PERÚ Ministerio del Ambiente

IGP Instituto Geofísico del Perú

Informe técnico

MAPA DE PELIGROS DEL VOLCÁN COROPUNA

Noviembre de 2026



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 COROPUNA

Lima, Perú
Noviembre de 2026

CRÉDITOS

Vladimiro Huaroc Portocarrero
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 Coropuna
Informe técnico

Marco Rivera
David Valdivia
Juan Cuno
Carla Arias
Autores

Marco Rivera
Jorge Concha
Edición de contenido

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Carátula: Vista del volcán Coropuna

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: +51 54 369212
Contacto

Este informe ha sido elaborado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP)
Calle Badajoz 169, Mayorazgo, Ate, Lima
Teléfono: +51 1 317 2300

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

REGEN

Lima, noviembre de 2026

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, se repetirán en el futuro con igual o incluso mayor intensidad. En este escenario, la ciencia, de la mano de nosotros los científicos, ha contribuido a 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 las 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. Desde entonces, hemos fortalecido esta labor mediante la implementación de redes de monitoreo geofísico, la formación continua de profesionales y la suscripción de convenios con universidades e instituciones nacionales e internacionales para desarrollar estudios pioneros sobre los volcanes. Son más de 35 años dedicados a documentar la actividad volcánica, sus eventos precursores, sus productos y manifestaciones, con el propósito de contribuir a la seguridad y al 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 el IGP cuenta con el Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), el servicio de vigilancia volcánica que opera las 24 horas del día, y 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 este mapa de peligros del volcán Coropuna, 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 Coropuna es un complejo volcánico activo ubicado a 150 km al noroeste de la ciudad de Arequipa. Sobre la base de datos de campo, estudios previos de su actividad eruptiva y el comportamiento de volcanes peruanos análogos, se consideran cinco escenarios ante una eventual erupción: 1) erupción efusiva, con emisión de flujos de lava; 2) erupción explosiva vulcaniana (Índice de Explosividad Volcánica [IEV] 1-2); 3) erupción con crecimiento y colapso de domo; 4) erupción explosiva subpliniana (IEV 3-4); y 5) erupción explosiva pliniana (IEV 5).

Asimismo, sobre la base de estudios previos y simulaciones numéricas de procesos volcánicos, se elaboraron cinco mapas de peligros integrados en un solo póster:

a) Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal. Muestra las zonas que podrían verse afectadas por flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares, avalanchas de escombros y proyectiles balísticos. De estos fenómenos, se considera que los flujos de lava tienen mayor probabilidad de ocurrencia.

b) Mapa de peligros por caída de ceniza asociada a una erupción vulcaniana (IEV 1-2). Distingue tres zonas de peligro. La zona de peligro alto (rojo) se extiende aproximadamente hasta 18 km hacia el sur, 32 km hacia el norte, 30 km hacia el noroeste y 25 km hacia el sureste del volcán Coropuna. Esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza de algunos centímetros de espesor. La zona de peligro moderado (naranja) se extiende de 18 km a 71 km hacia el sur, de 32 km a 74 km hacia el norte, de 30 km a 98 km hacia el noroeste y de 25 km a 106 km hacia el sureste del volcán. En esta zona podrían acumularse depósitos de caída de ceniza de algunos milímetros de espesor. La zona de peligro bajo (amarillo) presenta una configuración elíptica y se extiende hasta 139 km hacia el sur, 143 km hacia el norte, 156 km hacia el noroeste y más de 209 km hacia el sureste del volcán Coropuna. En esta zona, el impacto sería bajo y la caída de ceniza podría ser imperceptible para la población.

c) Mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción subpliniana (IEV 3-4). Distingue tres zonas de peligro. La zona de peligro alto (rojo) comprende el área proximal y se extiende aproximadamente hasta 63 km hacia el sur, 76 km hacia el norte, 109 km hacia el noroeste y 108 km hacia el sureste del volcán Coropuna. Esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza y lapilli de pómez, que formarían capas de varios centímetros de espesor. La zona de peligro moderado (naranja) se extiende hasta 269 km hacia el sur, 222 km hacia el norte, 262 km hacia el noroeste y 386 km hacia el sureste del volcán, sobrepasando la frontera entre Perú y Bolivia. Esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza con espesores que variarían desde algunos milímetros hasta algunos centímetros. La zona de peligro bajo (amarillo) se extiende a más de 360 km hacia el sur, 364 km hacia el norte, 435 km hacia el noroeste y más de 409 km hacia el sureste del volcán Coropuna, sobrepasando las fronteras del Perú con Chile y Bolivia. Esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza con espesores de pocos milímetros.

d) Mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción pliniana (IEV 5). Distingue tres zonas de peligro. La zona de peligro alto (rojo) comprende el área próxima al volcán y se extiende hasta 126 km hacia el sur, 158 km hacia el norte, 198 km hacia el noroeste y 216 km hacia el sureste del volcán Coropuna. Esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza y lapilli de pómez, que formarían capas con espesores desde varios centímetros hasta algunos metros. La zona de peligro moderado (naranja) se extiende hasta 440 km hacia el sur, 322 km hacia el norte, 443 km hacia el noroeste y 582 km hacia el sureste del volcán. Esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza con espesores que variarían desde algunos milímetros hasta varios decímetros. La zona de peligro bajo (amarillo) presenta una configuración elíptica y se extiende a más de 440 km hacia el sur, 603 km hacia el norte, 761 km hacia el noroeste y más de 582 km hacia el sureste del volcán Coropuna, con influencia en los territorios de Chile y Bolivia. Esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza y lapilli de pómez, con espesores de algunos milímetros.

e) Mapa de peligros por lahares. El volcán Coropuna alberga un importante casquete glaciar en su cima. Ante una eventual erupción, podrían generarse lahares que descenderían por las quebradas ubicadas alrededor del volcán, principalmente por aquellas situadas en el flanco sur. La zona de peligro alto (rojo) corresponde al área con mayor posibilidad de verse afectada por lahares de pequeño volumen (de 1 000 000 m^3 a 2 000 000 m^3), asociados a erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1-2) o a lluvias intensas. La zona de peligro moderado (naranja) podría verse afectada por lahares de volumen moderado (6 000 000 m^3), mientras que la zona de peligro bajo (amarillo) corresponde al área con menor posibilidad de verse afectada por lahares de gran volumen (12 000 000 m^3). Estos últimos podrían estar asociados a erupciones de gran magnitud (IEV ≥ 3) o al desprendimiento del casquete glaciar.

Ante una eventual erupción del volcán Coropuna, las áreas ubicadas al pie de su flanco sur serían especialmente susceptibles de verse afectadas por fenómenos volcánicos, como caídas de ceniza, flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares y avalanchas de escombros. En estas áreas se localizan centros poblados, terrenos de cultivo, obras de infraestructura, como represas y canales de agua, así como lagunas. Asimismo, la actividad ganadera podría verse afectada por la ocurrencia de estos fenómenos.

CONTENIDO

7 Presentación

9 Resumen

14 Introducción

16 Condiciones climatológicas

18 Aspecto socioeconómico

20 Cobertura vegetal

24 Tipos de erupciones volcánicas

24 Erupción estromboliana

24 Erupción vulcaniana

25 Erupción pliniana (subpliniana-ultrapliniana)

25 Erupción efusiva

26 Los peligros volcánicos

26 Caída de piroclastos (tefras)

27 Flujos de lava

27 Flujos y oleadas piroclásticas

27 Lahares (flujos de lodo y escombros)

29 Avalanchas de escombros

30 Gases volcánicos

31 El volcán Coropuna

31 Morfología actual

31 Geología e historia eruptiva

34 Contexto estructural

34 Contexto glaciológico

35 Datos y metodología para la elaboración de mapas
35 Metodología para la elaboración de mapas
35 Simulación de procesos volcánicos con programas informáticos especializados
38 Escenarios eruptivos considerados
43 Resultados: mapas de peligros del volcán Coropuna
43 Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal
45 Mapa de peligros por caídas de cenizas durante una erupción vulcaniana (IEV 1-2)
47 Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción subpliniana (IEV 3-4)
49 Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción pliniana (IEV 5)
49 Mapa de peligros por lahares
52 Conclusiones
54 Referencias

COROPUNA

Elevación
6377 m s. n. m.

Región
Arequipa

Provincias
Castilla y Condesuyos

Última erupción
Hace 1400-1600 años aprox.

Población en un radio de 40 km
26 432 personas

Inicio de vigilancia en tiempo real
2018

Instrumentos y técnicas de vigilancia
5 estaciones sísmicas
1 cámara científica
2 inclinómetros
Sistemas satelitales





1. Introducción

En el sur del Perú, la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental sudamericana dio lugar, durante el Pliocuaternario, a la formación de una cadena de volcanes activos y potencialmente activos, distribuidos 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.

Los estudios geológicos, geofísicos y vulcanológicos efectuados en el sur del Perú en las últimas décadas han permitido describir las características de la actividad volcánica reciente manifestada por los volcanes activos existentes a lo largo de la cadena volcánica: Coropuna, Sabancaya, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Yucamane, Tutupaca, Casiri y Purupuruni (Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011; Samaniego et al., 2015; Samaniego et al., 2016; Samaniego et al., 2020; Rivera et al., 2020b; Prival et al., 2020). En épocas históricas, algunos de estos volcanes, como Ubinas, Tutupaca, Sabancaya y Huaynaputina, causaron enormes estragos a varios poblados, terrenos de cultivo y obras de infraestructura localizados en sus inmediaciones. La actividad eruptiva recurrente de los volcanes Sabancaya (1990-1998 y 2016-2026) 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 tendientes a elaborar mapas de peligros de los volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano.

En el sur peruano también existen volcanes potencialmente activos, como Auquihuato, Sara Sara y Chachani, que presentaron actividad eruptiva durante el Pleistoceno superior y el Holoceno, es decir, hace varios miles de años. Desde entonces, la actividad de dichos volcanes ha sido mínima; solo se detecta leve e incipiente actividad sísmica. Estos volcanes podrían reactivarse en el futuro.

El Coropuna (15° 31′ S; 72° 39′ O; 6377 m s. n. m.) es un complejo volcánico constituido por al menos cinco conos volcánicos y domos de lava superpuestos entre sí. Estos edificios volcánicos se denominan Yanaranra (6305 m s. n. m.), Coropuna (6161 m s. n. m.),

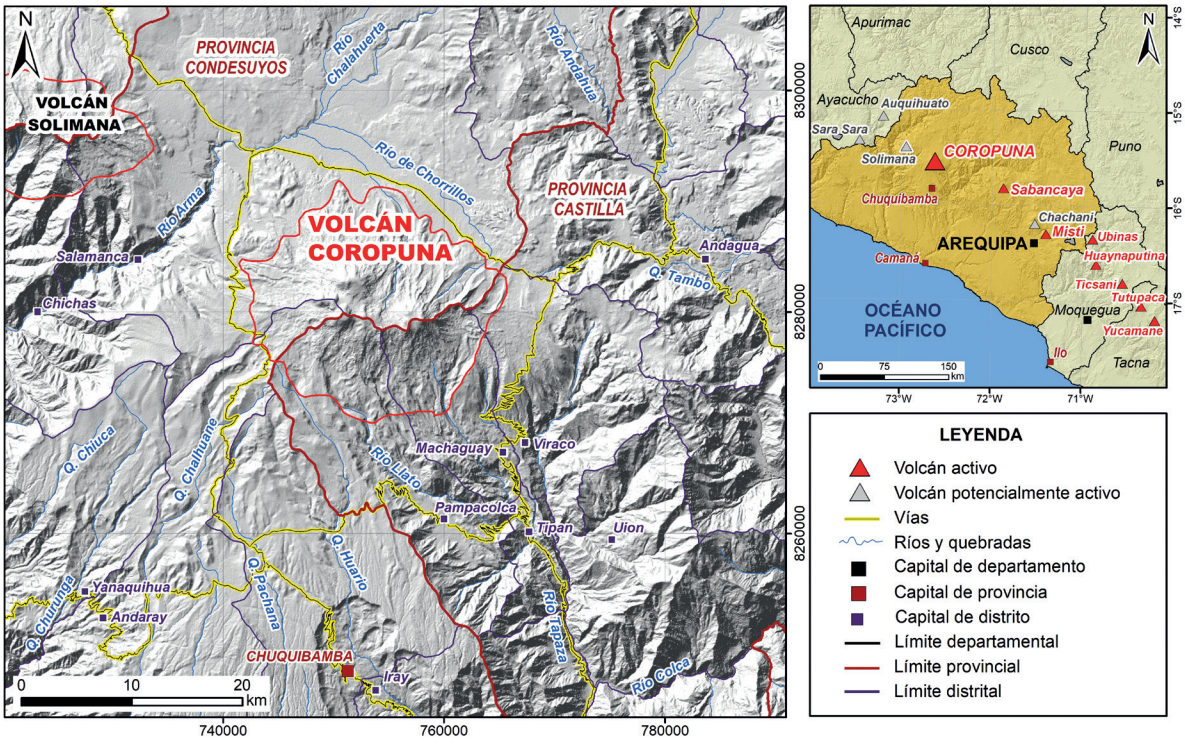

Figura 1. Mapa de ubicación del volcán Coropuna, poblados y obras de infraestructura ubicados en las inmediaciones de dicho volcán.

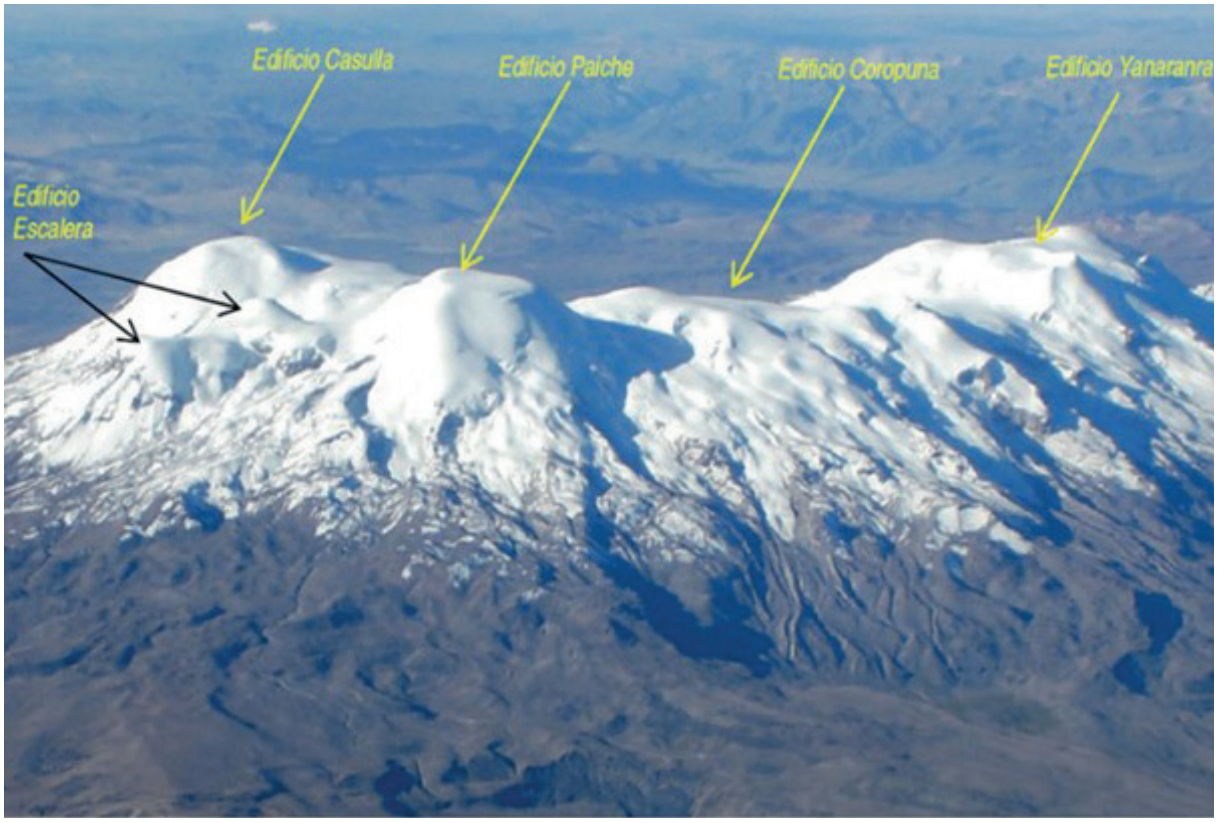

Figura 2. Vista del complejo volcánico Coropuna constituido por cinco edificios: Yanaranra, Coropuna, Paiche, Escalera y Casulla (tomado de Mariño et al., 2018).

Paiche (6330 m s. n. m.), Casulla (6377 m s. n. m.) y Escalera (6171 m s. n. m.), distribuidos en un área de 25 km de largo y 17 km de ancho.

El volcán Coropuna se considera un volcán activo porque ha presentado erupciones en los últimos miles de años. Dicho volcán se ha edificado al extremo norte de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC). El volcán Coropuna se sitúa a 150 km al noroeste de la ciudad de Arequipa y a una distancia de 15 km a 23 km al norte y noroeste de los poblados de Viraco, Machaguay, Pampacolca, San Antonio, Yato, Tagre, Chupacra y Tipan (Figura 1).

El Coropuna es catalogado como un volcán de alto riesgo (del Carpio et al., 2022). No se dispone de información sobre la actividad histórica del Coropuna. Diversos estudios indican que este volcán estuvo activo desde el Pleistoceno medio al Holoceno (Mariño et al., 2018; Bromley et al., 2019). En efecto, al menos cuatro flujos de lava andesíticos emplazados durante el Holoceno se encuentran distribuidos en los flancos noreste, sureste y noroeste del edificio volcánico (Bromley et al., 2019; Úbeda, 2011). La lava más reciente, ubicada al sureste del Coropuna, fue datada por Bromley et al. (2019) en 1.4 ka (aproximadamente 1400 años antes del presente [AP]). Dicha lava tiene 4 km de longitud. Actualmente, no se evidencia actividad fumarólica alguna; sin embargo, en un radio menor a los 25 km del complejo volcánico existen fuentes termales que sugieren la actividad de un sistema hidrotermal (Núñez & Valenzuela, 2001; Masías, 2018).

El volcán Coropuna puede reactivarse en el futuro y generar una erupción efusiva o explosiva cuyos productos pueden afectar áreas aledañas donde existen importantes fuentes hídricas, reservorios de agua, carreteras y población dedicada principalmente a la ganadería y agricultura. El objetivo central del presente estudio es presentar los mapas de peligros del volcán Coropuna, con el propósito de proporcionar a la sociedad, a las instituciones del SINAGERD (INDECI, CENEPRED, etc.) y a las autoridades locales y regionales (Gobierno Regional de Arequipa, municipalidades provinciales y distritales, etc.) un documento oficial que identifique las zonas potencialmente afectadas por una erupción volcánica. Esta información permitirá formular proyectos de desarrollo, elaborar planes de prevención y gestionar una eventual crisis volcánica.

1.1 Condiciones climatológicas

Los datos de precipitación y de temperaturas máxima y mínima registrados en las áreas circundantes al volcán Coropuna fueron tomados de las estaciones meteorológicas de Orcopampa, Salamanca, Yanaquihua y Chichas, operadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). La estación meteorológica de Orcopampa se ubica a 45.7 km al noreste del volcán Coropuna, mientras que la estación de Salamanca se ubica a 22.8 km al oeste. Por su parte, la estación Yanaquihua se ubica a 37 km al suroeste del Coropuna y la estación Chichas se encuentra a 31 km al oeste del volcán Coropuna (Tabla 1).

1.1.1 Temperatura

La estación meteorológica de Salamanca, entre 2000 y 2025, registró una temperatura máxima promedio de 18.5 °C y una temperatura mínima promedio de 6.8 °C. La temperatura máxima registrada fue de 23.7 °C y la temperatura mínima de –8.2 °C (Figura 3).

Por su parte, la estación meteorológica de Yanaquihua, entre 1998 y 2025, registró una temperatura máxima promedio de 19.9 °C y una temperatura mínima promedio de 6.8 °C. La temperatura máxima registrada fue de 25.6 °C y la temperatura mínima de 0.6 °C (Figura 3).

La estación meteorológica de Orcopampa, entre 1996 y 2025, registró una temperatura máxima promedio de 18.7 °C y una temperatura mínima promedio de 0.4 °C. La temperatura máxima registrada fue de 29.8 °C y la temperatura mínima de –21 °C (Figura 3).

La estación meteorológica de Chichas, entre 1998 y 2025, registró una temperatura máxima promedio de 23.9 °C y una temperatura mínima promedio de 11.4 °C. En dicho periodo, la temperatura máxima registrada fue de 29.8 °C y la mínima, de 1.7 °C (Figura 3).

Las estaciones meteorológicas ubicadas en zonas aledañas y a menor altitud que el volcán Coropuna registraron una temperatura máxima de 29.8 °C y una temperatura mínima de –21 °C.

1.1.2 Precipitación

La estación pluviométrica de Orcopampa, durante el periodo 1949-2025 (Figura 4), registró un régimen pluviométrico estacional, caracterizado por una mayor frecuencia de precipitaciones entre diciembre y abril (Tabla 2), que alcanzaron hasta 57.0 mm, y una época seca entre mayo y noviembre, con una precipitación máxima de 25 mm. Sin embargo, en febrero se registraron precipitaciones inusuales que variaron entre 81.2 mm y 83.1 mm.

