



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



Informe
técnico

MAPA

DE PELIGROS DEL COMPLEJO YUCAMANE CALIENTES

Arequipa, 2024



CRÉDITOS

Juan Carlos Castro Vargas
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Presidente ejecutivo del IGP

Edmundo Norabuena
Director científico del IGP

Marco Rivera
Director del Observatorio Vulcanológico del Sur

Antonella Condorena
Jefa de la Unidad Funcional de Comunicaciones

Marco Rivera
David Valdivia
Juan Cuno
John Cruz
José Del Carpio
Autores

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Marco Rivera
Jorge Concha
Edición de contenido

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

Carátula: complejo volcánico Yucamane-Calientes

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

Teléfono: +5154369212

Arequipa, noviembre de 2024

CONTENIDO

6	Presentación
7	Resumen
8	Introducción
9	Condiciones climatológicas
11	Aspecto socioeconómico
12	Los peligros volcánicos
12	Caída de piroclastos (tefras)
13	Flujos y oleadas piroclásticas
13	Lahares (flujos de lodo y escombros)
13	Avalanchas de escombros
13	Flujos de lava
13	Gases volcánicos
14	El complejo Yucamane-Calientes
14	Volcán Calientes: etapas de evolución
15	Volcán Yucamane: etapas de evolución
17	Erupciones históricas en el complejo Yucamane-Calientes
18	Datos y metodología para la elaboración de mapas
18	Metodología para la elaboración de mapas
18	Softwares empleados
19	Parámetros de entrada para posibles escenarios eruptivos
23	Resultados: mapas de peligros del complejo Yucamane-Calientes
23	Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal
25	Mapa de peligros por caídas de cenizas durante erupción vulcaniana (IEV1-2)
27	Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción subpliniana o pliniana (IEV 3-4)
29	Mapa de peligros por lahares
31	Conclusiones
32	Referencias

YUCAMANE



Elevación

5495 m s. n. m.



Región

Tacna



Provincia

Candarave



Última erupción

Hace 3270 años aprox.



Población en un radio de 30 km

6711 personas aprox.



Inicio de vigilancia en tiempo real

2018



Instrumentos y técnicas de vigilancia

2 estaciones sísmicas

1 cámara científica

2 inclinómetros

Sistemas satelitales



PRESENTACIÓN



Dr. Hernando Tavera
Presidente ejecutivo
Instituto Geofísico del Perú

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

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

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

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

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

Quienes formamos parte del SINAGERD tenemos claro que no es posible gestionar el riesgo sin el respaldo de la ciencia. Confiamos en que esta misma perspectiva sea compartida por cada peruano y peruana. Sabemos que es un proceso, pero creemos que la generación periódica de productos científicos, como lo es en esta oportunidad este mapa de peligros del complejo volcánico Yucamane-Calientes, 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 complejo volcánico Yucamane-Calientes (CVYC) se ubica en la región Tacna, a 11 km de la localidad de Candarave. Está constituido de dos volcanes: Calientes al norte y Yucamane al sur, siendo este último el que ha presentado actividad reciente. Con base en estudios vulcanológicos previos y datos de campo, en caso de una eventual erupción del volcán Yucamane o del volcán Calientes, se proponen cinco escenarios eruptivos. A continuación, se menciona cada uno de ellos ordenados de acuerdo con su probabilidad de ocurrencia: 1) erupción de tipo vulcaniana (Índice de Explosividad Volcánica [IEV] 1-2); 2) erupción explosiva de tipo subpliniana (IEV 3); 3) erupción con el crecimiento de domo o colapso de un sector del volcán; 4) erupción efusiva con emisión de flujos de lava; y 5) erupción explosiva de tipo pliniana (IEV 4-5).

Con base en estudios previos y en el modelamiento de procesos volcánicos se han elaborado cuatro mapas de peligros que se presentan en un solo póster: a) mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal, que considera la ocurrencia de flujos de lava, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros, caída de proyectiles balísticos y lahares. b) Mapa de peligros por caídas de cenizas para un escenario de tipo vulcaniano (IEV 1-2), en el cual la zona de alto peligro (rojo) se halla hasta una distancia de 43 km al este, oeste y norte, y 48 km al suroeste del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de varios milímetros a centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se halla aproximadamente entre 43 km y 110 km al oeste, y entre 43 km a más de 83 km al este de dicho complejo volcánico. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de algunos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, con una distancia de más de 240 km al este, 125 km al oeste y 100 km al sur. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de menos de 1 mm de espesor. c) Mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de tipo subpliniano-pliniano (IEV 3-4), en el cual la zona de alto peligro (rojo) por caída de piroclastos muestra una

configuración elíptica alrededor del complejo volcánico Yucamane-Calientes, con una distancia de 215 km al oeste, más de 60 km al este y más de 128 km al sur. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas y lapilli pómez que formarían una capa de varios centímetros o decímetros de espesor. De manera local, en caso de una erupción altamente explosiva, se generaría caída de pómez de menos de 0.5 m de espesor que cubriría zonas adyacentes a dicho complejo volcánico. La zona de moderado peligro (naranja) tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 215 km a 290 km al noroeste, de 120 km a 170 km al norte, y a más de 170 km al sur. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de más de 1 mm de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica alrededor del complejo volcánico Yucamane-Calientes, con una distancia de más de 290 km al oeste, 170 km al norte y de más de 280 km al sur. En esta zona se depositarían cenizas de menos de 0.1 mm de espesor. d) Mapa de peligro por lahares, en el cual la zona roja es considerada de alto peligro y corresponde a la zona de mayor probabilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos (500 000 m³) asociados a erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1-2) o a lluvias intensas. La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de moderado volumen (1 millón de m³), mientras que la zona amarilla es considerada de bajo peligro o de menor probabilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos (2 millones de m³) asociados a erupciones de gran magnitud (IEV ≥ 3). Se debe recalcar que la probabilidad de ocurrencia de tales erupciones es muy baja.

En caso de una eventual erupción del complejo volcánico Yucamane-Calientes, las zonas más propensas a ser afectadas por los productos volcánicos serían, principalmente, la provincia de Candarave (11 km al suroeste del volcán), donde habitan cerca de 3482 pobladores, además de caseríos/parajes, terrenos de cultivo, pastizales y obras de infraestructura. Asimismo, se vería afectado el ganado camélido que habita la zona.

1. Introducción

El vulcanismo reciente en el sur peruano ocurre a lo largo de la cordillera occidental de los Andes (Figura 1), la cual forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC; de Silva & Francis, 1991). En ella se distinguen conos volcánicos, domos de lava, calderas, estratovolcanes, complejos volcánicos, etc., cuya fase mayor de construcción se desarrolló durante el Mioceno, Pleistoceno y Holoceno (Mamani et al., 2010; Thouret et al., 2016).

El vulcanismo en los Andes del sur peruano es el resultado de la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental sudamericana. Este vulcanismo se produce entre 190 km y 280 km al este del borde occidental del continente sudamericano, paralelo a la fosa Perú-Chile. La dirección de convergencia de la placa de Nazca bajo el continente sudamericano es de N79°E, con una velocidad media de 5-6 cm/año (Norabuena et al., 1999).

A lo largo de la cadena volcánica se distinguen al menos una docena de volcanes de edad Pleistocena-Holocena: Sara Sara, Coropuna, Ampato-Sabancaya, Chachani, Misti, Ubinas,

Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucamane-Calientes, Purupuruni, Casiri, entre otros. Además, se distinguen numerosos volcanes monogenéticos que corresponden a conos de escorias y flujos de lava, como los apreciados en Andahuay, Orcopampa, Huambo, Yura (Arequipa) y Caylloma. De entre todos estos volcanes, Sabancaya, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani y Tutupaca han presentado actividad eruptiva durante los últimos 500 años, actividad que ha causado enormes estragos a varios poblados, terrenos de cultivo y obras de infraestructura localizadas en sus inmediaciones. Basta mencionar los daños ocasionados por la erupción del volcán Huaynaputina, en febrero de 1600 d. C., considerada la más importante ocurrida en épocas históricas en los Andes, donde perdieron la vida más de 1500 personas (Adams et al., 2001; Thouret et al., 2002).

El complejo volcánico Yucamane-Calientes (17°08'34"-17°12'50" S; 70°14'50"-70°09'55" O) se ubica en el extremo norte de la región Tacna, en el flanco occidental de la cordillera de los Andes del sur peruano (Figura 2).

El objetivo del presente trabajo es presentar los mapas de peligros del complejo volcánico Yucamane-Calientes, los cuales tienen como propósito brindar a la sociedad, instituciones del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de

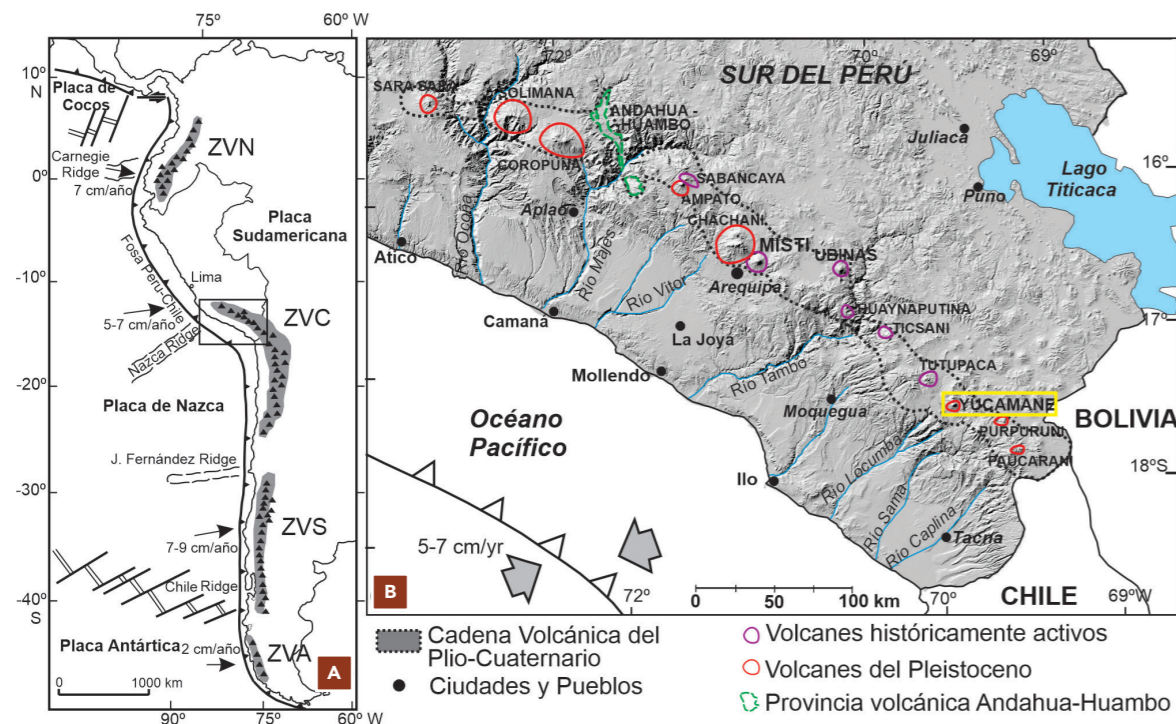


Figura 1. (a) Mapa de ubicación de las zonas volcánicas de Sudamérica: norte (ZVN), central (ZVC), sur (ZVS) y austral (ZVA). (b) Sector norte de la ZVC, en el sur del Perú. El volcán Yucamane está ubicado en el extremo sur de la cadena volcánica pliocuaternaria del sur peruano.

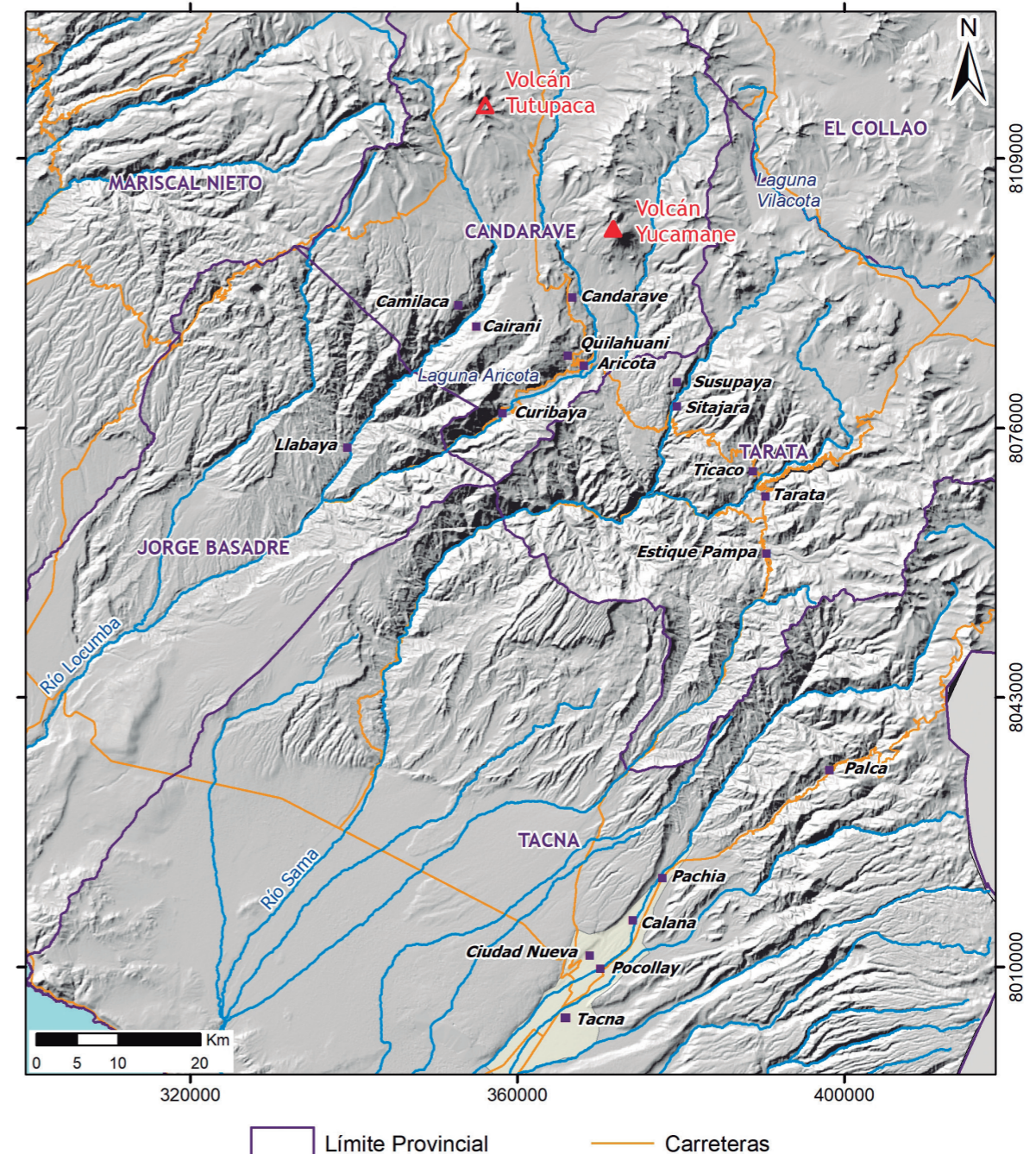


Figura 2. Mapa de ubicación del volcán Yucamane, el cual forma parte del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

