Por otro lado, en el entorno del volcán Auqui huato existen lineamientos tectónicos de orientación predominante noroeste-sureste, entre los que destacan los lineamientos de Huancarama, Auqui huato, Andamarca, Oyolo, Cruz Pata, Puca Ccasa, Pirca y Sara Sara (Martínez & Cervantes, 2003).

3.2 Actividad volcánica reciente

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

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 orientado a determinar características de erupciones pasadas y la geología del volcán Auquihuato.
- Procesamiento de imágenes de satélite Landsat del volcán Auquihuato 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 Auquihuato.
- 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 Auquihuato.

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, 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. El *software* 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 Auquihuato en caso del escenario de erupciones explosivas de tipo vulcanianos (IEV 1-2), se consideró un volumen DRE de ceniza de 0.002 km^3 , volumen frecuentemente emitido en erupciones explosivas de tipo vulcaniano, como la presentada por el volcán Tungurahua el 14 de julio de 2006 (Bustillos & Samaniego, 2011) y por el volcán Ubinas durante los últimos 500 años (Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2020). También se consideró una altura de la pluma volcánica de 6.5 km.

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

Escenario eruptivo	IEV 1-2
Duración de la simulación	24 horas
Duración de la erupción	3 horas
Altura sobre el nivel del cráter	6.5 km
Altura sobre el nivel del mar	11.5 km
Volumen DRE (km ³)	0.002

Por otro lado, en la simulación para la depositación de cenizas del volcán Auquihuato para un escenario de erupción de tipo subpliniano (IEV 3), se consideró un volumen DRE de ceniza de 0.04 km³. Este y otros parámetros utilizados para la simulación de un escenario eruptivo de IEV 3 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.

Escenario eruptivo	IEV 3
Duración de la simulación	24 horas
Duración de la erupción	5 horas
Altura sobre el nivel del cráter	10 km
Altura sobre el nivel del mar	15 km
Volumen DRE (km ³)	0.04

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 al 2024. En todos los casos se consideró la dirección del viento predominante (SE y SO de la cima del volcán Auquihuato). 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 y en sección transversal inundadas por dicho lahar (Figura 9). Con base en la recopilación de datos de campo de 27 eventos lahárlicos 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 9). 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.

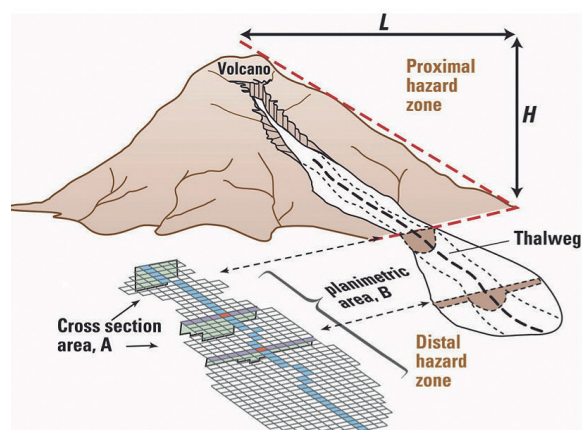


Figura 9. Relaciones entre la distancia (L) y la altura (H) por donde recorrerían los lahares, así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B) inundadas por un lahar (Schilling, 1998).

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 ampliamente 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 9). 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; Warwick et al., 2022). Detalles sobre el código VolcFlow y sus aplicaciones para simulaciones de lahares se pueden encontrar en Cárdenas et al. (2013) y Vásconez et al. (2019).

4.3 Escenarios eruptivos considerados

Para la elaboración de los escenarios eruptivos del volcán Auqui huato, se han considerado datos de campo y los estudios geológicos previos efectuados sobre dicho volcán y volcanes análogos (Sabancaya, Ubinas y Ticsani), así

como el estado y la morfología que presenta en la actualidad el volcán Auqui huato y otros aspectos que se describen a continuación:

- Los dinamismos eruptivos futuros, es decir, los tipos de erupciones que podría presentar el volcán Auqui huato.
- 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 Auqui huato, tales como los volcanes de Andahua-Huambo, Ubinas, Ticsani.

Adicionalmente, se consideró la presencia de nieve y hielo en las partes altas del volcán Auqui huato, especialmente durante la temporada de lluvias (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 Auqui huato, los cuales se detallan a continuación.

4.3.1 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 o plumas volcánicas de menos de 20 km de altura (Sigurdsson et al., 2000); en ocasiones, en dichas erupciones se generan flujos piroclásticos. La ceniza emitida durante dicha erupción puede ser dispersada a algunas decenas de kilómetros de distancia y sobrepasar fácilmente los 50 km de distancia. En el sur peruano, los volcanes Misti, Ubinas, Sabancaya y otros han presentado erupciones vulcanianas con Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 1 y 2 (Thouret et al., 2001; Gerbe & Thouret, 2004; Rivera et al., 2014; Rivera et al., 2016). En el caso del volcán Misti, las erupciones vulcanianas de IEV 1–2 han generado varios depósitos de caída de ceniza, y de variado volumen. Durante la última erupción vulcaniana del Misti ocurrida entre los años 1440–1470 d. C., que tuvo un IEV 2 (Thouret et al., 2001), se emplazaron caídas de ceniza

de color gris oscuro que formaron una capa de aproximadamente 10 cm de espesor en la parte superior del cono volcánico, y 1 cm de espesor a 20 y 30 km al oeste y norte del cráter del volcán, respectivamente.

En el caso del volcán Sabancaya (Arequipa), durante la actividad eruptiva 1988–1998 se generaron columnas de cenizas de 1 km a 3 km de altura que fueron dispersadas por los vientos hasta 30 km de distancia en dirección este (Guillande et al., 1992; Thouret et al., 1994). Posteriormente, en su proceso eruptivo 2016–2025, la dispersión de ceniza fue predominante en dirección este, sureste y noreste del volcán, sobrepasando los 50 km de distancia.

