

Informe
técnico

MAPA DE PELIGROS DEL VOLCÁN MISTI

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
Juan Cuno
David Valdivia
Ivonne Lazarte
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: volcán Misti y la ciudad de Arequipa

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
13	Los peligros volcánicos
13	Caída de piroclastos (tefras)
14	Flujos y oleadas piroclásticas
14	Lahares (flujos de lodo y escombros)
14	Flujos de lava
14	Avalanchas de escombros
15	Gases volcánicos
16	El volcán Misti
16	Historia eruptiva
18	Actividad histórica del volcán Misti
19	Datos y metodología para la elaboración de mapas
19	Metodología para la elaboración de mapas
19	<i>Softwares</i> empleados
21	Parámetros de entrada para posibles escenarios eruptivos
26	Resultados: mapas de peligros del volcán Misti
26	Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal
28	Mapa de peligros por caídas de ceniza durante erupción vulcaniana (IEV 2)
30	Mapa de peligros por caídas piroclásticas para una erupción subpliniana-pliniana (IEV 4-5)
32	Mapa de peligros por lahares
34	Conclusiones
35	Referencias

MISTI

**Elevación**

5822 m s. n. m.

**Región**

Arequipa

**Provincia**

Arequipa

**Última erupción**

1442-1470

**Población en un radio de 30 km**

1 031 807 personas

**Inicio de vigilancia en tiempo real**

2005

**Instrumentos y técnicas de vigilancia**

6 estaciones sísmicas
2 cámaras científicas
2 estaciones GNSS
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 volcán Misti, ayudará a que cada persona comprenda mejor la amenaza que enfrenta en su entorno, y que la prevención debe estar basada en información científica oficial, confiable y oportuna. Esta es nuestra labor en el IGP, hacer "ciencia para protegernos, ciencia para avanzar".

RESUMEN

El volcán Misti es uno de los volcanes activos del sur peruano, cuya cima está ubicada a 17 km del centro de la ciudad de Arequipa. Su última erupción de gran magnitud (Índice de Explosividad Volcánica [IEV] 5) ocurrió hace aproximadamente 2000 años AP (antes del presente), mientras que su más reciente erupción moderada tuvo lugar en el siglo XV, con un IEV 2. Con base en estudios vulcanológicos previos efectuados sobre dicho volcán, además de datos de campo, se propone y describe en este informe seis escenarios eruptivos en caso de una eventual erupción de dicho volcán. Desde el más probable al menos probable, podemos mencionar los siguientes: 1) escenario de erupción vulcaniana (IEV 1-2); 2) escenario de erupción subpliniana a pliniana (IEV 3-4); 3) escenario de erupción pliniana (IEV 5); 4) escenario de erupción efusiva, con emplazamiento de flujos de lavas; 5) escenario de erupción con colapso de domos de lava; y 6) erupción con colapso de flanco y emplazamiento de avalanchas de escombros.

Dichos escenarios fueron considerados en la elaboración de cuatro mapas de peligros, todos presentados en un solo póster: 1) mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal, que muestra las áreas que pueden ser afectadas por flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares, avalanchas de escombros y caída de proyectiles balísticos, en caso de erupciones volcánicas. 2) Mapa de peligros por caídas de ceniza para un escenario de erupción vulcaniana (IEV 1-2), donde la zona de alto peligro (rojo) comprende un radio aproximado de 12 km a 14 km alrededor del cráter del volcán Misti. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa con un espesor menor a 5 cm. La zona de moderado peligro (naranja) tiene una configuración elíptica, cuyos límites se hallan aproximadamente entre 55 km y 73 km al este, y 58 km al oeste del cráter del volcán Misti. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de algunos centímetros a milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración

elíptica, cuyos límites se hallan a una distancia de más de 110 km al oeste, 74 km al norte, y 162 km al este del volcán Misti. Durante erupciones vulcanianas, esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas que formarían una capa de ceniza menor a 1 mm de espesor. 3) Mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de erupción subpliniana-pliniana (IEV 4-5), donde la zona de alto peligro (rojo) corresponde al área proximal y se halla a una distancia de más de 350 km al este, 400 km al oeste, 150 km al norte y más de 270 km al sur del volcán Misti. Dicha zona puede ser afectada por la caída de ceniza y lapilli de pómez que formarían una capa de más de 1 cm de espesor.

De manera local, durante erupciones subplinianas o plinianas con IEV 4-5, las zonas aledañas al Misti, en un radio de 10 km a 12 km alrededor del volcán, pueden ser afectadas por caída de lapilli de pómez y ceniza que formarían una capa de 1.0 m a 0.5 m de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, cuyo límite está a una distancia de más de 350 km al este, de 400 km a 540 km al oeste, y de más de 270 km al sur. Durante erupciones subplinianas a plinianas con IEV 4-5, esta zona puede ser afectada por caída de cenizas de más de 1 mm de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 300 km al este, de más de 540 km al oeste y más de 270 km al sur del Misti. Dicha zona puede ser afectada por caída de ceniza de más de 0.1 mm de espesor. 4) Mapa de peligros por lahares, donde la zona roja es considerada la zona de alto peligro y es aquella con mayor probabilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos asociados a erupciones moderadas (IEV 1-2) o lluvias intensas. La zona naranja, de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de moderado volumen y, finalmente, la zona amarilla, considerada de bajo peligro o de menor probabilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos, ambas asociadas a erupciones importantes y lluvias intensas.

1. Introducción

El Misti (16°16' S, 71°22' O, 5822 m s. n. m.) es un volcán activo del sur del Perú que forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC) (De Silva y Francis, 1991; Figura 1). Dicho volcán se construyó en el borde oeste de la cordillera occidental de los Andes, donde limita por el sureste con el extinto volcán Pichu Pichu; por el noroeste, con el complejo volcánico Chachani; por el norte y este, con la altiplanicie Puna y, por el suroeste, con la cuenca sedimentaria de Arequipa, donde se halla la ciudad del mismo nombre.

El vulcanismo presente a lo largo de la ZVC es generado por la subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental sudamericana. Actualmente, la dirección de convergencia entre la placa de Nazca y la placa sudamericana es de N78°E, con una velocidad de 5-7 cm/año (Norabuena et al., 1999). La cadena volcánica se desarrolló aproximadamente a 240 km del borde de la placa sudamericana, paralela a la fosa Perú-Chile. Esta cadena volcánica está constituida por volcanes como el Sara Sara, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Tutupaca, y Casiri; complejos volcánicos como

el Sabancaya-Ampato, Coropuna, Chachani y Yucamane-Calientes; complejos de domos como el Ticsani y Purupuruni y, finalmente, campos de volcanes monogenéticos como Huambo-Andahua y Yura. De los volcanes citados anteriormente, seis volcanes han presentado, por lo menos, una erupción durante el período denominado "histórico", es decir, posterior a la llegada de los españoles (1532 d. C.). Estos son el Sabancaya, Misti, Ubinas, Ticsani, Huaynaputina y Tutupaca.

El cráter del volcán Misti se emplaza a 17 km del centro de la ciudad de Arequipa. Nuevos asentamientos humanos situados al noreste y norte de la ciudad, en los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Paucarpata, Mariano Melgar y Chiguata, se vienen asentando a menos de 12 km de distancia de la cima.

El objetivo del presente estudio es mostrar los mapas de peligros del volcán Misti, información útil para ser utilizada por parte de la sociedad, instituciones y autoridades del SINAGERD (Gobierno Regional de Arequipa, Municipalidad Provincial de Arequipa, etc.) para el ordenamiento territorial, la formulación de obras de infraestructura, la elaboración de planes de contingencia, la mitigación y prevención del riesgo volcánico y el manejo de una eventual crisis volcánica del Misti.

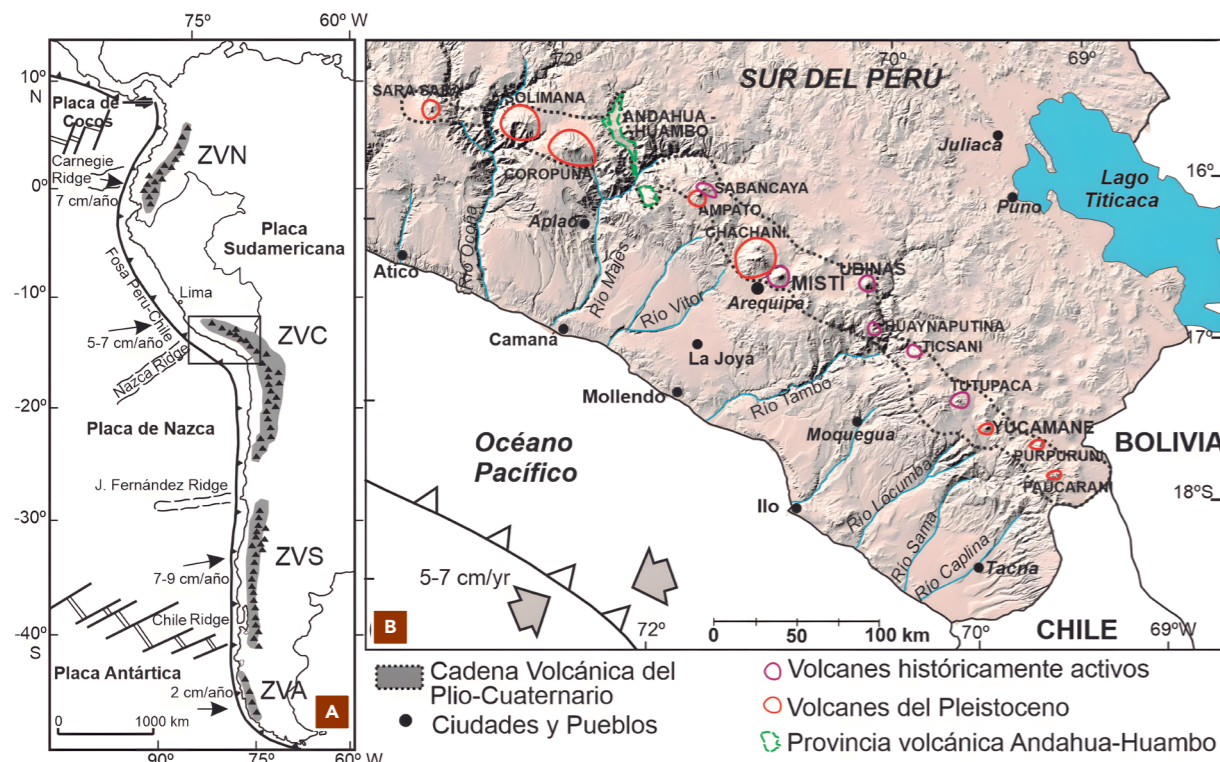


Figura 1. (a) Mapa de ubicación de las zonas volcánicas de Sudamérica: norte (ZVN), central (ZVC), sur (ZVS) y austral (ZVA). (b) El volcán Misti está ubicado en la cadena volcánica Pliocuaternaria del sur peruano, que corresponde a la Zona Volcánica Central de los Andes.

Los mapas de peligros volcánicos son documentos cartográficos que muestran el nivel de peligrosidad volcánica de las áreas adyacentes a un determinado volcán activo. El objetivo de dichos mapas es representar las zonas susceptibles de ser afectadas por uno o varios fenómenos volcánicos en caso de una erupción con determinadas características, definidos previamente con base en eventos pasados y la simulación de determinados procesos volcánicos. En estos mapas se representa cartográficamente la extensión probable de todos los productos que un volcán es capaz de generar durante una futura erupción y que pueden provocar daños en su entorno.

1.1 Condiciones climatológicas

Para el análisis de la temperatura y precipitación del área de estudio se consideraron datos estadísticos de cuatro estaciones meteorológicas: La Pampilla, Chiguata, El Frayle y Aguada Blanca, ubicadas en la ciudad del Arequipa y al norte del volcán Misti (Tabla 1). De ellas, las estaciones meteorológicas La Pampilla, Chiguata y El Frayle pertenecen al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), mientras que la estación meteorológica Aguada Blanca a la Autoridad Autónoma de Majes (AUTODEMA).

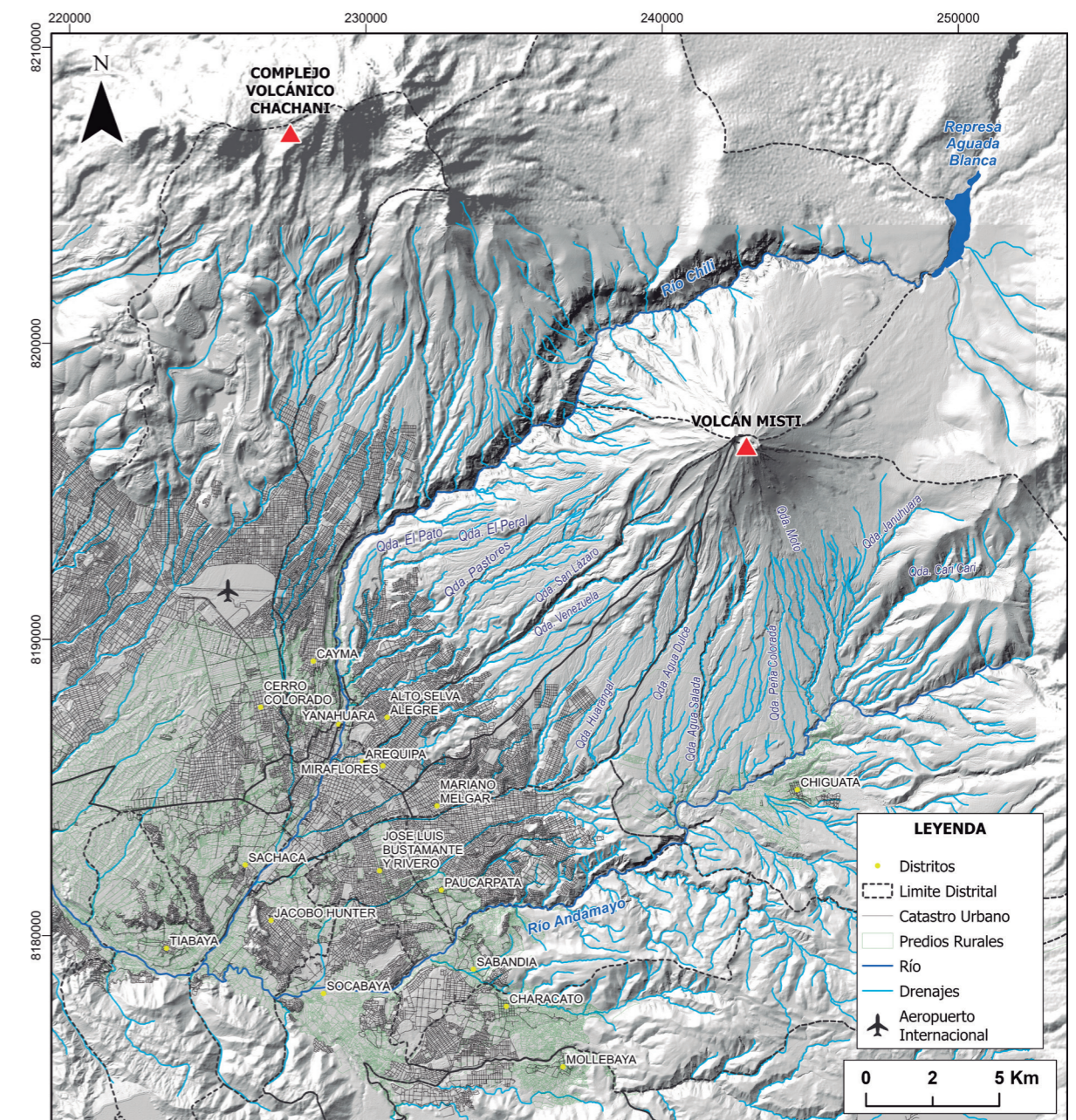


Figura 2. Mapa de ubicación del volcán Misti y la ciudad de Arequipa, donde habitan más de 1100 000 personas.