La estación Yanaquihua, durante el periodo 1963-2025 (Figura 4), registró un régimen pluviométrico estacional, caracterizado por una mayor frecuencia de precipitaciones entre diciembre y marzo (Tabla 2), durante la cual las precipitaciones alcanzaron 47.6 mm, y una época seca entre mayo y noviembre, en la cual las precipitaciones registraron valores de 0.1 mm a 31.3 mm. Sin embargo, en enero, febrero y marzo se registraron precipitaciones inusuales entre 55.1 mm y 68.5 mm.

La estación Salamanca, durante el periodo 1964-2025 (Figura 4), registró una época de mayor recurrencia de precipitación, entre diciembre y marzo (Tabla 2). En dicha época, las precipitaciones variaron entre 0.3 mm y 33.9 mm, con una precipitación máxima de 49 mm. En la época seca, entre mayo y noviembre, las precipitaciones oscilaron entre 0.1 mm y

Tabla 1. Ubicación de las estaciones pluviométricas Orcopampa, Salamanca, Yanaquihua y Chichas, ubicadas en las inmediaciones del volcán Coropuna (Fuente: SENAMHI, 2026).

Nombre	Coordenadas		Altitud (m s. n. m.)	Periodo de Registro	Cuenca
	Latitud	Longitud			
Orcopampa	15°15′49.9″ S	72°20′27.5″ O	3203	1949-2025	Camaná
Salamanca	15°30′10.6″ S	72°49′55.3″ O	3203	1964-2025	Ocoña
Yanaquihua	15°46′35.4″ S	72°52′33″ O	3007	1963-2025	Ocoña
Chichas	15°32′53.2″ S	72°55′5.9″ O	2161	1963-2025	Ocoña

17.4 mm; sin embargo, se presentó una precipitación inusual de 36.0 mm.

La estación Chichas, durante el periodo 1963-2025 (Figura 4), registró un régimen pluviométrico estacional, con una época de mayor frecuencia de precipitaciones comprendida entre diciembre y abril (Tabla 2), durante la cual las precipitaciones alcanzaron valores de hasta 33.4 mm, y una época seca entre mayo y noviembre, durante la cual las precipitaciones oscilaron entre 0.1 mm y 14.6 mm.

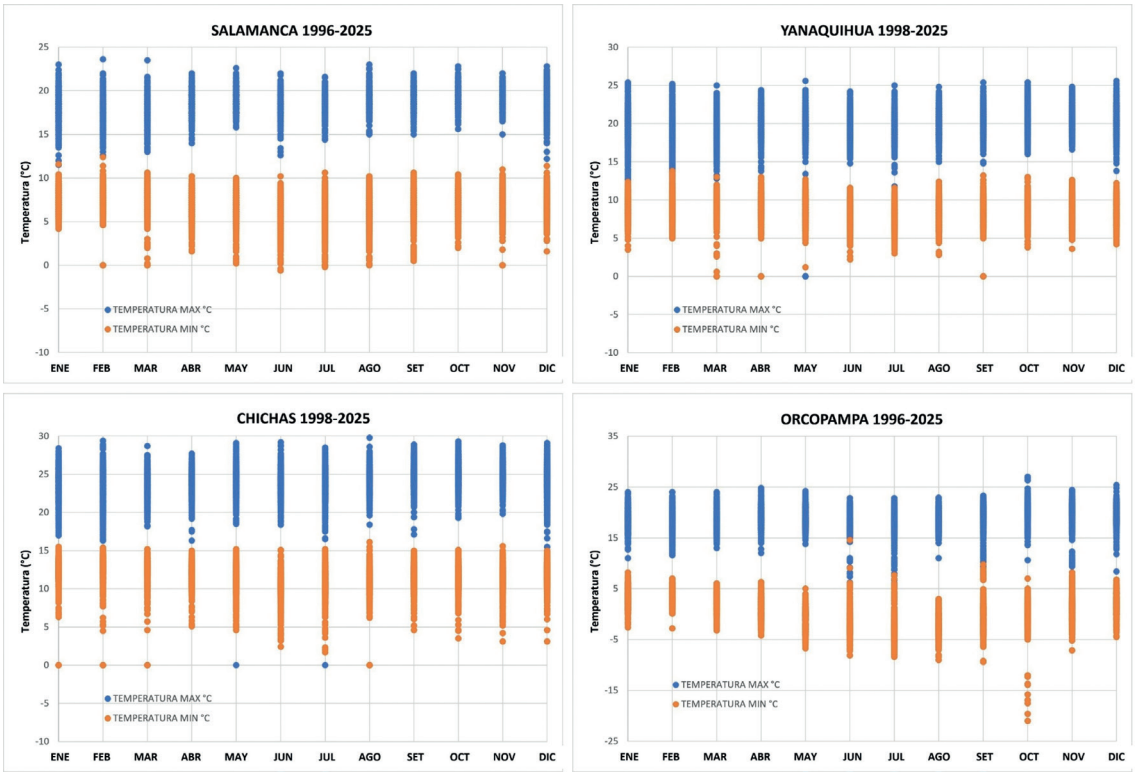

Figura 3. Gráficos de temperaturas máximas y mínimas diarias, por mes, registradas por las estaciones Orcopampa, Yanaquihua, Salamanca y Chichas (Fuente: SENAMHI, 2026).

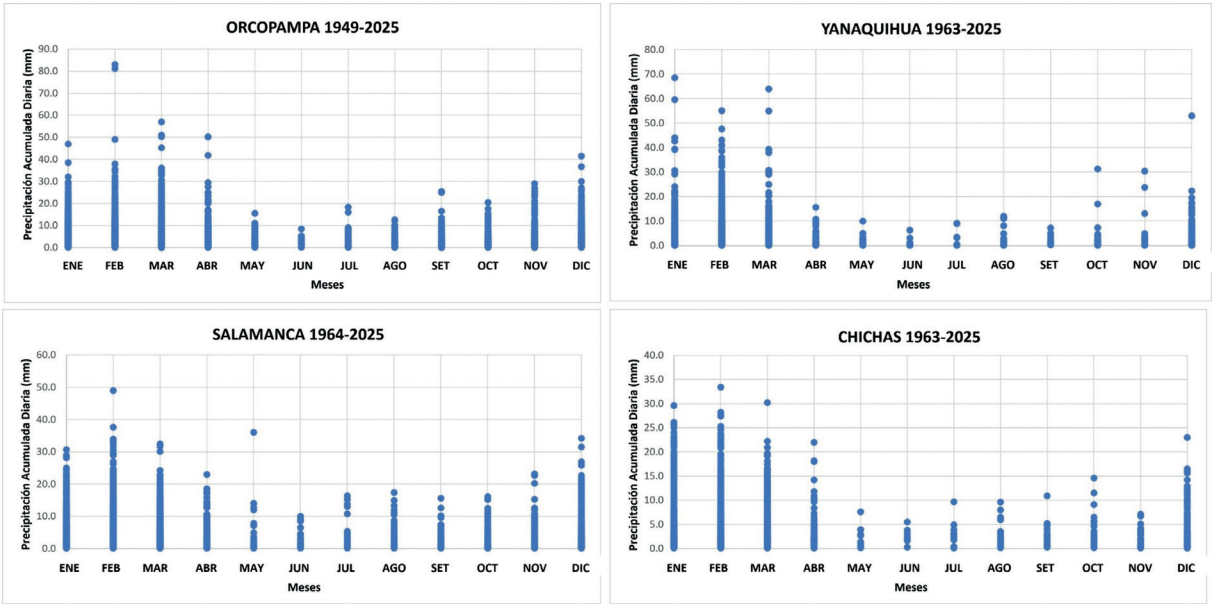

Figura 4. Gráficos de precipitación acumulada diaria por mes, registrados en las estaciones meteorológicas de Orcopampa, Yanaquihua, Salamanca y Chichas, ubicadas alrededor del volcán Coropuna (Fuente: SENAMHI, 2026).

Tabla 2. Promedio mensual de días con precipitación según los datos de las estaciones pluviométricas ubicadas alrededor del volcán Coropuna (Fuente: SENAMHI, 2026).

PROMEDIO DE DÍAS CON LLUVIA												
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
Chichas	8	9	7	2	0	0	0	0	0	0	1	2
Orcopampa	16	16	15	7	2	1	1	1	3	4	5	9
Salamanca	14	16	14	4	1	1	1	1	1	2	2	6
Yanaquihua	8	10	6	1	0	0	0	0	0	1	0	2

1.2 Aspecto socioeconómico

1.2.1 Datos poblacionales

En un radio de 40 km alrededor del volcán Coropuna se ubican 16 distritos. Según el último censo efectuado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática en 2025, en dichos distritos habitan aproximadamente 26 432 personas (Tabla 3).

1.2.2 Vivienda e infraestructura

En los 16 distritos ubicados en un radio de 40 km alrededor del volcán Coropuna existen 17 071 viviendas particulares, 11 003 viviendas particulares con ocupantes presentes y 11 228 hogares (Tabla 4). Además, se han contabilizado comisarías, centros de salud, centros educativos, puentes y redes viales vecinales y departamentales (Tabla 5), cuyas ubicaciones se presentan en la Figura 5.

Tabla 3. Cantidad de habitantes en los distritos ubicados en un radio de 40 km del volcán Coropuna (INEI, 2025).

n.°	DISTRITO	CANTIDAD DE HABITANTES 2025
1	SALAMANCA	466
2	CHICHAS	490
3	YANAQUIHUA	5985
4	ANDARAY	462
5	CHUQUIBAMBA	3880
6	IRAY	723
7	PAMPACOLCA	2053
8	VIRACO	1532
9	MACHAGUAY	660
10	TIPAN	490
11	UÑON	227
12	AYO	561
13	ANDAGUA	1191
14	CHACHAS	1325
15	CHILCAYMARCA	1191
16	ORCOPAMPA	5196
TOTAL		26 432

Tabla 4. Cantidad de viviendas particulares y viviendas con ocupantes presentes ubicadas en un radio de 40 km desde la cima del volcán Coropuna (Fuente: INEI, 2025).

n.°	DISTRITO	VIVIENDAS PARTICULARES CENSADAS	VIVIENDAS PARTICULARES CON OCUPANTES PRESENTES QUE VIVEN PERMANENTEMENTE	HOGARES CENSADOS
1	SALAMANCA	521	257	258
2	CHICHAS	443	231	234
3	YANAQUIHUA	3250	2297	2361
4	ANDARAY	364	221	227
5	CHUQUIBAMBA	2361	1511	1568
6	IRAY	445	313	317
7	PAMPACOLCA	1572	857	869
8	VIRACO	1061	755	771
9	MACHAGUAY	435	318	319
10	TIPAN	382	245	247
11	UÑON	193	129	131
12	AYO	490	342	344
13	ANDAGUA	772	482	490
14	CHACHAS	962	624	630
15	CHILCAYMARCA	607	491	505
16	ORCOPAMPA	3213	1930	1957
TOTAL		17 071	11 003	11 228

Tabla 5. Infraestructura en un radio de 40 km desde la cima del volcán Coropuna (Fuente: INEI, 2025).

INFRAESTRUCTURA	CANTIDAD
Comisarías	9
Puentes	6
Centros de salud	8
Centros educativos	134
Red vial departamental	268 km
Red vial vecinal	441.71 km

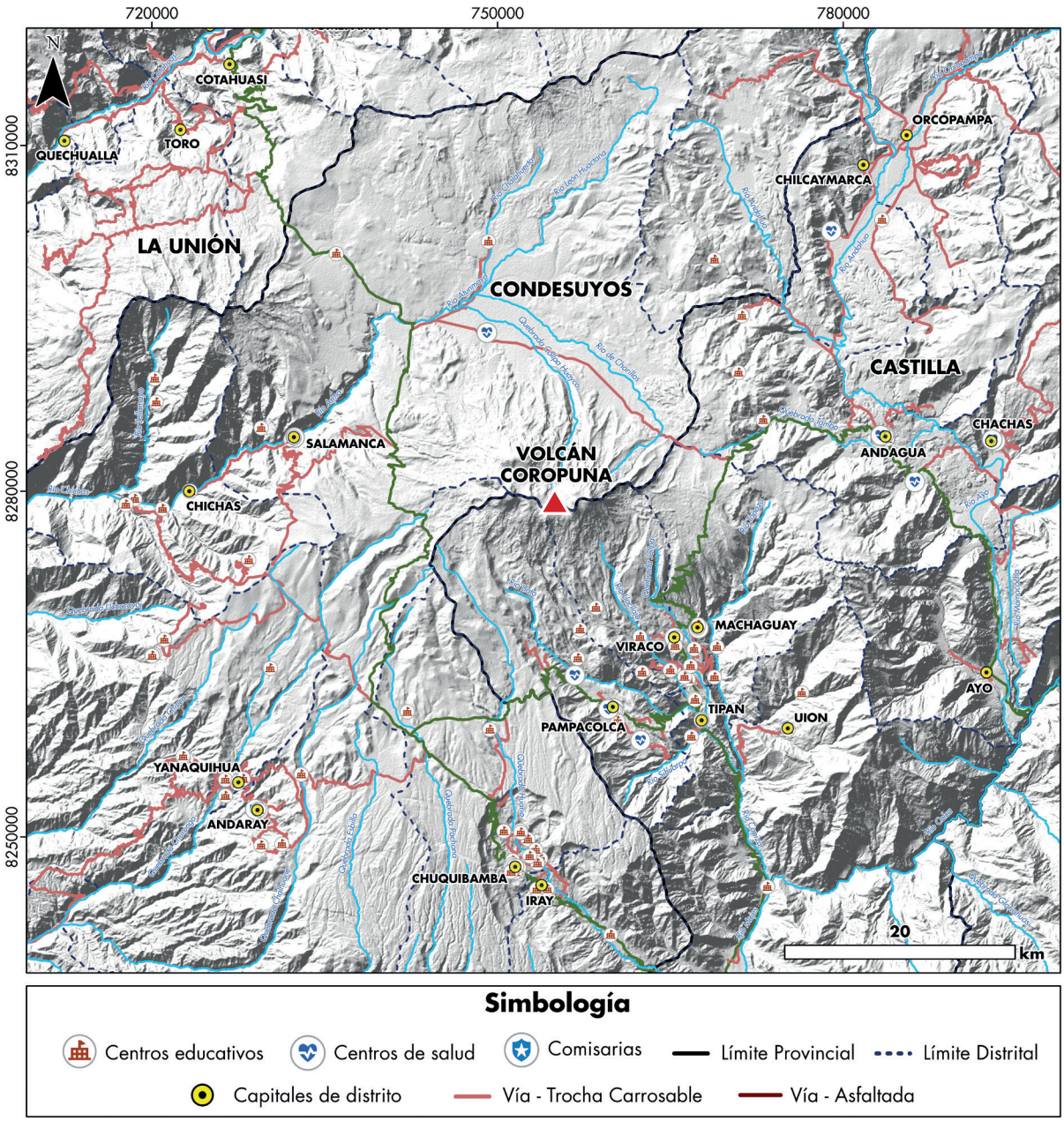

Figura 5. Mapa de infraestructura existente en un radio de 40 km de la cima del volcán Coropuna (fuente: datos de Secretaría de Gobierno y Transformación Digital).

1.3 Cobertura vegetal

En un radio de 40 km del volcán Coropuna, entre los 4000 m s. n. m. y 5000 m s. n. m., predomina el pajonal andino (Figura 6), mientras que sobre los 5000 m s. n. m. la vegetación es escasa. En la meseta ubicada al norte, este y oeste del Coropuna existen bofedales y, en menor proporción, bosques relictos altoandinos. Al pie del flanco sur del volcán, los pobladores destinan las tierras a la agricultura, en áreas rodeadas de matorrales.

A continuación, se describen los tipos de vegetación existentes en áreas aledañas al volcán Coropuna.

- Cardonal

Este tipo de cobertura vegetal se encuentra entre 1500 m s. n. m. y 2500 m s. n. m. (Figura 6). Su distribución está condicionada por la aridez de la zona y se presenta de manera dispersa sobre colinas y montañas. Predominan comunidades de

suculentas de la familia Cactaceae. Las especies que sobresalen por su porte columnar (de hasta 5 m) son *Neoraimondia arequipensis* ("gigantón") y *Browningia candelaris* ("candelabro") (Figura 7).

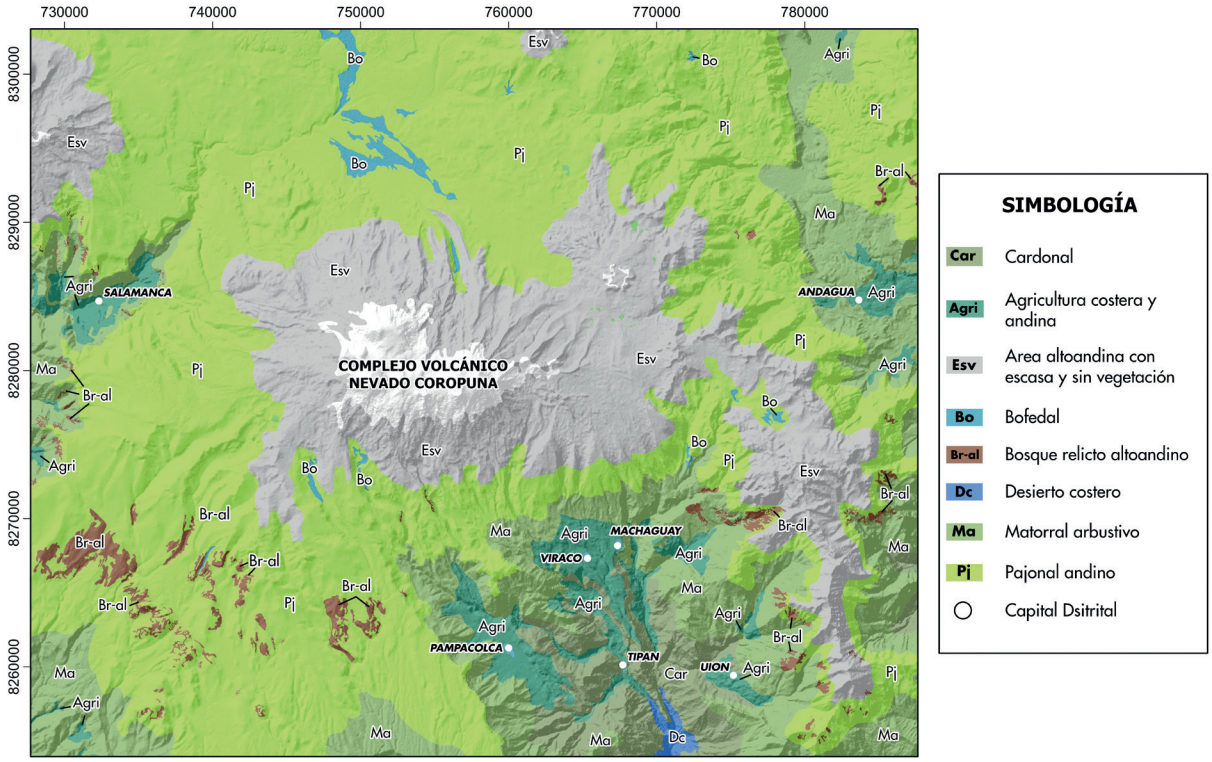

Figura 6. Cobertura vegetal en un radio de 40 km alrededor del volcán Coropuna (Fuente: Ministerio del Ambiente, 2015).



Figura 7. Cobertura vegetal de tipo cardonal, a) «gigantón» (*Neoraimondia arequipensis*) y b) «candelabro» (*Browningia candelaris*) (Fuente: Lisa Calle https://descubriendohojas.blogspot.com/2015/04/el-cactus-candelabro-y-las-maravillas.html).

• Agricultura costera y andina

Corresponde a un área antrópica en la que los pobladores siembran plantas y cultivos para el consumo humano (Figura 6). Las principales plantaciones existentes al pie del flanco sur del volcán Coropuna incluyen tubérculos, como la papa, y otros cultivos, como ajo, cebolla, alfalfa, maíz, trigo y quinua.

• Bofedal

Llamado también "oconal" o "turbera", constituye un ecosistema hidromórfico ubicado a partir de los 3800 m s. n. m. (Figura 6). Este humedal altoandino se encuentra al norte, oeste y sur del volcán Coropuna. Se alimenta del agua proveniente del deshielo de los glaciares, del afloramiento de agua subterránea (puquial) y de la precipitación pluvial. La poca disponibilidad de oxígeno, debido al drenaje pobre, favorece la acumulación de un grueso colchón orgánico formado por raíces muertas de las plantas y materia orgánica del suelo.

• Bosque relicto altoandino

Este bosque se encuentra distribuido en terrenos montañosos, entre 3500 m s. n. m. y 4900 m s. n. m. y excepcionalmente forma parte de la vegetación ribereña de ciertos ríos y quebradas (Figura 6). Este tipo de vegetación se distingue al sureste, oeste y suroeste del volcán Coropuna. Este tipo de bosque, considerado relicto por su reducida extensión, está representado por el género *Polylepis*, conocido localmente como "queñoal", "quinual" o "quenual" (Figura 8), el cual está conformado por más de 19 especies, como *Polylepis canoi, P. flavipila, P. incana, P. incarum, P. lanata, P. microphylla, P. multijuga, P. pauta, P. pepei, P. racemosa, P. reticulata, P. rugulosa, P. sericea, P. subsericans, P. subtusalbida, P. tarapacana, P. tomentella, P. triacontandra y P. weberbaueri* (Mendoza & Cano, 2011).