Por otra parte, el volcán Ubinas, durante la erupción del 19 de julio de 2019 (Figura 10), de IEV 2, generó una columna de cenizas y gases de más de 5500 m de altura sobre la cima del volcán. Posteriormente, 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 y Puno, así como algunas ciudades de Bolivia, como La Paz. Durante la erupción de 2019 se registraron depósitos de caídas de ceniza de 1 mm de espesor a 20 km de distancia al sureste del volcán Ubinas (Aguilar et al., 2019).

En el caso del Auqui huato, aunque no se han identificado depósitos de caídas de ceniza ligados a una erupción explosiva de tipo vulcaniano (IEV 1–2), este volcán puede generar una erupción explosiva con la emisión de cenizas que podrían afectar áreas aledañas.

Cabe mencionar que durante erupciones vulcanianas (IEV 2) también pueden generarse flujos piroclásticos de poco volumen y limitado alcance (Sigurdsson et al., 2000). Dependiendo de la topografía del terreno, estos flujos pueden sobrepasar los 6 km del cráter del volcán, lo que afectaría la vida de algunos pobladores que habitan en áreas próximas al volcán.

4.3.2 Erupción de tipo efusiva con emisión de lavas

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



Figura 11. Vista de flujos de lavas del volcán Pacaya (Guatemala), emitidos entre el 5 de febrero y el 23 de abril de 2021. Las lavas viajaron hasta 3.7 km del volcán.

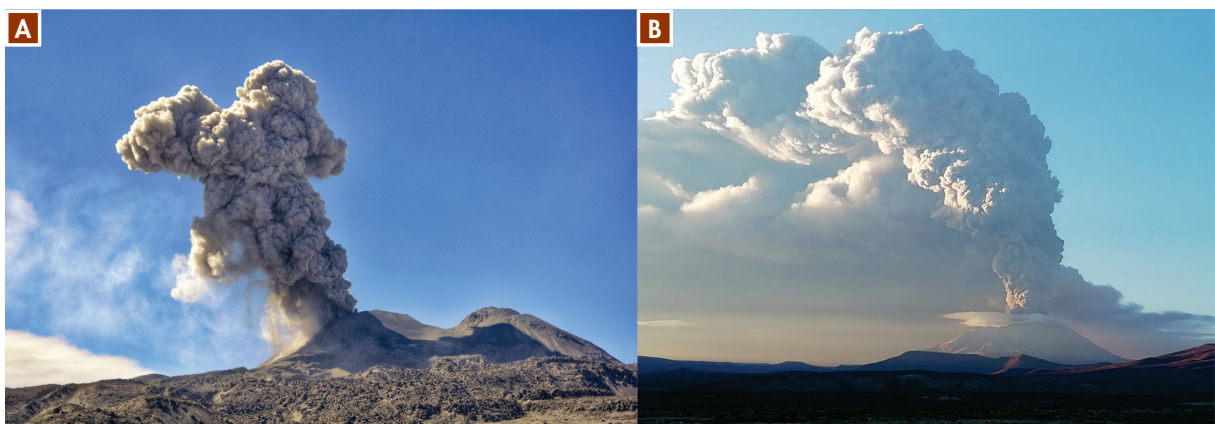


Figura 10. Vista de volcanes que presentaron erupciones vulcanianas de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 1–2: A) Actividad explosiva de julio de 2024 del volcán Sabancaya. B) Erupción del 19 de julio de 2019 del volcán Ubinas.

De acuerdo con los estudios vulcanológicos realizados en el volcán Auquihuato, a lo largo de su evolución este ha presentado actividad efusiva caracterizada por la emisión de flujos de lava que han alcanzado distancias de hasta 12 km del volcán. En el futuro, es posible que el volcán se reactive y genere actividad efusiva con la emisión de flujos de lava. La posibilidad de ocurrencia de una erupción efusiva es de baja a moderada.

4.3.3 Erupción con crecimiento de domo

En el caso de una reactivación del volcán Auquihuato, es posible la formación de un domo de lava. Dicho domo se forma cuando la lava, por extrusión dentro del conducto volcánico, es demasiado viscosa para fluir a más de uno o varios cientos de metros de distancia (Francis, 1993). Durante el crecimiento del domo, los extremos de dicho domo vienen a ser inestables y pueden caer o colapsar dando lugar a la formación de flujos piroclásticos y avalanchas de escombros.

El escenario que describe una futura erupción con el crecimiento y colapso de un domo de lava se basa en la presencia de domos de lava en volcanes análogos, como el volcán Sabancaya, el cual ha presentado durante el reciente periodo eruptivo (2016–2025) el crecimiento recurrente de domos de lava (Figura 12) que fueron visibles en el cráter del volcán (Machacca et al., 2023). Estos domos fueron destruidos por las constantes explosiones que presentó dicho volcán. Eventualmente, un domo en crecimiento puede colapsar dando lugar a la generación de flujos piroclásticos que pueden recorrer distancias de más de 6 km de la cima del volcán.

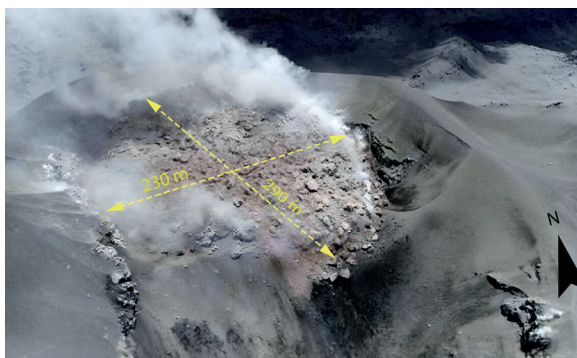


Figura 12. Vista de la superficie del domo de lava del volcán Sabancaya (29 de octubre de 2019). En aquel entonces, el domo medía aproximadamente 230 × 290 m (Coppola et al., 2022).