Tabla 1. Cuadro de estaciones meteorológicas ubicadas en la ciudad de Arequipa y al norte del volcán Misti.

Estación meteorológica	Coordenadas		Altitud (m s. n. m.)	Periodo de Registro	Cuenca
	Latitud	Longitud			
La Pampilla	16° 24' 49.66"	71° 32' 4.31"	2326	1932-2024	Quilca-Vítor-Chili
Chiguata	16° 24' 23.22"	71° 24' 32.9"	2885	1966-2013	Quilca-Vítor-Chili
El Frayle	16° 9' 17.35"	71° 11' 20.77"	4131	1964-2013	Quilca-Vítor-Chili
Aguada Blanca	16° 14' 43.37"	71° 20' 50.87"	3577	2015-2024	Camaná

1.1.1 Temperatura

En Arequipa, el clima es predominantemente seco en invierno, otoño y primavera. También es semiárido a causa de las precipitaciones pluviales y templado por la condición térmica. Se tiene en promedio entre nueve a once horas de sol en el día en las zonas bajas (Arequipa); sin embargo, sobre los 4000 m s. n. m., el promedio es de 7 horas (Jiménez et al., 2010).

Las temperaturas máximas registradas en la estación meteorológica La Pampilla, ubicada en la ciudad de Arequipa, entre los años 1932 y 2024, es de 29.4 °C, mientras que la temperatura mínima es de -4.6 °C. En tanto, en la estación Chiguata, entre los años 1995 y 2013, la temperatura máxima registrada fue de 24 °C y la temperatura mínima de -6.1 °C. A 33 km al noreste del cráter del volcán Misti, se ubica la estación El Frayle, la cual registró, entre 1964 y 2024, una temperatura máxima de 23.0 °C y una temperatura mínima de -18 °C.

En consecuencia, en la ciudad de Arequipa, ubicada por encima de los 2300 m s. n. m., predomina un clima frío y seco que, en algunas ocasiones, puede llegar a temperaturas de -6.1 °C. Por encima de los 3700 m s. n. m., en la altiplanicie de la cordillera de los Andes, se presentan temperaturas gélidas que llegan hasta -18.0 °C.

1.1.2 Precipitación

De acuerdo con los datos de las tres estaciones pluviométricas (La Pampilla, Chiguata y Aguada Blanca [Figura 2]), las mayores precipitaciones en el área de la ciudad de Arequipa ocurren

en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. En estos cuatro meses se han registrado precipitaciones diarias de hasta 48.8 mm y, entre los meses abril a noviembre, de hasta 19 mm. Cabe mencionar que el 8 de febrero de 2013 se registró una precipitación inusual de 124.5 mm.

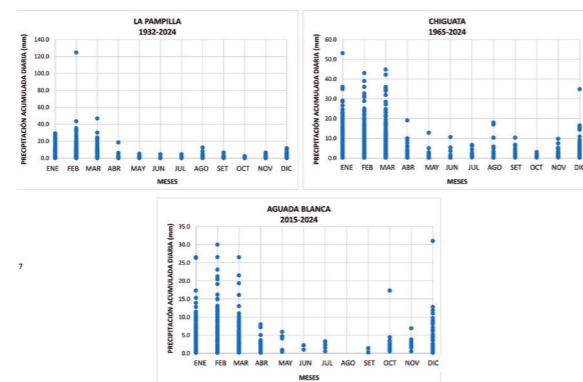


Figura 3. Precipitaciones acumuladas diarias para las tres estaciones meteorológicas: La Pampilla, Chiguata y Aguada Blanca.

En el sector noroeste del volcán Misti, sobre los 4000 m s. n. m., la precipitación anual total varía entre 212.4 mm a 278.2 mm (Tabla 2). Al suroeste del volcán Misti, sobre los 2300 m s. n. m. (ciudad de Arequipa), la precipitación anual también es variable, tal es así que en la estación La Pampilla la precipitación promedio anual total es 72.4 mm y en la estación de Chiguata de 184.6 mm.

Entre los años 2010 y 2023, las mayores precipitaciones mensuales se registraron en los meses de enero, febrero y marzo. En febrero de 2013 se llegó a registrar una precipitación acumulada mensual de 190.2 mm (Tabla 3).

Tabla 2. Precipitación anual total (mm) del periodo 1932-2024. Fuente: SENAMHI-AUTODEMA

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
La Pampilla	21.7	31.0	13.5	0.9	0.2	0.1	0.1	0.5	0.3	0.2	0.6	3.2	72.4
El Frayle	71.5	71.5	55.4	15.0	2.0	3.3	1.8	2.4	3.8	5.4	13.5	32.6	278.2
Chiguata	54.0	67.2	46.0	2.8	0.5	0.6	0.5	1.8	0.8	0.3	1.2	9.0	184.6
Aguada Blanca	61.0	65.9	45.4	6.12	2.06	0.64	1.07	0.0	0.33	4.3	3.4	22.3	212.4

Tabla 3. Precipitaciones mensuales totales durante los meses diciembre, enero, febrero y marzo de 2010 a 2023, registradas por la estación meteorológica La Pampilla (Fuente: SENAMHI).

Año	Precipitación (mm)			
	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
2010	0.9	1.9	12.1	1.2
2011	17.1	39.7	74.4	1
2012	2.12	98.2	153.8	31.3
2013	3.1	32.8	190.2	26.7
2014	0	33.3	1.9	0.2
2015	0	13.7	103.4	47.2
2016	0	0	52.8	1
2017	14	103.5	50.5	42.7
2018	0	12.8	3	5.8
2019	0	28.1	43.1	10.1
2020	19.1	75.6	119.8	46.4
2021	0	14.6	0.4	13.4
2022	20.3	11.2	18.1	25.8
2023	2.7	47.9	49	21.7

Tabla 4. 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
Arequipa	Alto Selva Alegre	2510	85870	28679
Arequipa	Arequipa	2429	55437	17997
Arequipa	Cayma	3244	91935	33112
Arequipa	Cerro Colorado	2486	197954	80385
Arequipa	Characato	3610	12949	6746
Arequipa	Chiguata	3364	2939	2267
Arequipa	Jacobo Hunter	2309	50164	13160
Arequipa	José Luis Bustamante Y Rivero	2389	81829	23796
Arequipa	La Joya	1730	32019	20470
Arequipa	Mariano Melgar	2459	59918	20548
Arequipa	Miraflores	2450	60589	17800
Arequipa	Mallebaya	2658	4756	4218
Arequipa	Paucarpata	2453	131346	36020
Arequipa	Pocsi	3426	445	447
Arequipa	Polobaya	3448	837	619
Arequipa	Quequeña	2637	4784	4767
Arequipa	Sabandía	2560	4368	1516
Arequipa	Sachaca	2300	24225	7926
Arequipa	San Juan De Siguan	1448	611	334
Arequipa	San Juan De Tarucani	4741	1377	946
Arequipa	Santa Isabel De Siguan	2345	682	604
Arequipa	Santa Rita De Siguan	1453	6318	2269
Arequipa	Socabaya	2590	75351	22822
Arequipa	Tiabaya	2288	16191	4569
Arequipa	Uchumayo	2279	14054	6304
Arequipa	Vítor	1675	3610	4280
Arequipa	Yanahuara	2402	25417	9033
Arequipa	Yarabamba	3250	1314	1952
Arequipa	Yura	4532	33346	35394
Total			1 080 635	408 980

1.2 Aspecto socioeconómico

1.2.1 Dato poblacional

A inicios del siglo XXI, Arequipa, conformada por 29 distritos densamente poblados (INEI, 2018; Tabla 4) y con una población de 1 080 635 habitantes en el año 2017, abarca una extensión territorial de 2923.53 km². Los distritos que están en el área de influencia del volcán Misti son Alto Selva Alegre, Miraflores, Paucarpata, Mariano Melgar y Chiguata, así como los ubicados en la margen derecha del río Chili como Yanahuara, Cayma, Cerro Colorado, Yura, Cercado de Arequipa, José Luis Bustamante y Rivero, Hunter, Uchumayo, Tiabaya y Sachaca (Figura 1).

La vulnerabilidad de la ciudad de Arequipa se incrementa diariamente debido a que la ciudad

crece hacia zonas cercanas al volcán Misti y en áreas de alto peligro, como en las inmediaciones o riberas de las quebradas que se prolongan

del volcán Misti (quebradas San Lázaro, Pastores, Huarangal, Venezuela, El Pato, etc.). Este panorama se aprecia principalmente en los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata y Chiguata.

1.2.2 Obras de infraestructura

La ciudad de Arequipa cuenta infraestructura importante, la cual se describe a continuación.

- Represas de agua El Pañe, Los Españoles, Pillones, El Fraile, Banputañe, Challhuanca y Aguada Blanca, las cuales, en total, poseen una capacidad de almacenamiento de cerca de 400 millones de m³ (Jiménez et al., 2010). Este sistema abastece de agua para el consumo poblacional de Arequipa.
- La planta de tratamiento de agua potable La Tomilla, ubicada en la cuenca media del río Chili, abastece a más del 80 % de la población de Arequipa.
- Las centrales hidroeléctricas del río Chili (Charcani I, II, III, IV, V) generan cerca de 172 MW (Jiménez et al., 2010). Se ubican en el cañón del río Chili, al pie del flanco noroeste del volcán Misti.
- Ocho puentes vehiculares en la cuenca media del río Chili que conectan los sectores sureste y noroeste de la ciudad de Arequipa. En ambas márgenes se ubican, por ejemplo, la empresa de generación eléctrica de Arequipa S. A. (EGASA), universidades (Universidad Católica San Pablo), el Club Internacional de Arequipa, centros comerciales, colegios, así como urbanizaciones y nuevos proyectos de vivienda.
- La mina Cerro Verde, una de las más importantes del país, se abastece para sus operaciones de agua de la cuenca del río Chili. Se estima que utiliza poco más de 1160 l/s de agua.
- Aeropuerto internacional Alfredo Rodríguez Ballón, ubicado a 18 km al oeste de la cima del volcán Misti.

2. Los peligros volcánicos

Diversos estudios vulcanológicos efectuados a nivel global han compilado los principales peligros volcánicos, los cuales corresponden a caídas de ceniza y pómez, la ocurrencia de flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares (flujos de escombros), avalanchas de escombros y gases volcánicos (Blong, 1984; Tilling, 1989; Blong, 2000; Bignami et al., 2012) que son representados en la Figura 4.

2.1 Caída de piroclastos (tefras)

Las caídas de piroclastos o tefras se generan durante erupciones explosivas, cuando los fragmentos de roca son expulsados hacia la atmósfera de manera violenta formando una columna eruptiva que puede alcanzar varios kilómetros de altura, los cuales, posteriormente, caen sobre la superficie del suelo. Los fragmentos más grandes y densos caen cerca del volcán y se denominan bombas o bloques (>64 mm), mientras que las partículas de menor tamaño, denominadas lapilli (2-64 mm) y ceniza (<2 mm), son transportadas por el viento a

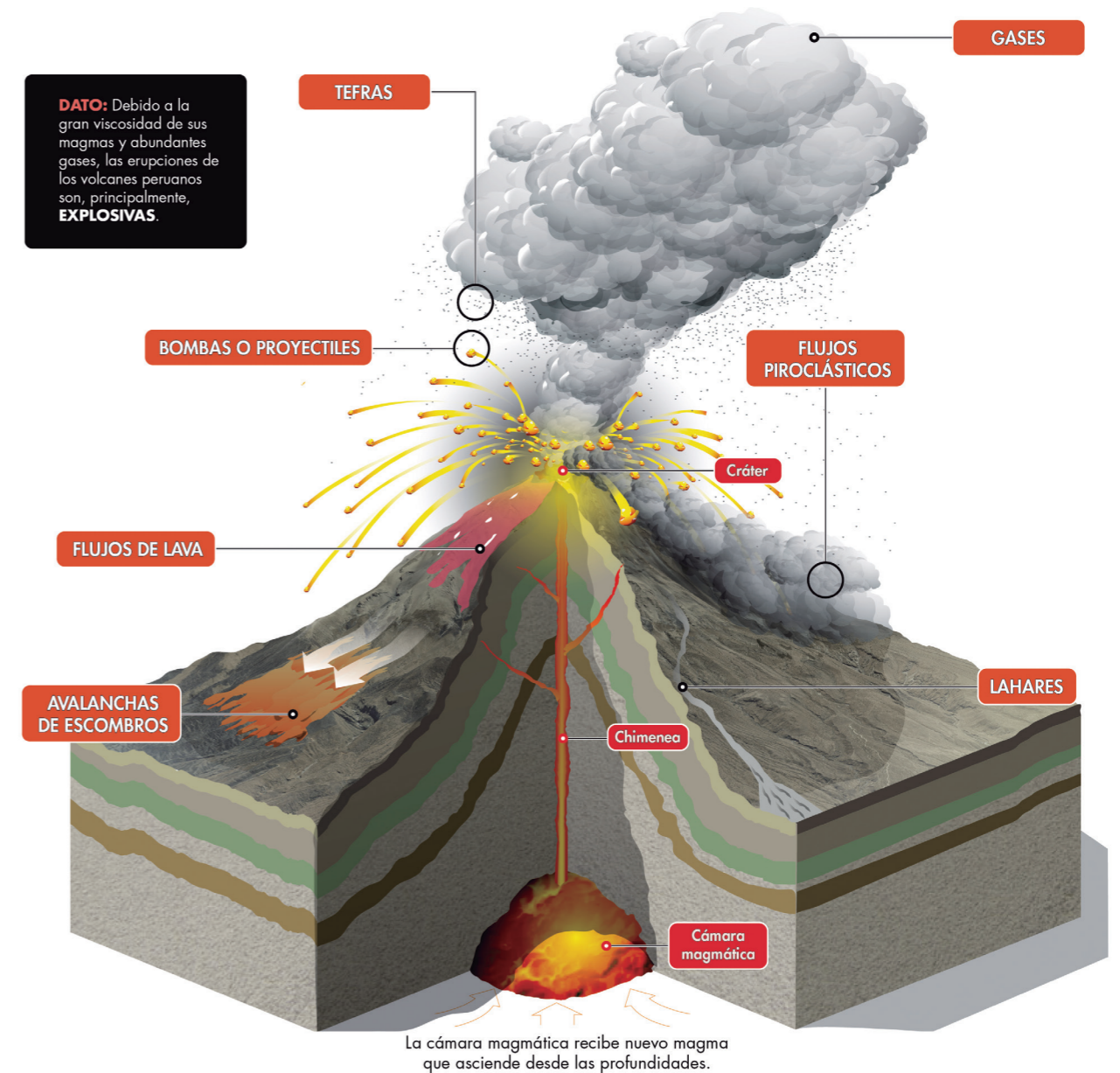


Figura 4. Tipos de peligros volcánicos que puede presentar durante una erupción un estratovolcán como el Misti.