• Matorral arbustivo

Es una cobertura vegetal ampliamente distribuida entre los 1500 m s. n. m. y 3800 m s. n. m.,



Figura 8. Cobertura vegetal correspondiente a un bosque relicto altoandino de queñoales (Fuente: Actualidad Ambiental https://www.actualidadambiental.pe/plantan-mas-de-40-mil-quenuales-en-la-reserva-paisajistica-nor-yauyos-cochas/).

alrededor del volcán Coropuna. De acuerdo con la clasificación realizada en la Reserva Paisajística Nor Yauyos Cochas, el matorral arbustivo puede clasificarse en matorral semiárido, matorral subhúmedo y matorral húmedo. El matorral semiárido está asociado a condiciones de aridez y semiaridez, y presenta especies arbustivas, suculentas y arbóreas como *Opuntia subulata*, *Dodonaea viscosa* y *Mutisia acuminata*. El matorral subhúmedo, ubicado aproximadamente entre los 3000 m s. n. m. y los 3600 m s. n. m., está conformado por arbustos caducifolios y perennifolios, además de especies arbóreas dispersas como Schinus molle, Kageneckia lanceolata y Escallonia resinosa.

Finalmente, el matorral húmedo, existente entre los 3600 m s. n. m. y 3800 m s. n. m., mantiene follaje verde durante todo el año y presenta especies como *Chuquiraga spinosa, Baccharis tricuneata, Astragalus garbancillo, Lupinus balianus* y *Senecio collinus*. Esta vegetación constituye un recurso importante para la población rural, porque se utiliza como fuente de leña y plantas medicinales, y como área de pastoreo.

• Pajonal andino

Corresponde a una cobertura vegetal dominada principalmente por herbazales altoandinos, distribuida entre los 3800 m s. n. m. y 4800 m s. n. m. Se desarrolla en superficies casi planas, laderas empinadas, escarpes, depresiones y valles glaciares. Esta cobertura integra tres subunidades distintas desde el punto de vista fisonómico y florístico: pajonal, césped y tolar. El pajonal está conformado por hierbas agrupadas en manojos que pueden alcanzar hasta 80 cm de altura, con predominio de especies de los géneros *Calamagrostis*, *Stipa* y *Festuca*. En términos de uso, el pajonal andino constituye una fuente importante de forraje para la ganadería altoandina, especialmente para camélidos y ganado ovino. Por su parte, el césped presenta hierbas de porte bajo, generalmente menores a 15 cm, dominadas por gramíneas, graminoides y especies almohadilladas. El tolar se caracteriza por el predominio de arbustos resinosos, con especies como *Parastrephia lepidophylla, Parastrephia phylicaeformis* y *Baccharis tricuneata*.

En las zonas del volcán Coropuna, por encima de los 4500 m s. n. m., la cobertura vegetal disminuye debido a las condiciones climáticas extremas, lo que da lugar a suelos desnudos y a la presencia de especies rastreras o almohadilladas como *Azorella* sp. y *Pycnophyllum* sp.

• Área altoandina con escasa vegetación o sin ella

Corresponde a las zonas sin cobertura vegetal, como las áreas glaciares, áreas periglaciares, albufera, lago, laguna, río, estero, represa y poblado.

2. Tipos de erupciones volcánicas

Los volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano pueden presentar distintos tipos de erupciones, que se clasifican según su estilo eruptivo y nivel de explosividad. Entre las erupciones que han presentado los volcanes peruanos en el pasado, incluido el Coropuna, se encuentran las erupciones efusivas y explosivas con distintos valores del Índice de Explosividad Volcánica (IEV).

Las erupciones explosivas comprenden erupciones estrombolianas, vulcanianas y plinianas (subplinianas y ultraplinianas). Por su parte, las erupciones efusivas se caracterizan principalmente por la emisión de flujos de lava y pueden presentar distintos estilos de actividad, entre ellos el hawaiano.

A continuación, se detallan los tipos de erupciones volcánicas.

2.1 Erupción estromboliana

Es una erupción de baja explosividad que produce explosiones discretas separadas unas de otras por periodos de segundos a varias horas. Los productos piroclásticos generados en estas erupciones son de tamaño variable (bombas y lapilli) con escasa dispersión y alcance. También puede generar flujos de lava capaces de recorrer varios kilómetros desde el centro de emisión. Generalmente, en este tipo de erupciones intervienen magmas básicos. En el Perú, algunos ejemplos de volcanes asociados a este tipo de actividad son los volcanes monogenéticos de Andahua, Huambo, Yura y otros.

2.2 Erupción vulcaniana

Es una erupción que se caracteriza por generar explosiones pequeñas a moderadas, originadas por la liberación súbita de gases acumulados en el conducto volcánico, debido a la presencia de un tapón de lava o roca que encierra el conducto de salida. Este tipo de erupción genera columnas de gases y cenizas de hasta 20 km de altura (Sigurdsson et al., 2000), las cuales pueden ser dispersadas por los vientos a decenas o incluso centenas de kilómetros de distancia del volcán. Asimismo, dichas erupciones generan la expulsión de fragmentos de roca volcánica que caen principalmente en zonas cercanas al volcán.

En el sur del Perú, el volcán Sabancaya, ubicado en Caylloma (Arequipa), desde noviembre de 2016 ha presentado un proceso eruptivo de tipo vulcaniano, con explosiones frecuentes que generan columnas de gases y cenizas de entre 2 km y 5.5 km de altura sobre la cima del volcán (Figura 9). De manera similar, el volcán Ubinas, ubicado en Moquegua, durante las dos últimas décadas ha desarrollado erupciones de tipo vulcaniano con explosiones que generan columnas eruptivas de hasta 6.5 km de altura (Figura 9), provocando recurrentes caídas de ceniza en áreas aledañas.

En el futuro, el volcán Coropuna puede presentar este tipo de actividad explosiva con emisión de cenizas, las cuales pueden afectar áreas aledañas.

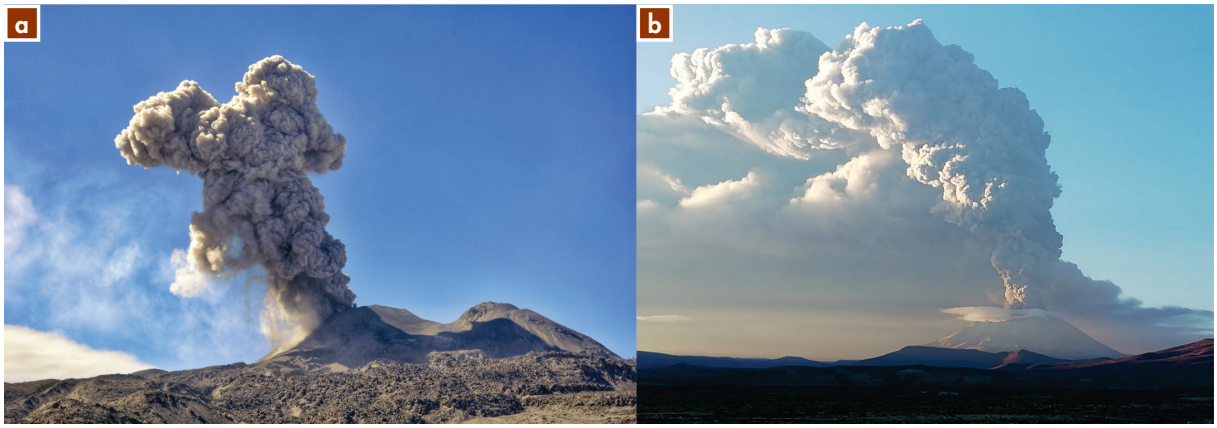

Figura 9. Vista de volcanes que presentaron erupciones vulcanianas recientes de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) igual a 2: a) Actividad explosiva de julio de 2024 del volcán Sabancaya. b) Erupción del volcán Ubinas ocurrida el 19 de julio de 2019.

2.3 Erupción pliniana (subpliniana-ultrapliniana)

Se trata de una erupción de gran magnitud en la que intervienen magmas ácidos e intermedios, caracterizados por su alta viscosidad y elevada concentración de volátiles disueltos. Esta última favorece la fragmentación del magma y la generación de material piroclástico y columnas eruptivas que pueden alcanzar varios kilómetros de altura sobre la cima del volcán, incluso hasta 50 km en el caso de las erupciones ultraplinianas. El material piroclástico emitido puede ser dispersado por el viento y depositarse posteriormente, formando extensos mantos de tefras (lapilli y ceniza) que recubren la topografía preexistente. En determinadas condiciones, las columnas eruptivas también pueden colapsar y generar flujos piroclásticos que se desplazan a ras del suelo a velocidades superiores a 100 km/h.

Por tanto, las erupciones plinianas (subplinianas y ultraplinianas) son erupciones magmáticas explosivas de conducto abierto, caracterizadas por la emisión de grandes volúmenes de tefra (ceniza, lapilli y bombas) y la generación de extensos flujos piroclásticos. En el sur del Perú, la erupción del volcán Huaynaputina, ocurrida en 1600 (IEV 6), constituye un claro ejemplo de este tipo de actividad explosiva. Durante dicho evento, se depositaron entre 13 km^3 y 14 km^3 de material piroclástico de caída, y se estima que la columna eruptiva alcanzó aproximadamente 32 km de altura sobre la cima del volcán (Prival et al., 2020; Mariño et al., 2021).

Otros volcanes que han presentado erupciones explosivas de gran magnitud son El Chichón (México), en 1982, y Pinatubo (Filipinas), en 1991. Por su parte, los volcanes Láscar (Chile), en abril de 1993, y Calbuco (Chile), en abril de 2015, constituyen ejemplos de erupciones subplinianas de IEV 4 (Figura 10).

2.4 Erupción efusiva

Una erupción efusiva se caracteriza por la emisión de flujos de lava, constituidos por corrientes de roca fundida que emergen a través del cráter o de fracturas existentes en los flancos de un volcán. Los volcanes del arco volcánico peruano generalmente emiten lavas de composición andesítica, andesítica básica y dacítica. En general, el caudal de estas lavas no supera unos pocos metros cúbicos por segundo y los flujos rara vez recorren más de 8 km desde su fuente de emisión. Durante su desplazamiento, las lavas se enfrían y solidifican (Francis, 1993).



Figura 10. Vista de volcanes que presentaron erupciones explosivas subplinianas con Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 4: a) Volcán Láscar, erupción del 19 de abril de 1993 (Fotografía de Ckelar Volcanes), y b) Volcán Calbuco, erupción del 23 de abril de 2015 (fotografía Barria C.).

3. Los peligros volcánicos

Diversos estudios vulcanológicos han compilado los principales peligros asociados con una erupción volcánica, entre los cuales se encuentran las caídas de ceniza y pómez, flujos de lava, flujos y oleadas piroclásticas, lahares (flujos de lodo), avalanchas de escombros y gases volcánicos (Blong, 1984; Tilling, 1989; Blong, 2000; Bignami et al., 2012), representados en la Figura 11. A continuación, se describen estos fenómenos para el caso del volcán Coropuna.

3.1 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 transportadas 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 depende de la magnitud de la erupción, de la densidad de los fragmentos y de la velocidad del viento

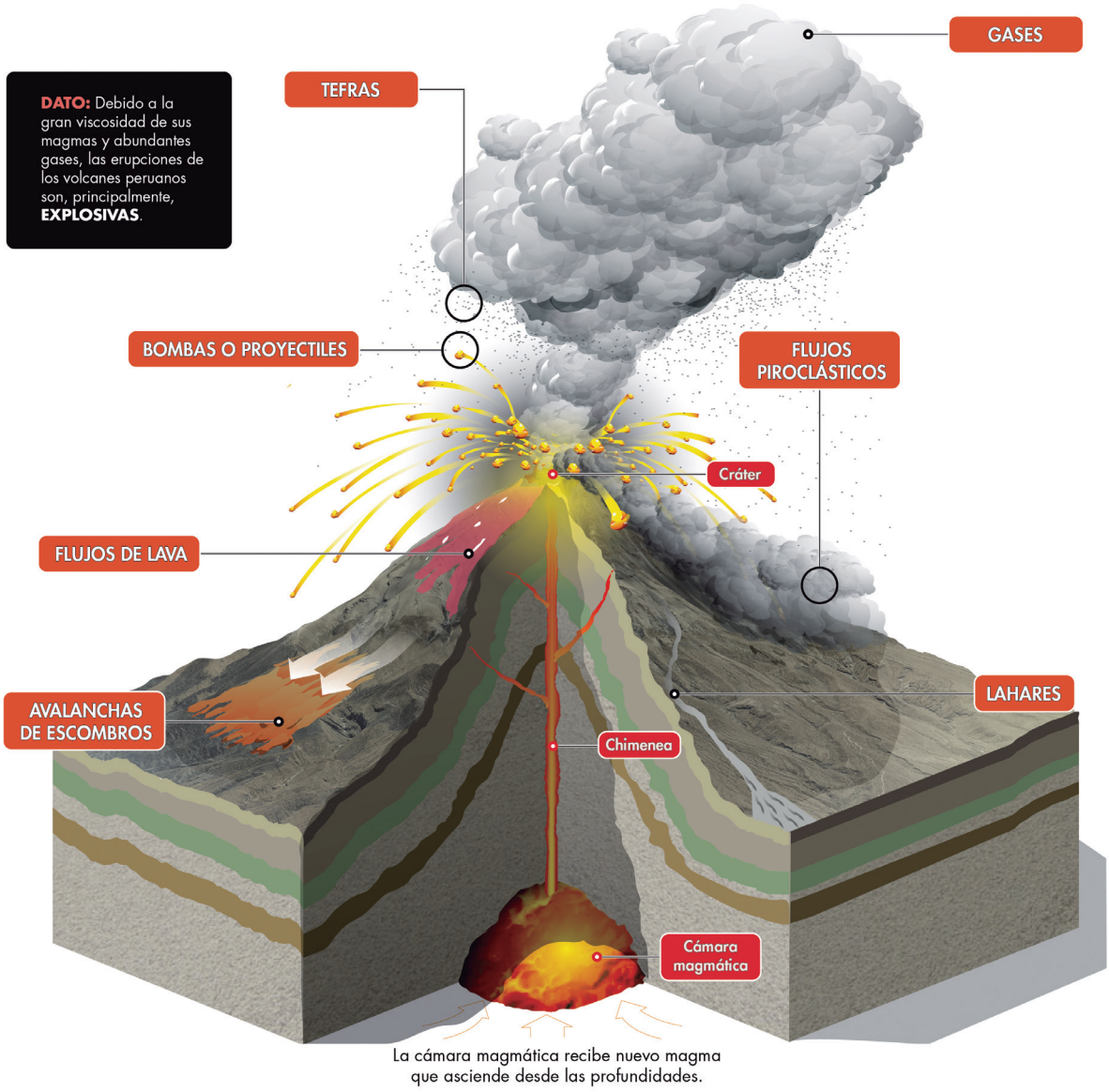

Figura 11. Tipos de peligros volcánicos que puede presentar un volcán como el Coropuna.

al momento de la erupción. Las partículas pueden cubrir y afectar extensas áreas, de algunas centenas de km² a varios cientos de km² (Cas & Wright, 1987).

Estas partículas pueden causar problemas de salud en las personas, contaminar fuentes de agua, colapsar los techos de viviendas por el peso acumulado, afectar terrenos de cultivo, 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. Un ejemplo del impacto de esta actividad son los efectos nocivos provocados por la gran erupción del volcán Huaynaputina ocurrida en 1600 d. C., que afectó sobremanera todo el sur peruano. También destacan los efectos ocasionados por la actividad explosiva moderada y recurrente de los volcanes Ubinas y Sabancaya ocurrida en las últimas décadas.

En inmediaciones del volcán Coropuna se distinguen algunos depósitos de cenizas retrabajadas de poco espesor (Núñez & Valenzuela, 2001), vinculados con la actividad explosiva moderada del volcán ocurrida durante el Pleistoceno superior y Holoceno, lo cual muestra que dicho volcán no presentó erupciones explosivas importantes.

3.2 Flujos de lava

Las lavas emitidas desde un volcán pueden desplazarse por el fondo de los valles y quebradas y alcanzar varios kilómetros de distancia. Rara vez recorren más de 8 km de distancia del centro de emisión (Francis, 1993). Los volcanes del sur peruano han emitido lavas viscosas que recorren algunos kilómetros de distancia, mientras que otras lavas se enfrían en la zona del cráter, formando domos de lava.

Los flujos de lava calcinan, sepultan y destruyen todo a su paso; sin embargo, en los Andes, especialmente en el sur peruano, generalmente no representan un peligro para las personas debido a su baja velocidad de desplazamiento, ya que su velocidad suele permitir evacuar las zonas de peligro (Tilling, 1989). El volcán Coropuna, en el Pleistoceno y Holoceno, ha emitido flujos de lava de composición andesítica y dacítica. Según Bromley et al. (2019), durante los últimos 12 000 años, el Coropuna ha emitido tres flujos de lava que afloran al pie de los flancos oeste, sureste y noreste del volcán. Dichas lavas viajaron de 4.7 km a 5.8 km de distancia desde su centro de emisión.

3.3 Flujos y oleadas piroclásticas

Las erupciones explosivas importantes pueden generar flujos piroclásticos, también denominados corrientes de densidad piroclástica. Estas corrientes están conformadas 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 del suelo y a 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 parte 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 las últimas décadas muestran que la gran mayoría de los volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano, como Misti, Ubinas, Yucamane, Tutupaca, Ticsani, Huaynaputina, 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; Mariño et al., 2021; Aguilar et al., 2022), durante su evolución presentaron erupciones explosivas con emisiones de flujos piroclásticos, cuyos depósitos se encuentran en sus alrededores. Sin embargo, en inmediaciones del volcán Coropuna, no se distinguen flujos piroclásticos ligados a una actividad eruptiva reciente de dicho volcán.

3.4 Lahares (flujos de lodo y escombros)

Los lahares, o flujos de lodo y escombros, son mezclas de agua y fragmentos de roca volcánica de diversos tamaños que se desplazan rápidamente (20-60 km/h) por los valles y quebradas que

descienden de los volcanes. Pueden generarse tanto durante las erupciones como en periodos de tranquilidad volcánica, principalmente debido a lluvias intensas (Tilling, 1989). Sin embargo, el agua que los moviliza también puede provenir de la fusión del hielo o la nieve, de los ríos o de las lagunas cratéricas.

Los lahares pueden desbordarse de los cauces de las quebradas y extenderse hacia las zonas de abanicos de inundación, como ocurrió durante la erupción del volcán Nevado del Ruiz, en noviembre de 1985, cuando estos flujos destruyeron la ciudad de Armero, en Colombia (Naranjo et al., 1986). La extensión del área inundada depende del volumen de agua y de materiales sueltos disponibles, así como de la pendiente y la topografía de los valles y quebradas. Los lahares suelen destruir todo a su paso, recorrer grandes distancias (>100 km) e incluso provocar inundaciones en las zonas cercanas a los ríos y quebradas (Tilling, 1989). Asimismo, su volumen y la distancia recorrida están condicionados por la cantidad de agua y material suelto disponible, la temperatura del material movilizado y la pendiente del terreno.

La mayoría de los volcanes activos de los Andes del sur del Perú presentan este tipo de peligro, especialmente durante la temporada de lluvias (de diciembre a marzo), cuando las precipitaciones intensas sobre sus laderas y cumbres pueden desencadenar lahares. El volcán Coropuna posee un casquete glaciar en su cima, cuyo retroceso, asociado al cambio climático, puede favorecer la generación de lahares que descenderían por las quebradas que drenan sus flancos, especialmente por las del sector sur, como Cospanja, entre otras.

Durante su recorrido, los lahares pueden afectar terrenos de cultivo y centros poblados ubicados en ambas márgenes de los ríos Llacllajo, Tastane-Llato y Capiza. Un ejemplo de este peligro ocurrió el 20 de diciembre de 2016, cuando se desprendió un bloque de hielo del nevado Coropuna, lo que generó flujos de lodo que afectaron principalmente terrenos de cultivo de las localidades de Chupacra y Tipan, así como el sector de Paracolca, ubicados en las márgenes de los ríos Llato y Llacllajo (Concha & Vásquez, 2017; Figura 12).

Asimismo, en ambas márgenes de los ríos Llacllajo y Capiza, que drenan el flanco sur del volcán Coropuna, existen más de 10 depósitos de lahares voluminosos que evidencian la ocurrencia de estos eventos en el pasado (Figura 13).



Figura 12. Vista del valle del río Llato por donde el 20 de diciembre de 2016 descendieron lahares originados por el desprendimiento de un bloque de hielo del volcán Coropuna.



Figura 13. Vista del río Capiza donde se distinguen depósitos de lahares que en total miden 16 m de altura, emplazados en periodos pasados ligados a avenidas importantes.