La mayor amenaza asociada a domos de lava radica en generar una explosión lateral dirigida (“blast”). Estos son fenómenos complejos que comparten características de flujos y oleadas piroclásticas. Estas 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 Auquihuato no se ha registrado el crecimiento de domos o una erupción lateral dirigida, en el futuro dicho volcán puede reactivarse y generar una erupción de ese tipo, aunque las posibilidades son bajas. Durante una erupción lateral dirigida, los flujos piroclásticos producidos se desplazarían por los diversos sectores, cubriendo la altiplanicie, las depresiones y laderas localizadas alrededor del volcán Auquihuato, alcanzando distancias mayores a 8 km del volcán, tal como ocurrió en la erupción del volcán Tutupaca en el año de 1802 (IEV 3), en la cual se generaron depósitos de avalancha de escombros y flujos piroclásticos. Estos últimos viajaron poco más de 10 km de distancia al noreste del volcán (Samaniego et al., 2015).

4.3.4 Erupción de tipo subpliniano (IEV 3)

Durante erupciones explosivas de tipo subpliniano, con IEV 3, las columnas de gases y tefra (ceniza, lapilli de pómez, etc.) alcanzan comúnmente entre 3 km y 20 km de altura sobre la cima del volcán y generan depósitos de caída de tefra y flujos piroclásticos (Sigurdsson et al., 2000). La ceniza, influenciada por los vientos, puede ser dispersada a decenas y centenas de kilómetros de distancia

del volcán. En este tipo de erupciones se pueden generar flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, etc. que serían canalizados en quebradas y valles que drenan del volcán. Además, cuando los productos volcánicos calientes emitidos durante una erupción explosiva de IEV 3 interactúan con el casquete glaciar, cobertura de nieve o durante fuertes precipitaciones podrían desencadenar lahares o flujos de lodos.

En el continente sudamericano, el volcán Tungurahua (Ecuador), el 16 de agosto de 2006, desarrolló una erupción subpliniana con IEV 3 (Figura 13) que produjo una columna eruptiva de gases y ceniza de aproximadamente 18 km de altura. Posteriormente, las cenizas fueron dispersadas a varias decenas de kilómetros del volcán, principalmente en dirección norte y oeste. Después de dicha erupción, se midieron capas de caídas de ceniza de 4 cm y 5 cm de espesor a 10 km de distancia del cráter (Eychenne et al., 2012).



Figura 13. Vista de la erupción del 16 de agosto de 2006 del volcán Tungurahua (Ecuador), de IEV 3.

En 1985, el volcán Nevado del Ruiz (Colombia) generó una erupción subpliniana de IEV 3, la cual dejó un depósito de ceniza en áreas aledañas. La isópaca de 1 cm de espesor se midió a 35 km de distancia del volcán (Naranjo et al., 1986).

En la región de Tacna, el volcán Yucamane produjo, hace aproximadamente 3085 años AP, una erupción subpliniana que tuvo un IEV 3. Esta erupción se caracterizó por la formación de una columna eruptiva de entre 11 km y 12 km de altura sobre el nivel del mar, generando un depósito de caída piroclástica de $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$, con un alcance de más 10 km, y un flujo piroclástico con volumen de $9 \times 10^6 \text{ m}^3$ que se extendió a 5 km al noreste del volcán (Rivera et al., 2020b).

En el caso del volcán Auqui huato, aunque no se han identificado depósitos de caídas de tefra ligadas a una erupción explosiva de tipo

subpliniano presentada por dicho volcán; en el futuro podría generar un evento de este tipo, aunque la posibilidad es baja a muy baja. En tal escenario, podrían emitirse cenizas capaces de desplazarse a varias centenas de kilómetros alrededor del volcán y afectar gravemente áreas aledañas.

4.3.5 Colapso de flanco y emplazamiento de avalancha de escombros

No se han encontrado depósitos de avalanchas de escombros asociados al volcán Auqui huato. Sin embargo, depósitos de avalanchas de escombros se han identificado en varios volcanes del sur del Perú, como en Pichu Pichu, Ticsani, Misti, Ubinas, Tutupaca y Sara Sara (Mariño & Thouret, 2003; Rivera et al., 1998; Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Rivera et al., 2020a; Samaniego et al., 2015). El depósito de avalancha de escombros del volcán Ticsani, generado por un colapso de flanco occidental, cubrió aproximadamente 70 km^2 y alcanzó cerca de 40 km de distancia, luego de lo cual se transformó en lahar y fue canalizado por el río Tambo hasta llegar al océano Pacífico, situado a más de 150 km de distancia (Mariño & Thouret, 2003). En el volcán Ubinas se han encontrado hasta dos depósitos de avalanchas de escombros, emplazados durante el Pleistoceno superior ($>340 \text{ ka}$) y Holoceno (3670 ± 60 años AP), que alcanzaron 10 km y 4.5 km de distancia, respectivamente (Rivera et al., 1998; Thouret et al., 2005).

El volcán Auqui huato presenta flancos de fuerte pendiente (20° – 50°), así como sectores con rocas alteradas e hidrotermalizadas, factores que favorecen la ocurrencia de avalanchas de escombros. En el pasado, este volcán no ha generado avalanchas de escombros; por ello, es poco probable que ocurra un colapso de flanco que produzca una avalancha de escombros.

5. Resultados: mapas de peligros del volcán Auquihuato

Con base en los datos de campo y la simulación numérica, se han elaborado en el marco del presente estudio cuatro mapas de escenarios de peligros que consideran una erupción del volcán Auquihuato. Estos corresponden al 1) mapa de peligros múltiples para la zona proximal; 2) mapa de peligros por caída de ceniza para un escenario de erupción leve a moderada, de tipo vulcaniano (IEV 1–2); 3) mapa de peligros por caída de tefras para un escenario de erupciones explosivas de tipo subpliniano (IEV 3); 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 que cubrirían dichos eventos fueron integradas, producto del cual se tiene el mapa principal que considera peligros múltiples (Figura 14). Además, las zonas de alto, moderado y bajo peligro fueron determinadas con base en escenarios eruptivos establecidos en función del Índice de Explosividad Volcánica (IEV).

5.1.1 Zona de alto peligro (rojo)

Comprende un área proximal, ligeramente alargada de noroeste a sureste, que involucra el cono volcánico y diversas quebradas que drenan del volcán Auquihuato, las cuales pueden ser afectadas por la ocurrencia de flujos piroclásticos, flujos de lava, proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares (flujos de lodo). Cualquier tipo de erupción puede afectar dicha área, inclusive las de bajo Índice de Explosividad Volcánica (IEV 1–2).