grandes distancias para luego caer y formar una capa de varios milímetros o centímetros de espesor (Walker, 1971). Las partículas pueden afectar extensas áreas, de varias centenas de km² (Blong, 1984; Tilling, 1989; Bignami et al., 2012).

Durante erupciones explosivas también son eyectados proyectiles balísticos (bloques incandescentes) que son expelidos a decenas o centenas de metros por segundo y, típicamente, su alcance está restringido a un radio de 3 km del centro de emisión (Tilling, 1989). Sin embargo, en erupciones plinianas pueden alcanzar mayores distancias. El peligro de impacto es grande cerca al cráter y decrece conforme se incrementa la distancia.

Estas partículas pueden causar problemas de salud en las personas, contaminar fuentes de agua, colapsar los techos por el peso acumulado, afectar cultivos, interrumpir el tráfico aéreo, dificultar las actividades socio-económicas, provocar enfermedades oculares, respiratorias y estomacales, entre otros.

2.2 Flujos y oleadas piroclásticas

Los flujos piroclásticos son masas calientes (300 °C a 800 °C) conformadas por una mezcla de ceniza, fragmentos de rocas volcánicas y gases. Estos flujos descienden por los flancos del volcán a ras de la superficie del suelo y a grandes velocidades, comprendidas entre 100 m/s y 300 m/s (Hoblitt et al., 1995). Poseen generalmente una parte inferior densa que se encauza y desplaza por el fondo de las quebradas o valles, y otra superior, menos densa, denominada oleada piroclástica, compuesta por una nube turbulenta de gases y ceniza que con facilidad sale del valle, sobrepasa relieves importantes y afecta una mayor área. Estos flujos y oleadas destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso (Tilling, 1989).

2.3 Lahares (flujos de lodo y escombros)

Los lahares o flujos de barro son mezclas de partículas volcánicas de tamaños diversos movilizados por el agua y que fluyen rápidamente (20-60 km/h) por valles y quebradas que drenan de los volcanes. Se generan en periodos de erupción o de tranquilidad volcánica (Tilling,

1989). El agua puede provenir de fuertes lluvias y fusión de hielo o nieve que permanece en la cima o ladera de los volcanes.

Los lahares viajan a lo largo de quebradas o ríos y, eventualmente, pueden desbordarse causando inundación y daños en áreas aledañas. El área afectada depende del volumen de agua y de materiales sueltos disponibles, así como de la pendiente y topografía. Normalmente, destruyen todo a su paso, y pueden alcanzar grandes distancias (>200 km) e, incluso, generar inundaciones cerca al cauce de ríos (Tilling, 1989).

2.4 Flujos de lava

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida que son expulsadas por el cráter o fracturas en los flancos del volcán. Pueden fluir por el fondo de los valles y alcanzar varios kilómetros de distancia; rara vez, recorren más de 8 km del centro de emisión (Francis, 1993). Los volcanes del sur peruano han emitido lavas viscosas que recorren algunos kilómetros de distancia, mientras que otras se enfrían en la zona del cráter formando domos de lava. Por ejemplo, en el volcán Misti, la mayoría de flujos de lava se desplazaron entre 6 km y 9 km de distancia (Mariño et al., 2016).

Los flujos de lava calcinan y destruyen todo a su paso; sin embargo, no representan un peligro para las personas debido a su baja velocidad de desplazamiento (Tilling, 1989).

2.5 Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros son derrumbes o colapsos de un sector del volcán. Se originan debido a factores de inestabilidad, tales como la elevada pendiente del volcán, presencia de fracturas o fallas tectónicas, movimientos sísmicos fuertes y explosiones volcánicas. Las avalanchas de escombros ocurren con poca frecuencia. Comúnmente, pueden alcanzar decenas de kilómetros de distancia mientras se desplazan a gran velocidad. Por ejemplo, en el caso del Mount St. Helens (EE. UU.), la avalancha registrada estuvo asociada a una erupción lateral dirigida; en este episodio, se estimaron velocidades del orden de 240 km/h (Glicken, 1996).

Las avalanchas de escombros tienen mayor

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

Las avalanchas de escombros entierran y destruyen todo lo que encuentran a su paso: puentes, terrenos de cultivo, vías, canales, etc. Adicionalmente pueden generar lahares o flujos de lodo, a partir del desagüe del agua represada por la avalancha (Tilling, 1989).

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).

3. El volcán Misti

El Misti es un volcán de forma cónica y asimétrica. En su cima alberga un cráter de 900 m de diámetro, en cuyo interior existe otro cráter pequeño de 500 m de ancho y 80 m de profundidad, que contiene un domo de lava de 20 m de alto y 140 m de ancho.

El volcán Misti se ha construido sobre secuencias volcánicas más antiguas del volcán Chachani y sobre tres secuencias de ignimbritas riódacíticas del Mioceno y Pleistoceno denominadas Río Chili (13.3 Ma aprox.), La Joya (4.9 Ma aprox.) y Aeropuerto de Arequipa (1.6 Ma aprox.) (Paquereau-Lebti et al., 2006). El volcán Misti es resultado de una actividad volcánica efusiva que produjo flujos de lava que se desplazaron hasta 9 km de distancia, alternada con depósitos piroclásticos (flujos y caídas piroclásticas), estos últimos asociados a erupciones explosivas de diferente magnitud que tuvieron hasta un IEV 5 (Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011; Siebert et al., 2011; Mariño et al., 2016). Al pie del flanco sur y suroeste del volcán Misti se extienden depósitos volcanoclasticos y piroclásticos que forman un abanico de suave pendiente (<10°), sobre el cual se construye la ciudad de Arequipa.

3.1 Historia eruptiva

Estudios geológicos previos efectuados por Sui (1999), Legros (2001) y Thouret et al. (2001), han señalado que el Misti se constituye de dos edificios volcánicos sucesivos. El edificio más antiguo, denominado "Misti 1" (Figura 5), se construyó antes de 112 000 años, y consiste de un estratocono de 500 m de altura que culmina a ~3500 m s. n. m. (Thouret et al., 2001). El edificio "Misti 1" consiste de flujos de lava de 20 m a 60 m de espesor, de composición andesítica a dacítica, junto con depósitos de flujo de escoria andesítica de 4 m a 12 m de espesor. Dichas secuencias están expuestas en el cañón del río Chili, así como al pie del flanco sur y suroeste del edificio actual. En total, estas secuencias poseen un espesor aproximado de 400 m.

Hace menos de 112 000 años AP, los flancos este y sureste del edificio "Misti 1" fueron cubiertos por lavas y depósitos piroclásticos de un estratocono más joven, que se desarrolló en tres etapas, denominadas "Misti 2", "Misti 3" y "Misti 4" (Thouret et al., 2001, Figura 5). Durante la etapa "Misti 2" (112 000-40 000 años AP), se emplazaron tres secuencias volcánicas: 1) una secuencia de lavas datadas entre 112 000 y 70 000 años AP (Thouret et al., 2001) de

500 m de espesor, que forma la parte basal e intermedia del cono del Misti (Figura 5). Al pie de los flancos sur, suroeste y noreste del Misti, dichas lavas están intercaladas con depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, además de flujos de pómez. 2) Una secuencia de brechas andesíticas de 10 m a 20 m de espesor visibles a 10 km al sur y al suroeste del cráter que tienen edades que varían desde 70 000 a 50 000 años AP. Dichas brechas son parte de un depósito de avalancha de escombros producto del colapso del flanco sur del Misti. 3) Una secuencia de depósitos de flujo piroclástico de pómez andesítico a dacítico de 12 m a 25 m de espesor que se emplazó entre 50 000 a 40 000 años AP, y aflora al pie del flanco sur y sureste del Misti. Thouret et al. (2001) correlacionan dichos depósitos con la formación de una caldera en la cima o la formación de un grupo de cráteres.

Durante la etapa "Misti 3" (38 000-11 000 años AP) se emplazaron cuatro secuencias volcánicas: 1) La primera secuencia consiste de lavas del cono superior (de 4400 a 5600 m s. n. m.) (Figura 5), así como de depósitos de flujo de pómez andesíticos a riolíticos datados entre 34 000-31 000 años AP, además de depósitos de caída de tefra dacíticos a riolíticos (Thouret et al., 2001). 2) Una secuencia de depósitos de flujo piroclástico de pómez, así como depósitos de flujos de bloques y cenizas andesíticos y dacíticos intercalados con capas de caída de

pómez emplazadas entre 38 000 y 25 000 años AP. Dichos depósitos tienen un espesor total de 80 m a 100 m, y afloran entre 6 km y 10 km del cráter, al pie del flanco sur del Misti (quebradas Huarangal, Honda y Grande). 3) Cinco depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas andesíticos de 5 m a 20 m de espesor, intercalados con depósitos de caídas de lapilli de pómez andesítica datados entre 25 000 y 20 000 años. Adicionalmente, depósitos de lahares y capas de caída de tefra están intercalados con los depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas en la parte superior de la secuencia. Dichos depósitos afloran al sur del volcán Misti, en las quebradas Honda y Grande. 4) La última secuencia, emplazada entre 14 000 a 11 000 años AP, incluye dos depósitos de flujo de pómez y ceniza de considerable volumen (~1 km³), intercalados con dos capas de caída de lapilli de pómez. Dichos depósitos de flujo de pómez son visibles a 12 km al sur y al suroeste de la cumbre, en los sectores de Los Gráficos y San Luis, donde tienen un espesor de 6 m a 8 m.

Finalmente, la etapa más reciente, ocurrida durante los últimos 11 000 años AP y denominada "Misti 4", comprende una secuencia de al menos diez capas delgadas de caída de cenizas, lapilli de pómez (Figura 6) y flujos piroclásticos generados durante erupciones explosivas plinianas, subplinianas y vulcanianas del volcán Misti.

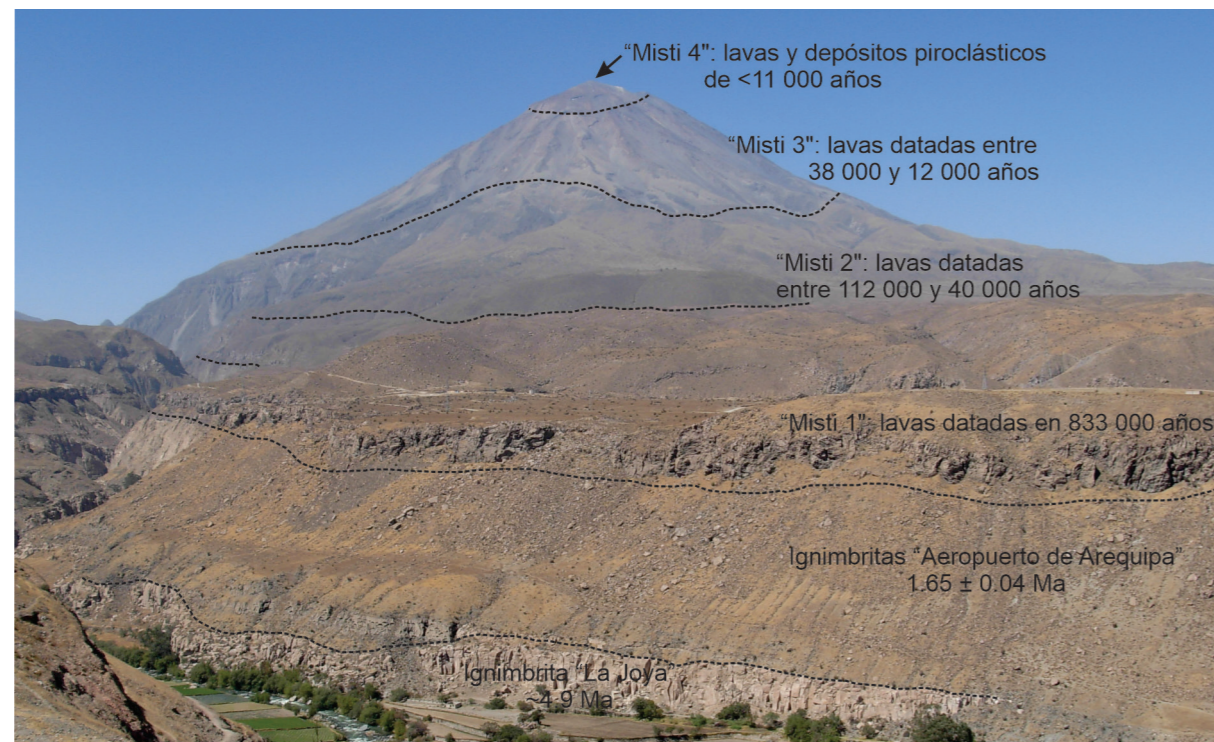


Figura 5. Vista del sector oeste del volcán Misti, donde se muestran los distintos depósitos emplazados durante las cuatro etapas de evolución presentadas por el volcán Misti: "Misti 1", "Misti 2", "Misti 3" y "Misti 4".