Desastres (SINAGERD) y autoridades (Gobierno Regional de Tacna, Municipalidad Provincial de Candarave, etc.) información útil para ser utilizada en el ordenamiento del territorio, la formulación de obras de infraestructura, la elaboración de planes de prevención, la mitigación y prevención del riesgo volcánico y el manejo de una eventual crisis volcánica del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

1.1 Condiciones climatológicas

El factor climático varía de acuerdo con la altitud, latitud, longitud y otros factores como la cercanía de las lagunas, lagos, etc., lo que origina un contraste de climas bien diferenciados respecto a la parte superior del complejo Yucamane-Calientes (localizado entre los 4000 y 5495 m s. n. m.) y

Tabla 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas de Candarave, Susapaya y Vilacota en inmediaciones del complejo volcánico Yucamane-Calientes operadas por el SENAMHI.

Nombre	Coordenadas		Altitud (m s. n. m.)	Periodo de Registro	Cuenca
	Latitud	Longitud			
Candarave	-17.29061	-70.267278	3415	1964-2024	Locumba
Susapaya	-17.35	-70.133333	3309	1966-2024	Sama
Vilacota	-17.1183	-70.0508	4440	1998-2024	Mauri

Tabla 2. Precipitación en el periodo 1964-2024 registrada por las estaciones meteorológicas de Candarave, Vilacota y Susapaya (Fuente: SENAMHI).

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Candarave	59.9	71.3	34.4	2.5	0.3	0.5	0.8	1.1	1.2	1.2	1.8	14.4
Vilacota	190.1	203.5	133.3	43.3	5.3	3.4	5.8	2.9	5.3	16.4	22.1	102.8
Susapaya	65.6	75.0	34.4	0.9	0.9	0.5	1.0	1.2	1.4	3.0	2.4	18.2

la parte inferior del volcán, entre los 3800-4500 m s. n. m., donde se localiza la altiplanicie volcánica o superficie puna.

En este estudio se presentan datos de temperatura y precipitación del área donde se localiza el complejo volcánico Yucamane-Calientes. Los datos corresponden a tres estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), ubicadas en Candarave, Susapaya y Vilacota (Tabla 1), las cuales se encuentran en inmediaciones del complejo volcánico Yucamane-Calientes (Tabla 1). Los datos corresponden al período comprendido entre 1964 y 2024.

1.1.1 Temperatura

De acuerdo con los registros de la estación Susapaya, entre los años 2000 y 2024, la temperatura máxima promedio fue de 17.4 °C y la temperatura mínima promedio de 4.3 °C. En tanto, la temperatura máxima registrada fue de 23.7 °C y la temperatura mínima fue de -8.2 °C.

1.1.2 Precipitación

De acuerdo con los registros del periodo 1964-2024 de la estación Candarave, ubicada a

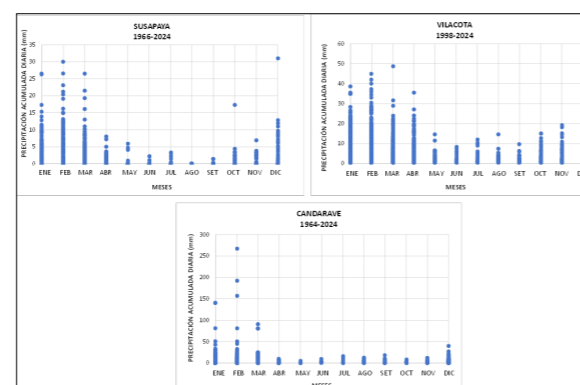


Figura 3. Precipitaciones diarias de las estaciones Candarave, Susapaya y Vilacota, localizadas dentro de un radio de 20 km desde el cráter del volcán Yucamane.

14 km al suroeste del volcán Yucamane, entre los meses de diciembre y marzo, las precipitaciones diarias promedio fueron de hasta 45 mm; sin embargo, ocurrieron precipitaciones excepcionales de 81 mm y 267 mm. Esta última precipitación ocurrió el 18 de febrero de 1984. Además, entre abril y noviembre, las precipitaciones registradas fueron de 16.1 mm.

La estación Susapaya, ubicada a 19 km al sureste del volcán Yucamane, registró que las mayores precipitaciones ocurren entre los meses de diciembre y marzo, con valores de precipitaciones diarias promedio de 31 mm. Entre los meses de abril y noviembre, las precipitaciones llegaron hasta 7.2 mm, siendo el mes de agosto en el cual se presentan escasas precipitaciones.

La estación Vilacota, ubicada a 17 km al noreste del volcán Yucamane, registró mayores precipitaciones entre los meses de diciembre y abril, con valores de precipitaciones diarias de hasta 49 mm. En los meses de abril y noviembre, las precipitaciones llegaron hasta 18 mm (Tabla 2).

1.2 Aspecto socioeconómico

1.2.1 Población y vivienda

La mayor población se concentra hacia la parte sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes, en las provincias de Candarave y Tarata. Los datos que se presentan a continuación (Tabla 3) corresponden al resultado del censo nacional (XII de población y VII de vivienda), efectuado en el año 2017 por el INEI (INEI, 2018).

Candarave es la capital de la provincia y también el pueblo más importante en términos de población. Según los datos del censo de 2017, le siguen en importancia los distritos de Camilaca (1148 habitantes), Cairani (988 habitantes), Quilahuani (720 habitantes), Huanuara (515 habitantes) y Curibaya (377 habitantes). Todos estos poblados pertenecen a la provincia de Candarave. El total de la población que habita en estas localidades no ha sufrido un cambio significativo durante los últimos años.

Tabla 3. Resultado del censo del INEI-censo XII de Población y VII de Vivienda de 2017.

Provincia	Distrito	Altura (m s. n. m.)	Población total	Viviendas
Candarave	Cairani	4306	988	653
Candarave	Camilaca	4489	1148	1226
Candarave	Candarave	4716	2354	1654
Candarave	Curibaya	2770	377	143
Candarave	Huanuara	4615	515	313
Candarave	Quilahuani	3277	720	446
Tarata	Sitajara	3404	350	327
Tarata	Susapaya	4598	518	634
Tarata	Ticaco	4650	581	494
TOTAL			7551	5890

Además, en la provincia de Candarave existen otros centros poblados menores, anexos y caseríos, ubicados cerca al complejo volcánico, tales como Yucamane Pampa, San Pedro, Santa Cruz, Totorá, La Victoria, Callerao, Morjani, Pallata, Aricota y otros.

Tarata, ciudad capital de la provincia de Tarata, está localizada a 37 km al sureste del complejo volcánico Yucamane-Calientes. En 2017, dicha ciudad contaba con una población de 3642 habitantes (INEI, 2017). Los distritos de esta provincia que se encuentran dentro del área de influencia del volcán Yucamane son Susapaya (518 habitantes), Sitajara (350 habitantes) y Ticaco (581 habitantes) (Tabla 3).

Con respecto a la cantidad de viviendas existentes en los poblados aledaños al volcán, se puede mencionar que, según el INEI (2018), en la provincia de Candarave, en los distritos Candarave, Cairani, Camilaca, Curibaya, Huanuara y Quilahuani, existían más de 4435 viviendas (ver Tabla 3), las cuales, en su gran mayoría, son de adobe o tapia, mientras que las demás viviendas son de ladrillo y cemento, otros de piedra y barro, así como de madera y de otros materiales. Durante los últimos años no se ha apreciado la construcción de un mayor aumento de viviendas, pero sí una ligera renovación del tipo de construcción, es decir, algunas viviendas de adobe o barro fueron reemplazadas por material noble (cemento y ladrillo).

Según el censo del INEI de 2017, en los distritos de Sitajara, Susapaya y Ticaco (provincia Tarata) existen aproximadamente 1455 viviendas (Tabla 3). Los tipos de viviendas en estos distritos son principalmente de adobe y tapia.

1.2.2 Actividades económicas principales

La principal actividad económica que se desarrolla en inmediaciones del complejo volcánico Yucamane-Calientes es la agricultura y, en menor medida, la crianza de animales vacunos y camélidos. Esta última actividad, principalmente, se desarrolla con mayor énfasis en la zona del altiplano, por encima de los 4000 m s. n. m. Una parte de la población de las provincias de Candarave realiza trabajos rutinarios de construcción civil. En tanto, otra parte labora en empresas mineras o entidades del Estado, tales como instituciones educativas, municipalidades, postas médicas, comisarías, Ministerio de Agricultura, Banco de la Nación, etc. Otra actividad desarrollada, y que merece ser incentivada, es el turismo, dado que la zona alberga impresionantes paisajes naturales, así como una flora y fauna diversa.

2. Los peligros volcánicos

Diversos estudios vulcanológicos han compilado los principales peligros volcánicos, los cuales corresponden a caídas de cenizas y pómez, la ocurrencia de flujos de lava, flujos y oleadas piroclásticas, flujos de escombros (lahares), avalanchas de escombros y gases volcánicos (Blong, 1984; Tilling, 1989; Blong, 2000; Bignami et al., 2012), todos representados en la Figura 4. A continuación, se describen estos fenómenos para el caso del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

2.1 Caída de piroclastos (tefras)

Constituyen el peligro directo de mayor alcance ligado a erupciones explosivas de tipo vulcaniana, subpliniana o pliniana. Las tefras están constituidas por pómez, escoria o ceniza que han sido expulsadas hacia la atmósfera por medio de las columnas eruptivas y que luego caen sobre la superficie. La altura máxima de la columna eruptiva está determinada por la tasa y velocidad de emisión, por el contenido de gases en el magma, entre otros. Los factores citados y la dirección del viento controlan el transporte de tefras a grandes distancias (Bignami et al., 2012; Blong, 1984).

2.2 Flujos y oleadas piroclásticas

Los flujos piroclásticos están conformados por una mezcla de fragmentos de roca, ceniza y gases que tienden a canalizarse dentro de las quebradas y valles. Se movilizan al ras del suelo, a velocidades que superan los 300 km/h, así como a altas temperaturas (de 300 °C a 800 °C) (Nakada, 2000). Estos flujos representan los eventos volcánicos más peligrosos y letales. Como ejemplo de su poder destructivo podemos citar lo ocurrido en el año 1902, durante la erupción del volcán Montaña Pelée (Martinica), donde flujos piroclásticos causaron la muerte de más de 30 000 personas y la destrucción total de la ciudad de Saint Pierre (Fisher & Heiken, 1982).

caso de la erupción de 1980 del volcán Mount St. Helens (EE. UU.), la avalancha se desplazó a una velocidad que varió entre 113 km/h y 240 km/h (Brantley & Myers, 1997).

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

2.5 Flujos de lava

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida que son expulsadas por el cráter o por las fracturas en los flancos de un volcán. Pueden fluir por el fondo de los valles y alcanzar varios kilómetros de distancia; raramente llegan a recorrer más de 8 km del centro de emisión (Francis, 1993). En los volcanes del sur peruano, las lavas son viscosas y, normalmente, se enfrían en la zona del cráter (forman domos) o recorren algunos kilómetros.

Los flujos de lava calcinan y destruyen todo a su paso; sin embargo, no representan un peligro alto para las personas debido a su baja velocidad (Tilling, 1989), lo que da tiempo para evacuar o escapar. Si los flujos de lava interactúan con la nieve que permanece en la cima del volcán podrían generar lahares o flujos de lodo que descenderían por los flancos del edificio volcánico.

2.3 Lahares (flujos de lodo y escombros)

Los lahares son mezclas de productos volcánicos que son removilizados por el agua y fluyen rápidamente por las quebradas que surcan los flancos de un volcán. Los lahares pueden ocurrir durante o después de una erupción.

Durante una erupción pueden generarse por lluvias intensas que removilizan todo el material volcánico que yace en las laderas de un volcán o por la interacción de un flujo de lava o flujo piroclástico que funde la nieve o hielo que permanece en la cumbre o los flancos de un volcán. Un ejemplo de ello ocurrió en Armero (Colombia), en 1985 (Lowe et al., 1986), donde una erupción explosiva de tamaño moderado (IEV 3, Pierson et al., 1990) fundió la cobertura de hielo que permanecía en la cima del volcán Nevado del Ruiz. El lahar ocasionó la muerte de más de 25 000 personas.