3.5 Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros se originan por el derrumbe o colapso de un sector del edificio volcánico, debido a factores de inestabilidad, como la elevada pendiente de sus flancos, la presencia de fracturas o fallas tectónicas, los movimientos sísmicos intensos y las erupciones volcánicas. Aunque ocurren con poca frecuencia, pueden desplazarse a gran velocidad y alcanzar distancias de decenas de kilómetros. Por ejemplo, en el monte St. Helens (EE. UU.), la avalancha de escombros estuvo asociada a una explosión lateral dirigida y alcanzó velocidades estimadas del orden de 240 km/h (Glicken, 1996).

La movilidad de las avalanchas de escombros depende de diversos factores, como el volumen del material movilizado, la reología del flujo, la pendiente del terreno, la formación de una zona de alta deformación por cizallamiento en su base y la presencia de fluidos hidrotermales o magmáticos (Ui et al., 2000). En general, los mayores volúmenes pueden favorecer un mayor alcance de estos flujos.

Las avalanchas de escombros entierran y destruyen todo lo que encuentran a su paso. Además, pueden generar lahares y crecidas debido a la liberación del agua represada por el material de la avalancha (Tilling, 1989).

En el sur del Perú, varios volcanes activos y potencialmente activos, como Misti, Ticsani, Tutupaca, Ubinas, Sara Sara y Coropuna, han presentado colapsos de flanco que generaron depósitos de avalanchas de escombros distribuidos en áreas aledañas (Thouret et al., 2001; Mariño & Thouret, 2003; Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2015; Rivera et al., 2020a). En el caso del volcán Ticsani, la avalancha de escombros cubrió aproximadamente 70 km^2 y alcanzó una distancia cercana a 40 km. Posteriormente, el flujo se transformó en un lahar que se canalizó por el río Tambo hasta llegar al océano Pacífico, situado a más de 150 km de distancia (Mariño & Thouret, 2003). Por su parte, en el volcán Coropuna se ha identificado un depósito de avalancha de escombros a 13 km de distancia, al pie de su flanco sur, en las inmediaciones del centro poblado de San Antonio. Este depósito estaría asociado a un colapso de flanco ocurrido en el pasado.

3.6 Gases volcánicos

Antes y durante una erupción volcánica se liberan importantes cantidades de gases, principalmente vapor de agua, además de dióxido de carbono, dióxido de azufre, ácido clorhídrico, monóxido de carbono, ácido fluorhídrico, azufre, nitrógeno, cloro y flúor, entre otros (Hoblitt et al., 1995).

Los gases volcánicos suelen diluirse y dispersarse rápidamente; sin embargo, pueden alcanzar concentraciones elevadas en zonas bajas o depresiones cercanas al volcán, donde representan un peligro de intoxicación y muerte para las personas y los animales. Asimismo, algunos gases pueden condensarse, adherirse a las partículas de ceniza o reaccionar con las gotas de agua, lo que favorece la formación de lluvia ácida y puede provocar corrosión, daños en los cultivos y contaminación del agua y los suelos. Por lo general, sus efectos nocivos se concentran dentro de un radio de 10 km alrededor del volcán (Tilling, 1989).

Actualmente, no se han identificado evidencias de emisiones de gases volcánicos en el Coropuna.

4. El volcán Coropuna

4.1 Morfología actual

Coropuna es un complejo volcánico extenso, ubicado en el extremo sur de una zona de altiplanicie volcánica. Según Mariño et al. (2018), dicho volcán está constituido por un grupo de al menos cinco conos o edificios de lava y domos de lava superpuestos entre sí, que cubren un área de 25 km de largo y 17 km de ancho. Los cinco conos volcánicos identificados son Yanaranra (6305 m s. n. m.), Coropuna (6161 m s. n. m.), Paiche (6330 m s. n. m.), Casulla (6377 m s. n. m.) y Escalera (6171 m s. n. m.), los cuales están alineados en dirección noroeste-sureste (Figura 14). Dichos conos se edificaron sobre flujos de lava emplazados durante una etapa temprana y media de evolución de dicho volcán. En conjunto, el volcán Coropuna descansa sobre secuencias volcánicas antiguas: ignimbrita Huaylillas, ignimbritas Sencca y flujos de lava andesítica del Eoceno al Neógeno que cubren secuencias volcano-sedimentarias del Permotriásico y Cretáceo (Margirier et al., 2015).

4.2 Geología e historia eruptiva

Según los estudios vulcanológicos realizados, la actividad eruptiva presentada por el volcán Coropuna en el pasado fue principalmente efusiva y se caracterizó por el emplazamiento de variados flujos de lava andesítica y dacítica (Figura 15), los cuales cubren secuencias volcánicas y sedimentarias del Mioceno y Cretácico. Durante las etapas temprana (400 ka) e intermedia (270-108 ka) de la evolución del volcán Coropuna se emplazaron flujos de lava andesítica y dacítica que conforman la base y parte media de dicho volcán (Mariño et al., 2018), sobre los cuales se emplazaron al menos cinco conos o edificios volcánicos: Yanaranra, Coropuna, Paiche, Casulla y Escalera. Estos últimos están constituidos por lavas y domos que se habrían formado durante el Pleistoceno medio y el Holoceno. Hace entre 1400 y 1600 años, el volcán Coropuna presentó su última actividad eruptiva, caracterizada por la emisión de flujos de lava (Bromley et al., 2019) que tienen hasta 5.8 km de longitud, visibles en los sectores noreste y sureste del volcán.

Los edificios volcánicos y domos de lava superiores que conforman dicho complejo son descritos a continuación:



Figura 14. Vista del sector sur del volcán Coropuna donde se distinguen los edificios volcánicos: Escalera, Paiche, Coropuna y Yanaranra.

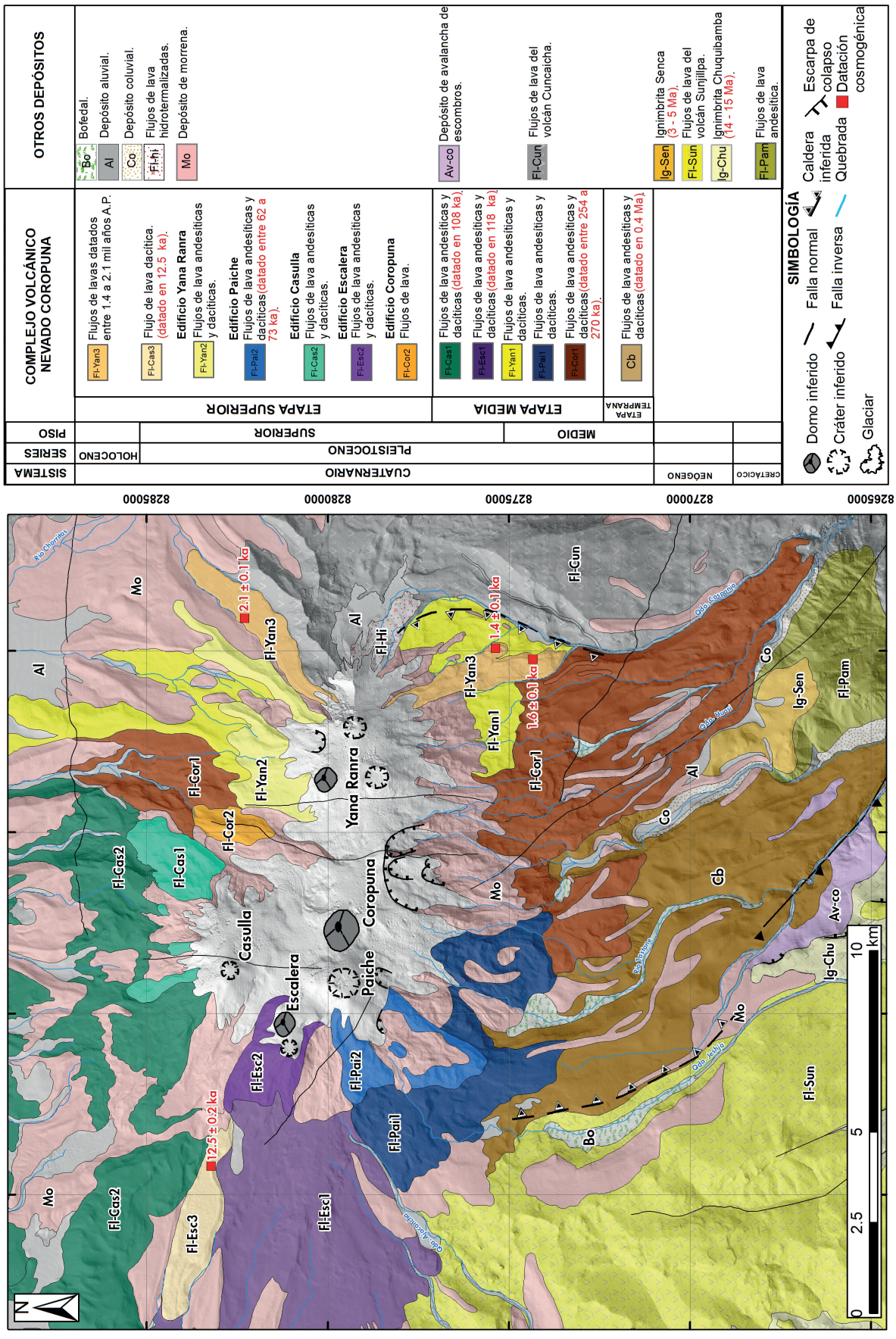

Figura 15. Mapa geológico del volcán Coropuna y áreas aledañas (modificado de Mariño et al., 2018).

4.2.1 Edificio Coropuna

Se encuentra ubicado en la parte central del complejo volcánico Coropuna, entre los edificios Yanaranra y Paiche. Se considera el edificio volcánico más antiguo del complejo volcánico Coropuna. A dicho edificio se le asocian flujos de lava de composición andesítica emplazados en el sector sur del volcán. Un flujo de lava andesítica visible al pie del edificio Coropuna fue datado en 270.1 ± 6.2 ka por Mariño et al. (2018).

4.2.2 Edificio Paiche

El edificio volcánico Paiche está ubicado en el extremo suroccidental del volcán Coropuna, entre los edificios Escalera y Coropuna. Este edificio presenta al menos seis flujos de lava en bloques, así como un domo de lava (Mariño et al., 2018). Este estratocono presenta en su cima un cráter de 0.8 km de diámetro, el cual está cubierto por una gruesa capa de glaciar.

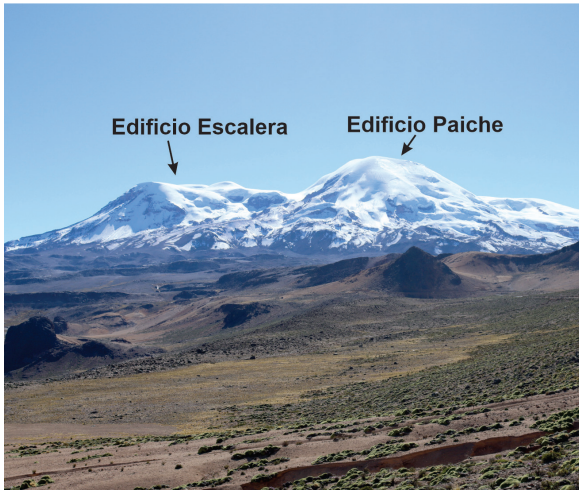

Figura 16. Vista del sector occidental del complejo volcánico Coropuna, donde se distinguen los edificios Escalera y Paiche.

4.2.3 Edificio Escalera

Dicho edificio se ubica en el extremo occidental del volcán Coropuna, entre los edificios Casulla y Paiche. A este edificio se le asocian cuatro flujos de lava andesíticos emplazados hacia el oeste. Un flujo de lava fue datado en 118 ± 2.3 ka (Mariño et al., 2018), y otro flujo de lava andesítica afírica fue datado en 255 ± 5.4 ka por Mariño et al. (2018).

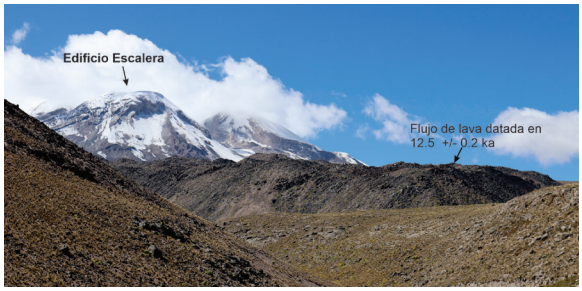

Figura 17. Vista de un flujo de lava reciente del volcán Coropuna que desciende del edificio Escalera.

4.2.4 Edificio Casulla

El edificio Casulla se encuentra ubicado en el extremo noroccidental del volcán Coropuna, al norte del edificio Escalera. En su cima se han identificado varios domos de lava y un cráter de aproximadamente 0.5 km de diámetro, cubiertos por el casquete glaciar. A este edificio se le asocian más de ocho flujos de lava de composición andesítica y dacítica, de espesores variables, que se distribuyen hacia el norte y noroeste del Coropuna y alcanzan distancias de poco más de 15 km. El flujo de lava mejor preservado se observa en el sector noroeste y tiene una longitud de 6 km. Un flujo de lava reciente fue datado en 12.5 ± 0.2 ka (Bromley et al., 2019).

4.2.5 Edificio Yanaranra

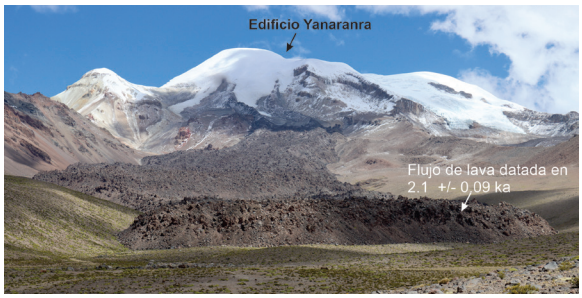

Figura 18. Vista de un flujo de lava reciente del volcán Coropuna que desciende del edificio Yanaranra.

Se encuentra ubicado en el extremo oriental del volcán Coropuna, emplazado sobre secuencias de rocas lávicas. El edificio Yanaranra se considera el más joven del volcán Coropuna y está conformado por una sucesión de flujos de lava de composición andesítica. Hacia sus extremos noreste y sureste existen tres flujos de lava recientes. De ellos, el flujo de lava que se extiende hacia el sector noreste fue datado por el método ^{3}He en 2.1 ± 0.09 ka, y los otros dos que se extienden hacia el sector

sureste fueron datados entre 1.62 ± 0.02 ka y 1.44 ± 0.07 ka (Bromley et al., 2019).

Respecto de la actividad volcánica del Coropuna durante los últimos 500 años no existen evidencias de campo ni documentos históricos que mencionen la ocurrencia de erupciones recientes o actividad eruptiva alguna de dicho volcán.

4.3 Contexto estructural

En el área del volcán Coropuna se identifican fallas y lineamientos con dos orientaciones predominantes: noroeste-sureste y noreste-suroeste (Figura 19). Entre las principales estructuras se encuentran: (1) la falla Chuquibamba (Mariño et al., 2018; Margirier et al., 2015), que corresponde a un sistema de fallas normales de orientación noroeste-sureste, ubicado a 20 km al suroeste del volcán Coropuna y que atraviesa la localidad de Chuquibamba; (2) la falla Pampacolca (Margirier et al., 2015; Úbeda, 2011), una falla inversa de orientación noroeste-sureste, ubicada a 10 km al sur del edificio volcánico y que atraviesa el poblado de Pampacolca; (3) el lineamiento Pumaranra, de orientación noroeste-sureste, paralelo a la falla Pampacolca y ubicado a 12 km al noreste del volcán Coropuna, cuyo trazado coincide con el cráter del centro volcánico Pumaranra y el curso del río Arma; y (4) el lineamiento Casulla, de orientación noreste-suroeste, que atraviesa las cimas de los edificios volcánicos Casulla y Paiche y corta el sistema de fallas Chuquibamba.

4.4 Contexto glaciológico

Actualmente, el volcán nevado Coropuna presenta un importante casquete glaciar. Malone et al. (2022) reportaron una superficie glaciar de 53.55 ± 2.80 km² en 1988 y de 42.02 ± 2.66 km² en 2020, lo que representa una pérdida de superficie de 11.5 km². Posteriormente, Llanto et al. (2025) muestran que la superficie del casquete glaciar en 1955 era de aproximadamente 56 km² y en 2022 disminuyó a 41 km², lo que representa una pérdida total de superficie de 15 km² y una pérdida promedio anual de 0.22 km². Este casquete glaciar constituye una fuente importante de agua para la población asentada al pie del volcán Coropuna. Según los estudios citados, el casquete atraviesa un periodo de retroceso acelerado.

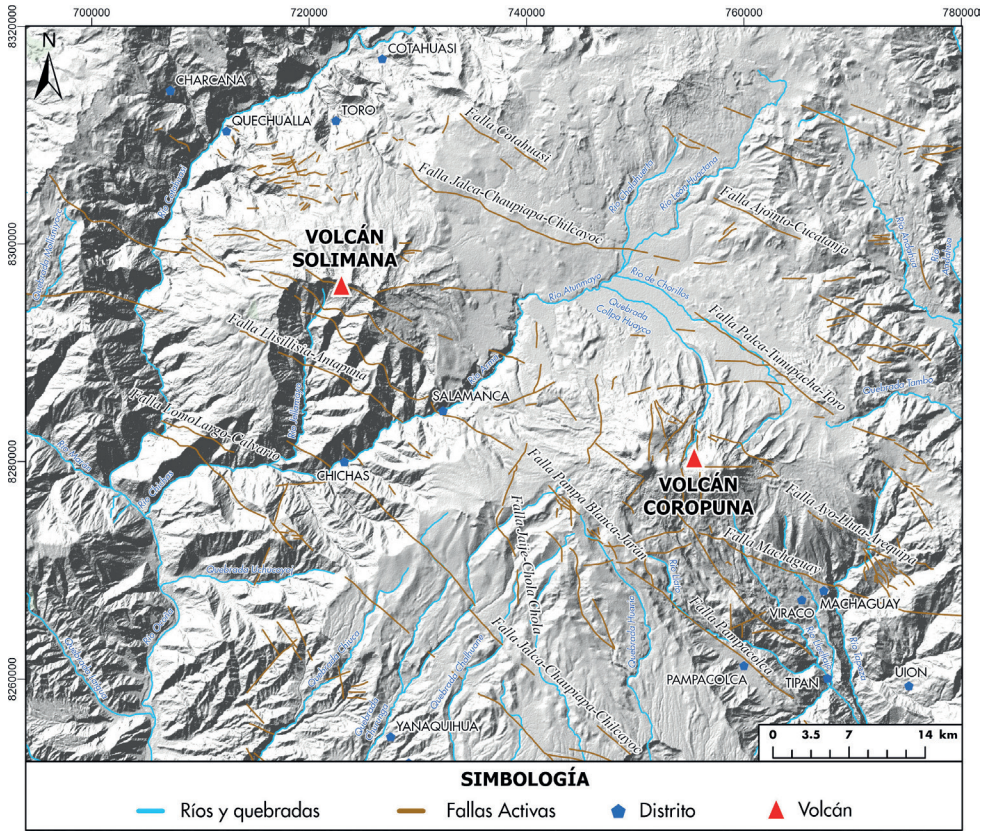

Figura 19. Sistema de fallas en la zona del volcán Coropuna. Las líneas continuas representan fallas y las discontinuas, lineamientos (modificado de Margirier et al., 2015; Torres et al., 2020).

5. Datos y metodología para la elaboración de mapas

5.1 Metodología para la elaboración de mapas

La metodología empleada para la elaboración de los mapas de peligro comprendió las siguientes actividades:

- Recopilación de material bibliográfico relacionado con la determinación de características de las erupciones pasadas y la geología del volcán Coropuna.
- Procesamiento de imágenes de satélite Landsat del volcán Coropuna y sus alrededores.
- Elaboración de un modelo digital de elevación (MDE) a través de imágenes satelitales de alta resolución (PerúSAT-1) proporcionadas por CONIDA.
- Trabajos de campo para el reconocimiento de secuencias volcánicas emitidas en el pasado por el volcán Coropuna.
- Evaluación del peligro volcánico, para lo cual se consideraron cinco escenarios eruptivos futuros: erupción efusiva con emisión de flujos de lava; erupción explosiva de tipo vulcaniana (IEV 1-2); erupción con crecimiento y colapso de domo; erupción explosiva de tipo subpliniana (IEV 3-4); y erupción explosiva de tipo pliniana (IEV 5). Un escenario representa una situación hipotética que describe los fenómenos y efectos de una erupción. Los escenarios se construyeron con base en las erupciones de volcanes análogos y se complementaron con información geológica y geofísica del Coropuna obtenida mediante estudios científicos. La definición de un escenario también ayuda en las tareas de prevención y la planificación de la respuesta ante la ocurrencia de una erupción.
- Modelización 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 Coropuna.

5.2 Simulación de procesos volcánicos con programas informáticos especializados

Se realizaron simulaciones de diversos procesos volcánicos, como se describe a continuación:

5.2.1 Dispersión de ceniza: *software* Ash3D

Para modelar la dispersión de ceniza emitida durante una erupción volcánica existen varios programas informáticos, entre ellos Ash3D (Mastin et al., 2009), que se basa en principios eulerianos tridimensionales y fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (Schwaiger et al., 2012). Esta herramienta permite calcular la cantidad de ceniza depositada y su concentración en el aire, y también puede utilizarse para reconstruir eventos pasados y formular posibles escenarios futuros de dispersión y deposición 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 caras de las celdas (Mastin et al., 2009).