Los límites de la zona de alto peligro se encuentran entre 2 km y 5 km de distancia del cráter del volcán Auquihuato (Figura 14). Las mayores distancias (3 km a 5 km del cráter) de la zona de alto peligro se encuentran en los sectores noreste, este y sureste del volcán, mientras que las menores distancias (2 km del cráter) están al oeste del volcán Auquihuato.

Los límites de la zona de alto peligro coinciden con el alcance de un gran número de flujos de lavas del Auquihuato, que se encuentran entre 2 km y 5 km de distancia desde su punto de emisión. Por otro lado, los proyectiles balísticos generados durante erupciones explosivas vulcanianas (IEV 1–2) pueden alcanzar distancias limitadas al volcán, típicamente menores a 3 km, según ejemplos de varios volcanes del sur del Perú (Rivera et al., 2014; Thouret et al., 1994). Además, un eventual colapso o derrumbe de un flanco del volcán Auquihuato puede generar avalanchas de escombros que afectarían dicha zona. Flujos piroclásticos generados durante erupciones vulcanianas (IEV 1–2), al igual que lahares generados durante erupciones o lluvias intensas, pueden afectar dicha zona.

En resumen, la zona de alto peligro (rojo) puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones explosivas vulcanianas de IEV 2, así como por flujos de lava, por proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares.

5.1.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona comprende la altiplanicie volcánica, y las quebradas y valles que drenan hacia el sureste del Auquihuato. Se extiende entre 5 km y 7 km de distancia al sureste del volcán. Asimismo, se extiende entre 2 km y 4 km de distancia al oeste, y de 3 km a 5 km al este y norte de dicho volcán (Figura 14). Esta zona puede ser cubierta por flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares, proyectiles balísticos y avalanchas de escombros en caso de que la erupción sea efusiva o explosiva de moderado a alto IEV (2–3).

Los límites de la zona de moderado peligro también coinciden con el alcance de algunos flujos de lava emitidos por el volcán Auquihuato que conforman su cono actual, los cuales se encuentran entre 4 km y 5 km de distancia del punto de emisión.

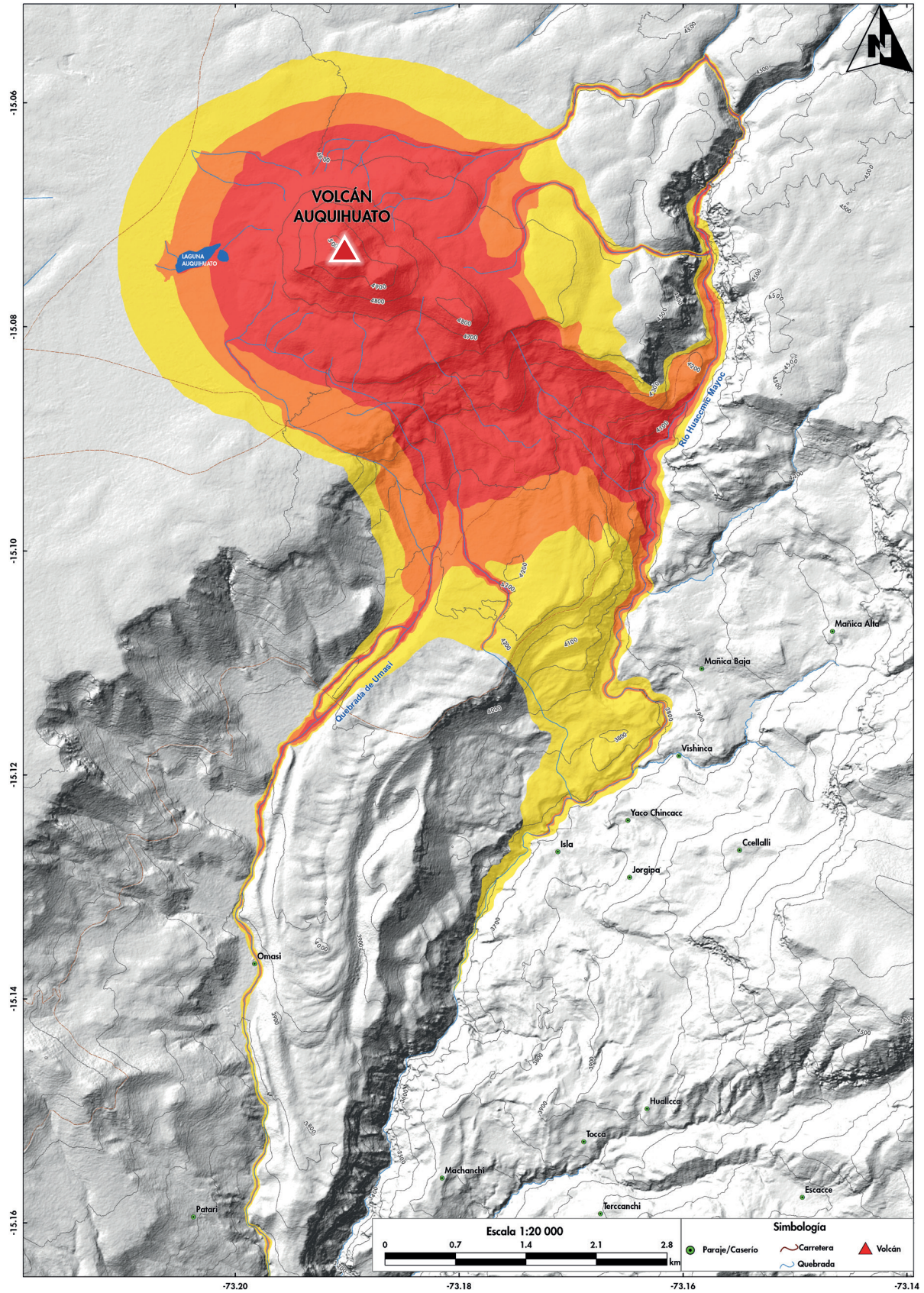


Figura 14. Mapa de peligros múltiples para la zona proximal, en el cual se muestran las zonas de peligro por el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas de escombros, lahares y eyección de proyectiles balísticos.