2.6 Gases volcánicos

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

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

2.4 Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros se generan por el colapso o derrumbe de un sector o la cima de un volcán debido a erupciones explosivas de gran magnitud, la intrusión de domos, la poca resistencia de las rocas del basamento al peso del volcán, la pendiente elevada del volcán, el grado de alteración hidrotermal de sus rocas o por un sismo importante, etc. (Ui et al., 2000). A mayor volumen, las avalanchas de escombros se desplazarán a mayor velocidad y distancia. En el

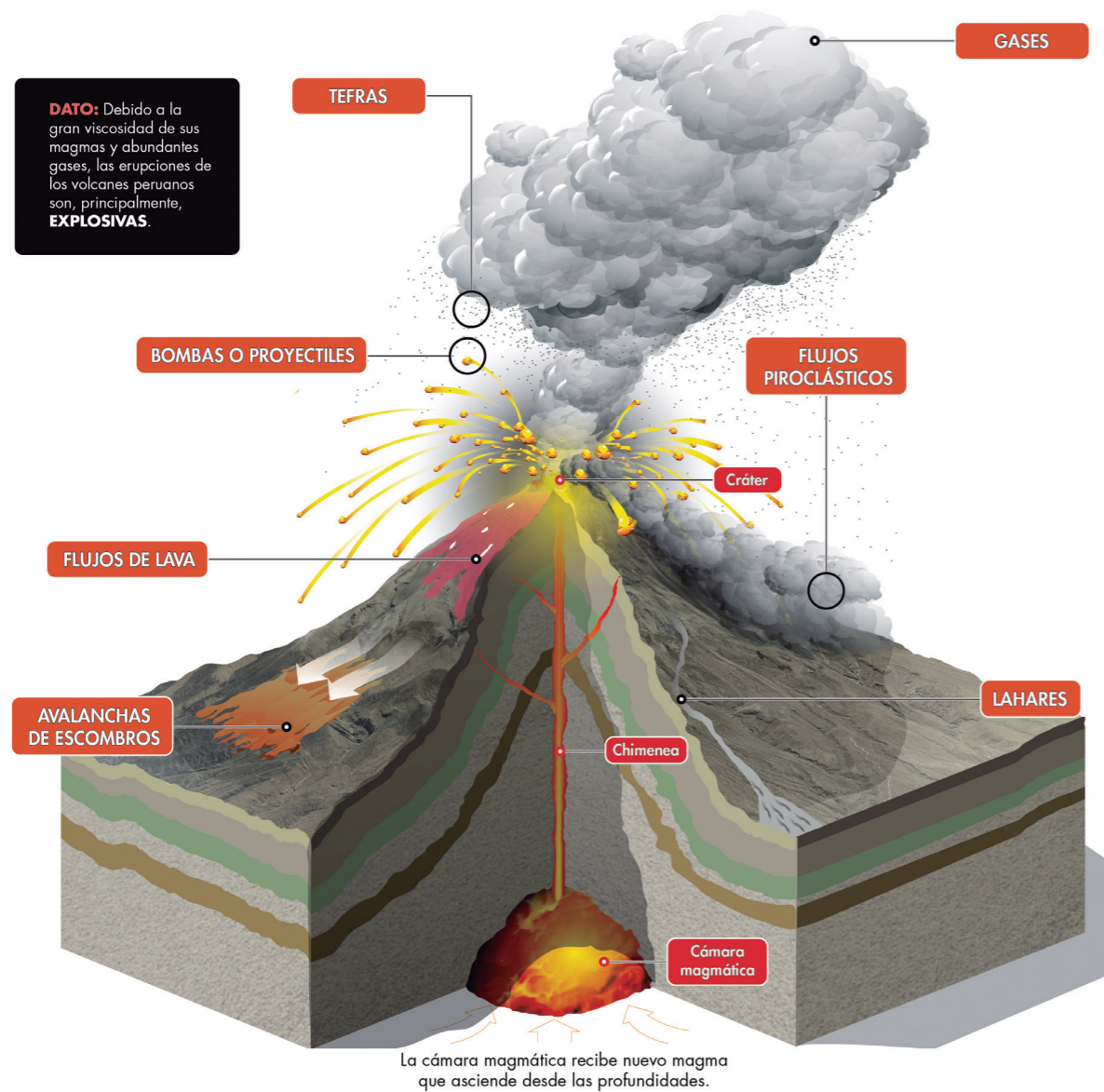


Figura 4. Tipos de peligros volcánicos que puede presentar durante una erupción el complejo volcánico Yucamane-Calientes.

3. El complejo Yucamane-Calientes

La historia eruptiva del complejo volcánico Yucamane-Calientes (CVYC) fue establecida por Rivera et al. (2020), quienes definieron cuatro etapas de crecimiento para el volcán Calientes y tres etapas para el volcán Yucamane. Según la disposición y distribución de los depósitos emitidos por ambos volcanes, así como sus características morfológicas, grado de erosión y superposición de sus depósitos, se asume que el volcán Calientes es el más antiguo de dicho complejo. A continuación, se detallan las etapas de evolución de ambos volcanes contiguos.

3.1 Volcán Calientes: etapas de evolución

Calientes I: Es el edificio más antiguo y está constituido por flujos de lava subhorizontales de composición andesítica (60.9-61.9 wt.% SiO₂) visibles en el flanco oeste del volcán (Figura 5). Dichos flujos tienen entre 20 m y 60 m de espesor y descansan sobre lavas más antiguas del volcán Yucamane Chico y las formaciones volcánicas pliocuaternarias. Un flujo de lava de esta unidad fue datado por el método K-Ar en 496 000 años AP (Rivera et al., 2020).

Calientes II: Constituido por depósitos de ignimbrita denominados "Ignimbrita Callazas" que afloran al pie de los flancos oeste, suroeste y sur del CVYC (Figura 6). Estos depósitos cubren las formaciones más antiguas que están constituidas de rocas sedimentarias y volcánicas de las formaciones Labra y Huaylillas, así como lavas de la unidad "Calientes I". Estas ignimbritas de color gris a beige están ligeramente consolidadas y tienen espesores de 80 m a 100 m. Las pómez son de composición dacítica (66-68 wt.% SiO₂), y representan la composición más silícica del CVYC. Esta ignimbrita ha sido datada con el método 40Ar/39Ar y U-Pb entre 158 000 y 198 000 años AP, respectivamente (Rivera et al., 2020).

Calientes III: Comprende una sucesión de flujos de lava andesíticos y dacíticos (60,2-65,1 wt.% SiO₂) que, en total, miden ~1200 m de espesor, y conforman el cono medio y superior del volcán Calientes (Figura 5). Estas lavas fueron datadas entre 126 ± 3 ka y 96 ± 17 ka por Rivera et al. (2020). Esta unidad incluye una sucesión de tres capas de flujos piroclásticos de bloques y flujos de ceniza que afloran a 6 km y 8 km al sureste de la cima del Yucamane. Cada capa tiene entre 12 m y 18 m de espesor. Los depósitos contienen bloques juveniles de composición dacítica (63.0-65.9 wt.% SiO₂).

Calientes IV: Comprende el cono superior del volcán Calientes y el complejo de domos de lava más recientes que se construyeron durante la última etapa ocurrida en el Holoceno (Figura 5). Tiene un diámetro de aproximadamente 1.2 km y una altura de 600 m. Estos domos son de composición dacítica (63-64 wt.% SiO₂).

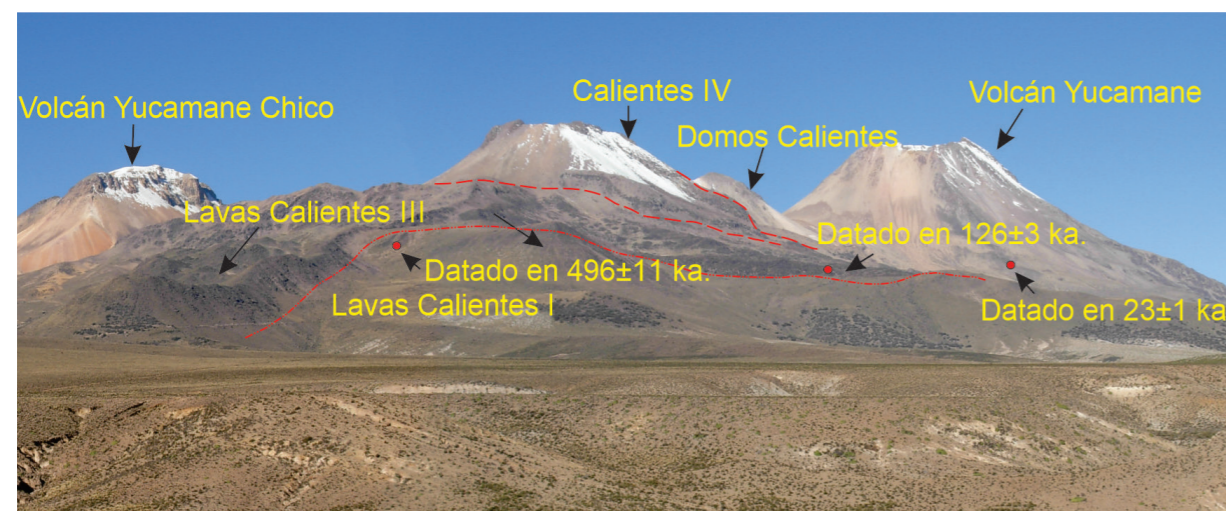


Figura 5. Vista del flanco occidental del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Se distinguen las lavas andesíticas y dacíticas de los volcanes Calientes y Yucamane (modificado de Rivera et al., 2020).

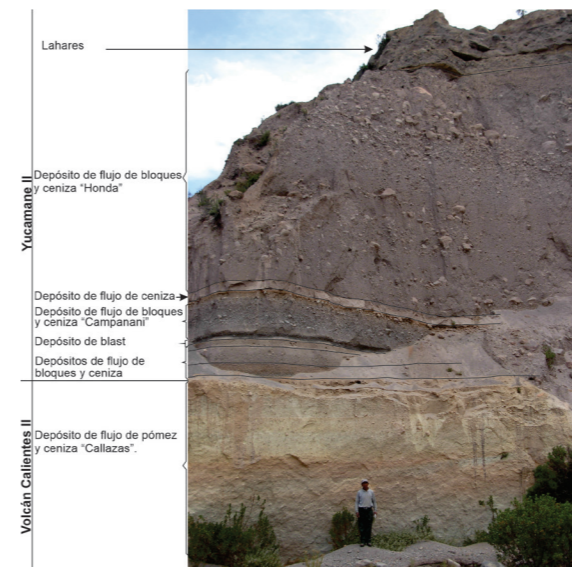


Figura 6. Secuencia piroclástica en la quebrada Honda, a 9 km al sur del volcán Yucamane, donde se distinguen depósitos de flujos de bloques y ceniza que yacen sobre la ignimbrita "Callazas" del volcán Calientes, de tonalidad amarillenta (modificado de Rivera et al., 2016).

3.2 Volcán Yucamane: etapas de evolución

Según Rivera et al. (2020), el volcán Yucamane presentó, al menos, tres etapas de evolución que son descritos a continuación:

Yucamane I: Es un remanente antiguo del volcán Yucamane. Consiste de una secuencia de flujos de lava de composición andesítica y dacítica (58.5-64.7 wt.% SiO₂) de ~300 m de espesor (Figura 7) que afloran al pie del flanco sur del cono. Dichas lavas se superponen a lavas antiguas del Mioceno superior-Pleistoceno del volcán Yucamane Chico.

Yucamane II: Consiste de los siguientes depósitos: 1) Depósito piroclástico de explosión lateral dirigida que forma una capa conspicua visible al oeste y al sur del volcán Yucamane (Figura 6). El depósito es de color gris y está compuesto principalmente por bloques juveniles andesíticos (62.3-62.7 wt.% SiO₂). El depósito fue fechado en 36 450 años AP (Rivera et al., 2020). 2) Depósito de avalancha de escombros que aflora entre 3 km y 14 km al sur y sureste del cráter del Yucamane. Dicho depósito tiene entre 40 m y 60 m de espesor y yace sobre la "Ignimbrita Callazas". 3) El depósito de flujo de bloques y cenizas "Campanani" aflora en casi todas las quebradas de los flancos sur y suroeste del volcán Yucamane (Figura 6). En la parte baja de la quebrada Campanani (9 km al suroeste del cráter del Yucamane) y en la quebrada Honda (9 km al sur del cráter del Yucamane), el depósito tiene entre 1 m a 8 m de espesor. 4) El depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas "Honda" aflora en la quebrada Honda y tiene de 10 m a 12 m de espesor (Figura 6). Este depósito contiene bloques juveniles densos de composición andesítica (61-62 wt.% SiO₂) y fue datado en 29 200 años AP.

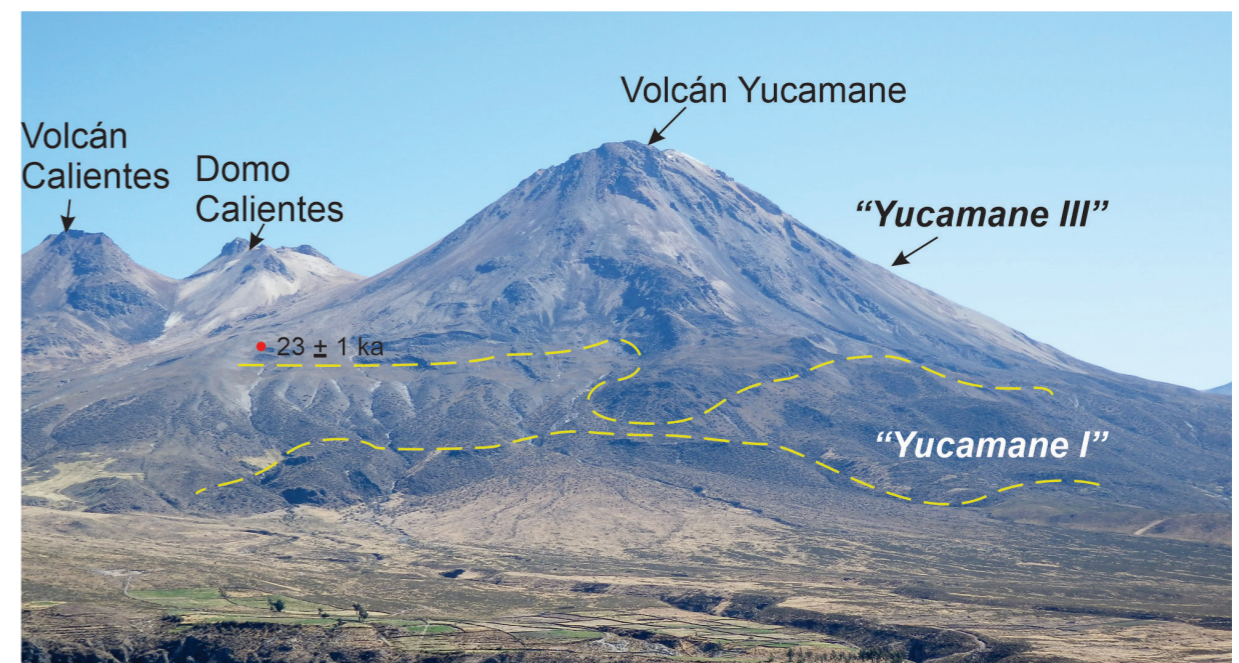


Figura 7. Vista del flanco suroeste del volcán Yucamane en donde se distinguen las lavas emplazadas durante las etapas "Yucamane I" y "Yucamane III".