Las condiciones iniciales de este *software* se basan en que una erupción explosiva inyecta tefra a la atmósfera a través de una columna de celdas sobre el volcán y distribuye la masa verticalmente mediante el modelo de Suzuki (Suzuki, 1983; Carey, 1996). Posteriormente, el modelo 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 mediante datos preexistentes que varían con el tiempo y métodos basados en volúmenes finitos de material. La velocidad de caída, la distribución y la duración del transporte se ven influenciadas por el tamaño de grano designado por el programa. La distribución vertical de la masa y la elevación se calculan usando la ecuación de Suzuki (1983).

El usuario ingresa variables a través de la plataforma virtual, como el nombre del volcán, la fecha, hora y duración de la erupción, la altura de la pluma, el

volumen (km³) emitido como roca densa equivalente del magma (DRE) y la duración de la simulación. Los resultados generados por el modelo incluyen la concentración (mg/m³) y altura de la nube de cenizas (km), espesor de los depósitos (milímetros y pulgadas), tiempo de llegada de la nube y de los depósitos después de la erupción (h), así como los aeropuertos afectados. Los parámetros eruptivos utilizados en el modelo Ash3D corresponden a tres escenarios de erupciones vulcanianas (IEV 1-2), subplinianas (IEV 3-4) y plinianas (IEV 5).

• Parámetros utilizados en la simulación Ash3D

Para la simulación de deposición de cenizas del volcán Coropuna para un escenario de erupción explosiva de tipo vulcaniana (IEV 1-2) se consideró un volumen DRE de ceniza de 0.002 km³ (Tabla 6), volumen frecuente en erupciones explosivas de tipo vulcaniano como la presentada por el volcán Tungurahua el 14 de julio de 2006 (Bustillos & Samaniego, 2011) y por el volcán Ubinas durante los últimos 500 años (Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2020). También se consideró una altura de la pluma volcánica de 6.5 km.

Tabla 6. 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 (km)	6.5
Altura sobre el nivel del mar (km)	12.6
Volumen DRE (km³)	0.002

Para simular la deposición de ceniza del volcán Coropuna durante una erupción subpliniana (IEV 3-4), se consideró un volumen DRE de ceniza de 0.3 km³ (Tabla 7). Este y otros parámetros utilizados para la simulación de un escenario eruptivo de tipo subpliniano de IEV 3-4 se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. 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 (km)	~15
Altura sobre el nivel del mar (km)	21
Volumen DRE (km³)	0.3

Para simular la deposición de ceniza del volcán Coropuna durante una erupción pliniana (IEV 5), se consideró un volumen DRE de tefra de 1.5 km³. Este y otros parámetros utilizados para la simulación de un escenario eruptivo de tipo pliniano de IEV 5 se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros eruptivos utilizados para la simulación con el código Ash3D, para el escenario eruptivo de tipo pliniano de IEV 5.

Escenario eruptivo	IEV 5
Duración de la simulación	24 horas
Duración de la erupción	10 horas
Altura sobre el nivel del cráter (km)	~15
Altura sobre el nivel del mar (km)	21
Volumen DRE (km³)	1.5

Una vez definidos los escenarios eruptivos, se realizaron 1152 simulaciones para cada escenario, con los datos de viento registrados de 2010 a 2025. En todos los casos se consideró la dirección del viento predominante: sureste y suroeste de la cima del volcán Coropuna. Los datos de viento fueron tomados del Centro Nacional de Predicción Ambiental de los EE. UU.

5.2.2 Descenso y desborde de flujos: código VolcFlow

Para simular el área de emplazamiento, la velocidad y la profundidad de lahares, avalanchas de escombros, flujos piroclásticos y otros flujos volcánicos, se cuenta con el *software* VolcFlow, que es un código euleriano de diferencias finitas escrito en el programa MATLAB. Este código determinista se basa en las ecuaciones de conservación de la masa y del 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 locales relacionadas con la topografía del terreno y la profundidad. El código VolcFlow se ha utilizado ampliamente para simular diferentes flujos gravitacionales, con una variación de los parámetros de simulación de acuerdo con la reología y las características de cada tipo de flujo, como lahares (Tabla 9), flujos piroclásticos (Tabla 10) y avalanchas de escombros (Tabla 11), especialmente en volcanes (Kelfoun & Druitt, 2005; Cárdenas Quiroga et al., 2013; Gueugneau, 2014; Vásconez et al., 2019; Kelfoun & Vallejo Vargas, 2016; Warwick et al., 2022). Detalles sobre el código VolcFlow y sus aplicaciones para simulaciones de lahares se pueden encontrar en Cárdenas Quiroga et al. (2013) y Vásconez et al. (2019).

Tabla 9. Parámetros utilizados para simular lahares mediante el código VolcFlow.

ESCENARIO ERUPTIVO	Volumen	Tiempo	Densidad	Cohesión	Viscosidad
	m^3	s	(kg/m^3)	Pa	Pa·s
Alto peligro	1-2 × 10^6	10 800	1300	1	1
Moderado peligro	6 × 10^6	10 800	1300	10	1
Bajo peligro	12 × 10^6	10 800	1300	20	1

Tabla 10. Parámetros utilizados para simular flujos piroclásticos haciendo uso del código VolcFlow.

ESCENARIO ERUPTIVO	Volumen	Densidad	Tiempo de simulación	Cohesión
	× 10^6 m^3	kg/m^3	s	Pa
Alto peligro	1	4000	400	5000
Moderado peligro	10	4000	800	5000
Bajo peligro	100	4000	1200	5000

Tabla 11. Parámetros utilizados para simular avalanchas de escombros haciendo uso del código VolcFlow.

ESCENARIO ERUPTIVO	Volumen	Tiempo de simulación	Cohesión	Viscosidad
	km^3	s	Pa	Pa·s
Alto peligro	1.7 0.4 0.3	400	52 000	1000
Moderado peligro	3.1 0.7 0.7	500	52 000	1000
Bajo peligro	5.0 1.8 1.6	600	52 000	1000

5.2.3 Descenso y desborde de flujos: modelo LaharZ

Para complementar los resultados de las simulaciones numéricas de los diferentes peligros asociados al volcán, se empleó el programa LaharZ (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998), implementado mediante LaharZ_py, principalmente para estimar y contrastar el alcance potencial de los flujos mediante la metodología del cono de energía (Malin & Sheridan, 1982). Esta metodología permite establecer una relación entre la distancia horizontal alcanzada por un flujo y la diferencia de elevación entre su punto de generación y el límite de alcance, lo que constituye una aproximación para evaluar su movilidad y extensión potencial.

El método del cono de energía ha sido ampliamente utilizado 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 una avalancha de escombros es función de la diferencia de altura (H) entre el punto de generación del flujo o la cima de un volcán y el punto de alcance del depósito (Figura 20). 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.

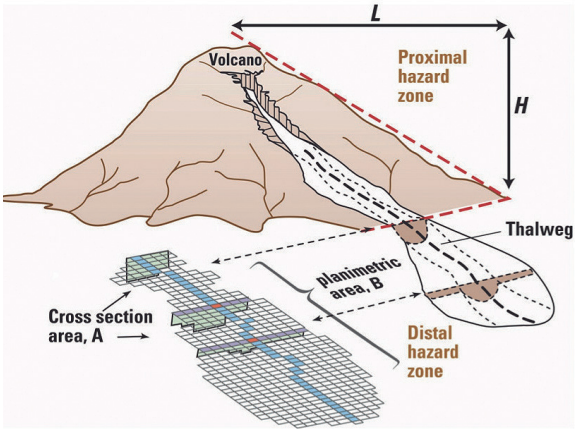

Figura 20. Relaciones entre la distancia (L) y la diferencia de altura (H) asociadas al alcance de los flujos (Schilling, 1998).

Los alcances obtenidos mediante el programa LaharZ_py fueron contrastados con los resultados de las simulaciones numéricas realizadas para los lahares, avalanchas de escombros, lavas y flujos piroclásticos. La integración de estos resultados permitió establecer las zonas potencialmente expuestas a los diferentes peligros volcánicos y contribuyó a la elaboración del mapa multipeligros presentado en este estudio.

5.3 Escenarios eruptivos considerados

Los mapas de peligros de este estudio se elaboraron con base en cinco escenarios eruptivos. Un escenario representa una situación hipotética que describe los fenómenos y efectos de una erupción para un volcán determinado. Para establecer los escenarios eruptivos que podría presentar el volcán Coropuna en el futuro, se analizaron los tipos de erupciones registradas en el pasado y el grado de recurrencia, con base en los estudios geológicos previos (Núñez & Valenzuela, 2001; Bromley et al., 2019; Mariño et al., 2018) y datos de campo del volcán Coropuna, así como el análisis de la morfología actual del volcán Coropuna y otros aspectos descritos a continuación:

- Los dinamismos eruptivos futuros, es decir, los tipos de erupciones que podría generar el volcán Coropuna.
- 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 Coropuna, tales como Ubinas, Sabancaya, Chachani y otros.

Adicionalmente, se consideró la presencia del casquete glaciar sobre la cima del volcán Coropuna, cuya fusión por interacción con productos volcánicos calientes, generados durante una erupción, podría originar lahares que discurrirían aguas abajo por las diversas quebradas y valles que surcan el volcán.

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

5.3.1 Erupción efusiva con emisión de flujos de lava

En el pasado, específicamente en el Pleistoceno y Holoceno, el Coropuna ha emitido principalmente

flujos de lava a través de diversos centros de emisión o conductos eruptivos. Las lavas recorrieron distancias de hasta 8 km desde su fuente. Durante los últimos 13 000 años, las erupciones efusivas del volcán Coropuna han sido poco recurrentes. Producto de ellas, en los flancos noroeste, sureste y noreste de este volcán se distinguen flujos de lava «recientes» datados por Bromley et al. (2019) en aproximadamente 12 500 y 1440 años AP. Estos flujos han recorrido distancias de hasta 5.8 km desde su centro de emisión. En el futuro, es posible que el Coropuna genere una erupción efusiva con la emisión de flujos de lava, los cuales podrían recorrer distancias similares a las registradas en el pasado, de hasta 8 km desde el centro de emisión, canalizándose en los valles y quebradas aledañas. Debido a la baja velocidad de desplazamiento de las lavas, las personas asentadas al pie del flanco sur del volcán podrían disponer de tiempo para evacuar hacia zonas seguras. Los habitantes de los centros poblados Ocoruro y Unro podrían quedar aislados debido a la obstrucción de las vías de acceso a ambas localidades. Asimismo, bofedales y terrenos de cultivo se encuentran expuestos a dicho peligro.

Por otro lado, el emplazamiento de flujos de lava puede fundir la capa de hielo y nieve que existe en la cumbre del volcán Coropuna, y generar lahares que descenderían por las quebradas que surcan el cono volcánico, especialmente durante los periodos lluviosos. Los lahares causarían daños severos en terrenos de cultivo, pastizales, bofedales, algunos poblados y obras de infraestructura, sobre todo si los lahares descienden por el flanco suroeste.

5.3.2 Erupción vulcaniana (IEV 1-2)

Las erupciones vulcanianas son de carácter explosivo y de intensidad moderada. Durante estas erupciones se emiten cenizas, bloques, bombas, escorias y, eventualmente, pómez. Las explosiones se dan en intervalos de minutos a horas e incluso días. Como resultado de estas explosiones, se generan columnas eruptivas de gases y cenizas que eventualmente ascienden hasta 20 km de altura (Sigurdsson et al., 2000).

En las laderas y partes bajas del volcán Coropuna se distinguen capas delgadas de ceniza retrabajada, ligadas a erupciones explosivas leves a moderadas ocurridas en el pasado (Núñez & Valenzuela, 2001). Dado que el Coropuna es un volcán activo, podría generar en el futuro erupciones explosivas moderadas de tipo vulcaniano con la emisión de ceniza que puede ser dispersada a más de 40 km alrededor de dicho volcán. Volcanes activos, como el Sabancaya y Ubinas, han generado erupciones recientes de este tipo. En efecto, el volcán Sabancaya, entre los años 1990 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, de 2016 a 2026, 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 (13 de septiembre de 2025). Dicho material fue dispersado a más de 30 km de distancia alrededor del volcán y afectó principalmente áreas aledañas.

Por otra parte, el volcán Ubinas, durante la erupción del 19 de julio de 2019, que alcanzó un IEV de 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 proximales y distales del volcán (a más de 250 km de distancia) en dirección sur y sureste y afectaron principalmente poblados cercanos del valle de Ubinas y algunas localidades alejadas ubicadas en las regiones de Moquegua, Tacna, Puno, así como algunas localidades 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).

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

Durante las erupciones vulcanianas (IEV 2), también pueden generarse flujos piroclásticos de pequeño volumen y alcance limitado (Sigurdsson et al., 2000). Por ejemplo, durante la erupción vulcaniana de 1976 del volcán Reventador (Ecuador), con un IEV 2, y las erupciones de 2006 y 2010 del volcán Tungurahua (Ecuador), se generaron flujos piroclásticos que recorrieron distancias superiores a 4 km desde sus respectivos cráteres (Aguilera et al., 1988; Hall et al., 2013). Ante una eventual erupción vulcaniana del volcán

Coropuna, podrían generarse flujos piroclásticos de pequeño volumen que descenderían por sus flancos y provocarían la fusión parcial del casquete glaciar ubicado en la cima. Este proceso podría dar lugar a la formación de lahares que se desplazarían por las quebradas y los valles que drenan el edificio volcánico.

5.3.3 Erupción con crecimiento y colapso de domo

En el Coropuna, es probable que durante una eventual erupción se forme un domo de lava. El domo se formaría cuando una lava muy viscosa se extruyera y fluyera lentamente, sin recorrer más de unos cientos de metros (Francis, 1993). Durante el crecimiento del domo, sus extremos pueden volverse inestables, desprenderse o colapsar y dar lugar a la formación de flujos piroclásticos.

El escenario que describe una futura erupción con el crecimiento y colapso de un domo de lava en el Coropuna está basado en la presencia de domos de lava en la cima de dicho volcán. Aunque en el Coropuna no se han identificado depósitos de flujos piroclásticos asociados a dicho evento o eventos pasados, existe la posibilidad de que se generen dichos depósitos, asociados al crecimiento y colapso de domos.

La mayor amenaza asociada al crecimiento de domos de lava radica en generar una explosión lateral dirigida (*blast*). Estas explosiones son fenómenos complejos que comparten características de flujos y oleadas piroclásticas. Estas explosiones 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 monte 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 posterior desencadenó una avalancha de escombros y la despresurización del sistema magmático, lo que dio lugar a una explosión lateral dirigida. Los depósitos de avalancha y los flujos piroclásticos generados por dicha explosión viajaron alrededor de 28 km de distancia del cráter. Desde aquel entonces se sabe que las grandes explosiones dirigidas resultan de la despresurización repentina del sistema magmático o hidrotermal del volcán debido al deslizamiento de una parte del flanco.

Aunque en la historia eruptiva del volcán Coropuna no se ha registrado tal evento, en un futuro puede producirse una explosión lateral dirigida. Esto 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 descenderían por los diversos flancos a una distancia superior a 8 km del volcán, y cubrirían la zona de altiplanicie, lomas y laderas localizadas alrededor del volcán Coropuna, como ocurrió durante la erupción del volcán Tutupaca de 1802 (IEV 3), en la cual se generaron depósitos de avalancha de escombros y flujos piroclásticos. Estos últimos viajaron a poco más de 10 km de distancia al noreste del volcán (Samaniego et al., 2015).

5.3.4 Erupción subpliniana (IEV 3-4)

Durante erupciones subplinianas, con IEV 3, las columnas de tefras (ceniza, lapilli de pómez, escorias) y gases ascienden comúnmente entre 3 km y 20 km de altura sobre el cráter y posteriormente generan depósitos de caída de tefras y flujos piroclásticos (Sigurdsson et al., 2000). La tefra emitida es transportada por los vientos y se dispersa 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) en 1985 generó una erupción subpliniana con IEV 3, que dejó un depósito de ceniza en áreas aledañas. La isópaca de 1 cm de espesor se midió a 35 km de distancia del volcán Nevado del Ruiz (Naranjo et al., 1986).

El 16 de agosto de 2006, el volcán Tungurahua (Ecuador) desarrolló una erupción subpliniana de IEV 3, que generó una columna eruptiva de gases y ceniza de aproximadamente 18 km de altura. Posteriormente, las cenizas fueron dispersadas a varias centenas de kilómetros de distancia del volcán, principalmente en dirección norte y oeste. Luego de la erupción se midieron capas de caídas de ceniza que tenían de 4 cm a 5 cm a 10 km de distancia del cráter (Eychenne et al., 2012).

Además, en la región Tacna, el volcán Yucamane, hace aproximadamente 3085 años AP, produjo una erupción de tipo subpliniana de IEV 3, que generó una columna eruptiva de 11 km a 12 km de altura sobre el nivel del mar, que posteriormente colapsó y generó un depósito de caída piroclástica de 1.6×10^7 m^3. Las tefras se dispersaron a

más de 30 km en dirección sureste. Asimismo, dicha erupción generó un flujo piroclástico de 9×10^6 m³ 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 tefra y flujos piroclásticos (Sigurdsson et al., 2000).

Existen algunos ejemplos de erupciones subplinianas de IEV 4 ocurridas recientemente en el continente sudamericano. Por ejemplo, en Chile, el volcán Calbuco, 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 km³, que generó una columna de pómez, ceniza y gases de 15 km a 17 km de altura (Segura, 2016) y generó flujos piroclásticos de 0.03 km³ que alcanzaron hasta 6 km de distancia al noreste del volcán (Castruccio et al., 2016; Romero et al., 2016).

Los días 19 y 20 de abril de 1993, el volcán Láscar (Chile) presentó una erupción subpliniana (IEV 4) que generó una columna eruptiva de lapilli de pómez, ceniza y gases de 25 km de altura y emitió un volumen total de 10^8 m³ de tefra (Pavez et al., 2006). Los flujos piroclásticos generados durante dicha erupción recorrieron 8.5 km de distancia en dirección noroeste y 4 km al sureste de la cima (Sparks et al., 1997). La pluma eruptiva fue arrastrada cientos de kilómetros de distancia hacia el sureste, llegando incluso hasta la costa atlántica de Argentina y Brasil. Los máximos espesores medidos se encuentran en la ladera este del volcán Láscar, 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 la laguna Aguas Calientes, a 25 km al sureste del cráter, de 1 cm a 3 cm en el Alto del Lari a 45 km del volcán, y 1 cm en Paso de Sico, a 70 km al sureste del volcán Láscar (Viramonte et al., 1995).

También destaca la erupción del volcán Reventador (Ecuador) ocurrida el 3 de noviembre de 2002, la cual fue de tipo subpliniana (IEV 4). Dicha erupción generó una columna eruptiva de 17 km de altura. En esa ocasión, la ceniza llegó hasta Quito a más de 80 km al oeste del volcán, donde se depositó una capa milimétrica de ceniza; esta caída de ceniza obligó al 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 km³ y de los depósitos de flujos piroclásticos fue de 0.04 km³ (Le Pennec et al., 2003; Hall et al., 2004).

Las erupciones subplinianas (IEV 3-4) también pueden generar lahares, especialmente si los flujos piroclásticos se emplazan sobre casquetes glaciares, los cuales originarían la fusión del hielo y de la 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). Lahares generados en dicho volcán causaron la muerte de más de 23 000 habitantes de la ciudad de Armero.

En el volcán Coropuna no se han identificado depósitos asociados a erupciones subplinianas de IEV 3 o 4, por lo que se considera baja la posibilidad de que ocurran eventos de este tipo. Sin embargo, durante una eventual erupción subpliniana, podría emitirse tefra (ceniza, lapilli de pómez, entre otros materiales) que se dispersaría a decenas o centenares de kilómetros del volcán.

Asimismo, estas erupciones podrían generar flujos piroclásticos que, al entrar en contacto con el casquete glaciar, provocarían la fusión parcial del hielo y favorecerían la formación de lahares. Estos descenderían por los valles y quebradas que drenan los flancos del volcán y podrían afectar terrenos de cultivo, bofedales, carreteras, puentes, canales y bocatomas, especialmente en el sector sur. También podrían alcanzar centros poblados como Chupacra, Tipan y Paracolca.

Las erupciones explosivas con IEV > 3 también pueden generar el colapso de flanco del volcán Coropuna, que daría lugar a la formación de avalanchas de escombros. En efecto, el volcán Coropuna presenta flancos de fuerte pendiente (20° a 60°), así como sectores con rocas bastante alteradas e hidrotermalizadas. En tal sentido, en caso de una eventual erupción de alto Índice de Explosividad Volcánica (IEV > 3) es probable que ocurra el colapso de un sector del volcán. La posibilidad de ocurrencia de avalanchas de escombros en el Coropuna es baja a moderada.