Por otro lado, el alcance 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 considerable de un flanco del volcán puede generar avalanchas de escombros que afectarían dicha zona. Asimismo, durante lluvias intensas pueden generarse lahares que afectarían dicha zona.

En resumen, la zona de moderado peligro (naranja) puede ser afectada por flujos piroclásticos y proyectiles balísticos generados durante erupciones explosivas de IEV 2–3, así como por flujos de lavas, avalanchas de escombros y lahares.

5.1.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

Esta zona se proyecta entre 7 km y 12 km hacia los sectores sur y sureste del volcán Auquihuato, y entre 5 km y 11 km hacia el sector este de dicho volcán. Así mismo, se proyecta entre 5 km y 11 km al oeste y suroeste del volcán Auquihuato, y de entre 3 km a 4 km al norte de dicho volcán. La zona de bajo peligro puede ser afectada por flujos piroclásticos, lahares y avalanchas de escombros, en caso de que la erupción explosiva sea muy importante (IEV ≥ 3). De igual manera, esta zona puede ser afectada por flujos de lava emitidos durante una erupción efusiva.

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 de dicho volcán (Samaniego et al., 2015). Asimismo, coincide con el alcance de algunos flujos de lava emitidos por el volcán Auquihuato, que se encuentran entre 8 km y 9 km de distancia de la cima del volcán. Además, un eventual colapso o derrumbe importante de un flanco del volcán puede generar avalanchas de escombros que afectarían dicha zona. Las lluvias intensas podrían generar lahares que afectarían la zona.

En resumen, la zona de bajo peligro (amarillo) puede ser afectada por flujos piroclásticos durante una erupción subpliniana (IEV 3). Asimismo, puede ser afectada por flujos de lava, avalanchas de escombros y lahares voluminosos. La probabilidad de ocurrencia de erupciones subplinianas en el Auquihuato 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 Auquihuato muestra tres zonas: zona de alto peligro en rojo, zona de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo (Figura 15).

5.2.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal, la cual presenta una configuración de forma elíptica. Esta zona se extiende hasta 26 km al oeste y 22 km de distancia al este del volcán Auquihuato (Figura 15). Durante erupciones vulcanianas de IEV 2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de algunos centímetros de espesor. Este escenario se basa en la dispersión de cenizas de erupciones vulcanianas de los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti.

5.2.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Los límites de la zona de moderado peligro se hallan aproximadamente de 23 km a 87 km al noroeste, y de 21 km a 98 km al sureste del Auquihuato (Figura 15). Durante erupciones vulcanianas de IEV 2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de varios milímetros de espesor. Esta hipótesis se basa en la dispersión de cenizas de la erupción vulcaniana del volcán Sabancaya, ocurrida entre los años 1988–1998 (IEV 2), que depositó una capa de ceniza de 1 mm de espesor a 30 km al este del volcán (Thouret et al., 1994); asimismo, en la dispersión de cenizas de la erupción actual del Sabancaya (2016–2025) que, a 20 km al este del cráter del volcán, se midió una capa de ceniza de 1 mm de espesor.

5.2.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro tiene una configuración