Yucamane III: Consiste en una intercalación de lavas de composición andesítica (55.2-63.6 wt.% SiO₂) que conforman el cono superior del volcán Yucamane, entre 4300 y 5495 m s.n.m. (Figura 7). Estas lavas han sido datadas entre 23 000 y 3000 años AP (Rivera et al., 2020). Además, en la etapa “Yucamane III” se emplazaron depósitos de flujos de escoria que afloran en el flanco suroeste del Yucamane. Estos depósitos tienen 10 m de espesor y son de color gris. Los bloques de escoria tienen una composición andesítica (56.7-58.4 wt.% SiO₂). Esta secuencia de escoria probablemente se emplazó durante el Pleistoceno tardío u Holoceno. También se emplazaron tres depósitos de caída de escorias: a) depósito de caída de escoria “Halloween Inferior” que aflora en el sector de Mal Paso (a 4 km al este de la cumbre de Yucamane), y tiene entre 12 cm y 15 cm de espesor. b) Depósito de caída de escoria “Parda” visible en el sector Mal Paso, el cual tiene entre 16 cm y 18 cm de espesor (Figura 8). Los fragmentos de escoria de este depósito son de composición andesítica (56.6-57.4 wt.% SiO₂). c) Depósito de caída de escoria “Halloween Superior”, el cual se encuentra en el cerro Mal Paso, y tiene entre 12 cm y 22 cm de espesor (Figura 9). Este depósito aflora por encima de los depósitos de caída de escoria “Parda” y “Halloween Inferior”. El depósito está compuesto de escoria de composición andesita básica (55.5-56.4 wt.% SiO₂).

volcán Yucamane (Figura 10). Este depósito tiene entre 40 cm y 50 cm de espesor a 2 km del cráter, y 5 cm de espesor a 9 km del cráter. Dicho depósito fue probablemente emitido durante una erupción subpliniana (Vela, 2015). Los fragmentos de pómez tienen una composición andesítica (61.1-62.7 wt.% SiO₂). Probablemente, asociado a dicha erupción, se emplazaron tres depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza de 5 m a 7 m de espesor, visibles al pie del flanco noreste del volcán Yucamane (Pampa Cambaya, a 6 km de la cumbre).

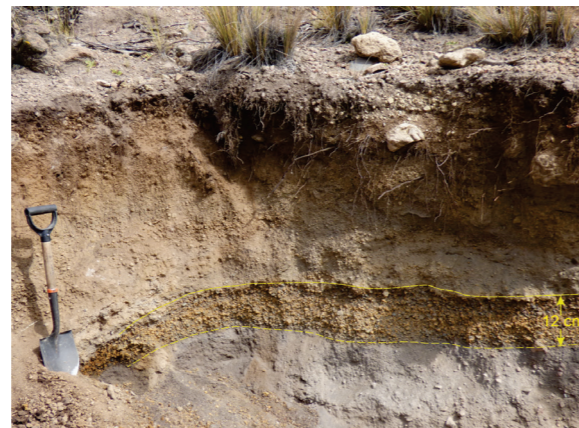


Figura 9. Depósito de caída de escoria “Halloween superior” que aflora al pie del sector Mal Paso, a 4 km al sur del cráter, donde mide 12 cm de espesor.



Figura 8. Depósito de caída de escoria “Parda” que aflora en el sector de Mal Paso, a 4 km al sur del cráter, donde mide 16 cm de espesor.

El depósito más reciente emitido por el volcán Yucamane corresponde a un depósito de caída de lapilli de pómez datado en 3085 años AP (Rivera et al., 2020), el cual aflora al este del



Figura 10. Depósito de caída de lapilli de pómez de hace 3270 ± 50 años AP que aflora al pie del flanco este del volcán Yucamane.

3.3 Erupciones históricas en el complejo Yucamane-Calientes

Las informaciones referentes a la actividad eruptiva de los volcanes Yucamane y Calientes, ocurrida en la época histórica, son escasas y, a la vez, contradictorias. Dean Valdivia, en “Fragmentos para la Historia de Arequipa” (Folletín de “El Deber”, Arequipa, 1874, página 109-111), considera a Candarave como anexo de Ilabaya, erigido en curato en 1776 por el Monseñor Abad Yllana, quién lo describe así: “Es frío y produce alfalfa. A su cabeza se halla el volcán Yucamani, corpulenta y que humea y reventó en parte en 1787”.

Por otro lado, Siebert et al. (2011) reportan varias posibles erupciones del volcán Yucamane ocurridas en los años 1320, 1780, 1787, 1802, 1862 y 1902. Según estudios recientes efectuados por Samaniego et al. (2015), al menos las erupciones ocurridas en los años 1780, 1787 y 1802 no estarían ligadas al volcán Yucamane, sino al volcán Tutupaca, localizado a 24 km al noroeste del volcán Yucamane. Estudios recientes de Rivera et al. (2020) muestran que el volcán Yucamane no ha generado erupciones al menos durante los últimos 500 años.

4. Datos y metodología para la elaboración de mapas

4.1 Metodología para la elaboración de mapas

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

- Recopilación de material bibliográfico relacionado a la geología, petrología, geoquímica, etc., disponible en tesis universitarias, boletines y revistas científicas.
- Procesamiento de imágenes de satélite Landsat del complejo volcánico Yucamane-Calientes para el cartografiado de los depósitos volcánicos.
- Uso de un Modelo Digital de Elevación (DEM) elaborado por CONIDA a través de imágenes satelitales SPOT 6 de alta resolución.
- Modelamiento de procesos volcánicos: dispersión de ceniza con el *software* Ash3d (Mastin et al., 2009) y la delimitación del alcance de flujos piroclásticos, lahares y avalanchas de escombros con el *software* LaharZ (Schilling, 1998).
- Elaboración de gráficos y tablas diversas.
- Elaboración de los mapas de peligros volcánicos.

4.2 Softwares empleados

4.2.1 Modelo Ash3d

El Ash3d (Mastin et al., 2009) es un *software* basado en los principios Eulerianos tridimensionales, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), y sus fundamentos son descritos por Schwaiger et al. (2012). Es una herramienta utilizada para calcular la cantidad de ceniza depositada y su concentración en el aire; además, puede usarse

para recrear eventos pasados y realizar escenarios futuros de dispersión de ceniza. Ash3d modela el transporte de ceniza volcánica dividiendo la atmósfera en una cuadrícula tridimensional y calculando el flujo de masa a través de las paredes celulares (Mastin et al., 2009).

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

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

En la simulación de dispersión de cenizas con el *software* Ash3d del complejo volcánico Yucamane-Calientes, para el escenario de erupciones vulcanianas (IEV 1-2), se consideró un volumen de ceniza de 0.1 km^3 , volumen frecuente en erupciones explosivas de tipo vulcanianas como la presentada 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 5 km.

En el modelamiento para la dispersión de cenizas del complejo volcánico Yucamane-Calientes para un escenario de erupción subpliniana (IEV 4) se consideró un volumen de ceniza menor a 0.8 km^3 , basado en el último episodio explosivo subpliniano del volcán Chaiten (Chile) de 2008,

con un volumen de productos de $\sim 1 \text{ km}^3$ y un IEV 4. También se consideró una altura de la pluma de ceniza de 14 km con una duración de 2.5 horas (Folch et al., 2008).

Para simular la dispersión de tefras del complejo volcánico Yucamane-Calientes durante una erupción pliniana (IEV 5) se consideró un volumen de pómez emitido de $1.4 \text{ m} \times 10^9 \text{ m}$, tomando como ejemplo el volumen de pómez emitido durante la erupción de hace 2000 años AP del volcán Misti (Harpel et al., 2011). Dicha erupción generó una pluma de pómez y ceniza de aproximadamente 29 km de altura y tuvo una duración aproximada del orden de 4 horas.

En todos los casos se consideró la dirección del viento predominante: sureste y suroeste del cráter del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Los datos de vientos fueron tomados del Centro Nacional de Predicción Ambiental de los EE. UU.

4.2.2 Modelo LaharZ

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

Para delimitar el alcance de los flujos piroclásticos y avalanchas de escombros se empleó la metodología denominada "cono de energía" (Malin & Sheridan, 1982), la cual ha sido muy utilizada para definir las zonas de peligro proximales y mediales alrededor de un volcán. Este método postula que el alcance horizontal (L) de un flujo piroclástico o avalancha de escombros está determinado en función de la diferencia de alturas (H) entre el punto de generación del flujo o la cima de un volcán, y el punto de alcance del depósito (Figura 11). La relación H/L es un indicador de la movilidad del flujo. Así, para una relación H/L cercana a 0.1, los flujos poseen gran movilidad y, por tanto, alcanzan mayor distancia, mientras que para una relación H/L cercana a

0.3 poseen poca movilidad. Los alcances de los flujos piroclásticos y avalanchas de escombros fueron delimitados con el programa LAHARZ_py.

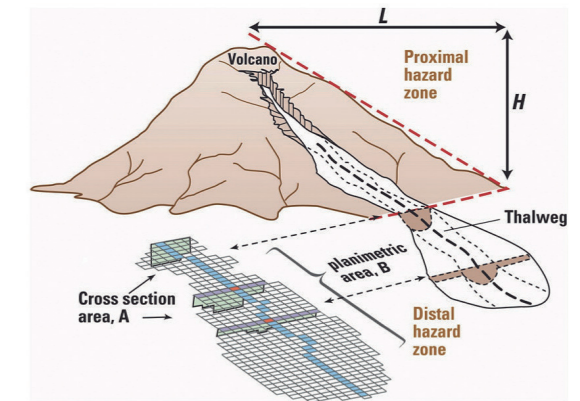


Figura 11. Relaciones entre la distancia (L) y la altura (H) por donde recorrerían los lahares, así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B) inundadas por un lahar (Schilling, 1998).

4.3 Parámetros de entrada para posibles escenarios eruptivos

Estudios geológicos efectuados por Rivera et al. (2020) muestran que las secuencias volcánicas del volcán Yucamane yacen sobre las secuencias volcánicas del volcán Calientes, lo cual sugiere que el volcán Calientes inició su actividad eruptiva mucho antes que el volcán Yucamane. Durante el Holoceno, los dos volcanes mostraron actividad eruptiva. Desde luego, según los datos geológicos, el volcán Yucamane ha sido más activo durante los últimos miles de años. En tal sentido, se sugiere que el más probable a reactivarse en el futuro es el volcán Yucamane.

Para la elaboración de los escenarios eruptivos, se han considerado estudios previos efectuados por Rivera et al. (2020), así como el estado y la morfología que presenta en la actualidad el complejo volcánico Yucamane-Calientes y otros aspectos descritos a continuación:

- Los tipos de dinamismos eruptivos reconocidos en el Yucamane y Calientes, los cuales podrían volver a repetirse.
- La magnitud de las erupciones del volcán Yucamane y Calientes es inferida en función del volumen de material emitido y por el área cubierta.

- El comportamiento de otros volcanes peruanos u otros de la Zona Volcánica Central de los Andes, considerados como “análogos” a los volcanes Yucamane y Calientes.

Se definieron cinco escenarios eruptivos ante una posible erupción del volcán Yucamane o volcán Calientes, desde el más posible al menos posible, los cuales se detallan a continuación.

4.3.1 Erupción de tipo vulcaniana (IEV 1-2)

Las erupciones vulcanianas son erupciones explosivas moderadas a leves que emiten materiales como ceniza, bloques, bombas y, eventualmente, lapilli de pómez. Las explosiones se dan en intervalos de minutos a horas e, incluso, días. Luego de las explosiones se generan columnas de gases y ceniza de menos de 20 km de altura (Sigurdsson et al., 2000). En ocasiones, en dichas erupciones se generan flujos piroclásticos. La ceniza emitida durante dicha erupción puede ser dispersada a algunas decenas de kilómetros de distancia e, incluso, sobrepasar fácilmente los 30 km de distancia. En el sur peruano, los volcanes Misti, Ubinas, Sabancaya y otros han presentado erupciones vulcanianas con IEV de 1 y 2 (Thouret et al., 2001; Gerbe & Thouret, 2004; Rivera et al., 2014; Rivera et al., 2016). Actualmente, el volcán Sabancaya viene generando erupciones vulcanianas con emisiones de cenizas.

Los estudios de tefrocronología realizados en el volcán Yucamane por Rivera et al. (2020) permitieron identificar, al menos, la presencia de tres depósitos de caída de escoria andesíticas ligados a erupciones vulcanianas. Estos depósitos fueron emplazados hace más de 3270 años AP.

En caso de que el volcán Yucamane, o eventualmente el Calientes, presentara una erupción vulcaniana con IEV 1 o 2, las caídas de cenizas afectarían a poblados como Candarave, San Pedro, Yucamane Pampa, Santa Cruz y otros, así como a los terrenos de cultivo, ganado camélido, canales de agua, etc. localizados entre 8 y 30 km de distancia del cráter del Yucamane.