5.3.5 Erupción pliniana (IEV 5)

Las erupciones plinianas se encuentran entre las erupciones explosivas de mayor magnitud,

debido a que el magma que las genera es rico en sílice, viscoso y posee alto contenido de gases. En dichas erupciones, las columnas eruptivas pueden alcanzar alturas mayores a 20 km y los materiales emitidos pueden caer y afectar más de 800 km^2 (Cas & Wright, 1987). Durante estas erupciones se generan depósitos voluminosos de caída de lapilli de pómez y ceniza. Asimismo, se pueden generar flujos piroclásticos de pómez y ceniza, y oleadas piroclásticas. También es frecuente la formación de lahares asociados a este tipo de erupciones, que pueden alcanzar distancias de decenas a cientos de kilómetros respecto al volcán. Asimismo, podría ocurrir el colapso o derrumbe de un sector del volcán, lo que generaría depósitos de avalanchas de escombros.

En el sur del Perú, los volcanes Misti, Ubinas, Ticsani, Yucamane, Ampato, Sara Sara, Huaynaputina y Chachani han presentado en el pasado erupciones plinianas (Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Harpel et al., 2011; Mariño y Thouret, 2003; Samaniego et al., 2016; Rivera et al., 2020a; Mariño et al., 2021; Aguilar et al., 2022). La erupción del volcán Misti, ocurrida hace aproximadamente 2000 años AP, fue de tipo pliniano (IEV 5) y generó depósitos de caída de lapilli de pómez visibles en toda el área de Arequipa (Harpel et al., 2011). A más de 12 km del cráter del volcán Misti el depósito tiene entre 10 cm y 20 cm de espesor. Asimismo, la erupción generó flujos piroclásticos de pómez y ceniza que poseen espesores mayores a 3 m a más de 11 km del cráter (Cobeñas et al., 2012). La erupción generó lahares que alcanzaron más de 20 km de distancia del volcán (Thouret et al., 2001).

Según los estudios vulcanológicos realizados, en el volcán Coropuna no se han encontrado depósitos asociados a una erupción pliniana generada por dicho volcán. Sin embargo, el Coropuna podría presentar en el futuro una erupción pliniana de IEV 5, con emisión de tefras (lapilli y ceniza) y flujos piroclásticos. La tefra expelida viajaría cientos de kilómetros de distancia, alrededor del volcán (Figura 24), causando impacto en los poblados aledaños, ganado, terrenos de cultivo, obras de infraestructura (reservorios de agua, canales de agua, etc.), entre otros. Los poblados más afectados por caída de ceniza y lapilli de pómez serían aquellos localizados en las provincias de Castilla, Condesuyos, La Unión (Arequipa), Parinacochas y Páucar del Sara Sara (Ayacucho). Por su parte, los flujos piroclásticos generados podrían descender por las laderas del volcán y afectar poblados aledaños como Tuhuallqui, Unro, Costuro, Maucallacta y otros poblados menores localizados entre 10 km y 14 km de distancia del Coropuna, así como obras de infraestructura (canales de agua, carreteras, etc.) y terrenos de cultivo localizados cerca del volcán.

Una erupción pliniana del Coropuna también puede generar lahares, especialmente si los flujos piroclásticos se emplazan sobre la cobertura de hielo y nieve que se encuentra en la cima y las laderas del volcán, originando la fusión de hielo y nieve. También pueden producirse lahares después de una erupción, asociados a lluvias intensas, que descenderían por las diversas quebradas que surcan los flancos del volcán, sobre todo por aquellos ubicados al suroeste, sur y sureste, causando graves daños a los terrenos de cultivo, carreteras, puentes, etc. Durante una erupción pliniana, el alcance de los lahares sería mayor de 20 km. Esta estimación se basa en la presencia de diversos depósitos de lahares que se encuentran en las quebradas localizadas en el flanco sur del volcán Coropuna (quebradas Llacllajo, Tastane, Llato, y río Capiza, etc.). El alcance de los lahares sería de varias decenas de kilómetros de distancia, por ejemplo, el lahar de la erupción pliniana del volcán Misti de hace 2000 años AP tiene casi 1 m de espesor a 16 km al suroeste de la cima del volcán Misti (Harpel et al., 2011).

Asimismo, durante una erupción pliniana puede ocurrir el colapso o derrumbe de un sector del volcán Coropuna. La simulación numérica realizada en el marco de este estudio muestra que, si el flanco sur, suroeste o sureste colapsara, las avalanchas viajarían a poco más de 12 km de distancia en dirección a los ríos Llacllajo y Llato. Si el colapso se produjera en el flanco oeste, las avalanchas viajarían poco más de 9 km de distancia; en cambio, si ocurriera en el flanco norte, alcanzarían aproximadamente 10 km.

6. Resultados: mapas de peligros del volcán Coropuna

Se elaboraron cinco mapas de peligros que consideran una eventual erupción del volcán Coropuna: 1) mapa de peligros múltiples para la zona proximal; 2) mapa de peligros por caída de ceniza, correspondiente a un escenario de erupción explosiva leve a moderada de tipo vulcaniano (IEV 1-2); 3) mapa de peligros por caída de tefras, correspondiente a un escenario de erupción subpliniana (IEV 3-4); 4) mapa de peligros por caída de tefras, correspondiente a un escenario de erupción pliniana (IEV 5); y 5) mapa de peligros por lahares.

Estos mapas, elaborados a diferentes escalas, se integraron en una sola lámina de formato A1 para facilitar su visualización (véase el mapa de peligros).

6.1 Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal

Las zonas proximales de los volcanes, ubicadas a menos de 18 km de sus cimas, son susceptibles de verse afectadas por diversos fenómenos volcánicos que pueden ocurrir simultáneamente durante una erupción. En el caso del volcán Coropuna, la zonificación de peligros para la zona proximal se realizó considerando múltiples fenómenos volcánicos, como flujos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas de escombros, lahares y eyección de proyectiles balísticos. La integración de las áreas potencialmente afectadas por estos fenómenos permitió elaborar el mapa principal de peligros múltiples (Figura 21). Asimismo, las zonas de peligro alto, moderado y bajo se delimitaron a partir de escenarios eruptivos establecidos en función del Índice de Explosividad Volcánica (IEV).

6.1.1 Zona de alto peligro (rojo)

Comprende un área proximal, ligeramente alargada de noroeste a sureste, que incluye los cinco edificios volcánicos, las laderas del volcán, la zona de altiplanicie y el curso superior de las quebradas y valles de los ríos Tastane-Llato, Llacllajo y Cospanja, que drenan del volcán Coropuna. Esta zona puede ser severamente afectada 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, incluidas las erupciones de bajo Índice de Explosividad Volcánica (IEV 1-2).

Los límites de la zona de alto peligro se ubican aproximadamente a 6 km al oeste, 11 km al norte, 18 km al sureste y 7 km al este de la cima del volcán Coropuna (Figura 21). Los límites de la zona de alto peligro coinciden con el alcance de un gran número de flujos de lava del volcán Coropuna, que se prolongan hasta 8 km de distancia desde su punto de emisión. Por otro lado, según datos de erupciones vulcanianas (IEV 1-2) recientes presentadas por otros volcanes activos, los proyectiles balísticos generados durante dichas erupciones han alcanzado distancias limitadas a las zonas proximales al cráter, típicamente menores a 4 km. Asimismo, un eventual colapso o derrumbe de un flanco del volcán puede generar avalanchas de escombros que afectarían dicha zona. Además, los flujos piroclásticos generados durante erupciones vulcanianas (IEV 1-2), al igual que lahares generados durante erupciones o lluvias intensas pueden afectar la zona de alto peligro.

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

6.1.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Corresponde al área colindante con la zona de alto peligro. La zona de moderado peligro comprende áreas adyacentes al volcán Coropuna, como los flancos del volcán, las nacientes de las quebradas y los valles que descienden desde el volcán, y un sector de la altiplanicie volcánica. Esta zona se extiende entre 18 km y 21 km de distancia al sur de la cima del volcán Coropuna. Asimismo, se extiende de 11 km a 15 km de distancia al norte, y de 6 km a 8 km al oeste de dicho volcán (Figura 21). Esta zona puede ser alcanzada por flujos piroclásticos en caso de que la erupción explosiva sea moderada a alta, así como por flujos de lava, lahares y avalanchas de escombros.

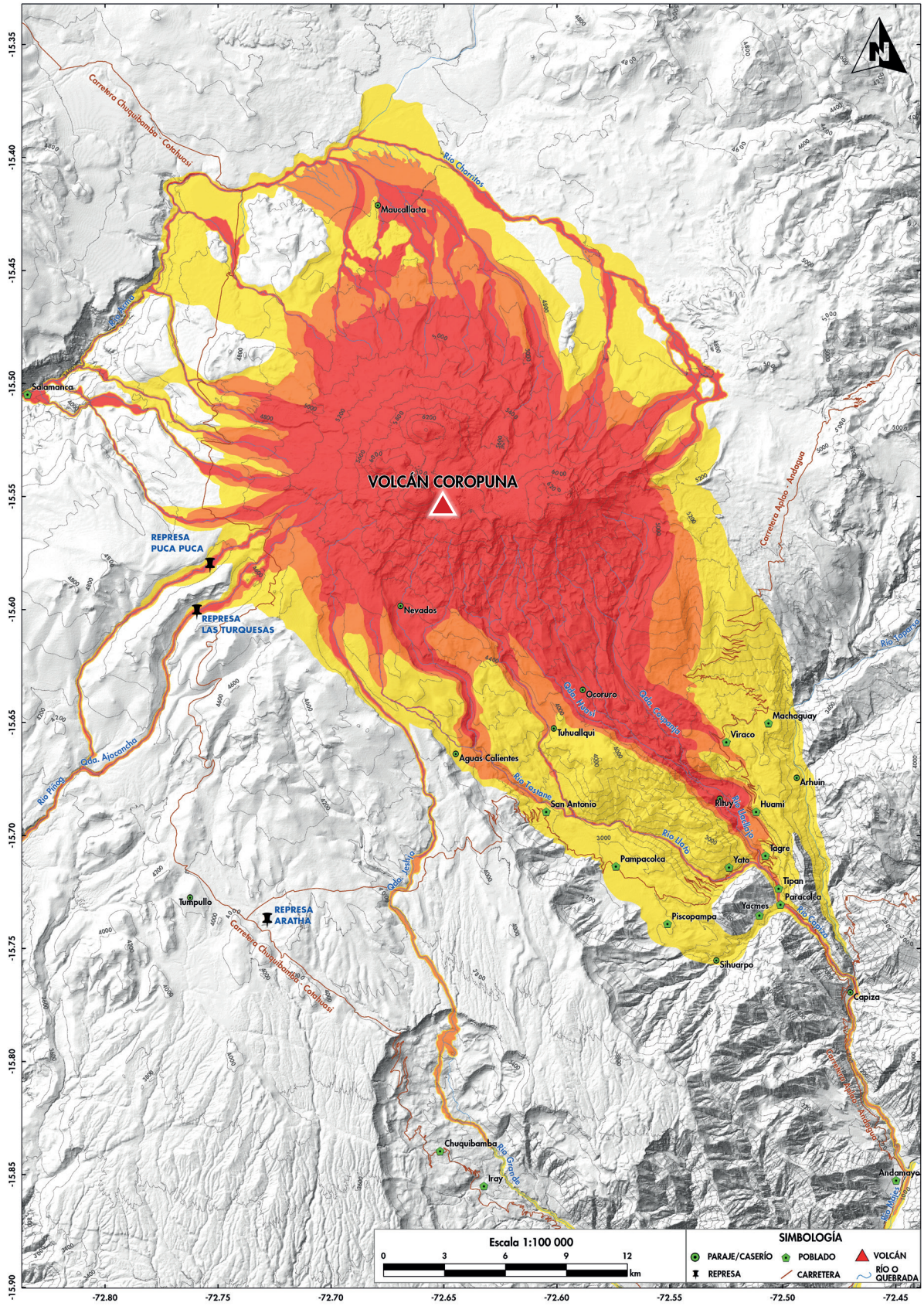

Figura 21. Mapa de peligros múltiples de la zona proximal del volcán Coropuna, en el cual se muestran las zonas de peligro por el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas de escombros, lahares y eyección de proyectiles balísticos.

Los alcances antes descritos coinciden con los alcances de los flujos piroclásticos de la erupción subpliniana de IEV 3 del volcán Tutupaca ocurrida entre los años 1787 y 1802, que 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. Asimismo, las lluvias intensas pueden generar lahares que afecten la zona.

Durante eventuales erupciones efusivas, los flujos de lava emitidos pueden alcanzar dicha zona. 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 subpliniano (IEV 3-4) y lahares podrían afectar la zona.

En resumen, la zona de moderado peligro (naranja) puede ser afectada por flujos piroclásticos, así como por flujos de lava, avalanchas de escombros y lahares.

6.1.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

Esta zona se extiende entre 21 km y 23 km hacia el sector sureste del volcán Coropuna, entre 15 km y 18 km hacia el sector norte y entre 8 km y 14 km al oeste de dicho volcán. La zona de bajo peligro puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante una erupción explosiva de tipo pliniana (IEV 5). Asimismo, puede ser afectada por lahares y avalanchas de escombros de gran volumen.

Los alcances antes descritos coinciden con el alcance de algunos flujos piroclásticos emitidos por el volcán Misti, como el depósito de flujo piroclástico de la erupción pliniana de hace 2000 años AP, que se encuentra a 11 km al suroeste de la cima del volcán Misti, donde mide 1 m de espesor (Harpel et al., 2011). Asimismo, coincide con el alcance del flujo piroclástico "Diente de caballo" del volcán Sara Sara, que se encuentra a 15 km al oeste de dicho volcán, donde mide 5 m de espesor (Rivera et al., 2020a). También coincide con el alcance de algunos depósitos de lahares visibles en las quebradas que drenan de dicho volcán.

En resumen, la zona de bajo peligro (amarillo) puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante una erupción pliniana (IEV 5). Asimismo, puede ser afectada por avalanchas de escombros y lahares voluminosos. La probabilidad de ocurrencia de erupciones plinianas en el Coropuna es baja.

6.2 Mapa de peligros por caídas de cenizas durante una erupción vulcaniana (IEV 1-2)

El mapa de peligros por caída de ceniza para un escenario de erupción vulcaniana del volcán Coropuna se divide en tres zonas: zona de alto peligro en rojo, zona de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo (Figura 22). Los límites de las zonas se basan en los resultados de 1152 simulaciones de dispersión de tefras para un escenario de erupción de tipo vulcaniana y con datos de viento de 2010 a 2025.

6.2.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro está representada por el área de color rojo (Figura 22), que se extiende aproximadamente 18 km hacia el sur, 32 km hacia el norte, 30 km hacia el noroeste y 25 km hacia el sureste. De acuerdo con las simulaciones, esta área puede ser cubierta por depósitos de cenizas que podrían tener algunos centímetros de espesor. Además, dentro de un radio de entre 2 km y 4 km desde el centro de emisión, esta zona podría verse afectada por la caída de fragmentos balísticos de tamaños variables, de centímetros a metros de diámetro.

Esta hipótesis se basa en la erupción vulcaniana del volcán Ubinas de los años 2006-2009 (IEV 2), que dejó una capa de ceniza de 1 cm de espesor a 7 km al sureste del cráter del Ubinas y bloques balísticos de 2 m a 0.5 km de distancia del cráter (Rivera et al., 2010).

6.2.2 Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de moderado peligro está representada en color naranja (Figura 22), que se prolonga de 18 km a 71 km al sur, de 32 km a 74 km al norte, de 30 km a 98 km al noroeste y de 25 km a 106 km al sureste del volcán Coropuna. De acuerdo con las simulaciones, esta área puede

ser cubierta por depósitos de cenizas que podrían alcanzar algunos milímetros de espesor. Esta hipótesis se basa en la simulación numérica, así como 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). Esta estimación también considera la dispersión de cenizas registrada durante el proceso eruptivo reciente del volcán Sabancaya (2016-2026), que dejó depósitos de ceniza de 1 mm de espesor a 20 km al este del cráter del volcán.

6.2.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro está representada en color amarillo (Figura 22) y se extiende aproximadamente 139 km hacia el sur, 143 km hacia el norte, 156 km hacia el noroeste y 209 km hacia el sureste del volcán Coropuna. De acuerdo con las simulaciones, esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza con espesores inferiores a 1 mm. La dispersión de ceniza estaría condicionada por la dirección del viento predominante y, en determinados sectores, su caída podría resultar imperceptible.

Esta hipótesis se basa en la dispersión de ceniza registrada durante la erupción vulcaniana (IEV 2) del volcán Ubinas, ocurrida el 19 de julio de 2019. Durante este evento, se acumuló una capa de ceniza de 1 mm de espesor a 20 km al sureste del cráter. Asimismo, se registró caída de ceniza en la mina Quellaveco, ubicada a 90 km al sureste del volcán Ubinas (Aguilar et al., 2019).

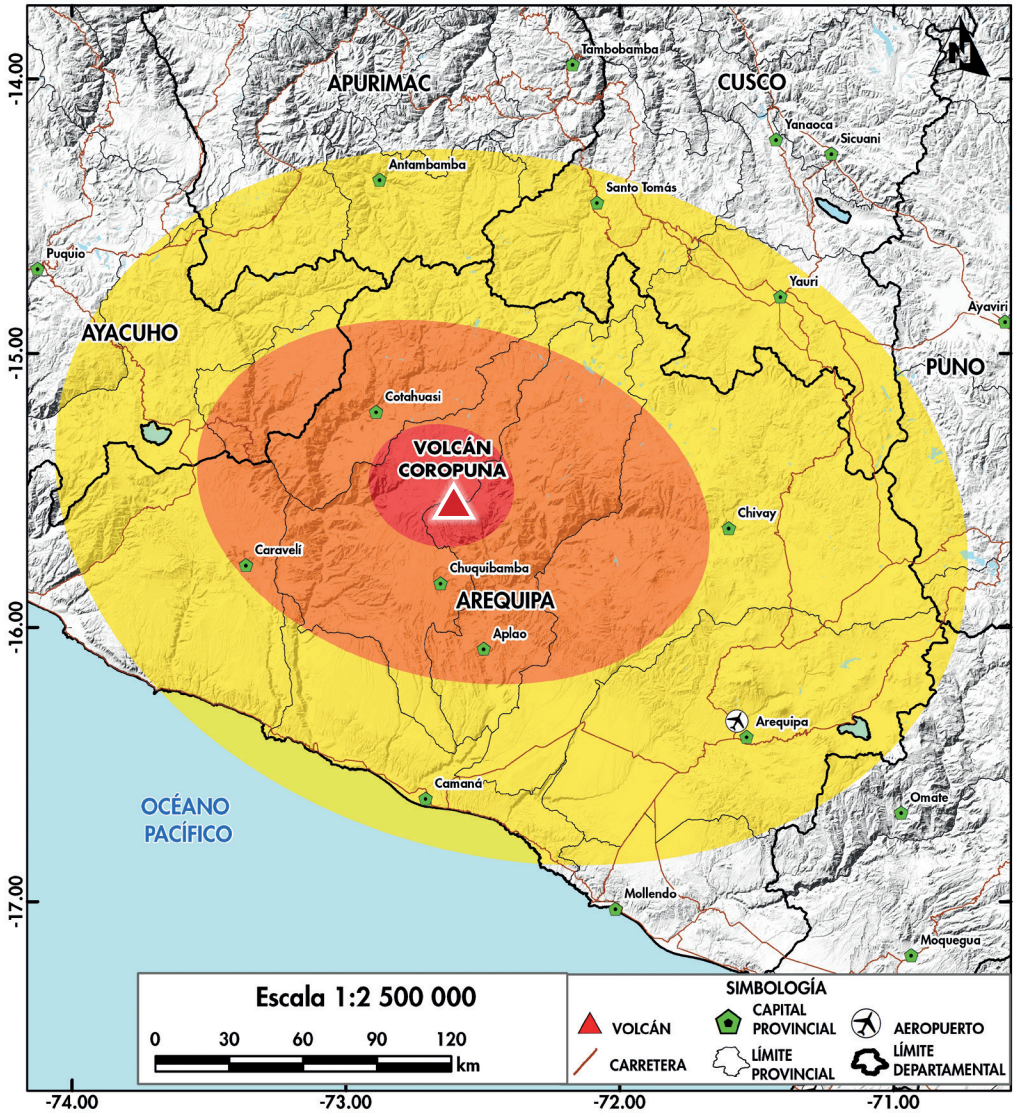

Figura 22. Mapa de peligro por caída de ceniza del volcán Coropuna para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano con IEV 1-2 (simulación USGS, 2026).

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

El mapa de peligros por caídas piroclásticas correspondiente a un escenario de erupción subpliniana del volcán Coropuna se divide en tres zonas: de peligro alto (rojo), de peligro moderado (naranja) y de peligro bajo (amarillo) (Figura 23).

En las inmediaciones del volcán Coropuna no se han identificado depósitos asociados a erupciones subplinianas. Por ello, se considera que la posibilidad de que ocurran erupciones de este tipo es muy baja. No obstante, por analogía con otros volcanes de características similares, no puede descartarse que se produzcan en el Coropuna.

6.3.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de peligro alto está representada en color rojo (Figura 23) y se extiende aproximadamente 63 km hacia el sur, 76 km hacia el norte, 109 km hacia el noroeste y 108 km hacia el sureste del volcán Coropuna. De acuerdo con las simulaciones numéricas realizadas, durante erupciones explosivas subplinianas (IEV 3), esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza y lapilli de pómez, con espesores que variarían desde varios centímetros hasta algunas decenas de centímetros. La mayor acumulación de tefras podría registrarse en esta zona proximal, dentro de un radio de aproximadamente 62 km del volcán.