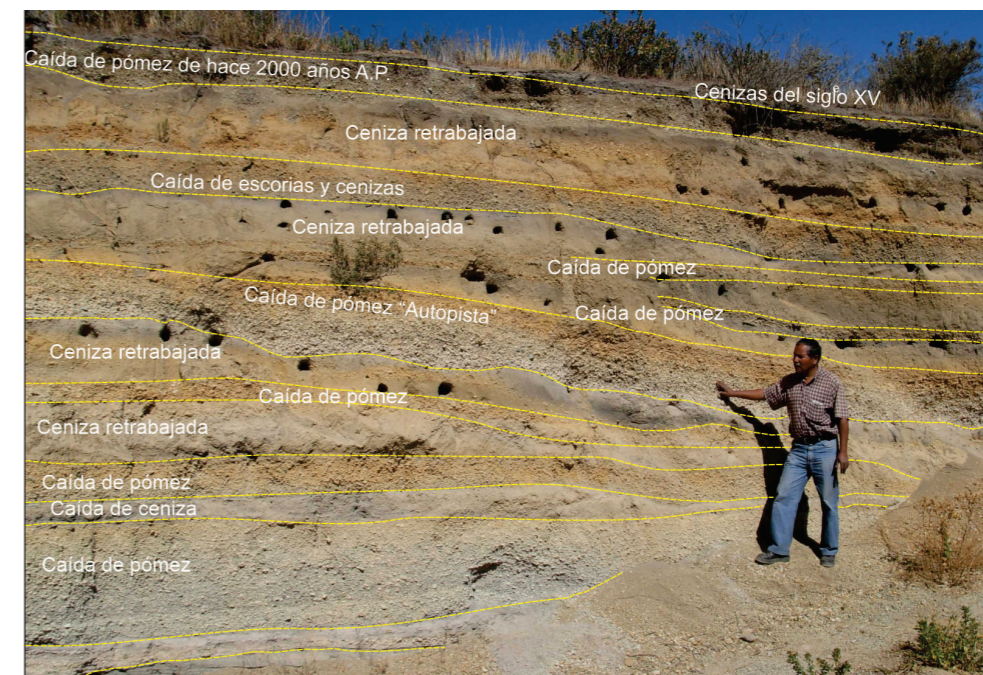


Figura 6. Secuencia de caídas piroclásticas visibles al pie del flanco oeste del Misti, donde se resalta el depósito de caída de lapilli pómez "Autopista", el depósito de caída de pómez de hace 2000 años AP y, en la parte superior, la ceniza de la erupción del siglo XV.

La erupción pliniana más reciente del volcán Misti ocurrió hace 2000 años AP, tuvo un IEV 5 y generó depósitos de caída de lapilli de pómez de hasta 20 cm de espesor en el centro de la ciudad de Arequipa (Cobeñas et al., 2012). En total, el volumen de caída de lapilli de pómez generado durante la erupción fue calculado en 1.4 km³ (Harpel et al., 2011). Además, dicha erupción generó flujos piroclásticos y lahares (Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011) visibles en las quebradas que drenan del volcán Misti (Figura 7). Otros eventos explosivos menores ocurrieron a fines de la época precolombina, en el siglo XV (1440-1470 d. C., IEV 2), erupciones que depositaron ceniza gris de composición andesítica. Tras ello, la actividad histórica del Misti consistió en eventos fumarólicos, con la formación de lahares esporádicos de pequeño volumen (Chávez, 1992; Suni, 1999; Thouret et al., 2001; Delaite et al., 2005).



Figura 7. Depósitos de flujos piroclásticos y lahares visibles en la quebrada Huarangal generados durante la erupción de hace 2000 años AP del volcán Misti.

3.2 Actividad histórica del volcán Misti

Diversas recopilaciones de crónicas escritas por varios autores, como Zamácola y Jauregui (1804), Barriga (1951), Chávez (1992), Hantke y Parodi (1966), Simkim y Siebert (1994), dan cuenta de la ocurrencia de al menos cinco

erupciones explosivas leves o emisiones de gases presentados por el volcán Misti durante los últimos 600 años (Tabla 5). A continuación, se presenta una breve descripción de las mismas:

Tabla 5. Resumen sobre las características de la actividad eruptiva histórica a reciente del volcán Misti.

Año	Tipo de Actividad	IEV	Observaciones
1440-1470	Erupción explosiva vulcaniana	2	Las cenizas fueron dispersadas a más de 20 km, principalmente al oeste y suroeste del Misti
1577	Erupción explosiva ¿leve?	¿2?	Emisión de cenizas
1677	Actividad fumarólica		Emisión de gases en marzo y mayo de 1677
1784	Explosión ¿freática?		Asociada a una actividad sísmica
1787	Actividad fumarólica		Emisión de gases

Además, se han reportado varios eventos poco precisos sobre la actividad del Misti ocurridos entre los siglos XVI y XX, los cuales, posiblemente, corresponden a emisiones de gases u otros eventos. En efecto, Simkin y Siebert (1994); Hantke y Parodi (1966); Zamácola y Jáuregui (1804); Barriga (1951); Chávez (1992); Thouret et al. (2001) mencionan intensa actividad fumarólica ocurrida en los años 1542, 1599, agosto de 1836, agosto de 1830, 1831, septiembre de 1869, marzo de 1870, 1948-1949, y el último reportado entre 1984 y 1985. Estos eventos causaron alarma en la población y fueron confundidos probablemente con una reactivación del volcán Misti.

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 volcán Misti.
- Uso de un Modelo Digital de Elevación (DEM) elaborado por CONIDA, a través de imágenes satelitales SPOT ó 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 del volcán Misti.

4.2 Softwares empleados

4.2.1 Modelo Ash3d

Las simulaciones de caída de ceniza usando modelos numéricos tienen como propósito predecir las zonas que podrían ser potencialmente afectadas por caída de ceniza en una ventana de tiempo definida. En este sentido, el uso del programa Ash3d permite construir escenarios de peligro de caída de cenizas para tres procesos eruptivos del volcán Misti (vulcaniano, subpliniano y pliniano), con el objetivo de evaluar el nivel de afectación en la provincia y región Arequipa.

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); 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, así como métodos 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 (km³) emitido como roca densa equivalente del magma (DRE) y la duración de la simulación. Los archivos resultantes que entrega el modelo son concentración (mg/m³) 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 tres escenarios de erupciones vulcanianas, subplinianas y plinianas.

En la simulación de dispersión de cenizas del Misti para el escenario de erupciones vulcanianas (IEV 1-2) con el *software* Ash3d, se consideró un volumen de ceniza de 0.1 km³, 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 Misti 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 Chaitén (Chile) en el 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 Misti durante una erupción pliniana (IEV 5), se consideró un volumen de pómez emitido de $1.4 \times 10^9 \text{ m}^3$, 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: en dirección sureste y suroeste del cráter del volcán Misti. 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 durante erupciones pasadas. El programa LAHARZ_py se ejecutó 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. Para la simulación en las quebradas y ríos de interés se ubicaron 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.

Con respecto a los volúmenes de lahares empleados en este estudio, Delaite et al. (2005), han realizado estimaciones de volúmenes de lahares que descienden por los flancos del volcán Misti. Así, mostraron que volúmenes máximos de lahares son del orden de 1.5 a 4 millones de m^3 , y estarían asociados a erupciones explosivas moderadas (IEV 1-2); lahares con volúmenes del orden de 9 a 10 millones de m^3 son menos frecuentes, pues ocurren cada 1000 a 5000 años, y estarían asociados a erupciones importantes

(IEV ≥ 3 ; Delaite et al., 2005; Vargas-Franco et al., 2010). Recientemente, Thouret et al. (2022), para la construcción de escenarios de peligros por descenso de lahares del volcán Misti asociados a lluvias intensas, considera tres volúmenes de lahar de 150 000, 350 000 y 500 000 m^3 .

Tomando en consideración dichos datos, así como las condiciones climáticas actuales de la zona, los volúmenes de los eventos laháricos escogidos para este estudio fueron de 150 000 m^3 , para los lahares de poco volumen que se estiman son más frecuentes, mientras que los volúmenes de 350 000 m^3 y 500 000 m^3 corresponden a lahares de dimensiones importante, aunque son menos frecuentes.

Además, para delimitar el alcance de los flujos piroclásticos y avalanchas de escombros durante erupciones volcánicas, se empleó la metodología denominada "cono de energía" (Malin & Sheridan, 1982). 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 la cima de un volcán y el punto de alcance del depósito (Figura 8). La relación H/L es un indicador de la movilidad del flujo. Así, para una relación H/L cercana a 0.1, los flujos piroclásticos o avalanchas poseen gran movilidad y, por lo 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.

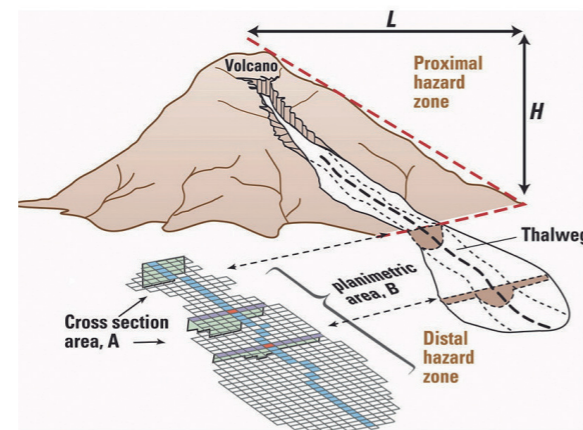


Figura 8. Relaciones entre la distancia (L) y la altura (H) por donde recorrerían los lahares, así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B) inundadas por un lahar (Schilling, 1998).

4.3 Parámetros de entrada para posibles escenarios eruptivos

Con base en la información existente sobre la estratigrafía volcánica, la cronoestratigrafía eruptiva, la comparación con otros volcanes activos "análogos" y los dinamos eruptivos presentados por el Misti, efectuados por Thouret et al. (2001), Legros (2001), Harpel et al. (2011), Cobeñas et al. (2012), Suni (1999) y Mariño et al. (2016), se proponen seis escenarios eruptivos generadores de peligros en el volcán Misti. En particular, para la elaboración de los escenarios, se han considerado los siguientes aspectos:

- Los tipos de erupciones que podría generar el volcán Misti.
- La magnitud y frecuencia de las erupciones pasadas, así como la distribución de los productos volcánicos emitidos que ha sido establecida en estudios previos.
- El comportamiento de otros volcanes peruanos, considerados como «análogos» al Misti, debido a que estos han presentado erupciones similares en el pasado, como el Ubinas, Ticsani y Yucamane (Thouret et al., 2005; Mariño & Thouret, 2003; Rivera et al., 2020).
- Datos bibliográficos sobre alcance de flujos piroclásticos, dispersión de tefras, emplazamiento de flujos de lava, lahares y avalanchas de escombros.

4.3.1 Erupción de tipo vulcaniana (IEV 1-2)

Las erupciones vulcanianas son erupciones explosivas que emiten materiales juveniles y otros arrancados del conducto volcánico, 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 eruptivas de hasta 10 km de altura (Sigurdsson et al., 2000).

En el volcán Misti se han identificado varios depósitos de caída de ceniza de limitado espesor y volumen, los cuales han sido asociados a erupciones vulcanianas. Entre los años 1440 y 1470 d. C., el Misti presentó una erupción vulcaniana (Thouret et al., 2001) que dejó una capa de ceniza de color gris oscuro, de aproximadamente 10 cm de espesor, en la parte superior del cono volcánico, y de 1 cm de espesor a 20 km al oeste, norte y sur del cráter del volcán (Figura 9). El volumen de la caída de ceniza estimada fue de $6 \times 10^6 \text{ m}^3$, por lo que ha dicha erupción se le asignó un IEV de 2 (Thouret et al., 2001). Según Thouret et al. (2001), se estima que el volcán Misti presenta erupciones vulcanianas con IEV 1-2 cada 500 a 1500 años, aproximadamente. Por tanto, la probabilidad de ocurrencia de erupciones con IEV 1-2 es alta.

En el sur del Perú, los volcanes Sabancaya y Ubinas también han presentado erupciones vulcanianas con IEV 1 a 2. Por ejemplo, la

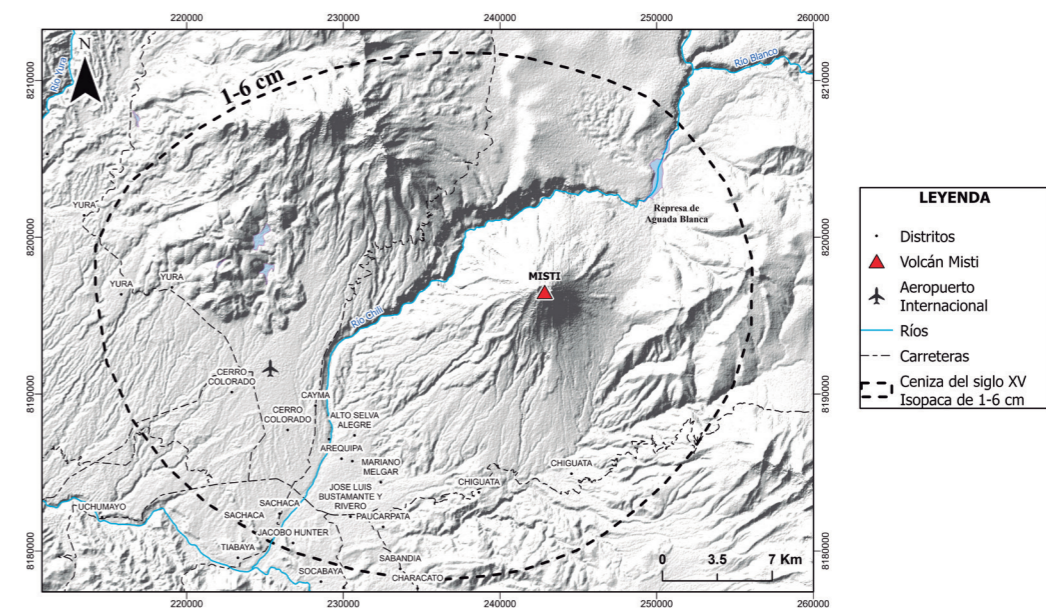


Figura 9. Mapa de distribución de la ceniza asociada a la erupción de 1440-1470 d. C. del volcán Misti (modificado de Thouret et al., 2001).