También es frecuente la formación de lahares o flujos de barro durante la ocurrencia de este tipo de erupciones, sobre todo si ocurre en temporada de lluvia (diciembre a marzo), pues en esa época los volcanes poseen una cobertura

de hielo y nieve. Esta hipótesis se basa en la presencia de lahares con espesores centimétricos a métricos visibles en las quebradas que drenan de los volcanes Yucamane y Calientes, como quebradas Gentilcagua, Honda y Campanani, donde existen depósitos de lahares de pequeño volumen, posiblemente de 100 000 m³ a 400 000 m³. Estos lahares, posiblemente, están asociados a las erupciones vulcanianas ocurridas durante el Holoceno.

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

4.3.2 Erupción de tipo subpliniana (IEV 3)

Durante erupciones de tipo subpliniana, con IEV 3, las columnas de gases y tefra (ceniza, escoria y pómez) alcanzarían entre 3 km y 20 km de altura sobre el cráter y generarían depósitos de caída de tefra y flujos piroclásticos (Sigurdsson et al., 2000). La ceniza influenciada por los vientos puede ser dispersada a decenas y centenas de kilómetros de distancia del volcán. El volcán Nevado del Ruiz (Colombia) generó en 1985 una erupción subpliniana con IEV 3, la cual dejó un depósito de ceniza en áreas aledañas. Las isópacas de 1 cm de espesor se midieron a 35 km de distancia del volcán (Naranjo et al., 1986). En este tipo de erupciones se pueden generar flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, etc. que serían canalizados en quebradas y valles aledaños al volcán.

La mayoría de volcanes del sur del Perú han presentado este tipo de erupciones. En el volcán Yucamane se han encontrado depósitos de caídas de lapilli de pómez y caídas de escoria asociados a erupciones subplinianas con IEV 3. En efecto, la última erupción subpliniana del Yucamane ocurrió hace ~3270 años AP; esta erupción dejó una capa de caída de lapilli de pómez de 50 cm de espesor a 2 km al pie de los flancos sureste y este del volcán. Con relación al volcán Calientes, no se ha reconocido ningún depósito de caída piroclástica emitido por dicho volcán. En tal sentido, la probabilidad de ocurrencia de erupciones subplinianas con IEV 3 en el volcán Yucamane es de moderada a alta.

En caso de que el volcán Yucamane, o en menor medida el volcán Calientes, presentase una erupción subpliniana, las cenizas afectarían seriamente los poblados de Candarave, San Pedro, Santa Cruz, Callerao y otros poblados menores ubicados entre 8 km y 40 km del volcán.

Durante las erupciones subplinianas también pueden producirse flujos piroclásticos. En efecto, en la erupción subpliniana del Yucamane de hace aproximadamente 3270 años AP se emitieron flujos de pómez y ceniza que se emplazaron hasta 6 km al noreste de su cráter. Sin embargo, dependiendo de la topografía del terreno, estos flujos podrían alcanzar mayores distancias.

Las erupciones subplinianas (IEV 3) también pueden generar lahares, especialmente si los flujos piroclásticos se emplazan sobre la cobertura de hielo o nieve (Major & Newhall, 1989), aunque también pueden asociarse a lluvias intensas que ocurren entre diciembre y marzo de cada año. Una erupción subpliniana (IEV 3) del Yucamane o Calientes generaría lahares que descenderían por las diversas quebradas que surcan los flancos del complejo volcánico, sobre todo por aquellas ubicadas al sur y sureste del Yucamane. Esta versión está basada en la presencia de diversos depósitos de lahares que se encuentran en las quebradas localizadas en el flanco sur del volcán Yucamane (quebradas Honda, Campanani, Queñua, etc.).

4.3.3 Crecimiento de domo o colapso de un sector del volcán

Un domo de lava se forma durante una erupción, específicamente cuando el magma es demasiado viscoso para fluir más de unas decenas o cientos de metros (Francis, 1993). Durante el crecimiento de un domo, los flancos de dicha estructura son inestables y pueden colapsar, y así dar lugar a la formación de flujos piroclásticos. La mayor amenaza asociada al crecimiento de un domo de lava radica en la generación de explosiones laterales dirigidas o “blast”, las cuales eyectan flujos piroclásticos y producen el colapso de un sector del volcán. Estos flujos pueden producirse sin previo aviso y desplazarse a velocidades mayores a 50 m/s y mayores a 10 km de su fuente (Miller, 1989).

En el Yucamane o Calientes es probable la formación de un domo, ya que en inmediaciones de estos volcanes existen depósitos de flujos

de bloques y ceniza ligados al crecimiento y destrucción de domos producidos por dichos volcanes en el pasado. En efecto, en la parte baja del volcán Yucamane (quebrada Honda e inmediaciones de las localidades de Yucamane Pampa y Santa Cruz) existen depósitos de flujos de bloques y ceniza ligados al crecimiento y destrucción de domos generados por dicho volcán. Asimismo, existe un depósito de flujo piroclástico tipo *blast* datado en aproximadamente 36 450 años AP que ha descendido a más de 15 km al oeste y suroeste del volcán Yucamane, donde mide 20 cm de espesor.

En caso de que el volcán Yucamane genere una erupción explosiva, o si se produjera el crecimiento de un domo en su interior, uno de los flancos podría colapsar y generar depósitos de avalancha de escombros que se desplazarían hasta una distancia mayor a 8 km del volcán, esto según cálculos de líneas de energía y la distancia recorrida por depósitos preexistentes del volcán Yucamane. Si estos depósitos ingresaran a los ríos Calientes o Callazas podrían transformarse en lahares.

Igualmente, si el volcán Calientes presentara una erupción violenta, o si se produjera el crecimiento de un domo al interior de dicho volcán, uno de los flancos del sector oeste del Calientes o el complejo de domos podría colapsar y generar depósitos de avalancha de escombros que también se desplazarían hasta una distancia mayor a 6 km, principalmente en dirección este y oeste del volcán. La hipótesis sobre la generación de avalanchas de escombros está basada en la existencia de un depósito de avalancha de escombros del Pleistoceno que aflora en el sector de Santa Cruz, probablemente ligado al colapso de un sector del volcán Yucamane o Calientes.

4.3.4 Erupción de tipo efusiva con emisión de lavas

Una erupción efusiva consiste en la emisión pasiva de flujos de lava. El volcán Yucamane, al igual que el volcán Calientes, han emitido en el pasado lavas de composición andesítica y dacítica, es decir, moderadamente viscosas. Estos flujos de lava alcanzaron menos de 5 km de distancia de la fuente (Rivera et al., 2020).

Actualmente, si se produjera una erupción efusiva, las lavas serían similares a las emitidas en épocas anteriores, es decir, de composición andesítica o dacítica. En el caso del volcán Yucamane,

dichas lavas tendrían que rellenar el cráter para posteriormente desplazarse por los flancos del volcán. Para que ocurra este proceso, las lavas deberían sobrepasar un volumen mayor a 0.2 km³ y, desde luego, no recorrerían grandes distancias a partir del cráter (menos de 6 km), por lo que se podría predecir su curso. En el caso del volcán Calientes, las lavas descenderían libremente por los flancos del volcán y del domo para luego canalizarse por algunas quebradas que drenan de dicho volcán.

Asociado a cualquier erupción efusiva, puede presentarse el descongelamiento de la nieve o hielo que se encuentra eventualmente en la cumbre del volcán, entre los meses de diciembre a marzo. En consecuencia, se podría dar lugar a la formación de lahares o flujos de lodo. Estos flujos de barro, al recorrer las partes bajas, serían más peligrosos que las lavas.

4.3.5 Erupción de tipo pliniana (IEV 4-5)

Las erupciones plinianas son las erupciones explosivas más violentas debido a que el magma, en la mayoría de los casos, es ácido y posee alto contenido de gases. Las columnas eruptivas constituidas de ceniza, lapilli de pómez y gases suelen alcanzar alturas mayores a los 20 km y los materiales emitidos pueden afectar áreas de más de 800 km² (Cas & Wright, 1987). Durante estas erupciones se generan voluminosas caídas de lapilli de pómez y ceniza que viajan a centenas y miles de kilómetros del volcán. Asimismo, se pueden generar flujos y oleadas piroclásticas. También es frecuente encontrar lahares asociados a este tipo de erupciones a decenas y cientos de kilómetros.

En el sur del Perú, los volcanes Misti, Ubinas, Ticsani, Huaynaputina, Ampato y Sara Sara han presentado erupciones plinianas (Mariño & Thouret, 2003; Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011; Rivera et al., 2014; Samaniego et al., 2016; Rivera et al., 2020). La erupción de hace 2000 años AP del volcán Misti fue de tipo pliniano (IEV 5; Harpel et al., 2011) y generó un depósito de caída de pómez que tuvo un volumen de aproximadamente 1.4 km³. Este depósito tiene entre 10 cm a 20 cm de espesor en toda el área de Arequipa (a más de 12 km de distancia del cráter del volcán). Asimismo, la erupción produjo flujos piroclásticos de 0.01 km³. Estos depósitos poseen espesores métricos, a más de 11 km de

distancia del cráter. Además, la erupción dio lugar a depósitos de lahares que alcanzaron más de 20 km de distancia (Harpel et al., 2011).

Las erupciones plinianas del Yucamane son poco comunes, mientras que en el volcán Calientes no se han distinguido depósitos asociados a este tipo de erupciones. En tal sentido, la probabilidad de ocurrencia de una erupción pliniana en el Yucamane es baja, mientras que en el Calientes es aún más baja. En caso de la ocurrencia de una erupción pliniana en el Yucamane o Calientes, las tefras expelidas viajarían principalmente al oeste y este, a más de 100 km de distancia, y causarían impactos severos en los poblados, ganados, tierras de cultivo y obras de infraestructura (reservorios de agua, canales, etc.) localizadas en sus inmediaciones. Los poblados más afectados serían aquellos ubicados en las provincias de Candarave y Tarata.

Igualmente, durante la erupción se generarían flujos piroclásticos que podrían recorrer distancias mayores de 6 km del volcán, mayor a lo ocurrido durante la erupción subpliniana del Yucamane de hace 3270 años AP. Estos flujos afectarían centros poblados cercanos al volcán (Santa Cruz, Yucamane Pampa, Patapatani), obras de infraestructura (canales de agua, etc.) y terrenos de cultivo localizados cerca del volcán.

Las erupciones plinianas también podrían generar lahares en el Yucamane, especialmente si los flujos y oleadas piroclásticas se emplazan sobre la cobertura de hielo o nieve presente en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo en la cumbre del volcán, lo cual podría originar su fusión (Major & Newhall, 1989). Los lahares pueden descender por las quebradas que drenan del volcán Yucamane hacia los ríos Callazas y Caliente e, incluso, por quebradas que drenan por los volcanes Calientes y Yucamane Chico, lo cual causaría graves daños en terrenos de cultivo, carreteras, puentes, etc. Durante una erupción pliniana, el alcance de los lahares sería mayor a 30 km, lo que implicaría que la laguna Aricota sea llenada con sedimentos volcánicos.

5. Resultados: mapas de peligros del complejo Yucamane Calientes

Se han elaborado cuatro mapas de peligros que consideran una potencial erupción del volcán Yucamane y el volcán Calientes. En efecto, se presenta un mapa proximal de peligros múltiples (peligros por flujos piroclásticos, flujos de lava, eyección de proyectiles balísticos, avalanchas de escombros y lahares). Asimismo, se presenta un segundo y tercer mapa de peligros por caídas piroclásticas o de tefras, y un cuarto mapa de peligros por lahares para áreas mediales y distales.

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

5.1 Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal

El mapa principal muestra tres zonas de peligro: alto, moderado y bajo peligro, determinadas para flujos piroclásticos, flujos de lava, lahares, proyectiles balísticos y avalanchas de escombros. Producto de esta integración se tiene el mapa principal que considera peligros múltiples (Figura 12). A continuación, se describen las zonas de peligro.

5.1.1 Zona de alto peligro (rojo)

Comprende un área semicircular que involucra el cono volcánico, así como diversas quebradas y valles que drenan del complejo volcánico Yucamane-Calientes, las cuales pueden ser severamente afectadas por la ocurrencia de lahares (flujos de lodo), flujos piroclásticos, flujos de lava, proyectiles balísticos y avalanchas de escombros. Cualquier tipo de erupción puede afectar dicha área, inclusive las de baja magnitud (IEV 1-2), como las ocurridas durante el Holoceno. Como se ha mencionado anteriormente, la probabilidad de ocurrencia de erupciones vulcanianas es

mayor en el Yucamane debido a que episodios similares ocurrieron de manera recurrente durante el Holoceno; en tanto, en el volcán Calientes la probabilidad de ocurrencia es menor.

Los límites de la zona de alto peligro se encuentran entre 1 km y 5 km de distancia de los cráteres de ambos volcanes (Figura 12). Las mayores distancias (3-5 km del cráter) se encuentran en los sectores sur, sureste, este y noreste del volcán Yucamane, mientras que las menores distancias (1-2 km del cráter) están al pie del flanco norte del volcán Calientes.

Los límites obtenidos de la zona de alto peligro coinciden con el alcance de un gran número de flujos de lavas del Yucamane que se encuentran entre los 3 km y 5 km de distancia desde su punto de emisión (Figuras 5 y 7). Por otro lado, en varios volcanes del sur peruano, los proyectiles balísticos generados durante erupciones vulcanianas (IEV 1-2) han alcanzado distancias que se limitan a las zonas muy proximales al cráter, típicamente menores a 3 km. Por ejemplo, durante la erupción del volcán Ubinas 2006-2009, el alcance máximo de los proyectiles balísticos fue cercano a 2.5 km (Rivera et al., 2010) y, durante la erupción del volcán Sabancaya 1990-1998, alcanzó menos de 1 km del cráter (Thouret et al., 1994). Igualmente, gran parte de los flujos piroclásticos generados durante erupciones vulcanianas recorrieron distancias menores a 6 km del volcán. Por ejemplo, durante la erupción del volcán Tungurahua de 2010 (Ecuador) se generaron flujos piroclásticos que se emplazaron por las quebradas de los flancos sur y sureste, a distancias cercanas al volcán (Hall et al., 2013).

En resumen, la zona de alto peligro (rojo) se encuentra a 2 km y 5 km de distancia al norte y sur, respectivamente. Esta zona puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones pequeñas a moderadas con IEV 1-2, por flujos de lava, lahares, proyectiles balísticos y avalanchas de escombros.