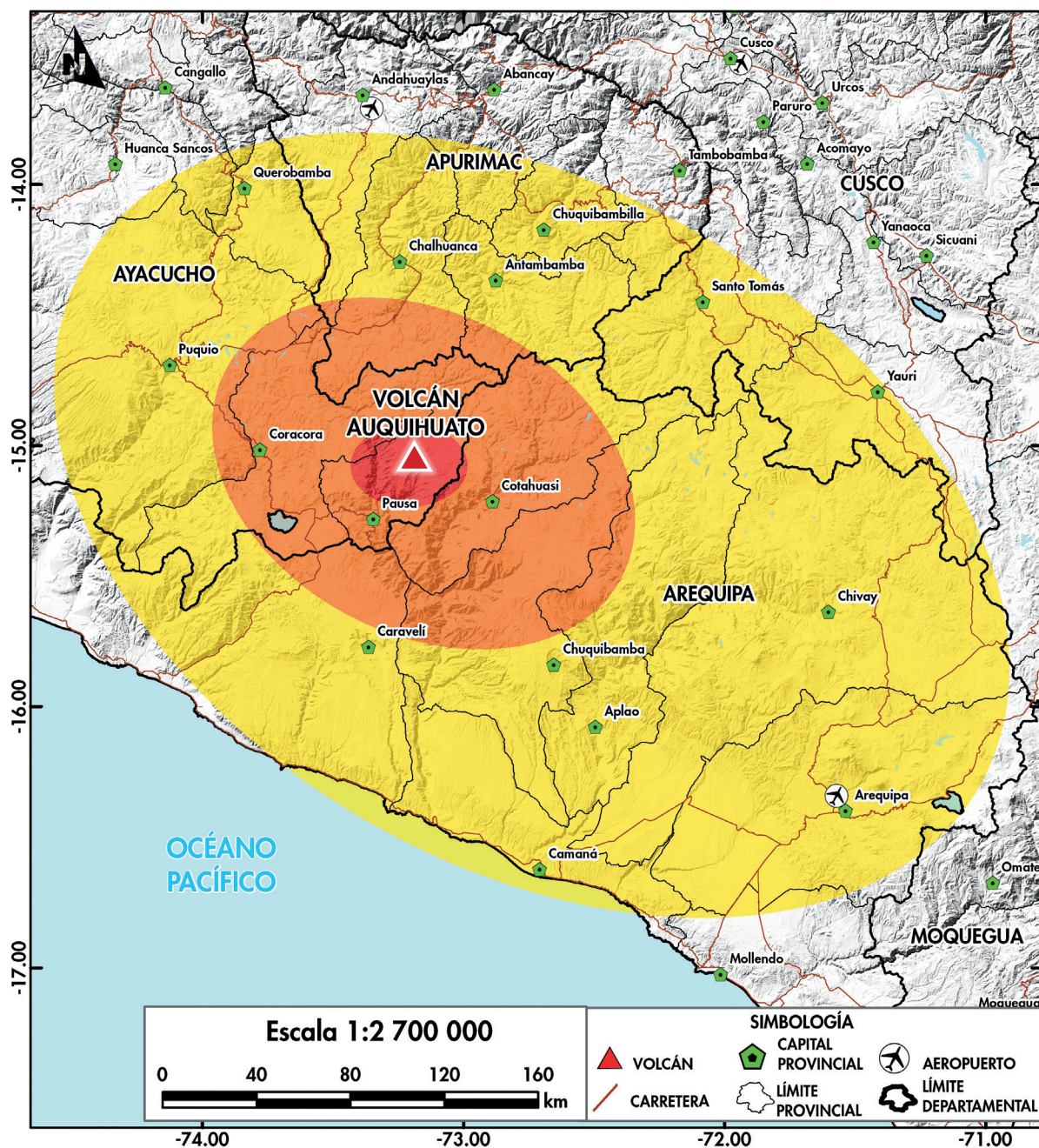


Figura 15. Mapa de peligro por caída de ceniza del volcán Auqui huato para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano de IEV 1–2 (simulación USGS, 2025).

elíptica, la cual se prolonga de 87 km a 160 km al noroeste y de 98 km a 269 km al sureste del volcán Auqui huato. Durante erupciones vulcanianas de IEV 2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor. Este escenario se basa en el último proceso eruptivo del volcán Sabancaya ocurrido entre los años 2016–2025, durante el cual se midieron capas de ceniza de menos de 1 mm de espesor a más de 30 km al este del volcán.

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

En inmediaciones del volcán Auqui huato no se han encontrado depósitos volcánicos asociados a erupciones subplinianas. En tal sentido, la posibilidad de ocurrencia de tales erupciones en el Auqui huato es muy baja.

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 57 km a 122 km al noroeste, y de 63 km a 117 km al sureste del volcán Auqui huato (Figura 16). Durante erupciones subplinianas de IEV 3, esta zona puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían varios milímetros a algunos centímetros de espesor. Esta estimación se basa en algunos ejemplos pasados, como en el caso de la erupción del volcán Nevado del Ruiz ocurrida en noviembre de 1985, durante la cual la ceniza se depositó formando una capa de 2 cm de espesor a 30 km de distancia del volcán. De manera similar, en el caso de la erupción de IEV 3 del volcán Tungurahua (Ecuador) ocurrida en agosto 2006, en la que se reportaron espesores de ceniza de 0.7 cm a 0.8 cm a 20 km del volcán (Eychenne et al., 2012).

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, con distancias desde el volcán que varían entre 122 km y 337 km al noroeste, y entre 117 km a 608 km al sureste del volcán Auqui huato (Figura 16). En esta zona podrían depositarse cenizas de menos de 1 mm de espesor. Los vientos van a influenciar en la distribución de la caída de ceniza. Está hipótesis se basa en la erupción del volcán Nevado del Ruiz (Colombia) ocurrida en noviembre de 1985, durante la cual se midió una capa de ceniza de 2 mm y 3 mm de espesor a 50 km de dicho volcán. Por su parte, luego de la erupción subpliniana de IEV 3 del volcán Tungurahua (Ecuador) ocurrida en agosto de 2006 (Eychenne et al., 2012) se reportaron espesores de ceniza de 0.7 cm a 0.8 cm a 20 km de distancia del volcán.

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 Auqui huato, además de la existencia de una capa de hielo y nieve en periodos de lluvia (diciembre a marzo), los volúmenes de los eventos laháricos escogidos fueron de 150 000 m³ para lahares de poco volumen, y que se estiman son más frecuentes, y volúmenes de 350 000 m³ y 500 000 m³ para lahares de mayor volumen, pero menos frecuentes.

En el mapa de peligros por lahares (Figura 17), la zona roja es considerada como zona de alto peligro, y corresponde a la zona de mayor posibilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos (150 000 m³), asociados a erupciones de baja Índice de Explosividad Volcánica 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, considerada de bajo peligro, es la de menor posibilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos (500 000 m³). Los lahares voluminosos (350 000 m³ y 500 000 m³) podrían estar asociados a erupciones de gran magnitud (IEV 2–3) o lluvias muy intensas.