última erupción del volcán Sabancaya, ocurrida entre 1988 y 1998, así como la actual erupción iniciada en 2016 hasta la actualidad, son de tipo vulcaniana (Machacca et al., 2023). Entre 1990 y 1998 se reportaron caídas de ceniza a una distancia de entre 20 km y 30 km al este del volcán Sabancaya (Thouret et al., 1994). Por su parte, la erupción del volcán Ubinas de 2006-2009 fue también de tipo vulcaniana, con un IEV 2 (Rivera et al., 2014). En dicha erupción se registraron depósitos de ceniza de 1 cm y 2 cm de espesor, a una distancia de entre 5 km y 6 km del cráter (Rivera et al., 2010). En la erupción de 2019 del Ubinas, las cenizas viajaron a más de 250 km de distancia del volcán.

En caso de ocurrir este escenario de erupción vulcaniana, puede producirse el emplazamiento de flujos piroclásticos de poco volumen. Por ejemplo, en las erupciones vulcanianas del volcán Tungurahua (Ecuador) de 2006 y 2010, con IEV 2, se generaron flujos piroclásticos que viajaron a más de 4 km del cráter de dicho volcán (Hall et al., 2013).

Durante el desarrollo las erupciones vulcanianas con IEV 2 también son frecuentes las emisiones de proyectiles balísticos. Durante la erupción del volcán Sabancaya de 1988 a 1998, los proyectiles balísticos alcanzaron algunos kilómetros de distancia (Guillande et al., 1992; Thouret et al., 1994). En la erupción del volcán Ubinas de 2006-2009, los proyectiles balísticos llegaron hasta 2.5 km de distancia del cráter (Rivera et al., 2014).

También durante y después de las erupciones vulcanianas es frecuente la formación de lahares o flujos de barro, sobre todo cuando la ceniza se deposita sobre un casquete glaciar o en periodos de lluvias (diciembre a marzo). En las quebradas San Lázaro, Pastores, Huarangal, Venezuela y El Pato, que se prolongan a lo largo de los flancos sur y suroeste del volcán Misti, se han identificado depósitos de lahares que sobreyacen al lahar asociado a la erupción de hace 2000 años AP, por lo que se infiere que fueron emplazados a finales del Holoceno y durante la época histórica.

4.3.2 Erupción de tipo subpliniana a pliniana (IEV 3-4)

Durante las erupciones de tipo subpliniana y pliniana con IEV 3-4, las columnas de gases, cenizas y pómez pueden alcanzar entre 15 km y 30 km de altura sobre la cima de un volcán



Figura 10. Caídas de ceniza y pómez en la ciudad de Puerto Montt (Chile), a raíz de la erupción del volcán Calbuco (al fondo), ocurrida el 22 de abril de 2015 (foto Barria C.).

(Newhall y Self, 1982), y pueden emplazar caídas piroclásticas de varios centímetros de espesor a más de 20 km del cráter. Asimismo, los flujos piroclásticos pueden alcanzar más de 10 km de distancia del cráter de un volcán. Por ejemplo, durante la erupción subpliniana del volcán Calbuco (Chile) en 2015, que tuvo un IEV 4, la columna eruptiva alcanzó poco más de 15 km de altura (Figura 10). En dicha erupción, la ceniza emitida alcanzó un espesor de 1.5 cm a 220 km al noreste del cráter, específicamente en la localidad de Collón Cura, Argentina (Romero et al., 2016). El volumen de tefras emitido fue mayor a 0.27 km³.

En el pasado, el Misti ha desarrollado erupciones de ese tipo. En caso de una eventual reactivación, se ha considerado este tipo de escenario basado en la erupción de hace 20 000 años AP que emplazó el depósito de caída de lapilli de pómez denominada "Autopista" (Thouret et al., 2001; Cacya et al., 2007). Este depósito "Autopista" se dispersó en dirección oeste del volcán Misti, donde el material cayó en áreas proximales y distales. Dicho depósito tiene entre 40 cm y 20 cm de espesor a 20 km y 25 km del cráter, respectivamente. Cacya et al. (2007) estiman que el volumen del depósito de caída de pómez fue mayor a 0.6 km³, y la altura de la columna eruptiva alcanzó entre 22 y 25 km. En tal sentido, la erupción tuvo un IEV 4.

En el sur del Perú, los volcanes Ubinas y Ticsani han presentado este tipo de erupciones. La erupción pliniana del volcán Ticsani (IEV 4), ocurrida hace aproximadamente 10 500 años AP, emplazó depósitos de caída de lapilli de pómez a más de 40 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003). En el volcán Ubinas, la última erupción pliniana ocurrió hace 980 años AP, y emplazó depósitos de caída de ceniza de hasta 25 cm de espesor a más de 40 km del cráter (Rivera et al., 1998).

Durante eventuales erupciones subplinianas o plinianas con IEV 3-4 del Misti, también pueden generarse lahares, especialmente si los flujos y oleadas piroclásticas se emplazan sobre la cobertura de nieve o hielo que permanece eventualmente en la cima del volcán o durante fuertes precipitaciones. Cereceda y Mariño (2008) han identificado trece depósitos de lahares entre Pampas de Cusco y Congata, de los cuales diez presentan entre 6 m y 8 m de espesor y podrían estar asociados a erupciones subplinianas o plinianas del volcán Misti con un IEV 3 o 4.

4.3.3 Erupción de tipo pliniana (IEV 5)



Figura 11. Columna eruptiva de varios kilómetros de altura formada durante la erupción pliniana del volcán Pinatubo, ocurrida el 12 de junio de 1991 (Foto R. Hoblitt, USGS).

Las erupciones plinianas son las más violentas, debido a que el magma posee alto contenido de gases y se emite un gran volumen de material piroclástico. Las columnas eruptivas constituidas de gases, ceniza y pómez pueden alcanzar más de 20 km de altura (Cas y Wright, 1987). Por ejemplo, durante la erupción pliniana del volcán Pinatubo (IEV 6) en Filipinas, sucedida el 12 de junio de 1991 (Figura 11), la columna eruptiva alcanzó más de 30 km de altura (McCormick et al., 1995). El Misti, durante la erupción de hace 2000 años AP, catalogada como erupción pliniana que tuvo un IEV 5, generó una columna

eruptiva de al menos 29 km de altura (Harpel et al., 2011). Dicha erupción emplazó un depósito de caída de lapilli de pómez en toda el área de Arequipa, el cual se ha identificado a más de 25 km al suroeste del cráter (Thouret et al., 2001; Cobeñas et al., 2012). Según Harpel et al. (2011), el volumen de tefras emitido durante esta erupción fue de 1.4 km³.

Además, a lo largo de su historia eruptiva, el volcán Misti ha presentado varias erupciones de tipo pliniana con IEV 5 que han dejado importantes depósitos de caída de tefras en el área de Arequipa. Por ejemplo, entre 38 500 y 32 400 años AP, el volcán Misti generó una erupción pliniana con IEV 5 que emplazó el depósito de caída de tefra "Sacarosa" (Harpel et al., 2023). Dicho depósito posee entre 0.40 m y 1.1 m de espesor a 20 km y 11 km al suroeste del cráter, respectivamente.

Las erupciones plinianas también pueden generar flujos y oleadas piroclásticas. Por ejemplo, durante la erupción de hace 2000 años AP del volcán Misti, se generaron flujos de pómez y ceniza (Figura 6) que alcanzaron hasta 13 km de distancia del cráter, en dirección sur y suroeste (Cobeñas et al., 2012). Dichos flujos poseen hasta 12 m de espesor a 6 km del cráter. Harpel et al. (2011) estimó que el flujo piroclástico tiene un volumen muy limitado, de solo 0.01 km³.

Las erupciones plinianas también pueden generar lahares de gran volumen, sobre todo si las caídas, flujos y oleadas piroclásticas cubren un casquete glaciar, como ocurrió en el pasado en los volcanes Cotopaxi (Ecuador), Nevado del Ruiz (Colombia) y St. Helens (EE.UU.). También pueden generarse en caso de lluvias extremas, como en el volcán Pinatubo (Filipinas). Según Harpel et al. (2011), durante y después de la erupción de hace 2000 años AP del volcán Misti, se generaron lahares importantes. Estos lahares han sido reconocidos en varios sectores y quebradas ubicadas al sur y suroeste del volcán Misti. En la quebrada San Lázaro (Arequipa), Delaite et al. (2005) estimó un depósito de lahar que posee, por lo menos, 9 km de largo, 4 m de espesor y, aproximadamente, 3.6 x 10⁶ m³ de volumen.

Cereceda y Mariño (2008) identificaron al menos trece depósitos de lahares entre Pampas de Cusco y Congata. De estos, los depósitos de lahar Tingo Grande, Pichu Pichu y Andamayo presentan entre 6 m y 8 m de espesor a más de 25 km al sureste del volcán Misti. Debido a su importante espesor, estos depósitos de lahar podrían estar asociados a las erupciones plinianas del volcán Misti.

4.3.4 Erupción de tipo efusiva con emisión de lava

Las erupciones efusivas consisten en la emisión de flujos de lava. Las lavas, al descender de un volcán, tienen velocidades y alcances limitados que varían en función de la tasa de emisión (volumen emitido por unidad de tiempo), la pendiente del terreno y la viscosidad de la lava (Walker, 1973). Las lavas de los volcanes peruanos son de composición intermedia a ácida (andesíticas, dacíticas y riolíticas), es decir, viscosas y de corto recorrido que alcanzan áreas aledañas a un volcán. Generalmente, su velocidad de emplazamiento es de unos pocos metros por hora.

El volcán Misti, a lo largo de su historia eruptiva, ha emitido lavas viscosas de composición andesítica a dacítica. Las lavas más distales alcanzaron entre 6 km y 9 km de distancia en dirección suroeste y oeste de la cima del volcán. Algunos flujos de lava han sido datados por Thouret et al. (2001) en 112 000 años AP (Cerro Pacheco), 70 000 años AP (Brazo del Misti) y 49 000 años AP (quebrada Honda).

Durante los últimos 30 000 años, las erupciones efusivas del volcán Misti han sido menos frecuentes respecto a las erupciones explosivas. Por lo antes señalado, es poco probable que ocurran erupciones efusivas en el volcán Misti en el futuro. De suceder una erupción efusiva, los flujos de lava tendrían que rellenar los dos cráteres del Misti, para lo cual deberían tener más de 0.5 km³ de volumen, para luego descender por los flancos sur y sureste, debido a que en estos sectores la pared del cráter posee menos altura. El curso de estos flujos de lava sería fácilmente predecible, ya que discurrirían preferentemente por las quebradas y alcanzarían distancias menores a los 8 km, por lo que difícilmente alcanzarían las zonas urbanas de la ciudad.

Durante las erupciones efusivas también pueden generarse lahares, especialmente si las lavas son emplazadas durante los meses de diciembre a abril, periodo del año en la cual existe importante presencia de nieve en la cumbre del volcán u ocurren lluvias intensas.

4.3.5 Erupción con crecimiento y colapso de domos de lava

Volcanes como el Misti, Ubinas, Sabancaya, Tutupaca, Yucamane, Sara Sara, Chachani y

otros, pueden desarrollar durante erupciones el crecimiento de domos de lava, dado que en el pasado dichos volcanes han desarrollado este tipo de eventos. Durante su crecimiento en el interior de los cráteres, los domos de lava pueden colapsar y generar flujos piroclásticos que pueden descender por los flancos de los volcanes. Por ejemplo, durante la erupción del volcán Merapi (Indonesia) en 2006 (Figura 12), los flujos piroclásticos generados por el colapso de domos alcanzaron una distancia de hasta 7 km de la cima del volcán (Charbonnier & Gertisser, 2008).



Figura 12. Vista de un flujo piroclástico que desciende por el flanco sureste del volcán Merapi (Indonesia) el 7 de junio de 2006. Fotografía tomada de Research and Technology Development Agency for Volcanology, Yogyakarta (BPPTK).

En el pasado, el volcán Misti ha generado numerosos flujos piroclásticos de bloques y cenizas que han sido originados por el colapso y destrucción de domos de lava, los cuales son visibles en las quebradas ubicadas principalmente al sur, sureste y suroeste del volcán. Por ejemplo, en la quebrada Pastores, aproximadamente a 10 km al suroeste del cráter, se observan tres depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, de 3 m a 5 m de espesor, emplazados entre 30 000 y 13 000 años AP. Asimismo, en la quebrada Honda y Grande, a 8.5 km al sur del volcán, aflora una secuencia de tres depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza de hasta 12 m de espesor, datados en 31 200 años AP (Thouret et al., 2001).

La probabilidad de que ocurra el emplazamiento y posterior colapso de domos en el volcán Misti es moderada, debido a que en el pasado ha presentado dicho escenario. Si se produjeran en el futuro, dada la morfología del cráter del Misti, estos flujos piroclásticos se canalizarían y desplazarían preferentemente a lo largo de las quebradas que drenan por los flancos sur,

sureste y suroeste, tales como San Lázaro, Pastores, Huarangal, Agua Salada y Honda Grande. Dependiendo del volumen del domo y material desprendido, los flujos podrían alcanzar fácilmente entre 10 km y 12 km de distancia.

4.3.6 Colapso de flanco y emplazamiento de avalancha de escombros

Las avalanchas de escombros se generan por el colapso de un sector de un volcán originado por factores de inestabilidad, muchas veces asociados a erupciones volcánicas. Dado que las avalanchas volcánicas presentan fluidos volcánicos ligados a la descompresión de los sistemas hidrotermales, estos flujos poseen mayor movilidad que sus similares no volcánicos. Las avalanchas volcánicas ocurren luego de sismos importantes, erupciones volcánicas o intrusión de cuerpos de magma o domos de lava. Las avalanchas de escombros se desplazan a gran velocidad. A mayor volumen tienen mayor velocidad y recorren mayor distancia. Durante la erupción del volcán Mount St. Helens en los EE. UU. (18 de mayo de 1980), se generó una avalancha de escombros que se desplazó a más de 240 km/hora y recorrió más de 24 km de la fuente (Glicken, 1996). Según Glicken (1996), el volumen aproximado de la avalancha de escombros fue de 2.3 km³.