5.1.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona comprende la altiplanicie volcánica que colinda directamente con el complejo volcánico Yucamane-Calientes.

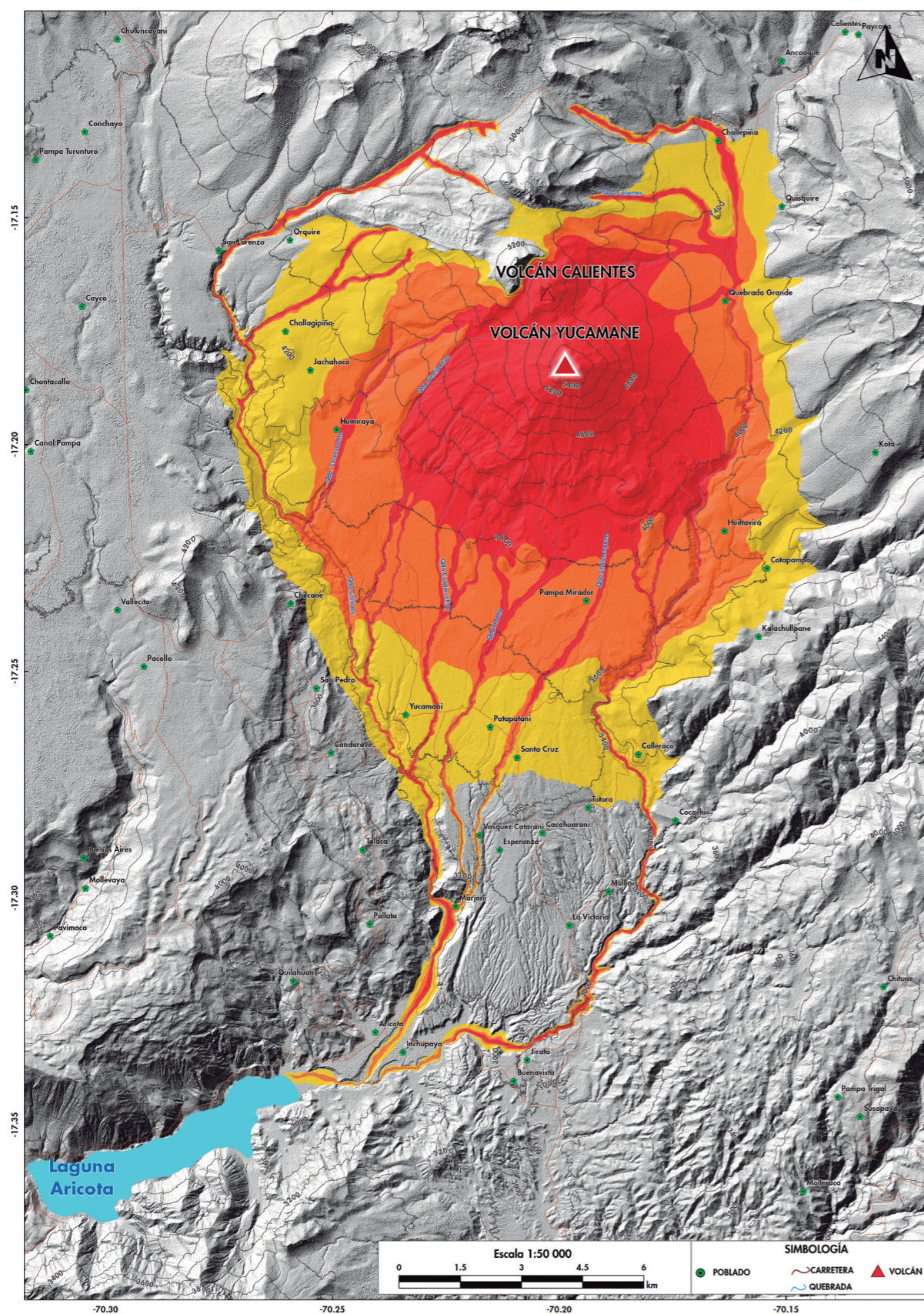


Figura 12. Mapa de peligro volcánico múltiple del área proximal del complejo Yucamane-Calientes.

Esta zona se extiende entre 5 km y 8 km de distancia al sureste, suroeste, oeste, este y sur del cráter del volcán Yucamane. Asimismo, se extiende entre 3 km y 6 km de distancia al pie de los flancos este y oeste del volcán Calientes y de 1 km a 3 km de distancia en el flanco norte de dicho volcán (Figura 12). En este último caso, la distancia alcanzada es menor respecto a la primera, ya que es limitada en el flanco norte por el volcán Yucamane Chico, el cual actúa como "barrera" topográfica. Esta zona puede ser cubierta por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares, proyectiles balísticos y avalanchas de escombros en caso de que la erupción explosiva sea moderada a alta (IEV 3-4).

Los límites de la zona de moderado peligro también coinciden con los máximos alcances de algunos flujos de lava emitidos por el volcán Yucamane que se encuentran alrededor de 5 km de distancia desde su punto de emisión. Por otro lado, el alcance máximo de proyectiles balísticos se encuentra dentro de un radio menor a 3 km, según datos tomados de Blong (1984). Esta distancia se encuentra dentro de los límites de la zona de moderado peligro.

Se consideró este escenario ya que al pie de los flancos este y noroeste del volcán Yucamane se encuentran depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza emitidos por dicho volcán hace aproximadamente 3270 años AP. Este tipo de erupciones han sido frecuentes en algunos volcanes del sur peruano, como la erupción del volcán Ubinas del año 1667 d. C. que emplazó flujos de escoria (IEV 3, Thouret et al., 2005).

En resumen, la zona de moderado peligro (naranja), que se encuentra entre 2 km y 8 km de distancia con respecto a los cráteres de los volcanes Yucamane y Calientes, puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones explosivas con IEV 3, así como por flujos de lavas, proyectiles balísticos y avalanchas de escombros.

5.1.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

Esta zona se proyecta entre 8 km y 11 km hacia los sectores suroeste, sur y sureste del volcán Yucamane, y entre 6 km y 9 km hacia los sectores este y oeste de dicho volcán, respectivamente. Asimismo, dicha zona se proyecta entre 7 km y 11 km al oeste, suroeste y este del volcán Calientes, y a menos de 3 km al norte de este

volcán, ello debido a la presencia del volcán Yucamane Chico que actúa como "barrera" topográfica que impediría el paso de flujos piroclásticos y avalanchas de escombros. Esta zona puede ser afectada por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares (flujos de barro) y avalanchas de escombros, en caso de que la erupción explosiva sea muy importante (IEV > 3).

Los alcances antes descritos coinciden con la evidencia del flujo piroclástico de pómez y ceniza presentado por el Yucamane durante el Pleistoceno superior, el cual recorrió alrededor de 8 km de distancia hacia el suroeste del volcán. Asimismo, coincide con la distancia alcanzada por el depósito de *blast* datado en $36\,450 \pm 250$ años AP que aflora hasta una distancia de 11 km al oeste del volcán Yucamane.

Es preciso mencionar que varios flujos piroclásticos generados durante erupciones plinianas con IEV 4-5 por volcanes del sur del Perú han recorrido distancias similares. Por ejemplo, los flujos piroclásticos de pómez y ceniza de la erupción del volcán Misti de hace 2000 años AP alcanzaron distancias de alrededor de 11 km del cráter del Misti (Thouret et al., 2001). Asimismo, según la literatura, los depósitos de lateral *blast* pueden recorrer decenas de kilómetros. Por ejemplo, el depósito de lateral *blast* del volcán Chachimbiri (Ecuador), ocurrido entre 3640 y 3510 años AP (Bernard et al., 2014), viajó a más de 10 km de distancia de dicho volcán.

En resumen, la zona de bajo peligro (amarillo) está localizada entre 3 km y 11 km de distancia de los cráteres de los volcanes Yucamane y Calientes. Esta puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones plinianas (IEV 4-5), depósitos de *blast* durante erupciones laterales dirigidas, además de avalanchas de escombros y lahares. Según el registro histórico, la probabilidad de ocurrencia de este tipo de erupciones es muy baja.

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

En el mapa de peligros se han definido tres zonas: alto peligro (en rojo), moderado peligro (en naranja) y bajo peligro (en amarillo). El foco de emisión sería el cráter de cualquiera de los volcanes, ya sea el Yucamane o Calientes.

Según el estudio estratigráfico y geocronológico del complejo volcánico Yucamane-Calientes, el volcán con mayor probabilidad de presentar ese tipo de erupción es el volcán Yucamane.

5.2.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal y comprende una zona semielíptica, con una

distancia de 43 km al este, 45 km al oeste y 48 km al suroeste del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de cenizas de algunos milímetros a centímetros de espesor. Está basado en la dispersión de cenizas de erupciones vulcanianas presentadas por los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti. En efecto, durante la erupción del volcán Sabancaya de 1988-1998 (IEV 2), a 8 km de distancia, se emplazaron caídas de cenizas de 1 cm de espesor

hacia el sector este (Thouret et al., 1994). En la erupción del volcán Ubinas de los años 2013-2017 (IEV 2) se emplazaron caídas de cenizas de entre 0.5 cm y 1 cm de espesor a 6 km de distancia. En la erupción vulcaniana del volcán Misti del siglo XV (IEV 2) se emplazaron caídas de cenizas de aproximadamente 4 cm de espesor a 10 km de distancia (Suní, 1999; Thouret et al., 2001).

km al oeste, más de 60 km al este y más de 128 km al sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes (Figura 14). Durante erupciones subplinianas o plinianas con IEV 3-4, esta área puede ser afectada por caídas de cenizas y lapilli pómez que formarían una capa de varios centímetros o decímetros de espesor. De manera local, en caso de una erupción altamente explosiva, se generarían caídas de pómez de menos de 0.5 m de espesor que cubrirían zonas adyacentes al complejo volcánico Yucamane-Calientes. Esta hipótesis está basada en el mapa de isópacas de la erupción del volcán Nevado del Ruiz (Colombia) de 1985 (IEV 3, Naranjo et al., 1986), el cual muestra que a 10 km de distancia de dicho volcán se emplazaron caídas de cenizas de 7 cm de espesor. También, durante la erupción de hace 3270 años AP del volcán Yucamane, se emplazaron caídas de cenizas de al menos 40 cm de espesor a 6 km de distancia. En el caso del volcán Tungurahua (Ecuador), en la erupción de agosto de 2006 de IEV 3, se reportaron espesores de caídas de cenizas de entre 4 cm y 5 cm a 10 km de distancia del cráter (Eychenne et al., 2012). La erupción del volcán Ticsani de hace 11 000 años AP (IEV 4) emplazó caídas de cenizas de alrededor de 3 m de espesor a 10 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003).

5.2.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Los límites de la zona de moderado peligro se hallan aproximadamente entre 43 km y 110 km al oeste, y entre 43 km a más de 83 km al este del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de cenizas de varios milímetros de espesor. Este escenario está basado en la dispersión de cenizas de la erupción vulcaniana del volcán Sabancaya de 1990-1998 (IEV 2), donde caídas de cenizas de 1 mm alcanzaron cerca de 30 km de distancia del cráter en dirección este (Thouret et al., 1994).

5.2.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro tiene una configuración elíptica, con límites a distancias de más de 240 km al este, 125 km al oeste y 100 km al sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área sería afectada por caídas de cenizas de menos de 1 mm de espesor. El volcán Ubinas, en su erupción de 2019, emplazó depósitos de caídas de cenizas de menos de 1 mm de espesor a 90 km al sureste del volcán Ubinas.

5.3.2 Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de moderado peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con límites a distancias de 215 km a 290 km al noroeste, de 120 km a 170 km al norte y a más de 170 km al sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Durante erupciones subplinianas o plinianas con IEV 3-4, esta área puede ser afectada por caídas de cenizas de varios milímetros de espesor. Se basa en el mapa de isópacas de las erupciones de los volcanes Nevado del Ruiz de noviembre de 1985 y Tungurahua de agosto de 2006 (IEV 3, Naranjo et al., 1986; Eychenne et al., 2012). En el caso del volcán Nevado del Ruiz, se emplazaron caídas de cenizas de cerca de 2 cm de espesor a 30 km de distancia y, en el caso del volcán Tungurahua, se reportaron espesores de 0.7 cm a 0.8 cm a la misma distancia. Adicionalmente, este escenario está basado en la erupción subpliniana de hace 3270 años AP del volcán Yucamane, la cual, a 20 km de distancia, generó depósitos de menos

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

5.3.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal y se halla a una distancia aproximada de más de 215