Este escenario toma como referencia la erupción del volcán Tungurahua (Ecuador), ocurrida en agosto de 2006 (IEV 3), durante la cual se registraron depósitos de caída de ceniza con espesores de entre 4 cm y 5 cm a una distancia de 10 km del cráter (Eychenne et al., 2012).

Durante erupciones subplinianas (IEV 4), esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de lapilli y bloques de pómez, que formarían capas cuyos espesores variarían desde varios decímetros hasta algunos metros (Figura 23). Esta hipótesis toma como referencia los depósitos de caída piroclástica asociados a erupciones explosivas de IEV 4 de los volcanes Misti y Ticsani. Durante la erupción del volcán Ticsani, datada en aproximadamente 11 000 años AP, se formaron depósitos de caída de ceniza de alrededor de 3 m de espesor a una distancia de 10 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003).

6.3.2 Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de peligro moderado está representada en color naranja (Figura 23) y es contigua a la zona de peligro alto. Presenta una configuración elíptica alrededor del volcán Coropuna y se extiende de 63 km a 269 km hacia el sur, de 76 km a 222 km hacia el norte, de 109 km a 262 km hacia el noroeste y de 108 km a 386 km hacia el sureste. De acuerdo con las simulaciones, esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza con espesores que variarían desde varios milímetros hasta algunos centímetros.

Estos espesores son comparables con los registrados durante otras erupciones volcánicas. Por ejemplo, durante la erupción subpliniana de noviembre de 1985 del volcán Nevado del Ruiz (Colombia), se formó una capa de ceniza de aproximadamente 2 cm de espesor a una distancia de 30 km del volcán. Asimismo, durante la erupción de agosto de 2006 del volcán Tungurahua (IEV 3), se registraron espesores de ceniza de 0.7 cm a 0.8 cm a una distancia de 20 km del volcán (Eychenne et al., 2012).

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 23). Esta 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 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).

6.3.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro está representada en color amarillo (Figura 23) y es contigua a la zona de peligro moderado. Presenta una configuración elíptica alrededor del volcán Coropuna y se extiende más de 360 km hacia el sur, 364 km hacia el norte, 435 km hacia el noroeste y más de 409 km hacia el sureste, con influencia en territorio chileno. De acuerdo con las simulaciones, durante una erupción subpliniana de IEV 3, esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza con espesores de hasta 1 mm. La distribución de estos depósitos estaría condicionada por la dirección de los vientos. Esta estimación toma como referencia la erupción del volcán Nevado del Ruiz (Colombia), ocurrida en noviembre de 1985, durante la cual

se registraron depósitos de caída de ceniza con espesores de 2 mm a 3 mm a una distancia de 50 km del volcán. Asimismo, tras la erupción del volcán Tungurahua (Ecuador), ocurrida en agosto de 2006 (IEV 3), se reportaron depósitos de ceniza de 6 mm de espesor a una distancia de 10 km del volcán (Eychenne et al., 2012).

Durante una erupción subpliniana de IEV 4, esta zona podría verse afectada por caídas de ceniza que formarían depósitos de pocos milímetros de espesor. Esta estimación se basa en antecedentes eruptivos, como la erupción explosiva del volcán Láscar (Chile), ocurrida en abril de 1993 (IEV 4), durante la cual la pluma eruptiva se dispersó cientos de kilómetros hacia el sureste y alcanzó incluso la costa atlántica de Argentina y Brasil. Los mayores espesores de los depósitos se registraron en la ladera este del volcán, a 5 km del cráter, donde alcanzaron hasta 80 cm y contenían fragmentos de pómez de hasta 0.4 m de diámetro. Los espesores disminuyeron progresivamente con la distancia al cráter: de 3 cm a 5 cm a una distancia de 25 km hacia el sureste, de 1 cm a 3 cm a 45 km y 1 cm a 70 km hacia el sureste del volcán (Viramonte et al., 1995). Asimismo, durante la erupción subpliniana del volcán Calbuco (Chile), ocurrida en 2015 (IEV 4), se registró una capa de ceniza de menos de 1 mm de espesor en la localidad de Neuquén (Argentina), ubicada aproximadamente a 510 km al noreste del volcán Calbuco (Romero et al., 2016).

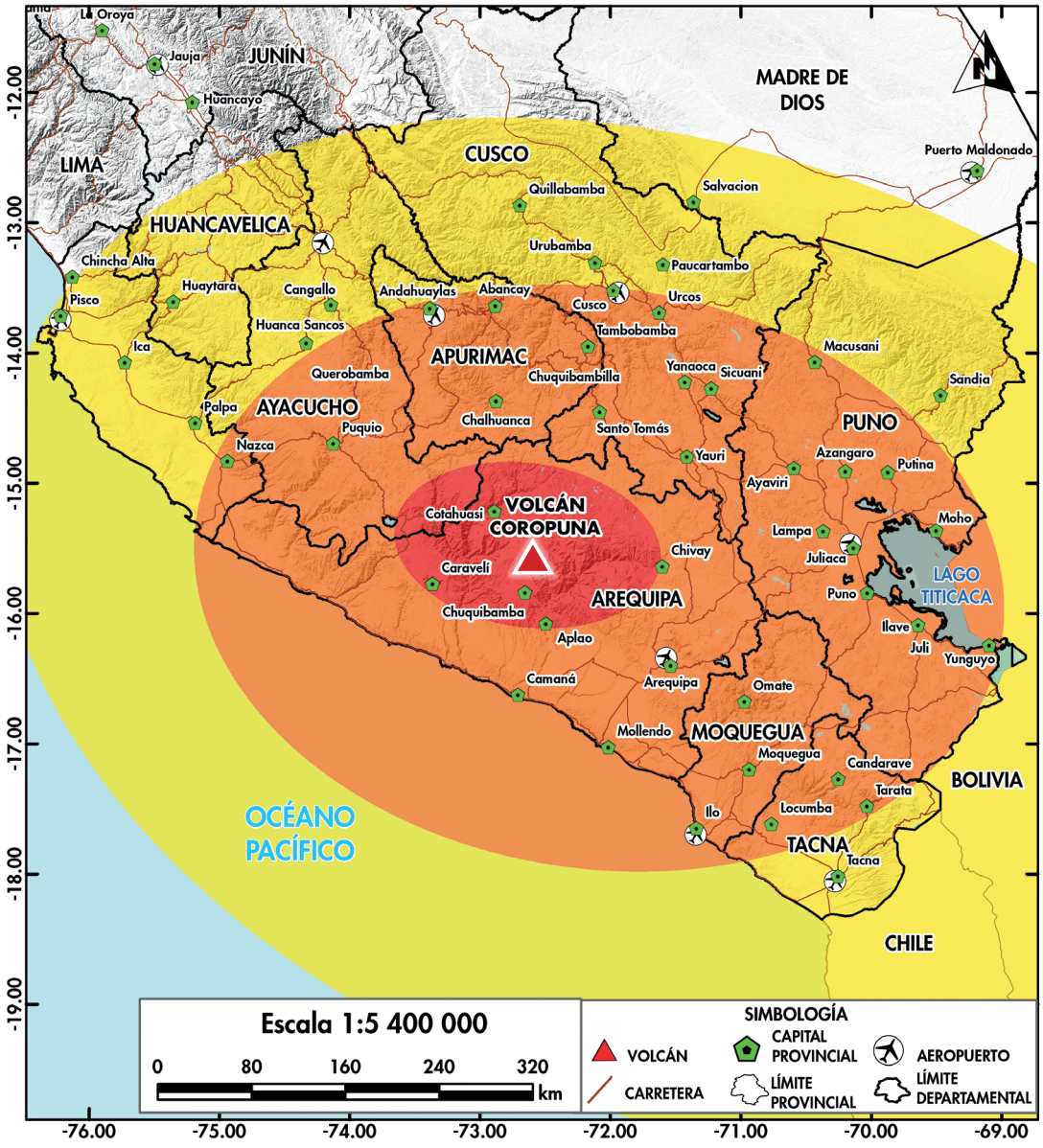

Figura 23. Mapa de peligro por caída de tefras del volcán Coropuna para un escenario eruptivo de tipo subpliniano con IEV 3-4 (simulación USGS, 2026).

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

Aunque en el pasado reciente el volcán Coropuna no ha presentado erupciones plinianas, es posible que en el futuro pueda generar una erupción de ese tipo, con posibles daños importantes en el ambiente, los poblados y las obras de infraestructura.

El mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de erupción pliniana del volcán Coropuna distingue tres zonas: peligro alto (rojo), moderado (naranja) y bajo (amarillo) (Figura 24).

6.4.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de peligro alto está representada en color rojo (Figura 24) y corresponde al área próxima al volcán Coropuna. Presenta una configuración elíptica y se extiende aproximadamente 126 km hacia el sur, 158 km hacia el norte, 198 km hacia el noroeste y 216 km hacia el sureste del volcán. De acuerdo con las simulaciones numéricas, durante una erupción pliniana (IEV 5), esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza, pómez o escoria, que formarían capas con espesores desde algunos decímetros hasta varios metros. Asimismo, el sector más próximo al volcán, dentro de un radio que podría alcanzar de 10 km a 15 km, concentraría los mayores impactos.

Este escenario puede compararse con los depósitos de caída de lapilli de pómez generados durante la última erupción pliniana (IEV 5) del volcán Misti, ocurrida hace aproximadamente 2000 años AP. Durante este evento, se depositó una capa de lapilli de pómez de 70 cm de espesor a una distancia de 7 km al suroeste del volcán (Harpel et al., 2011).

6.4.2 Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de peligro moderado está representada en color naranja (Figura 24) y es contigua a la zona de peligro alto. Presenta una configuración elíptica alrededor del volcán Coropuna y se extiende de 126 km a 440 km hacia el sur, de 158 km a 322 km hacia el norte, de 198 km a 443 km hacia el noroeste y de 216 km a 582 km hacia el sureste, con influencia en los territorios de Bolivia y Chile. De acuerdo con las simulaciones, esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza que alcanzarían espesores de algunos centímetros.

Como antecedente de este tipo de depósitos, se considera la erupción pliniana del volcán Misti, ocurrida hace aproximadamente 2000 años, durante la cual se formaron depósitos de caída de lapilli de pómez de 20 cm de espesor a una distancia de 13.5 km al suroeste del cráter (Cobeñas et al., 2012).

6.4.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de peligro bajo está representada en color amarillo (Figura 24) y se extiende a más de 440 km hacia el sur, aproximadamente 603 km hacia el norte, 761 km hacia el noroeste y más de 582 km hacia el sureste del volcán Coropuna, con influencia en territorios de Chile y Bolivia. De acuerdo con las simulaciones, esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza que alcanzarían espesores de algunos milímetros.

Dicha estimación es similar a la zona afectada durante la erupción pliniana de IEV 5 del monte St. Helens (Washington, EE. UU.), ocurrida en mayo de 1980, que generó una columna de lapilli de pómez de aproximadamente 19 km de altura. Posteriormente, los materiales emitidos, principalmente lapilli de pómez y ceniza, fueron dispersados hacia el este del volcán, a través de los Estados Unidos, y causaron una oscuridad total en Spokane, Washington, ubicado a 400 km del volcán. Se reportó un depósito de ceniza de 1.3 cm de espesor a 480 km de distancia del volcán (Harris, 1988).

6.5 Mapa de peligros por lahares

El Coropuna es un volcán con un importante casquete glaciar. Ante una eventual erupción con emisión de productos volcánicos calientes, podrían generarse lahares voluminosos que descenderían principalmente por los cursos de agua ubicados en el flanco sur del volcán, como las quebradas Cospanja, Huasi y Jeshja, así como los ríos Llacllajo, Tastane, Llato y Capiza. Asimismo, podrían desplazarse por la quebrada Ajocancha y el río Blanco, ubicados en el flanco suroeste.

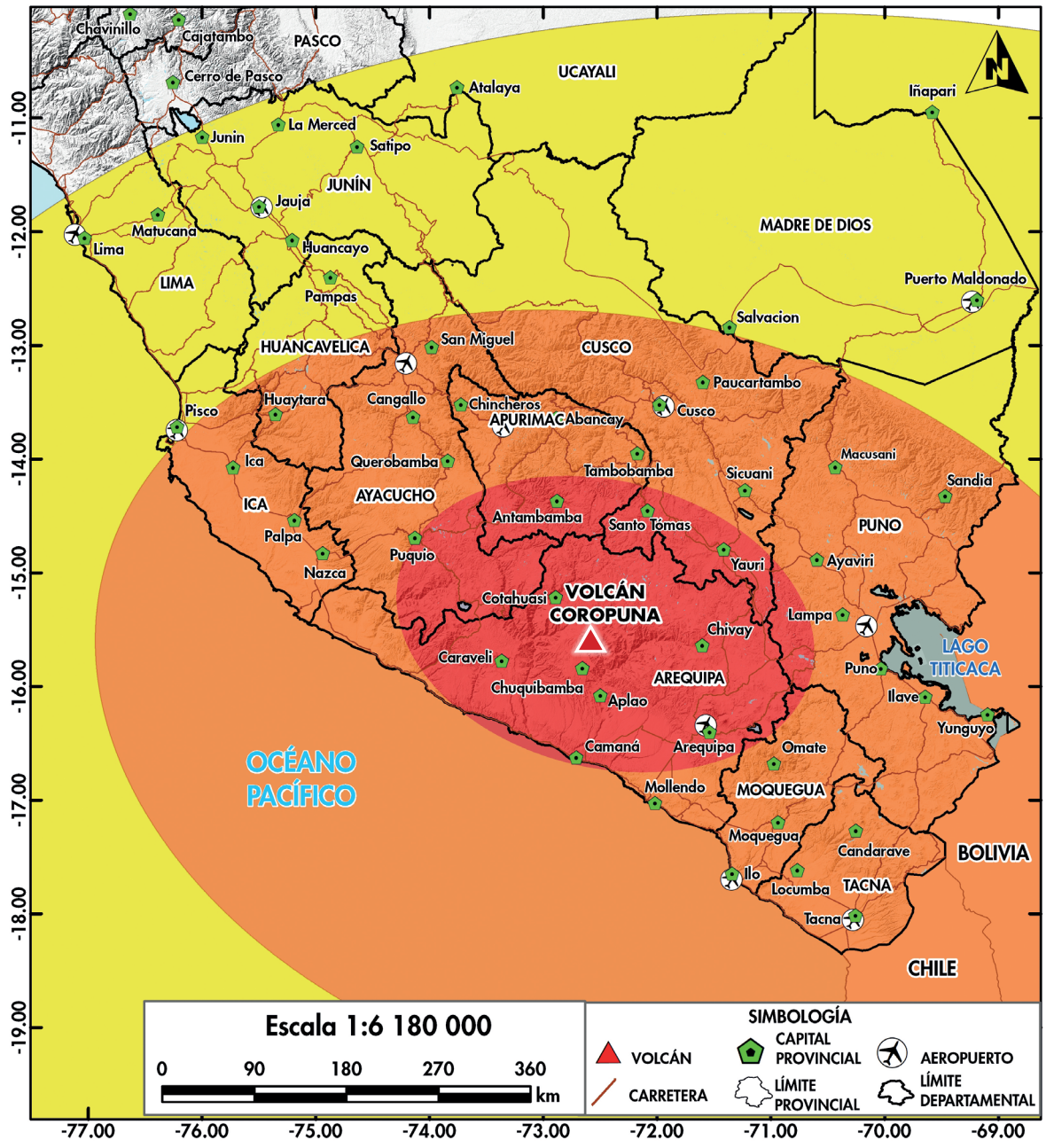

Figura 24. Mapa de peligro por caída de tefras del volcán Coropuna para un escenario eruptivo de tipo pliniano de IEV 5 (simulación USGS, 2026).

En el sur del Perú se dispone de pocas estimaciones de los volúmenes de lahares generados por los volcanes activos. Los cálculos de volúmenes para lahares del volcán Misti (Delaite et al., 2005; Thouret et al., 2022) muestran que los volúmenes máximos de lahares de entre 1.5 millones de m^3 y 4 millones de m^3 estarían asociados a erupciones explosivas moderadas (IEV 1-2), mientras que lahares con volúmenes máximos de entre 9 millones de m^3 y 10 millones de m^3 son menos frecuentes y presentan intervalos de recurrencia estimados de entre 1000 y 5000 años. Estos últimos estarían asociados a erupciones explosivas importantes (IEV ≥ 3; Delaite et al., 2005; Vargas Franco et al., 2010). Posteriormente, para construir escenarios de peligro por lahares asociados a lluvias intensas en el volcán Misti (Arequipa), Thouret et al. (2022) consideraron tres volúmenes de lahar: 150 000 m^3, 350 000 m^3 y 500 000 m^3.

Con base en estos antecedentes, en la presencia del casquete glaciar y en las condiciones meteorológicas del Coropuna, los volúmenes de lahares escogidos para la simulación de tres escenarios de peligro fueron de 1 000 000 m^3 a

2 000 000 m³, para lahares poco voluminosos, que se estiman más frecuentes, y volúmenes de 6 000 000 m³ y 12 000 000 m³, para lahares más voluminosos, pero menos frecuentes.

En el mapa de peligros por lahares (Figura 25) se distinguen tres zonas. La zona de peligro alto (rojo) presenta mayor posibilidad de verse afectada por lahares poco voluminosos (entre 1 000 000 m³ y 2 000 000 m³), asociados a erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1-2) o a lluvias intensas con fusión de hielo o nieve.

La zona de peligro moderado (naranja) podría verse afectada por lahares de 6 000 000 m³. Por su parte, la zona de peligro bajo (amarillo) presenta menor posibilidad de verse afectada por lahares muy voluminosos (12 000 000 m³).

Los lahares de 6 000 000 m³ y 12 000 000 m³ podrían estar asociados a erupciones explosivas de gran magnitud (IEV ≥ 3), que involucrarían la fusión parcial del casquete glaciar. No obstante, la posibilidad de ocurrencia de estas erupciones en el Coropuna se considera baja o muy baja.

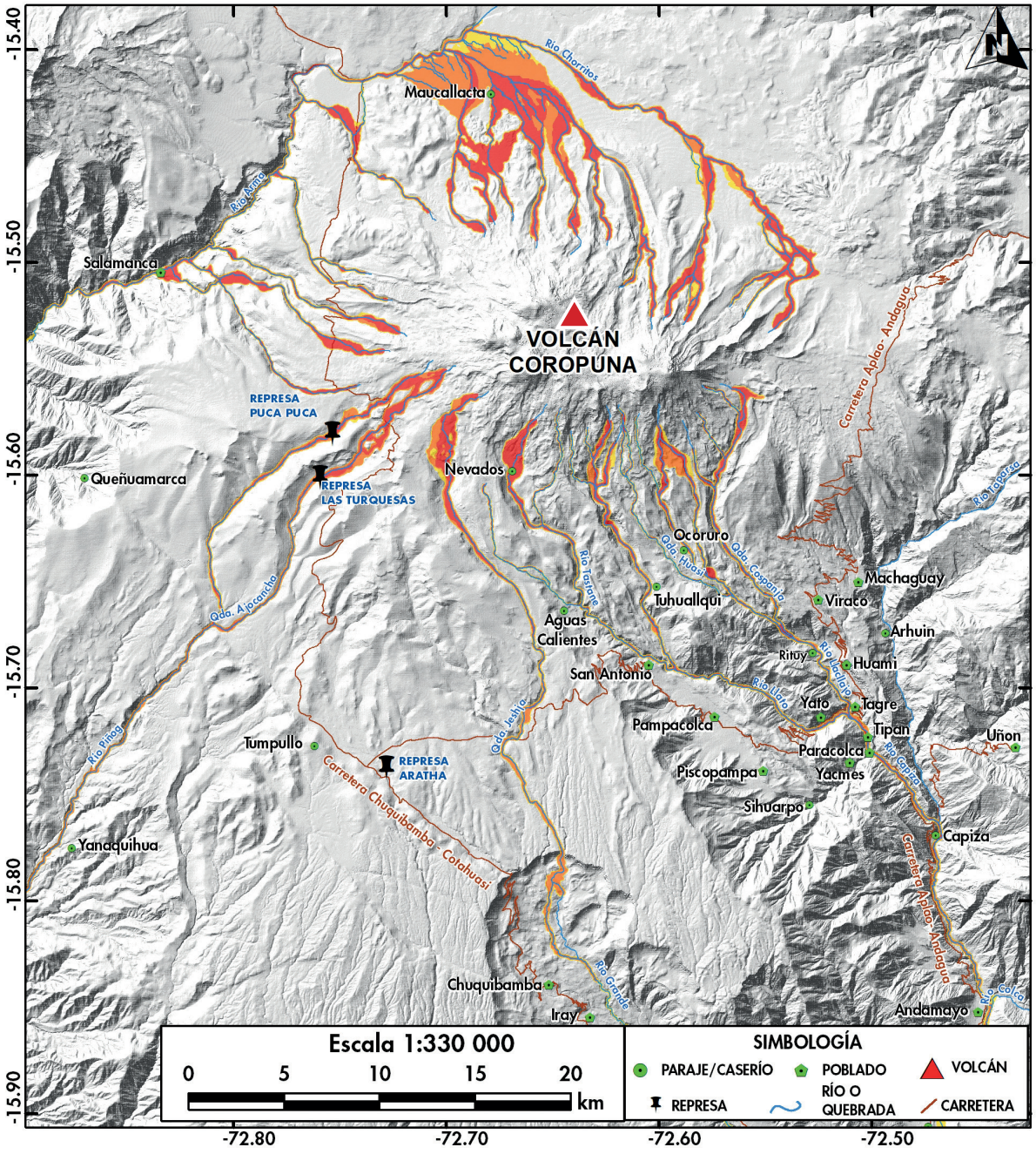

Figura 25. Mapa de peligro de lahares del volcán Coropuna en el que se resaltan tres niveles de peligro: alto (rojo), moderado (naranja) y bajo (amarillo).