En el sur del Perú, se han reconocido depósitos de avalanchas de escombros en los volcanes Tutupaca, Ticsani, Yucamane, Ubinas, Misti, entre otros (Mariño y Thouret, 2003; Thouret et al., 2001; Bernard, 2008; Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2015; Rivera et al., 2020). El depósito de avalancha de escombros del volcán Ticsani generado durante el Pleistoceno tuvo un volumen aproximado de 18 km³, cubrió cerca de 55 km² y alcanzó cerca de 31.5 km de distancia (Bernard, 2008), luego de lo cual se transformó en un flujo de escombros que se canalizó por el río Tambo y llegó al océano Pacífico, situado a más de 150 km de distancia (Mariño y Thouret, 2003).

En el volcán Misti se han encontrado dos depósitos de avalanchas de escombros que están asociados al colapso de sus flancos sur, suroeste y noroeste. El depósito más antiguo aflora entre 13 km y 15 km al sur y suroeste del Misti, en los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Chiguata y Paucarpata. Estos depósitos infrayacen a depósitos de caída y flujos piroclásticos del Misti

de más de 30 000 años AP. El segundo depósito aflora en la margen derecha del cañón del río Chili, entre 6 km y 7 km al noroeste del cráter del volcán. Este depósito se emplazó posiblemente alrededor de hace 11 000 años AP.

Según las características geomorfológicas y estructurales del volcán Misti, es posible la ocurrencia de avalanchas de escombros debido al colapso o derrumbe de sus flancos oeste, noroeste o sur, esto debido a la fuerte pendiente que presentan y a la presencia de fallas geológicas. El colapso puede estar asociado a una importante erupción explosiva o crecimiento de domos de lava. Si el colapso fuera del flanco oeste o noroeste los depósitos fácilmente represarían el río Chili, cuyo desembalse generaría lahares que se desplazarían a lo largo del valle del río Chili e inundarían la cuenca baja. Si el colapso fuera del flanco sur, las avalanchas de escombros afectarían sectores urbanos ubicados al sur, sureste y suroeste del Misti. Según Vargas et al. (2021), la distancia que alcanzarían las avalanchas de escombros sería entre 6 km y 15 km de la cima del volcán.

5. Resultados: mapas de peligros del volcán Misti

A continuación, se detallan los lineamientos seguidos en la elaboración del mapa de peligros del volcán Misti:

- Se tuvo en cuenta estudios previos efectuados sobre las erupciones pasadas del volcán Misti, estratigrafía volcánica, historia eruptiva, alcance de los productos en erupciones pasadas, así como la frecuencia de los eventos (Thouret et al., 2001; Legros, 2001; Harpel et al., 2011; Mariño et al., 2016).
- La evaluación del peligro fue realizada con base en datos científicos disponibles y a la simulación numérica utilizando *softwares* especializados.
- Los criterios para evaluar el peligro fueron la recurrencia y severidad de los diferentes procesos volcánicos presentados por el Misti.
- Para la construcción de los escenarios eruptivos se tuvo en cuenta toda la información geológica, vulcanológica, geocronológica, geoquímica, petrológica y geofísica disponibles.
- Se tuvo en cuenta el análisis de procesos que han ocurrido en otros volcanes considerados como "análogos" al volcán Misti.

Se han elaborado cuatro mapas de peligros: 1) mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal (Figura 13), 2) mapa de peligros por caídas de ceniza para una erupción vulcaniana con IEV 1-2 (Figura 14), 3) mapa de peligros por caídas piroclásticas para una erupción subpliniana y pliniana (IEV 4-5) (Figura 15), y 4) mapa de peligros por lahares (Figura 16). Finalmente, todos estos mapas 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

La zonificación de peligros del mapa principal se realizó para el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava, proyectiles balísticos,

lahares y avalanchas de escombros. En el mapa, las zonas susceptibles a ser afectadas por los diferentes procesos volcánicos antes mencionados se representan con tres colores: rojo, naranja y amarillo (Figura 13). La determinación de las tres zonas de peligros está basada en la combinación de las zonas que pueden ser afectadas por diferentes fenómenos volcánicos.

5.1.1 Zona de alto peligro (rojo)

En el mapa, los límites de la zona de alto peligro (color rojo) (Figura 13), en el caso de los sectores norte, oeste, suroeste y sur del Misti, se ubican entre 6 km y 7 km de distancia del cráter, mientras que en el sector este del Misti se encuentra entre 5 km y 6 km de distancia. Para delimitar la zona de alto peligro, se consideró un escenario eruptivo de tipo vulcaniano con IEV 1-2, y una erupción de tipo efusiva. Durante estos tipos de erupciones, esta zona puede ser severamente afectada por caídas de ceniza, flujos piroclásticos, proyectiles balísticos, lahares, flujos de lava y avalanchas de escombros. Debido a su cercanía al volcán y a sus características geomorfológicas, es la zona de mayor peligro, pues cualquier tipo de erupción la puede afectar, inclusive las de baja magnitud, como la ocurrida en el siglo XV que tuvo un IEV 2.

Los límites de la zona de alto peligro coinciden con el alcance de la mayoría de flujos de lavas del Misti. Durante erupciones efusivas, esta zona también puede ser afectada por flujos de lava.

Durante erupciones vulcanianas también pueden generarse flujos piroclásticos de poco volumen. Por ejemplo, en las erupciones vulcanianas del volcán Tungurahua (Ecuador) de 2006 y 2010, con IEV 2, se generaron flujos piroclásticos que viajaron a más de 4 km del cráter de dicho volcán (Hall et al., 2013).

La zona de alto peligro también se extiende a lo largo de las quebradas que se prolongan del volcán Misti y del río Chili, esto debido al posible emplazamiento de lahares que han sido frecuentes durante erupciones vulcanianas con IEV 2. Asimismo, en las quebradas San Lázaro, Pastores, El Pato, Huarangal, y Agua Salada, que descienden por los flancos sur y suroeste del volcán Misti, se han identificado depósitos de lahares que sobreyacen al lahar de la erupción de hace 2000 años AP. Además, la zona de alto peligro puede ser afectada por avalanchas de escombros producto de un derrumbe o colapso de flanco del Misti, tal como señala Vargas et al. (2021).

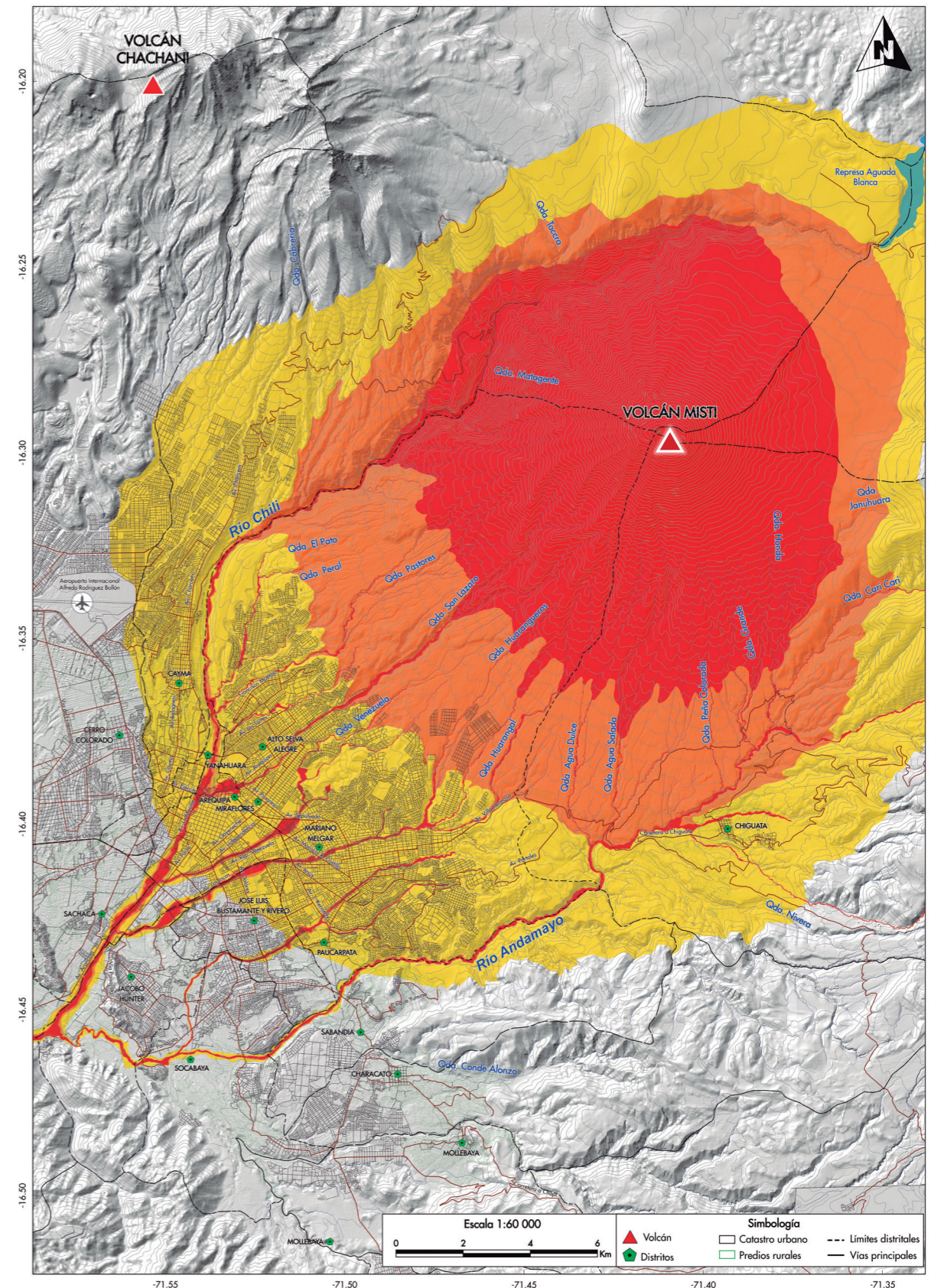


Figura 13. Mapa proximal de peligro múltiples en el cual se muestran las zonas de peligro por el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas de escombros, lahares y eyección de proyectiles balísticos. De color rojo se representa la zona de alto peligro; de naranja, la zona de moderado peligro y, de amarillo, la zona de bajo peligro.

5.1.2 Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de moderado peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Los límites de la zona de moderado peligro se encuentran a una distancia aproximada de entre 6 km y 12 km hacia al oeste, suroeste y sur del cráter del Misti, y de 5 km a 8 km al este y noreste del cráter.

Para delimitar la zona de moderado peligro (naranja, Figura 13), se consideró un escenario de erupción subpliniana a pliniana con IEV 3-4. Durante este tipo de erupciones, esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas y lapilli de pómez, flujos piroclásticos, lahares y avalanchas de escombros. Esta zona sería difícilmente afectada por flujos de lavas debido a la elevada viscosidad; sin embargo, sí sería perjudicada durante erupciones importantes, como la erupción explosiva que generó el depósito de caída de lapilli de pómez "Autopista" (Figura 6) que tuvo un IEV 4 y ocurrió entre 20 000 y 14 000 años AP (Cacya et al., 2007).

La zona de moderado peligro también se extiende a lo largo de las quebradas que se prolongan del volcán Misti y del río Chili, esto debido al posible emplazamiento de lahares. Además, la zona de moderado peligro puede ser afectada por avalanchas de escombros productos de un derrumbe o colapso de flanco sur o noroeste del volcán Misti, tal como lo sugiere Vargas et al. (2021).

5.1.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro, en color amarillo en el mapa, es la zona más alejada del volcán y, por tanto, la de menor peligro en caso ocurra una erupción del Misti. Los límites de la zona de bajo peligro en los sectores suroeste y sur del Misti se ubican entre 12 km y 17 km de distancia del cráter del volcán. En tanto, en el sector norte y noreste, estos límites se ubican entre 8 km y 13 km del cráter del Misti. Para delimitar la zona de bajo peligro (Figura 13) se consideró un escenario de erupción pliniana con IEV 5, el cual es poco frecuente en la historia eruptiva del volcán Misti. Durante este tipo de erupciones esta zona puede ser afectada por flujos y oleadas piroclásticas, lahares, avalanchas

de escombros, así como por caídas de pómez o ceniza. Durante la erupción pliniana del Misti ocurrida hace 2000 años AP, parte de esta zona fue afectada por flujos piroclásticos y lahares. Los flujos piroclásticos recorrieron al menos hasta 13 km de distancia en dirección suroeste del cráter del Misti (Cobeñas et al., 2012). Asimismo, en dicha zona, a 15 km al sur y suroeste del cráter, afloran depósitos de flujos piroclásticos del Misti generados hace 47 300 años AP, además del depósito de flujo piroclástico rico en pómez de hace 40 000 AP, el cual aflora a 14 km al oeste del cráter del volcán (Thouret et al., 2001).

La zona de bajo peligro también se extiende a lo largo de los ríos Chili y Andamayo, esto debido al muy posible emplazamiento de lahares de importante volumen durante erupciones de gran magnitud. Por ejemplo, Cereceda y Mariño (2008) identificaron depósitos de lahares en la zona de Congata, a más de 25 km al suroeste del volcán Misti, los cuales presentan entre 6 m y 8 m de espesor. Debido a su importante espesor, estos depósitos de lahar podrían estar asociados a las erupciones plinianas del volcán Misti. Además, la zona de bajo peligro puede ser afectada por avalanchas de escombros producto de un derrumbe o colapso de flanco del Misti, tal como lo sugiere Vargas et al. (2021).

5.2 Mapa de peligros por caídas de ceniza durante erupción vulcaniana (IEV 2)

El mapa de peligros por caídas de cenizas para un escenario de erupción vulcaniana del volcán Misti muestra tres zonas: zona de alto peligro en rojo, zona de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo (Figura 14).

5.2.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal y comprende un radio aproximado de 12 km a 14 km alrededor del cráter del volcán Misti (Figura 14). Esta zona puede ser afectada por la caída de cenizas durante erupciones de magnitud baja con IEV 2; el material formaría una capa de un espesor menor a 5 cm. Estos valores son coherentes con el área cubierta por la ceniza de la erupción del volcán Misti del siglo XV (Thouret et al., 2001).