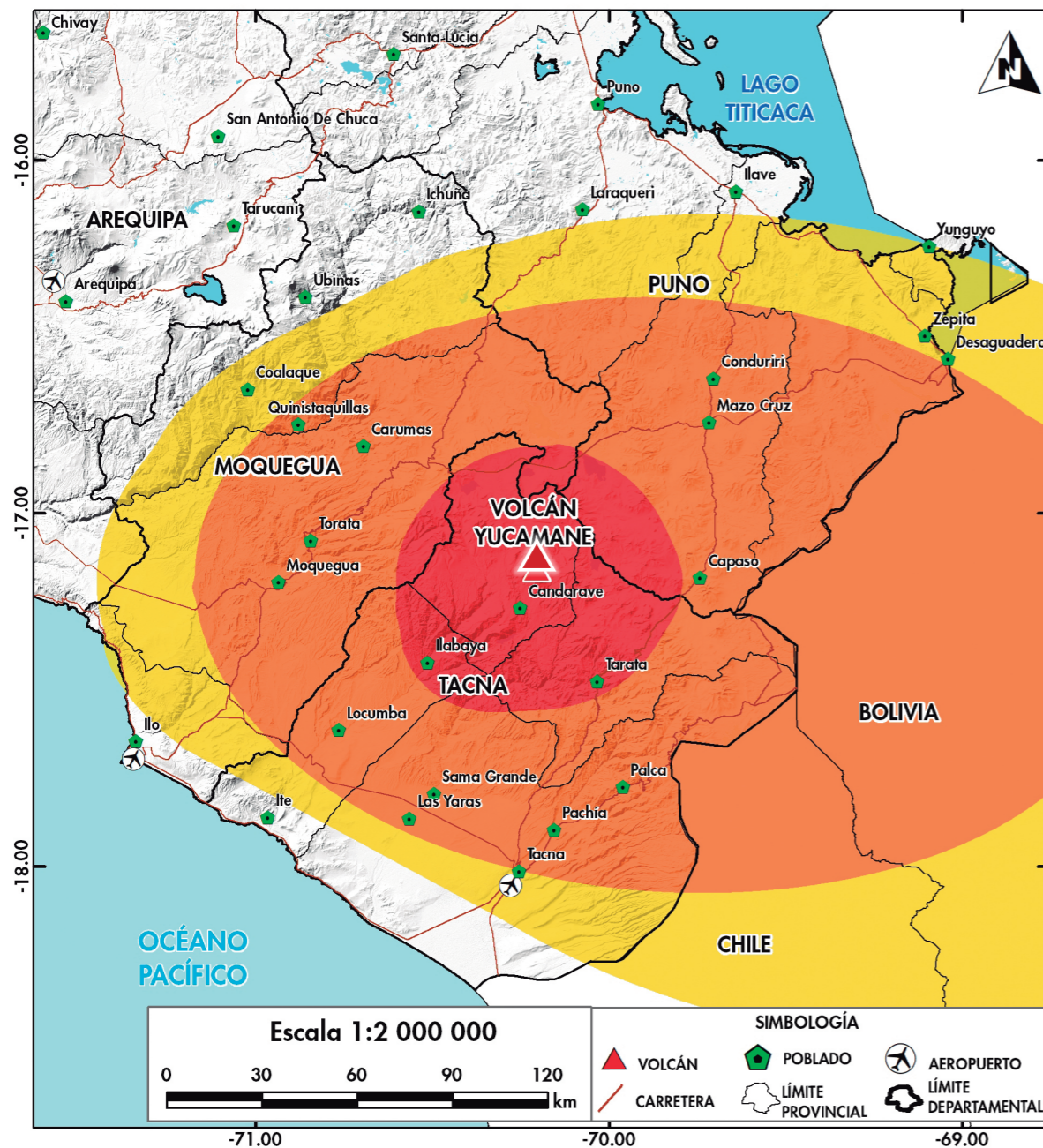


Figura 13. Mapa de peligros por caídas de cenizas del complejo Yucamane-Calientes para un escenario de erupción moderada de tipo vulcaniana (IEV 1-2).

de 1 cm de espesor. La erupción del volcán Ticsani de hace 11 000 años AP (IEV 4) emplazó caídas de cenizas de alrededor de 40 cm de espesor a 30 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).

5.3.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de moderado peligro. Esta zona tiene

una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 290 km al oeste, más de 170 km al norte y más de 280 km al sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes (Figura 14). Esta área puede ser afectada por caídas de cenizas de menos de 1 mm de espesor. Este escenario está basado en el mapa de isópacas de las erupciones de los volcanes Nevado del Ruiz de noviembre de 1985 y Tungurahua de agosto de 2006 (IEV 3, Naranjo et al., 1986; Eychenne et al., 2012). En efecto, en el caso del volcán Nevado del Ruiz, su erupción emplazó caídas de cenizas de entre 2 mm y 3 mm de espesor a

50 km de distancia. Además, se basa también en la erupción pliniana del volcán Hudson (Chile) de 1991 que tuvo un IEV 4. Durante esta erupción se emplazaron cenizas de menos de 10 cm de espesor a más de 120 km de distancia al sureste de dicho volcán (Naranjo et al., 1993). Asimismo, considera la erupción pliniana del volcán Chaitén de 2008 que tuvo un IEV 4. Esta erupción emitió cenizas que alcanzaron a medir menos de 1 cm de espesor a más de 150 km al sureste de dicho volcán (Watt et al., 2009).

5.4 Mapa de peligros por lahares

En el sur del Perú se han realizado pocas estimaciones de volúmenes de lahares. Solo se tienen cálculos para quebradas que descienden por los flancos del volcán Misti, además del río Chili que discurre entre los volcanes Misti y Chachani (Delaite et al., 2005). En dicho volcán, volúmenes de lahares del orden de 0.5 a 6 millones de m³ son frecuentes y ocurren cada

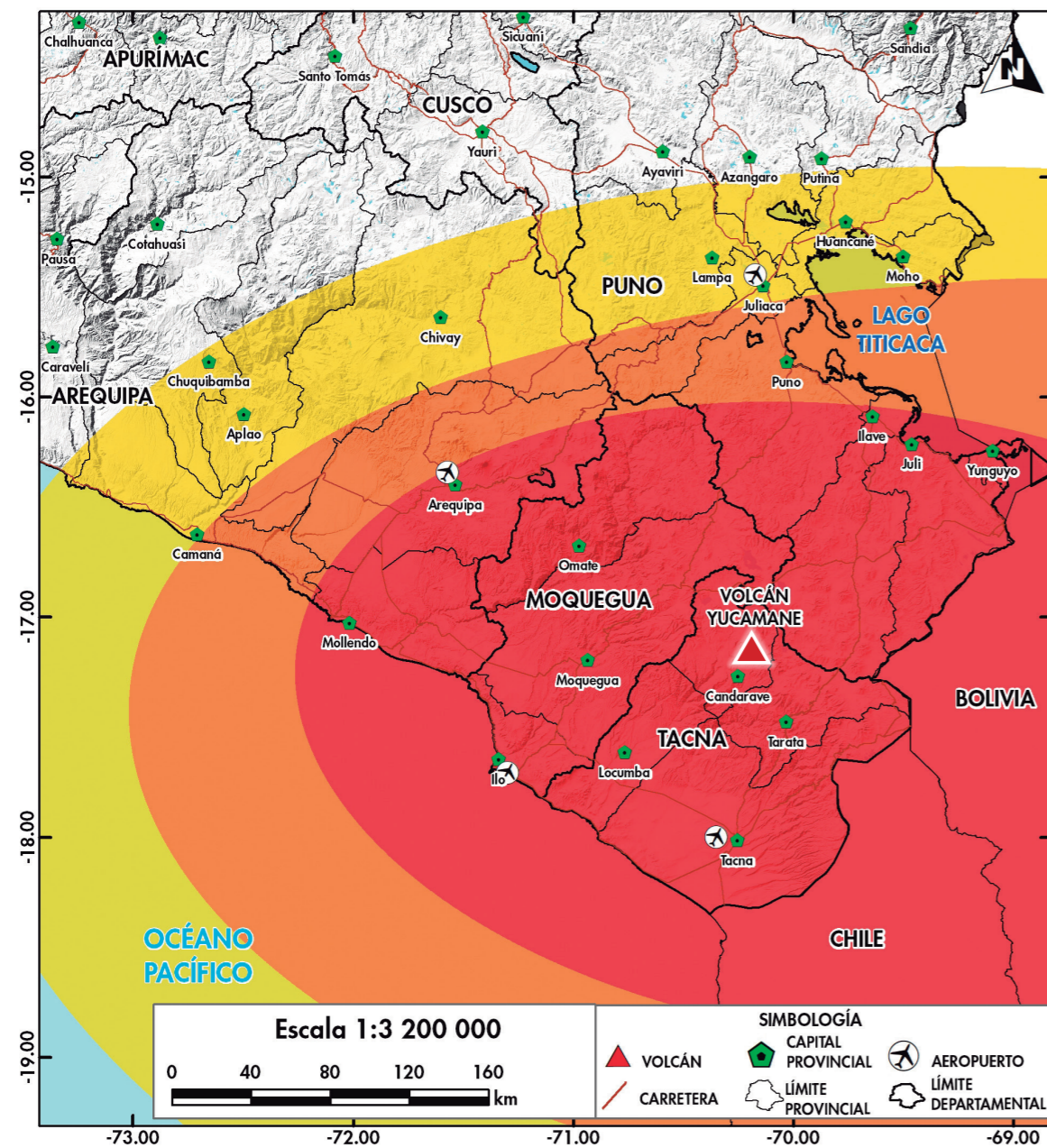


Figura 14. Mapa de peligros por caídas de cenizas del complejo Yucamane-Calientes para un escenario de erupción explosiva de tipo subpliniana o pliniana (IEV 3-4).

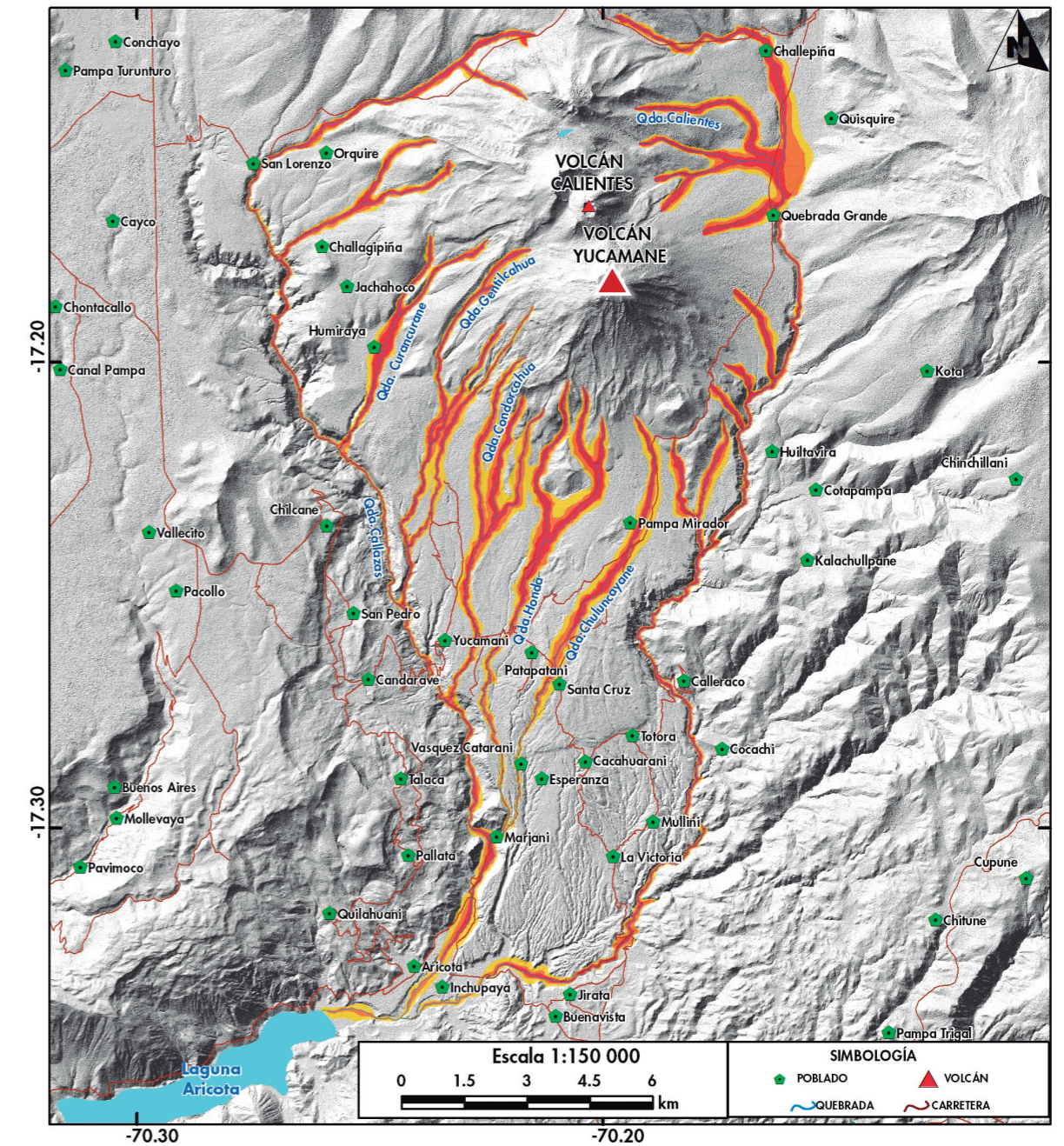


Figura 15. Mapa de peligros por lahares (huaicos o flujos de barro) del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

300 a 1000 años, aproximadamente, y su origen está asociado a erupciones explosivas moderadas (IEV 1-2).

Para la construcción de escenarios de peligros por descenso de lahares del volcán Misti (Arequipa), asociados a lluvias intensas, Thouret et al. (2022) consideran volúmenes de lahar de 150 000 m³, 350 000 m³ y 500 000 m³. Tomando en consideración dichos datos y las condiciones climáticas de la zona, así como la inexistencia de un casquete glaciar en el Yucamane-Calientes, se escogió un volumen de 300 000 m³ para lahares de poco volumen que, se estima, son los más frecuentes. Adicionalmente, se consideraron volúmenes de 1 y 2 millones de m³ para lahares de importante volumen que son menos frecuentes.

El modelamiento de lahares se realizó sobre las principales quebradas ubicadas en los flancos del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Se escogió la cabecera de cada quebrada, es decir, la zona proximal roja del mapa de peligros.

En el mapa de peligros por lahares (Figura 15), la zona roja es considerada la zona de alto peligro y corresponde a las áreas que podrían ser afectadas por lahares de hasta 300 000 m³; dichos lahares podrían asociarse a erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1-2) y a lluvias intensas. La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de 1 millón de m³. La zona amarilla es considerada de bajo peligro y puede ser afectada por lahares de 2 millones de m³. Según el registro histórico, la probabilidad de ocurrencia de estos dos últimos tipos de eventos es muy baja.

En este mapa también se presenta el área (línea morada) que puede ser afectada por flujos piroclásticos en caso de una explosión lateral dirigida "blast", ligada al crecimiento de un domo en el interior del volcán Yucamane que desencadenaría avalanchas de escombros y la emisión de flujos piroclásticos. Para delimitar la zona, se consideró el valor 0.22 para la relación H/L (donde H es altura y L distancia recorrida para flujos piroclásticos). Los valores de coeficiente H/L cercanos a 0.2 son frecuentes en los flujos piroclásticos tipo *blast*. Estos se originan por la explosión de un domo o colapso de un domo en crecimiento. Para este escenario, los centros de emisión considerados fueron las cumbres de los volcanes Yucamane y Calientes.