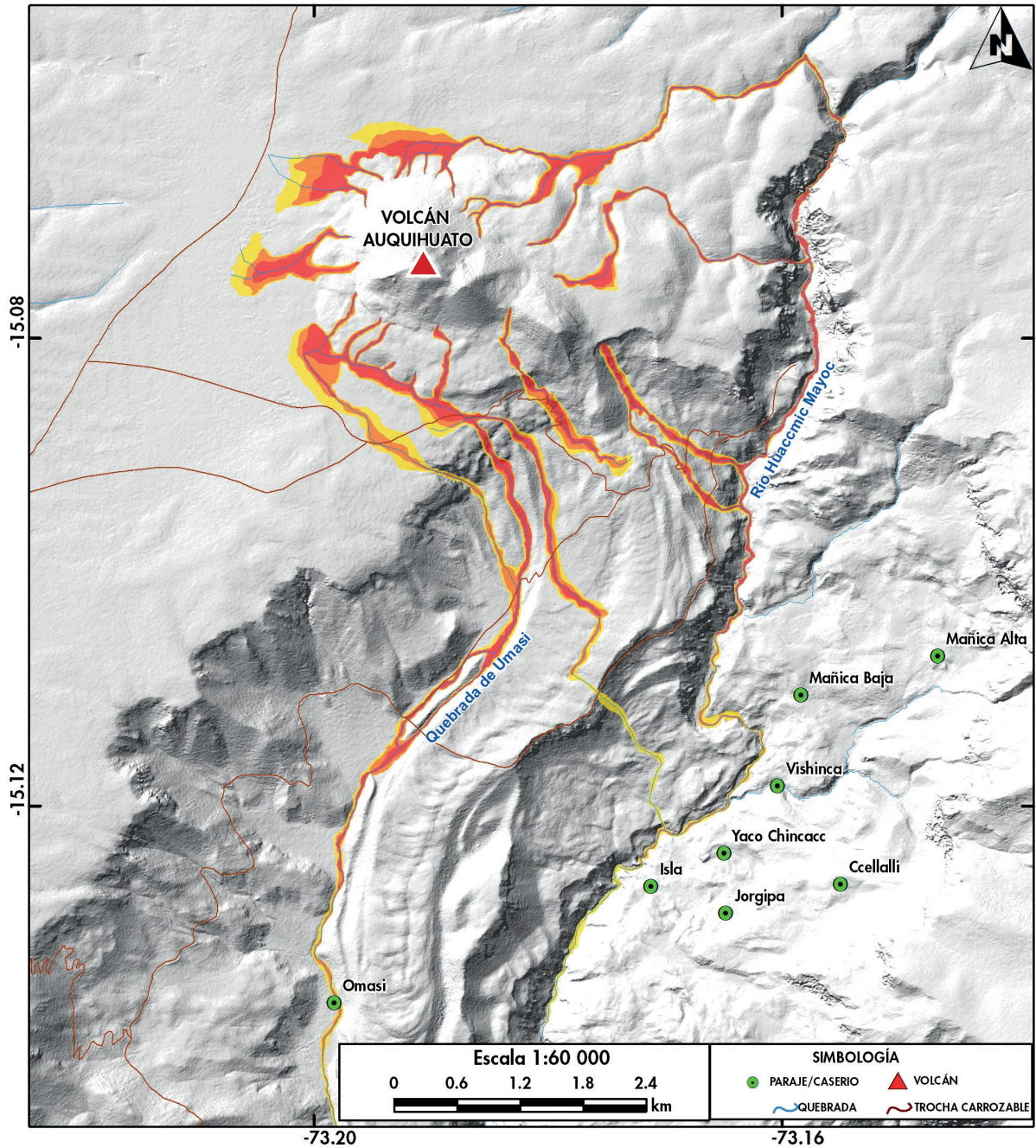


Figura 17. Mapa de peligro de lahares del volcán AuquiHuato que considera tres tipos de peligro: alto (rojo), moderado (naranja) y bajo (amarillo).

Conclusiones

- El Auquihuato es un volcán potencialmente activo ubicado al extremo sur de la región Ayacucho. Según el estudio vulcanológico realizado y la morfología actual que presenta, este volcán ha desarrollado principalmente una actividad eruptiva de tipo efusiva con emisión de flujos de lava ocurrida durante el Pleistoceno superior.
- En el volcán Auquihuato se han identificado cinco escenarios eruptivos en caso de una reactivación. Los escenarios corresponden a erupciones efusivas con emisión de flujos de lava, erupción explosiva de tipo vulcaniano (IEV 1–2), erupción subpliniana (IEV 3) y una erupción con crecimiento y destrucción de domo de lava.
- 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 km y 5 km de distancia del volcán Auquihuato; la zona de moderado peligro (naranja) se encuentra inmediatamente colindante con la zona de alto peligro, entre 5 km y 7 km del volcán; y la zona de bajo peligro (amarillo) está entre 7 km y 12 km de distancia del Auquihuato.
- En el mapa de peligros por caídas de cenizas para un escenario de erupción vulcaniana (IEV 1–2), la zona de alto peligro (rojo) se halla a una distancia de 26 km al oeste, y 22 km al este del volcán Auquihuato. 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 halla de 23 km a 87 km al noroeste y de 21 km a 98 km al sureste del cráter del volcán Auquihuato. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de pocos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, con distancias de 87 km a 160 km al noroeste, y de 98 km a 269 km al sureste del volcán Auquihuato. Esta zona puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor.
- En el mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de erupción subpliniana (IEV 3), la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se halla aproximadamente a una distancia de 57 km al noroeste y 63 km al sureste del volcán Auquihuato. Durante erupciones subplinianas, esta zona 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 Auquihuato, con una distancia de 57 km a 122 km al noroeste, y de 63 km a 117 km al sureste del volcán Auquihuato. Esta zona puede ser afectada por caída de cenizas que formarían una capa de algunos centímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) se prolonga hasta una distancia de 122 km a 337 km al noroeste, y de 117 km a 608 km al sureste del volcán Auquihuato. En esta zona podrían depositarse cenizas de hasta algunos milímetros de espesor.
- En el mapa de peligros por lahares distales, la zona roja, considerada de alto peligro, puede ser afectada por lahares de hasta 150 000 m³; la zona naranja, de moderado peligro, puede ser afectada por lahares 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 documentos técnicos útiles para las instituciones del SINAGERD, autoridades locales y regionales (Gobierno Regional de Ayacucho, municipalidades provinciales y distritales, etc.) y población, pues contribuirá para una adecuada formulación de proyectos de desarrollo, la elaboración de planes de prevención y el manejo de una eventual crisis volcánica del Auquihuato.