5.2.2 Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de moderado peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Dicha zona tiene una configuración elíptica, cuyos límites se hallan aproximadamente entre 14 km y 73 km al este, y entre 14 km y

58 km al oeste del cráter del volcán Misti (Figura 14). Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa con espesores de algunos centímetros a milímetros. Estos valores son coherentes con aquellos de la erupción del volcán Ubinas de los años 2006-2009, con IEV 2. Esta erupción dejó depósitos de ceniza con espesores de 1 mm en un radio de 30 km del cráter del volcán Ubinas (Rivera et al., 2014).

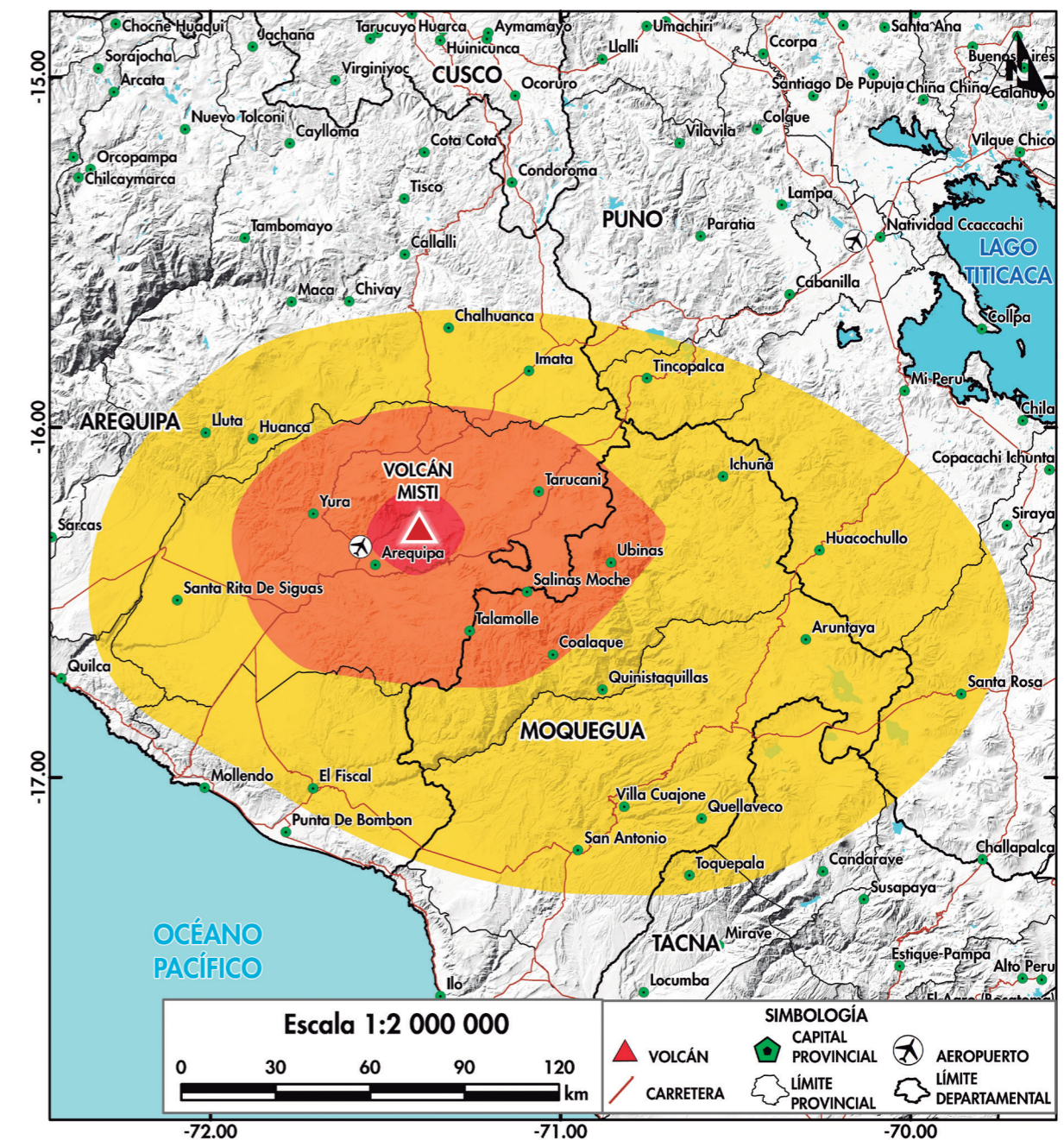


Figura 14. Mapa de peligro por caída de ceniza del volcán Misti para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano con IEV 1-2 (simulación USGS, 2021).

5.2.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro tiene una configuración elíptica, cuyos límites se hallan a una distancia de entre 58 km a más de 110 km al oeste, de 36 km a 70 km al norte, y de 73 km a 162 km al este del volcán Misti (Figura 14). Durante erupciones vulcanianas, esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas que formarían una capa con espesores menores a 1 mm. Estos valores son coherentes con el espesor de la capa de ceniza depositada durante la erupción del volcán Ubinas del año 2019, la cual mide 1 mm de espesor a más de 90 km de distancia del cráter del Ubinas (Aguilar et al., 2019).

5.3 Mapa de peligros por caídas piroclásticas para una erupción subpliniana-pliniana (IEV 4-5)

El mapa de peligros por caídas piroclásticas para una erupción de gran magnitud del volcán Misti (Figura 15) se realizó con base en un escenario de erupción de tipo subpliniana y pliniana con IEV 4-5. Se escogió este escenario ya que se han identificado varios depósitos de caídas piroclásticas del volcán Misti que han sido asociadas a estos tipos de erupciones.

5.3.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal y se halla a una distancia de más de 350 km al este, 400 km al oeste, 150 km al norte y más de 270 km al sur del volcán Misti (Figura 15). Dicha zona puede ser afectada por caídas de cenizas que formarían una capa de más de 1 cm de espesor. De manera local, durante erupciones subplinianas o plinianas con IEV 4-5, las zonas aledañas al Misti pueden ser afectadas por caída de lapilli de pómez y ceniza que formarían una capa de 1.0 a 0.5 m de espesor, en un radio de 10 km a 12 km alrededor del volcán. Los espesores de lapilli de pómez y ceniza disminuyen conforme se incrementa la distancia respecto al volcán.

Estos resultados son coherentes con el espesor del depósito de caída de lapilli de pómez "Autopista" que corresponde a una erupción pliniana con IEV 4, la cual tiene 40 cm a 20 km al oeste del cráter

(Cacya et al., 2007). Además, los resultados son coherentes con los depósitos de caída de pómez correspondiente a la erupción pliniana del volcán Misti de hace 2000 años AP. Durante dicha erupción, la zona proximal del Misti fue cubierta por una capa de lapilli de pómez que tiene 50 cm de espesor a 3 km al suroeste del Misti y 5 cm a 28 km al suroeste de la cima del Misti (Cobeñas et al., 2012). Asimismo, los resultados son coherentes con los depósitos de lapilli de pómez "Sacarosa", correspondientes a la erupción pliniana del volcán Misti (IEV 5) ocurrida entre 38 500 y 32 000 años AP. Los depósitos de lapilli de pómez presentan espesores de 1.10 cm a 10 km al suroeste del volcán Misti (Harpel et al., 2023).

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 (Figura 15). Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, cuyo límite está a una distancia de más de 350 km al este (territorio boliviano), de 400 km a 540 km al oeste y de más de 270 km al sur (territorio chileno). Durante erupciones subplinianas a plinianas con IEV 4-5, esta puede ser afectada por caídas de cenizas de más de 1 mm de espesor. Estos resultados son coherentes con la información basada en los depósitos emitidos por el Misti. Durante la erupción subpliniana (IEV 4) del volcán Calbuco (Chile) en 2015 las cenizas emitidas formaron una capa de 1.5 cm de espesor a 220 km al noreste del cráter, en la localidad de Collón Cura, Argentina (Romero et al., 2016).

Los resultados obtenidos para este escenario coinciden con los depósitos de cenizas "Sacarosa", correspondientes a la erupción pliniana del volcán Misti (IEV 5) ocurrida entre 38 500 y 32 000 años AP, donde los depósitos de ceniza presentaron espesores de 40 cm a 20 km al suroeste del volcán Misti (Harpel et al., 2023).

5.3.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro, color amarillo en el mapa (Figura 15), 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 300 km al este (territorio boliviano), más de 540 km al oeste (océano Pacífico) y más de 270 km al sur del Misti (territorio chileno). Dicha zona puede ser afectada por caídas de cenizas de más de 0.1 mm de espesor. Estos resultados son coherentes

con la información basada en la erupción subpliniana (IEV 4) del volcán Calbuco en Chile, en 2015, durante la cual las cenizas emitidas durante dicha erupción alcanzaron menos de 1.0 mm de espesor a 510 km al noroeste del cráter, en la localidad de Neuquen, Argentina (Romero et al., 2016).

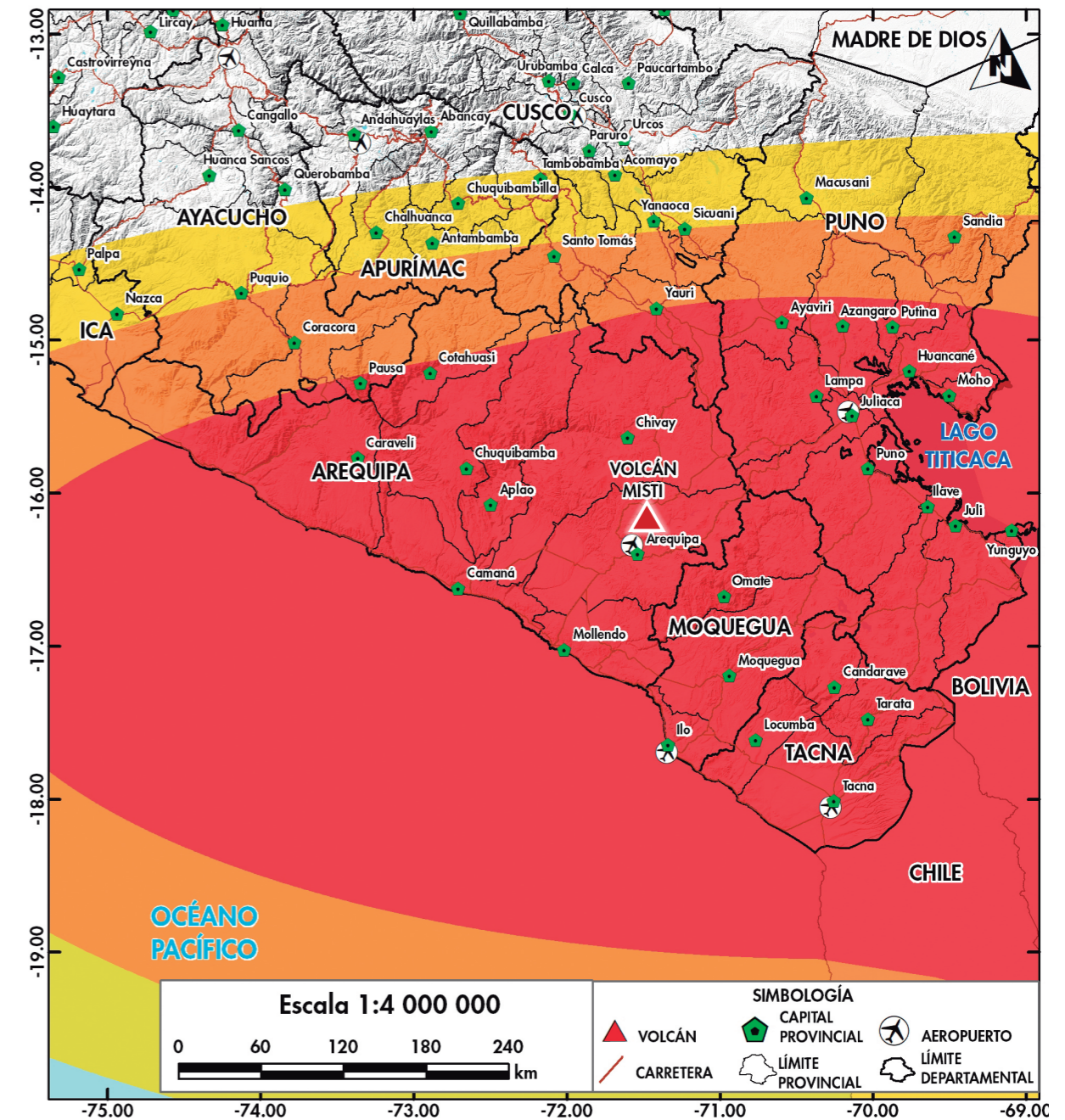


Figura 15. Mapa de peligro por caída de piroclastos del volcán Misti para un escenario eruptivo tipo subpliniano-pliniano con IEV 4-5 (simulación USGS, 2020).

5.4 Mapa de peligros por lahares

El mapa de peligros por descenso de lahares (Figura 16) obtenido está basado en el análisis de depósitos de lahares que se han identificado en las quebradas que se prolongan desde el volcán Misti y en el río Chili, así como en resultados de la simulación numérica y estudios previos efectuados sobre este tipo de flujos. En inmediaciones del Misti, los lahares pueden

generarse de dos maneras: a) durante erupciones volcánicas, con IEV 2 a 5 que pueden emplazar productos volcánicos calientes sobre la cobertura de nieve o hielo que permanece en la cima del volcán, o lluvias intensas; y b) por el colapso de un sector del flanco noroeste del volcán Misti que provocaría el represamiento del río Chili en la zona del cañón, y su posterior desembalse.

En el mapa de peligros, la zona roja es considerada de alto peligro (Figura 16) y corresponde a las

áreas que pueden ser afectadas por lahares de hasta 150 000 m³. Los lahares podrían asociarse a erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1-2) o lluvias intensas.

La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de 500 000 m³. Pueden generarse durante erupciones de gran magnitud, con IEV 3-4. Este escenario está basado en los lahares asociados a la erupción de hace 2000 años AP del volcán Misti.

La zona amarilla es considerada de bajo peligro y puede ser afectada por lahares de 1 millón de m³. Pueden generarse durante erupciones de gran magnitud, con IEV 5 o colapso de un sector del flanco noroeste del Misti. El escenario está basado en la presencia del depósito de lahar de la erupción de hace 2000 años, cuyos depósitos miden al menos 2 m de espesor en el distrito de Alto Selva Alegre, a 13 km al suroeste del cráter del Misti. Se debe mencionar que las condiciones climáticas actuales, sin la presencia de un casquete glaciar, son distintas a las de épocas pasadas.