Bajo estos parámetros, el límite del depósito de *blast* alcanza su mayor distancia hacia el sector sur del Yucamane, donde recorre hasta 13 km,

mientras que hacia el oeste alcanza hasta los 9 km de distancia y, hacia el este y sureste, los 7 km de distancia, aproximadamente. Al norte, recorre un promedio de 2 km y 12 km de distancia respecto al volcán Yucamane.

Conclusiones

- El complejo volcánico Yucamane-Calientes está conformado por dos volcanes alineados en dirección noroeste y sureste, los cuales, de norte a sur, son el volcán Calientes y el volcán Yucamane. Durante el Holoceno, el volcán Yucamane presentó, al menos, tres erupciones explosivas moderadas de tipo vulcanianas. Hace aproximadamente 3270 años AP, se produjo una erupción pliniana que emplazó flujos y caídas piroclásticas.
- Se han identificado cinco escenarios eruptivos en caso de una reactivación del volcán Yucamane o del volcán Calientes. De ellos, el más propenso a reactivarse por presentar actividad reciente es el volcán Yucamane. Los escenarios de mayor a menor probabilidad son los siguientes: 1) erupción de tipo vulcaniana (IEV 1-2); 2) erupción explosiva subpliniana (IEV 3); 3) erupción con crecimiento de domo y colapso de un sector del volcán; 4) erupción efusiva con emisión de lavas y 5) erupción pliniana (IEV 4-5). En cualquiera de los casos, los productos emitidos pueden afectar los poblados, terrenos de cultivo y obras de infraestructura localizadas en inmediaciones del volcán.
- Con base en los estudios efectuados, se presentan cuatro mapas de peligro volcánico incluidos dentro de un solo formato. Estos mapas son el mapa proximal de peligros múltiples (por flujos de lava, flujos piroclásticos, proyectiles balísticos, avalanchas de escombros). Este mapa muestra una zona de alto peligro (rojo) que se encuentra entre 1 km y 5 km de distancia del cráter del volcán Yucamane; la zona de moderado peligro (naranja), entre 5 km y 8 km de distancia del volcán; y la zona de bajo peligro (amarillo), entre 6 km y 11 km del complejo volcánico Yucamane-Calientes.
- En el mapa de peligros por caídas de cenizas para un escenario de tipo vulcaniano (IEV 1-2) se muestra que la zona de alto peligro (rojo) se halla a una distancia de entre 43 km a 45 km al este, y 48 km al suroeste del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de varios milímetros a centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se halla aproximadamente entre 43 km y 110 km al oeste y entre 43 km a más de 83 km al este del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de algunos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, con una distancia de más de 240 km al este, 125 km al oeste y 100 km al sur del del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de menos de 1 mm de espesor.
- En el mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de tipo subpliniano-pliniano (IEV 3-4) se distingue que la zona de alto peligro (rojo) tiene una configuración elíptica alrededor del complejo volcánico Yucamane-Calientes, con una distancia de más de 215 km al oeste, más de 60 km al este y más de 128 km al sur. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas y lapilli pómez que formarían una capa de varios centímetros o decímetros de espesor. De manera local, en caso de una erupción altamente explosiva, se generarían caídas de lapilli de pómez que formarían una capa de menos de 0.5 m de espesor en un radio de 15 km alrededor del complejo volcánico Yucamane-Calientes. La zona de moderado peligro (naranja) tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 215 km a 290 km al noroeste, de 120 km a 170 km al norte y a más de 170 km al sur. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas de más de 1 mm de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica alrededor del complejo volcánico Yucamane-Calientes, con una distancia de más de 290 km al oeste y de más de 280 km al sur. En esta zona se depositarían cenizas de menos de 0.1 mm de espesor.
- En el mapa de peligros por lahares, la zona roja, considerada de alto peligro, puede ser afectada por lahares de poco volumen (de hasta 300 000 m³); la zona naranja, de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de hasta 1 millón de m³, mientras que la zona amarilla, de bajo peligro, puede ser afectada por lahares de hasta 2 millones de m³. Por otro lado, el límite de alcance de los flujos piroclásticos generados por una eventual erupción lateral dirigida se sitúa entre 9 km y 13 km del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

Referencias

- Bernard, B., Hidalgo, S., Robin, C., Beate, B., Quijozaca, J. (2014). The 3640-3510 BC rhyodacite eruption of Chachimbiro compound volcano, Ecuador: a violent directed blast produced by a satellite dome. *Bulletin of Volcanology*, 76: 849-868
- Bignami, C., Bosi, V., Costantini, L., Cristiani, C., Lavigne, F., Thierry, P., eds. (2012). *Handbook for volcanic risk management: prevention, crisis management, resilience*. Orleans: MIAVITA team, 198 p.
- Blong, R.J. (1984). *Volcanic hazards: A sourcebook on the effects of eruptions*. Sydney: Academic Press, 424 p.
- Blong, R.J. (2000). Volcanic hazard and risk management. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R., Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 1215-1228.
- Brantley, S.R., Meyers B., (1997). *Mount St. Helens - From 1980 to 1996*. United States Geological Survey Factsheet 07097
- Cas, R.A.F., Wright, J.V. (1987). *Volcanic successions: modern and ancient*. London: Chapman & Hall, 528 p.
- Clapperton, C.M. (1993) - *Quaternary Geology and Geomorphology of South America*, Elsevier, Amsterdam, 779 pp.
- Delaite, G., Thouret, J.-C., Sheridan, M.F., Stinton, A., Labazuy, P., Souriot, T., van Westen, C. (2005). Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, Supplement, 140: 209-231.
- De Silva S.L., Francis P.W., (1991). *Volcanoes of the Central Andes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 219 p.
- Eychenne, J., Le Pennec, J.-L., Troncoso, L., Gouhier, M., Nedelec, J.-M. (2012). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 74(1): 187-205.
- Francis, P.W. (1993). *Volcanoes: a planetary perspective*. New York: Oxford University Press, 443 p.
- Fisher, R.V., Heiken, G. (1982). Mt. Pelée, Martinique-May 18 and 20, 1902, pyroclastic flows and surges. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 13; 339-371.
- Folch, A., Jorba, O., Viramonte, J. (2008). Volcanic ash forecast-application to the May 2008 Chaiten eruption. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 927-940.
- Gerbe, M.-C., Thouret, J.-C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66(6): 541-561.
- Hall, M., Steele, A., Mothes, P., Ruiz, M. (2013). Pyroclastic density currents (PDC) of the 16-17 August 2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador: Geophysical registry and characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 265; 78-93.
- Harpel, C.J., De Silva, S.L., Salas, G. (2011). The 2ka eruption of Misti volcano, southern Peru – the most recent plinian eruption of Arequipa’s iconic volcano. Boulder, CO: *Geological Society of America*, 72 p. Special Paper, 484.
- INEI (2018). *Censos Nacionales 2017: XII de Población y VII de vivienda. Resultados definitivos a nivel provincial y distrital: Provincias Tacna, Candarave, Jorge Basadre y Tarata*. Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- 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.
- Kelfoun, K., Samaniego, P., Palacios, P., Barba, D. (2009). Testing the suitability of frictional behaviour for pyroclastic flow simulation by comparison with a well-constrained eruption at Tungurahua volcano (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 71(9): 1057-1075.
- Lowe, D.R., Williams, S.N., Leigh, H., Connor, C. B., Gemell, J. B., Stoiber R.E. (1986). Lahars initiated by the 13 November 1985 eruption of nevado del Ruiz, Colombia, *Nature* 324: 51-53.
- 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.
- Malin, M.C., Sheridan, M.F. (1982). Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 217(4560): 637-640.
- Mamani, M.; Worner, G., Sempere, T. (2010). Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13 °S to 18 °S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Geological Society of America Bulletin*, 122, 162-182
- Mariño, J., Thouret, J.C. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros de volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, (95): 7-31.
- Mayle, F. E., Burn, M. J., Power, M., Urrego, D. H. (2009). Vegetation and fire at the Last Glacial Maximum in tropical South America. In: Vimeux, F., Sylvestre, F., Khodri, M. eds. Past climate variability in South America and surrounding regions: from the Last Glacial Maximum to the Holocene. Berlin: Springer, *Developments in Paleoenvironmental Research* 14, p.89-112.
- Miller C., (1989). Potencial Hazards From Future Volcanic Eruptions in California. *U.S. Geological Survey Bulletin*: 1847, United States, 17 p.
- Morrissey, M.M., Mastin, L.G. (2000). Vulcanian eruptions. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 463-475.
- Nakada, S. (2000). Hazards from pyroclastic flows and surges. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 945-955.
- Naranjo, J., Sigurdsson, H., Carey, S., Fritz, W. (1986). Eruption of the Nevado del Ruiz volcano, Colombia, on 13 November 1985: tephra fall and lahars, *Science*, 233(4767): 961-963.
- Naranjo, J., Moreno, H., Banks, N. (1993). La erupción del volcán Hudson en 1991 (46°S), Región XI, Aisén, Chile. *Boletín Servicio Nacional de Geología y Minería* N°44, Santiago, Chile.
- Norabuena, E., Dixon, T.H., Stein, S., Harrison, C.G.A. (1999). Decelerating Nazca-South America and Nazca-Pacific plate motions. *Geophysical Research Letters*, 26(22): 3405-3408.
- 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.
- Quang, C.X., Clark, A.H., Lee, J.K.W. (2005). Response of supergene processes to episodic Cenozoic uplift, pediment erosion, and ignimbrite eruption in the Porphyry Copper Province of southern Peru. *Economic Geology*, 100; 87-114.
- Rivera, M., Thouret, J.-C., Gourgaud, A. (1998). Ubinas, el volcán más activo del sur del Perú desde 1550: geología y evaluación de las amenazas volcánicas. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (88): 53-71.
- 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(1-2): 19-34.
- Rivera, M., Thouret, J.-C., Samaniego P., Le Pennec J.-L. (2014). The 2006-2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis, magma recharge and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 270; 122-141.
- Rivera, M., Mariño, J., Samaniego, P., Delgado, R., Manrique, N. (2016). Geología y evaluación de peligros del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 61, 122 p.
- Rivera, M., Cueva, K., Le Pennec, J. L., Vela, J., Samaniego, P., Manrique, N., Soncco, Y. (2020). Geología y evaluación de peligros del volcán Sara Sara (Ayacucho). *Boletín N° 78 serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*. INGEMMET p. 159.
- Rivera, M., Samaniego, P., Vela, J., Le Pennec, J.L., Guillou, H., Paquette, J.L., Liorzou, C., (2020). The eruptive chronology of the Yucamane-Calientes compound volcano: A potentially active edifice of the Central Andes (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 393; 106787 10.1016/j.jvolgeores.2020.106787
- Samaniego, P., Valderrama, P., Mariño J., Van Wyk de Vries, B., Roche, O., Manrique, N., Chedeville C., Liorzou, C., Fidel L., Malnati, J., (2015). The historical (218±14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru). *Bulletin of Volcanology*, 77:51-69.
- Schilling, S.P. (1998). LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. U.S. Geological Survey, Open File-Report 98-638, 79 p.

- Siebert, L., Glicken, H., Ui, T. (1987). Volcanic hazards from Bezymianny- and Bandai-type eruptions, *Bulletin of Volcanology*, 49(1): 435-459.
- Siebert, L., Simkim, T., Kimberley, P. (2011) - *Volcanoes of the World*. 3. ed. Washington, D.C.: Smithsonian Institution, Beckerel, CA: University of California Press, 551 p.
- Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S.R., Rymer H., Stix, J. eds (2000). *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, 1442 p.
- Thouret, J.-C., Guillaude, R., Huamán, D., Gourgaud, A., Salas, G., Chorowicz, J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin Société Géologique de France*, 165(1): 49-63.
- Thouret, J.C., Dávila, J., Eissen, J.P. (1999). Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, A.D. 1600, southern Peru. *Geology*, 27(5): 435-438.
- Thouret, J.C., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1593-1610.
- Thouret, J.C., Rivera, M., Worner, 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(6): 557-589.
- Thouret, J.-C., Ramírez, J., Gibert-Malengreau, B., Vargas, C., Naranjo, J., et al. (2007). Volcano-glacier interactions on composite cones and lahar generation: Nevado del Ruiz, Colombia, case study. *Annals of Glaciology*, 45(1): 115-127.
- Thouret, J.C., Jicha, B., Paquette J.-L., Cubukcu, E. (2016). A 25 myr chronostratigraphy of ignimbrites in south Peru: implications for the volcanic history of the Central Andes. *Journal of the Geological Society*. 173; 734-756.
- Tilling, R.I., ed. (1989). *Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos*, Santa Fé, Nuevo México, 2-3 julio 1989. [s.l.]: Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 125 p.
- Valdivia, D. (1874). *Historia de Arequipa*. Folletín El Deber, Arequipa, p. 109-111.
- Vela, J., (2015). *Estudio tefroestratigráfico de los depósitos asociados con las erupciones recientes del volcán Yucamane (Tacna)*. Tesis de Ing. Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 114 p.
- Watt, S.F.L., Pyle, D.M., Mather, T.A., Martin, R.S., Matthews, N.E. (2009). Fallout and distribution of volcanic ash over Argentina following the May 2008 explosive eruption of Chaitén, Chile. *Journal of Geophysical Research* 114 (B04207). doi: 10.1029/2008JB006219
- Ui, T., Takarada, S., Yoshimoto, M. (2000). Debris avalanches. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 617-626.
- Zamacola, J. (1888). *Apuntes para la historia de Arequipa*. Año de 1804. Arequipa: Imp. de La Bolsa, 98 p.

Información clave para ti

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

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



APP #IGP



Web CENVUL



REGEN

Complejo Yucamane-Calientes: vista desde el sector suroeste. Destaca a la derecha el volcán Yucamane, con una altura de 5495 m s. n. m.





@igp.peru



@igp_peru



@igp.peru



@igp_videos



@institutogeofisicodelperu



@igp.peru