Referencias□

- Aguilar, R., Ortega, M., Manrique, N., Apaza, F., Rivera, M., & Harpel, C. (2019). *Characteristics of the beginning of the 2019 eruptive crisis at Ubinas volcano (Peru)* [Póster]. AGU 2019 Fall Meeting, 9–13 December 2019, San Francisco, CA, United States.
- Aguilar, R., Thouret, J.-C., Samaniego, P., Wörner, G., Jicha, B., Paquette, J.-L., Suaña, E., & Finizola, A. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: The Chachani Volcano Cluster, Southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 426, 107539. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107539>
- Bignami, C., Bosi, V., Costantini, L., Cristiani, C., Lavigne, F., & Thierry, P. (2012). *Handbook for volcanic risk management: Prevention, crisis management, resilience*. MIAVITA Team.
- Blong, R. (1984). *Volcanic hazards: A sourcebook on the effects of eruptions*. Academic Press Australia.
- Blong, R. (2000). Volcanic hazard and risk management. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 1215–1228). Academic Press.
- Bustillos, J., & Samaniego, P. (2011). Volcán Tungurahua: Tamaño de las erupciones explosivas. *7mas Jornadas de Ciencias de la Tierra*. Escuela Politécnica Nacional.
- Cárdenas, E. A., Porras, P., & Morales, L. Y. (2013). Using VolcFlow software to simulate pyroclastic flows from the Cerro Machín volcano, Tolima, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(2), 157–172.
- Carey, S. (1996). Modeling of tephra fallout from atmospheric eruptions. En L. Scarpa & R. Tilling (Eds.), *Monitoring and mitigation of volcanic hazards* (pp. 429–463). Springer.
- Cas, R. A. F., & Wright, J. V. (1987). *Volcanic successions: Modern and ancient*. Allen and Unwin.
- Coppola, D., Valade, S., Masias, P., Laiolo, M., Massimetti, F., Campus, A., Aguilar, R., Anccasi, R., Apaza, F., Ccallata, B., Cigolini, R., Cruz, L., Finizola, A., Gonzales, K., Macedo, O., Miranda, R., Ortega, M., Paxi, R., Taipe, E., & Valdivia, D. (2022). Shallow magma convection evidenced by excess degassing and thermal radiation during the dome-forming Sabancaya eruption (2012–2020). *Bulletin of Volcanology*, 84, 16. <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01539-z>
- De Silva, S., & Francis, P. (1991). *Volcanoes of the central Andes* (8th ed.). Springer-Verlag.
- Decker, R., & Decker, B. (1989). *Volcanoes* (Revised ed.). W. H. Freeman.
- Delaite, G., Thouret, J.-C., Sheridan, M., 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*, 209–231.
- Eychenne, J., Le Pennec, J.-L., Troncoso, L., Gouhier, M., & Nedelc, J.-M. (2012). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology*, 74(1), 187–205.
- Francis, P. (1993). *Volcanoes: A planetary perspective*. Oxford University Press.
- Gerbe, M., & Thouret, J.-C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990–98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66, 541–561.
- 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.
- Guillande, R., Thouret, J.-C., Huamán, D., Gourgand, 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*.
- Hoblitt, R., Walder, J., Driedger, C., Scott, K., Pringle, P., & Vallance, J. (1995). *Volcano hazards from Mount Rainier* (Open-File Report 95-273). U.S. Geological Survey.

- INEI. (2018). *Censos Nacionales XII de Población y VII de Vivienda: Resultados definitivos*. 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*, 110, 972–984.
- Kelfoun, K., & Druitt, T. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 110(B12202). <https://doi.org/10.1029/2005JB003758>
- Machacca, R., Lesage, P., Tavera, H., Pesicek, J., Caudron, C., Torres, J., & Burgisser, A. (2023). The 2013–2020 seismic activity at Sabancaya Volcano (Peru): Long-lasting unrest and eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 435, 107767.
- 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*, 96, 1–27.
- Martínez, W., & Cervantes, J. (2003). *Memoria descriptiva del cuadrángulo de Pausa (31-p), escala 1:100 000*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2067>
- 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*. <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. (2020). *Encuesta Nacional de Hogares sobre Condiciones de Vida y Pobreza 2004–2020*. <https://www.gob.pe/institucion/mtpe/informes-publicaciones/3135305>
- Nakada, S. (2000). Hazards from pyroclastic flows and surges. En H. Sigurdsson et al. (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.
- 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)*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Rivera, M., Mariño, J., Samaniego, P., Delgado, R., & Manrique, N. (2016). *Geología y evaluación de los peligros del complejo volcánico Ampato–Sabancaya*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- 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.
- Samaniego, P., Rivera, M., Manrique, N., Schiavi, F., Nauret, F., Liorzou, C., & Ancellin, M.-A. (2020). Linking magmatic processes and magma chemistry during post-glacial to recent explosive eruptions of Ubinas volcano (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107095>

- Samaniego, P., 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*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0937-8>
- Schilling, S. (1998). *LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones* (Open-File Report 98-638). U.S. Geological Survey.
- Schwaiger, H., Denlinger, R., & Mastin, L. (2012). Ash3D: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition. *Journal of Geophysical Research*, *117*. <https://doi.org/10.1029/2011JB008968>
- Sigurdsson, H., Houghton, B. F., McNutt, S. R., Rymer, H., & Stix, J. (Eds.). (2000). *The encyclopedia of volcanoes* (1st ed.). Academic Press.
- Suzuki, T. (1983). A theoretical model for dispersion of tephra. En D. Shimozuru & I. Yokoyama (Eds.), *Arc volcanism: Physics and tectonics* (pp. 93–113). 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. *GSA Bulletin*, *159*(3–4), 1593–1610.
- Thouret, J.-C., Guillaude, R., Huamán, D., Gourgaud, A., Salas, G., & Chorowicz, J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): Reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcánicas. *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 Peru. *Bulletin of Volcanology*, *67*, 557–589.
- Thouret, J.-C., Jicha, B. R., & Paquette, J. L. (2016). A 25 Myr chronostratigraphy of ignimbrites in south Peru: Implications for the volcanic history of the Central Andes. *Journal of the Geological Society*, *173*, 734–756.
- Thouret, J.-C., 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 et al. (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 617–626). Academic Press.
- 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. Gropelli & L. Viereck-Goette (Eds.), *Stratigraphy and geology of volcanic areas* (Vol. SPE464, pp. 265–280). Geological Society of America.
- Váscónez, F., Váscónez, 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>
- Warwick, R., Williams-Jones, G., Kelman, M., & Witter, J. (2022). A scenario-based volcanic hazard assessment for the Mount Meager Volcanic Complex, British Columbia. *Journal of Applied Volcanology*, *11*, 5. <https://doi.org/10.1186/s13617-022-00114-1>

Información clave para ti

Puedes consultar el mapa de peligros del volcán Auqui huato, 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 Auqui huato: vista desde el sector oeste del volcán.





@igp.peru



@igp_peru



@igp.peru



@igp_videos



@institutogeofisicodelperu



@igp.peru