Conclusiones

- El Coropuna es un complejo volcánico activo que presenta un casquete glaciar en su cima. Se ubica en el límite de las provincias de Castilla y Condesuyos, en la región Arequipa. Según estudios previos, su actividad eruptiva efusiva más reciente ocurrió entre 12 500 y 1400 años antes del presente y se caracterizó por la emisión de flujos de lava, cuyos depósitos son visibles al pie de sus flancos oeste, sureste y noreste.

- Para una eventual reactivación del volcán Coropuna, se han considerado cinco escenarios eruptivos: 1) erupción efusiva; 2) erupción vulcaniana (IEV 1-2); 3) erupción con crecimiento y colapso de domo; 4) erupción explosiva subpliniana (IEV 3-4); y 5) erupción explosiva pliniana (IEV 5). Estos escenarios contemplan fenómenos como flujos de lava, caídas de ceniza y otros materiales piroclásticos, flujos piroclásticos, proyectiles balísticos, lahares y posibles avalanchas de escombros.

- Sobre la base de los estudios realizados, se elaboraron cinco mapas de peligros volcánicos, integrados en un solo póster. A continuación, se describen sus principales características:

  1) Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal. Considera la posible ocurrencia de flujos de lava, flujos piroclásticos, caída de proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares. La zona de peligro alto (rojo) presenta una configuración ligeramente alargada de noroeste a sureste y se extiende hasta 18 km hacia el sureste y 11 km hacia el norte del volcán Coropuna. La zona de peligro moderado (naranja) es contigua a la zona de peligro alto y se extiende de 18 km a 21 km hacia el sur y de 11 km a 15 km hacia el norte del volcán. Por su parte, la zona de peligro bajo (amarillo) alcanza hasta 23 km hacia el sureste y 18 km hacia el norte del volcán Coropuna.

  2) Mapa de peligros por caída de ceniza para un escenario de erupción vulcaniana (IEV 1-2). La zona de peligro alto (rojo) se extiende aproximadamente hasta 18 km hacia el sur, 32 km hacia el norte, 30 km hacia el noroeste y 25 km hacia el sureste del volcán Coropuna. Esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza de algunos centímetros de espesor. La zona de peligro moderado (naranja) se extiende de 18 km a 71 km hacia el sur, de 32 km a 74 km hacia el norte, de 30 km a 98 km hacia el noroeste y de 25 km a 106 km hacia el sureste del volcán. En esta zona podrían acumularse depósitos de caída de ceniza de pocos milímetros de espesor. La zona de peligro bajo (amarillo) presenta una configuración elíptica y se extiende hasta 139 km hacia el sur, 143 km hacia el norte, 156 km hacia el noroeste y más de 209 km hacia el sureste del volcán Coropuna. Esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza con espesores inferiores a 1 mm.

  3) Mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción subpliniana (IEV 3-4). Este mapa distingue tres zonas de peligro. La zona de peligro alto (rojo) se extiende hasta 63 km hacia el sur, 76 km hacia el norte, 109 km hacia el noroeste y 108 km hacia el sureste del volcán Coropuna. La zona de peligro moderado (naranja) alcanza hasta 269 km hacia el sur, 222 km hacia el norte, 262 km hacia el noroeste y 386 km hacia el sureste. Por su parte, la zona de peligro bajo (amarillo) se extiende a más de 360 km hacia el sur, 364 km hacia el norte, 435 km hacia el noroeste y más de 409 km hacia el sureste del volcán. Esta última zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza con espesores de hasta algunos milímetros.

  4) Mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción pliniana (IEV 5). La zona de peligro alto (rojo) comprende el área próxima al volcán y se extiende hasta 126 km hacia el sur, 158 km hacia el norte, 198 km hacia el noroeste y 216 km hacia el sureste del volcán Coropuna. Esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza y lapilli de pómez, con espesores que variarían desde varios centímetros hasta algunos metros. La zona de peligro moderado (naranja) se extiende hasta 440 km hacia el sur, 322 km hacia el norte, 443 km hacia el noroeste y 582 km hacia el sureste del volcán, con influencia en los territorios de Chile y Bolivia. Esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza con espesores que variarían desde algunos milímetros hasta varios decímetros. La zona de peligro bajo (amarillo) presenta una configuración elíptica y se extiende a más de 440 km hacia el sur, 603 km hacia el norte, 761 km hacia el

noroeste y más de 582 km hacia el sureste del volcán Coropuna, con influencia en los territorios de Chile y Bolivia. Esta zona podría verse afectada por depósitos de caída de ceniza y lapilli de pómez, con espesores de algunos milímetros.

5) Mapa de peligros por lahares. La zona de peligro alto (rojo) podría verse afectada por el descenso y desborde de lahares con volúmenes comprendidos entre 1 000 000 m^3 y 2 000 000 m^3. La zona de peligro moderado (naranja) podría verse afectada por lahares con volúmenes del orden de 6 000 000 m^3, mientras que la zona de peligro bajo (amarillo) podría verse afectada por lahares con volúmenes de 12 000 000 m^3. Los lahares podrían descender principalmente por los cursos de agua ubicados en el flanco sur del volcán Coropuna, como las quebradas Cospanja, Huasi y Jeshja, así como los ríos Llacllajo, Tastane, Llato y Capiza. Asimismo, podrían desplazarse por la quebrada Ajocancha y el río Blanco, ubicados en el flanco suroeste del volcán.

- Los mapas de peligros volcánicos del Coropuna elaborados en este estudio constituyen herramientas técnicas para las instituciones integrantes del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), las autoridades regionales y locales, las municipalidades provinciales y distritales, así como para la población. Estos mapas proporcionan información que contribuirá a la formulación de proyectos de desarrollo, la elaboración de planes de prevención, la gestión reactiva del riesgo de desastres y el manejo de una eventual crisis volcánica.

Referencias

- Aguilar, R., Ortega, M., Manrique, N., Apaza, F., Rivera, M., & Harpel, C. J. (2019). *Characteristics of the beginning of the 2019 eruptive crisis at Ubinas volcano (Peru)* [Presentación de póster]. AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, California, Estados Unidos. https://hdl.handle.net/20.500.12544/2709

- Aguilar, R., Thouret, J.-C., Samaniego, P., Wörner, G., Jicha, B., Paquette, J.-L., Suaña, E., & Finizola, A. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: The Chachani Volcano Cluster, southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 426*, 107539. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107539

- Aguilera, E., Almeida, E., Balseca, W., Barberi, F., Coltelli, M., Innocenti, F., & Pasquarè, G. (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 and resilience*. MIAVITA.

- Blong, R. J. (1984). *Volcanic hazards: A sourcebook on the effects of eruptions*. Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2009-0-21853-8

- Blong, R. J. (2000). Volcanic hazard and risk management. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer y J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 1215–1228). Academic Press.

- Bromley, G. R. M., Thouret, J.-C., Schimmelpfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker, K., Vivanco López, S. P., ASTER Team, Aumaître, G., Bourlès, D., & Keddadouche, K. (2019). In situ cosmogenic ^{3}He and ^{36}Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. *Bulletin of Volcanology, 81*, 64. https://doi.org/10.1007/s00445-019-1325-6

- Bustillos, J., & Samaniego, P. (2011). *Volcán Tungurahua: Tamaño de las erupciones explosivas* [Presentación en congreso]. VII Jornadas de Ciencias de la Tierra, Departamento de Geología, Escuela Politécnica Nacional.

- Cárdenas Quiroga, E. A., Porras Rodríguez, P., & Morales Martín, L. Y. (2013). Empleo del programa VolcFlow para simular flujos piroclásticos del volcán Cerro Machín, Tolima, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 23*(2), 157–172. https://doi.org/10.18359/rcin.228

- Carey, S. (1996). Modeling of tephra fallout from atmospheric eruptions. En R. Scarpa y R. I. Tilling (Eds.), *Monitoring and mitigation of volcano hazards* (pp. 429–463). Springer.

- Cas, R. A. F., & Wright, J. V. (1987). *Volcanic successions: Modern and ancient*. Allen & Unwin.

- Castruccio, A., Clavero, J., Segura, A., Samaniego, P., Roche, O., Le Pennec, J.-L., & Droguett, B. (2016). Eruptive parameters and dynamics of the April 2015 sub-Plinian eruptions of Calbuco volcano (southern Chile). *Bulletin of Volcanology, 78*, 62. https://doi.org/10.1007/s00445-016-1058-8

- Cobeñas, G., Thouret, J.-C., Bonadonna, C., & Boivin, P. (2012). The c. 2030 yr BP Plinian eruption of El Misti volcano, Peru: Eruption dynamics and hazard implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 241–242*, 105–120. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.06.006

- Concha, R., & Vásquez, E. (2017). *Peligros geológicos asociados a la dinámica del río Llacllajo* (región Arequipa, provincia Castilla, distrito Tipan) (Informe técnico n.° A6742). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

- Decker, R., & Decker, B. (1989). *Volcanoes* (ed. rev.). W. H. Freeman and Company.

- Delaite, G., Thouret, J.-C., Sheridan, M. F., Labazuy, P., Stinton, A., Souriot, T., & van Westen, C. (2005). Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband 140*, 209–231.

- Del Carpio, J., Rivera, M., Torres, J., Tavera, H., & Puma, N. (2022). *Evaluación del peligro volcánico en Perú: Una herramienta para la gestión del riesgo de desastres* (Informe técnico n.° 029-2022/IGP Ciencias de la Tierra Sólida). Instituto Geofísico del Perú.

- De Silva, S. L., & Francis, P. W. (1991). *Volcanoes of the Central Andes*. Springer-Verlag.

- Eychenne, J., Le Pennec, J.-L., Troncoso, L., Gouhier, M., & Nédélec, 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*, 187–205. https://doi.org/10.1007/s00445-011-0517-5

- Francis, P. (1993). *Volcanoes: A planetary perspective*. Oxford University Press.

- Glicken, H. (1996). *Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens volcano, Washington* (Open-File Report 96-677). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/ofr96677

- 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., 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. L., Ramón, P., Mothes, P., Le Pennec, J.-L., García, A., Samaniego, P., & Yepes, H. (2004). Volcanic eruptions with little warning: The case of Volcán Reventador's surprise November 3, 2002 eruption, Ecuador. *Revista Geológica de Chile, 31*(2), 349–358.

- Hall, M. L., Steele, A. L., Mothes, P. A., & Ruiz, M. C. (2013). Pyroclastic density currents (PDC) of the 16–17 August 2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador: Geophysical registry and characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 265*, 78–93. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.08.011

- Harpel, C. J., de Silva, S., & Salas, G. (2011). The 2 ka eruption of Misti volcano, southern Peru—The most recent Plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. *Geological Society of America Special Papers, 484*, 1–72.

- Harris, S. L. (1988). *Fire mountains of the West: The Cascade and Mono Lake volcanoes*. Mountain Press Publishing Company.

- Hoblitt, R. P., Walder, J. S., Driedger, C. L., Scott, K. M., Pringle, P. T., & Vallance, J. W. (1995). *Volcano hazards from Mount Rainier, Washington* (Open-File Report 95-273). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/ofr95273

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2025). *Censos Nacionales 2025: Resultados*. https://censos2025.inei.gob.pe/

- Iverson, R. M., Schilling, S. P., & Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin, 110*(8), 972–984. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110%3C0972:ODOLIH%3E2.3.CO;2

- Kelfoun, K., & Druitt, T. H. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 110*(B12), B12202. https://doi.org/10.1029/2005JB003758

- Kelfoun, K., & Vallejo Vargas, S. (2016). VolcFlow capabilities and potential development for the simulation of lava flows. En A. J. L. Harris, T. De Groeve, F. Garel y S. A. Carn (Eds.), *Detecting, modelling and responding to effusive eruptions* (pp. 337–343). Geological Society of London. https://doi.org/10.1144/SP426.8

- Le Pennec, J.-L., Hidalgo, S., Samaniego, P., Ramón, P., Yepes, H., & Eissen, J.-P. (2003). Magnitud de la erupción del 3 de noviembre del 2002 del volcán El Reventador. *En Memorias de las Quintas Jornadas en Ciencias de la Tierra* (pp. 97–99). Escuela Politécnica Nacional.

- Llanto, J., Pellitero, R., Úbeda, J., Atkinson-Gordo, A. D. J., & Pasapera, J. (2025). 69-year geodetic mass balance of Nevado Coropuna (Peru), the world's largest tropical icefield, from 1955 to 2024. *Remote Sensing, 17*(19), 3344. https://doi.org/10.3390/rs17193344

- Major, J. J., & Newhall, C. G. (1989). Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods. *Bulletin of Volcanology, 52*(1), 1–27. https://doi.org/10.1007/BF00641384

- Malin, M. C., & Sheridan, M. F. (1982). Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science, 217*(4560), 637–640.

- Malone, A. G. O., Broglie, E. T., & Wrightsman, M. (2022). The evolution of the two largest tropical ice masses since the 1980s. *Geosciences, 12*(10), 365. https://doi.org/10.3390/geosciences12100365

- Margirier, A., Audin, L., Carcaillet, J., Schwartz, S., & Benavente, C. (2015). Tectonic and climatic controls on the Chuquibamba landslide (western Andes, southern Peru). *Earth Surface Dynamics, 3*(2), 281–289. https://doi.org/10.5194/esurf-3-281-2015

- Mariño, J., Cueva, K., Thouret, J.-C., Arias, C., Finizola, A., Antoine, R., Delcher, E., Fauchard, C., Donnadieu, F., Labazuy, P., Japura, S., Gusset, R., Sánchez, P., Ramos, D., Macedo, L., Lazarte, I., Thouret, L., Del Carpio, J., Jaime, L., & Saintenoy, T. (2021). Multidisciplinary study of the impacts of the 1600 CE Huaynaputina eruption and a project for geosites and geotouristic attractions. *Geoheritage, 13*(3), 64. https://doi.org/10.1007/s12371-021-00577-5

- 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, 95*, 7–31. http://hdl.handle.net/20.500.12816/1261

- Mariño, J., Thouret, J.-C., Cabrera, M., Aguilar, R., Valdivia, D., Manrique, N., Edwards, B., & Kochtitzky, W. (2018). *Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico nevado Coropuna* [Presentación en congreso]. XIX Congreso Peruano de Geología.

- Masías, P. (2018). *Características químicas e isotópicas del sistema hidrotermal del complejo volcánico nevado Coropuna* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].

- Mastin, L. G., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., Dean, K., Durant, A., Ewert, J. W., Neri, A., Rose, W. I., Schneider, D. J., Siebert, L., Stunder, B., Swanson, G., Tupper, A., Volentik, A., & Waythomas, C. F. (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*(1–2), 10–21. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008

- Mendoza, W., & Cano, A. (2011). Diversidad del género *Polylepis* (*Rosaceae, Sanguisorbeae*) en los Andes peruanos. *Revista Peruana de Biología, 18*(2), 197–200. https://doi.org/10.15381/rpb.v18i2.228

- Ministerio del Ambiente. (2015). *Mapa nacional de cobertura vegetal: Memoria descriptiva*. Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural.

- Nakada, S. (2000). Hazards from pyroclastic flows and surges. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer y J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 945–955). Academic Press.

- Naranjo, J. L., Sigurdsson, H., Carey, S. N., & Fritz, W. (1986). Eruption of the Nevado del Ruiz volcano, Colombia, on 13 November 1985: Tephra fall and lahars. *Science, 233*(4767), 961–963. https://doi.org/10.1126/science.233.4767.961

- Núñez, S., & Valenzuela, G. (2001). *Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán-Nevado Coropuna: Estudios de riesgos volcánicos en el sur del Perú* (Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, n.° 25). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

- 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 Lascar 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. C., Janda, R. J., Thouret, J.-C., & Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 41*(1–4), 17–66.

- Prival, J.-M., Thouret, J.-C., Japura, S., Gurioli, L., Bonadonna, C., Mariño, J., & Cueva, K. (2020). New insights into eruption source parameters of the 1600 CE Huaynaputina Plinian eruption, Peru. *Bulletin of Volcanology, 82*, 7. https://doi.org/10.1007/s00445-019-1340-7

- Rivera, M., Cueva, K., Le Pennec, J.-L., Vela, J., Samaniego, P., Manrique, N., & Soncco, Y. (2020a). *Geología y evaluación de los peligros del volcán Sara Sara (Ayacucho)* (Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, n.° 78). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

- Rivera, M., Samaniego, P., Vela, J., Le Pennec, J.-L., Guillou, H., Paquette, J.-L., & 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*, 106787.

- Rivera, M., Thouret, J.-C., Mariño, J., Berolatti, R., & Fuentes, J. (2010). Characteristics and management of the 2006–2008 volcanic crisis at the Ubinas volcano (Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 198*, 19–34.

- Romero, J. E., Morgavi, D., Arzilli, F., Daga, R., Caselli, A., Reckziegel, F., Viramonte, J., Díaz-Alvarado, J., Polacci, 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., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., Delgado, R., Valderrama, P., & Scao, V. (2016). The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 323*, 110–128.

- Samaniego, P., Valderrama, P., Mariño, J., van Wyk de Vries, B., Roche, O., Manrique, N., 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. https://doi.org/10.1007/s00445-015-0937-8

- Schilling, S. P. (1998). *LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones* (Open-File Report 98-638). U.S. Geological Survey.

- Schwaiger, H. F., Denlinger, R. P., & Mastin, L. G. (2012). Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117*(B4), B04204. https://doi.org/10.1029/2011JB008968

- Segura, A. (2016). *Erupción subpliniana de abril de 2015 del volcán Calbuco, Andes del Sur: Génesis, dinámica y parámetros físicos de la columna eruptiva y depósitos piroclásticos de caída asociados* [Tesis, Universidad de Chile]. http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142799

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2026). *Estaciones meteorológicas e hidrológicas*. Recuperado el 9 de septiembre de 2026, de https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones

- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., & Stix, J. (Eds.). (2000). *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press.

- Sparks, R. S. J., Gardeweg, M. C., Calder, E. S., & Matthews, S. J. (1997). Erosion by pyroclastic flows on Lascar volcano, Chile. *Bulletin of Volcanology, 58*(7), 557–565. https://doi.org/10.1007/s004450050162

- Suzuki, T. (1983). A theoretical model for dispersion of tephra. En D. Shimozuru y I. Yokoyama (Eds.), *Arc volcanism: Physics and tectonics* (pp. 93–113). Terra Scientific Publishing Company.

- 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*, 865989. https://doi.org/10.3389/feart.2022.865989

- Thouret, J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., & Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin, 113*(12), 1593–1610. https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113%3C1593:GOEMVN%3E2.0.CO;2

- 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.-C., 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.

- Tilling, R. I. (1989). Volcanic hazards and their mitigation: Progress and problems. *Reviews of Geophysics, 27*(2), 237–269.

- Torres, J. L., Del Carpio, J., & Rivera, M. (2020). *Evaluación y análisis de la actividad sísmica en el complejo volcánico nevado Coropuna (periodos 2001–2002, 2008–2010 y 2018–2019)* (Informe vulcanológico IGP/CENVUL-COR/IV 2020-0001). Instituto Geofísico del Perú.

- Úbeda, J. (2011). *El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico nevado Coropuna (cordillera occidental de los Andes Centrales)* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid].

- Ui, T., Takarada, S., & Yoshimoto, M. (2000). Debris avalanches. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer y J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 617–626). Academic Press.

- Vargas Franco, R. D., Thouret, J.-C., Delaite, G., van Westen, C., Sheridan, M. F., Siebe, C., Mariño, J., Souriot, T., & Stinton, A. (2010). Mapping and assessing volcanic and flood hazards and risks, with emphasis on lahars, in Arequipa, Peru. En G. Groppelli y L. Viereck-Goette (Eds.), *Stratigraphy and geology of volcanic areas* (Geological Society of America Special Paper 464, pp. 265–280). Geological Society of America. https://doi.org/10.1130/2010.2464(13)

- Vásconez, F., Vásconez, R., & Mothes, P. (2019). Flujos de lodo del volcán Carihuairazo provocados por el terremoto de Ambato, Ecuador, en 1698 y su reconstrucción numérica con perspectivas a futuro. *Revista Geofísica, 69*, 11–29. https://doi.org/10.35424/rgf.v0i69.823

- Viramonte, J., Becchio, R., Bolli, M. I., Petrinovic, I., Seggiaro, R., & Tejada, A. (1995). *Informe sobre la erupción del volcán Láscar de abril de 1993*. Instituto Geonorte, Universidad Nacional de Salta.

- 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 Coropuna, 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 Coropuna: vista desde el sector suroeste.



IGP
Instituto Geofísico del Perú

@igp.peru
@igp_peru
@igp.peru
@igp_videos
@institutogeofisicodelperu
@igp.peru