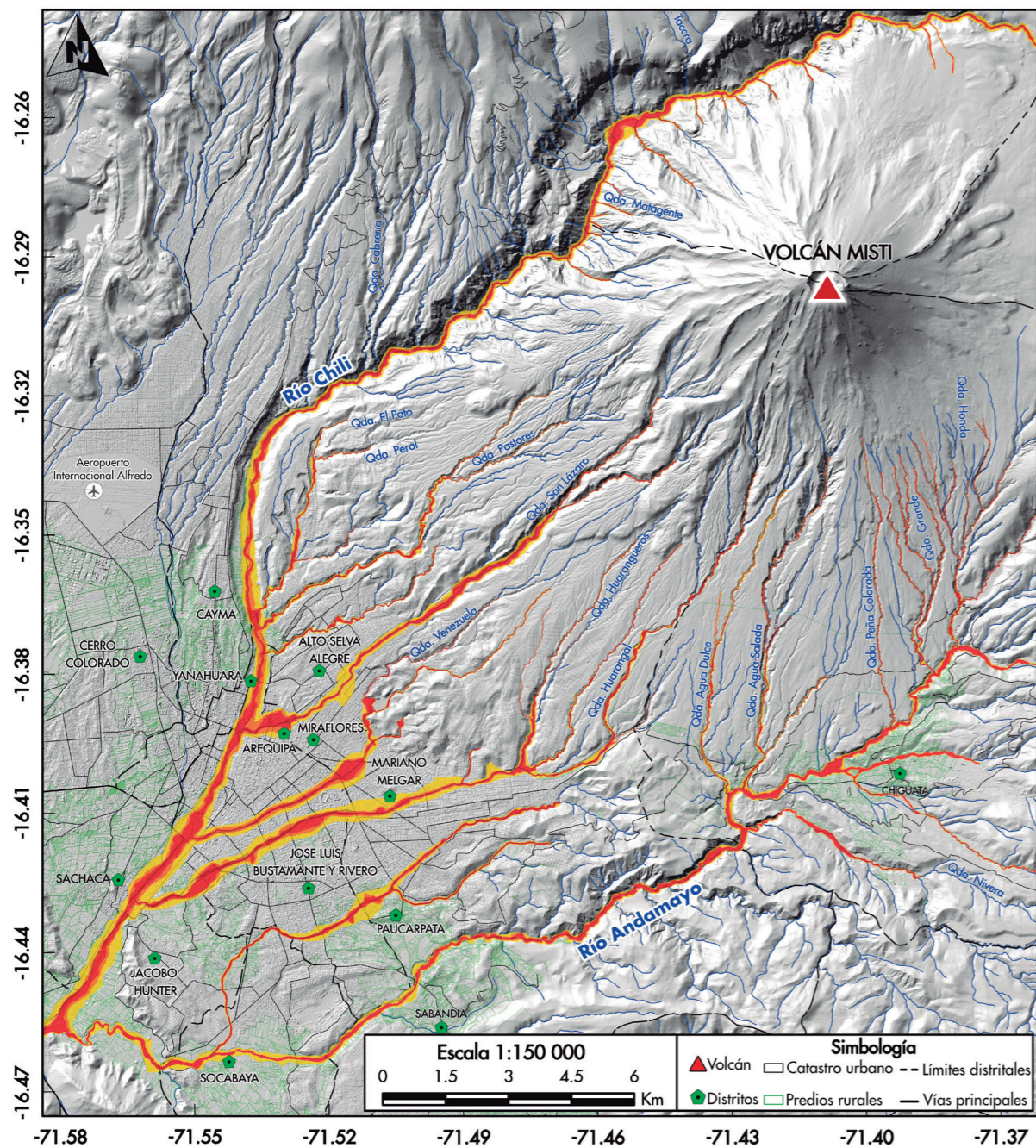


Figura 16. Mapa de peligros por lahares del volcán Misti.

Conclusiones

- El Misti es un volcán activo, cuya cima está ubicada a 17 km del centro de la ciudad de Arequipa. El Misti presentó una gran erupción explosiva, de IEV 5, hace 2000 años AP. Durante los últimos 600 años ha presentado por lo menos tres erupciones leves a moderadas, en 1440-1470; 1784 d. C. y 1787 d. C. La erupción de 1440-1470 tuvo un IEV igual a 2.
- Los principales peligros en el volcán Misti son las caídas piroclásticas, lahares, flujos piroclásticos, flujos de lava y avalanchas de escombros. Para la elaboración de los mapas de peligros, se consideraron seis escenarios: 1) erupción vulcaniana con IEV 1-2; 2) erupción subpliniana con IEV 3-4; 3) erupción pliniana con IEV 5; 4) erupción efusiva con emisión de lavas; 5) erupción con crecimiento y colapso de domos de lava; y 6) colapso de flanco y emplazamiento de avalanchas de escombros.
- El mapa proximal de peligros múltiples se realizó para el emplazamiento de flujos y oleadas piroclásticas, flujos de lava, bloques balísticos, lahares y avalanchas de escombros. Los límites de la zona de alto peligro (rojo), en los sectores norte, noroeste y este, se encuentran aproximadamente entre 6 km y 7 km de distancia del cráter del Misti, mientras que, en el sector este, se encuentran entre 5 km y 6 km de distancia. Los límites de la zona de moderado peligro (naranja) se encuentran aproximadamente entre 6 km y 12 km hacia el oeste, suroeste y sur del cráter, mientras que, hacia los sectores este y noreste, se encuentran entre 5 km a 8 km del cráter. Finalmente, los límites de la zona de bajo peligro (amarillo), en los sectores suroeste y sur, se ubican entre 12 km y 17 km de distancia del cráter. Finalmente, en los sectores norte y noreste, se ubican entre 8 km y 13 km del cráter del Misti.
- Mapa de peligros por caídas de ceniza para un escenario de erupción vulcaniana (IEV 1-2): En él, la zona de alto peligro (rojo) comprende un radio aproximado de 12 km a 14 km alrededor del cráter del Misti. Esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas que formarían una capa con un espesor menor a 5 cm. La zona de moderado peligro (naranja) tiene una configuración elíptica, cuyos límites se hallan aproximadamente entre 55 km y 73 km al este, y 58 km al oeste del cráter del volcán. Esta zona puede ser afectada por caídas de

cenizas que formarían una capa con espesores de algunos centímetros a milímetros. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, cuyos límites se hallan a una distancia de poco más de 110 km al oeste, 74 km al norte y 162 km al este del volcán. Durante erupciones vulcanianas, esta zona puede ser afectada por caídas de cenizas que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor.

- Mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de erupción subpliniana-pliniana (IEV 4-5): La zona de alto peligro (rojo) por caída de piroclastos corresponde al área proximal y se halla a una distancia de más de 350 km al este, 400 km al oeste, 150 km al norte y más de 270 km al sur del Misti. Dicha zona puede ser afectada por caídas de cenizas que formarían una capa de más de 1 cm de espesor. De manera local, durante erupciones subplinianas o plinianas con IEV 4-5, las zonas aledañas al Misti, en un radio de 10 km a 12 km alrededor del volcán, pueden ser afectadas por caída de lapilli de pómez y ceniza que formarían una capa de 1.0 m a 0.5 m de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, cuyo límite está a una distancia de más de 350 km al este, 400 km al oeste y más de 270 km al sur. Durante erupciones subplinianas a plinianas con IEV 4-5, esta puede ser afectada por caídas de cenizas de más de 1 mm de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) corresponde 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 300 km al este, más de 540 km al oeste y más de 270 km al sur del Misti (territorio chileno). Dicha zona puede ser afectada por caídas de cenizas de más de 0.1 mm de espesor.
- El mapa de peligro por emplazamiento de lahares (flujos de barro) muestra zonas de color rojo, naranja y amarillo. Los lahares en la zona roja son de alcance local y pueden generarse durante erupciones de pequeña a moderada magnitud (IEV 2) o precipitaciones intensas. Los lahares que se muestran en color naranja son de alcance regional y pueden generarse durante erupciones de gran magnitud (IEV 3-4). Los lahares que se muestran en color amarillo son de alcance regional y pueden generarse durante erupciones de gran magnitud (IEV 5) y por el colapso del flanco noroeste del volcán Misti que provocaría el represamiento del río Chili en la zona del cañón.

Referencias

- Aguilar, R., Ortega, M., Manrique, N., Apaza, F., Rivera, M., Harpel, C. (2019). *Characteristics of the beginning of the 2019 eruptive crisis at Ubinas volcano (Peru)* [poster]. AGU 2019 Fall Meeting, 09-13 December 2019, San Francisco, CA, USA.
- Ballón, T. (1900). *El Misti*, Primer Festival del Libro Arequipeño.
- Ballón T. (1972). *Paleomagnetismo de las Rocas volcánicas de Arequipa*. Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.
- Barriga, V. (1951). *Los Terremotos de Arequipa (1582 – 1868)* Editorial La Colmena S.A.
- Bernard, B. (2008). *Étude des dépôts d'avalanches de débris volcaniques: analyse sédimentologique d'exemples naturels et identification des mécanismes de mise en place*. Tesis Doctoral en Ciencias de la Tierra, Université Blaise Pascal, Francia. 295 p.
- 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., Glicken, H. (1986). *Volcanic Debris Avalanches*. *Earthquakes & Volcanoes*, v.18, n.5, p.195-206.
- Cacya, L., Mariño, J., Rivera, M., Thouret, J-C. (2007). La erupción pliniana "Autopista" del volcán Misti (21,000-11,000 años AP). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 102, p. 25-42.
- Carey S. (1996). "Modeling of tephra fallout from atmospheric eruptions", in Scarpa, L.A. and Tilling, R.I. (eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards*, Berlin, Springer Verlag, pp. 429-463.
- Cas, R., Wright, J. (1987). *Volcanic successions, modern and ancient*, Allen & Unwin, London, 528 pp.
- Cereceda, C., Mariño, J. (2008). *Estudio de flujos de escombros volcánicos en el valle del río Chili, sector Chapi Chico-Uchumayo, Arequipa*. En: XIII Congreso Latinoamericano de Geología y XIV Congreso Peruano de Geología, Lima, 2008. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 6 p.
- Chávez, J. (1992). *La erupción del Volcán Misti. Pasado Presente y Futuro*: Arequipa, Impresiones Zenit, 158 p.
- Charbonnier, S., Gertisser, R. (2008). Field observations and surface characteristics of pristine block-and-ash flow deposits from the 2006 eruption of Merapi volcano, Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177: 971-982.
- Cobeñas, G., Thouret, J-C., Bonadona, C., Boivin, P. (2012). The c.2030 yr BP Plinian eruption of El Misti volcano, Peru: Eruption dynamics and hazard implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 241-242, 105-120.
- 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*, vol. 140, p. 209-231.
- De Silva, S.L., Francis, P.W. (1991). *Volcanoes of the Central Andes*: Berlin, Springer, 216 p.
- 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.
- Francis, P.W. (1993). *Volcanoes: a planetary perspective*. New York: Oxford University Press, 443 p.
- Guillaude, R., Thouret, J.C., Huaman, D., Le Guern, F. (1992). *L'activité éruptive actuelle du volcan Nevado Sabancaya (Sud du Pérou) et l'évaluation des menaces et des risques: géologie, cartographie et imagerie satellitaire*. Ministère de l'Environnement et Centre National d'Études Spatiales, Paris, 120 p.
- Glicken, H. (1996). *Rockslide-Debris Avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington*. USGS Open-File Report, p. 96-677.

- 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.
- Hantke, G., Parodi, A. (1966). *Catalogue of the active volcanoes of the world. Part XIX: Colombia, Ecuador and Peru*: Naples, IAVCEI, 73 p.
- Harpel, C.J., de Silva, S., Salas, G. (2011). The 2 ka Eruption of Misti Volcano, Southern Peru—The Most Recent Plinian Eruption of Arequipa's Iconic Volcano. *Geological Society of America Special Paper* 484.
- Harpel, C.J., Cuno, J.J., Takach, M.K., Rivera, M., Aguilar, R., Tepley, F.J., Garcia, F. (2023). The late Pleistocene Sacarosa tephrafall deposit, Misti volcano, Arequipa, Peru: its magma, eruption, and implications past and future eruptive activity. *Bulletin of Volcanology* 85, 1–24.
- Hoblitt, R., Walder, J., Driedger, C., Scott, K., Pringle, P., Vallance, J. (1995). Volcano Hazards from Mount Rainier, Washington: U.S.G.S. Open- File Report 95- 273.
- INEI (2018). *Resultados definitivos de los Censos Nacionales 2007: XII de Población, VII de vivienda y III de Comunidades Indígenas*. Arequipa. <https://censo2017.inei.gob.pe/resultados-definitivos-de-los-censos-nacionales-2017/>
- Iverson, R.M., Schilling, S.P., Vallance, J.W. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin* 100: 972-984
- Jiménez, P., Amézaga, J., Rotting, T., Guzmán, E. (2010). *El Río Chili: Cuenca árida con presencia minera*. Instituto Regional de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa-Perú. 161 p.
- Legros, F. (2001). Tephra stratigraphy of Misti volcano, Peru. *Journal of South American Earth Science* 14, 15–29.
- Machacca, R., Lesage, P., Tavera, H., Pesicek, J., Caudron, C., Torres, J., Puma, N., Vargas, K., Lazarte, I., Rivera, M., Burgisser, A. (2023). The 2013–2020 seismic activity at Sabancaya Volcano (Peru): Long lasting unrest and eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 435(107767).
- Malin, M.C., Sheridan, M.F. (1982). Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 217(4560): 637-640.
- Mastin, L. G., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., Dean, K., et al. (2009). A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 186, 10–21.
- Mariño, J., Thouret, J-C. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 95, p. 7-16.
- Mariño, J., Rivera, M., Thouret, J.C., Macedo, L. (2016). *Geología y Mapa de Peligros del Volcán Misti*. INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, N° 60, Lima. Perú.
- McCormick, M. P., Thompson, L. W., Trepte, C. R. (1995). Atmospheric effects of the Pinatubo eruption. *Nature*, 373(6513), 399-403.
- Newhall, C., Self, S. (1982). The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 87, Nro. c2, p. 1231-1238.
- Norabuena, E.O., 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.
- Paquereau, P., Thouret, J. C., Worner, G., Fornari, M. (2006). Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154, p. 251-275.
- Rivera, M., Thouret, J., & Gourgau, A. (1998). Ubinas, el volcán más activo del Perú desde 1550: geología y evaluación de las amenazas volcánicas. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, 88, 53-71.
- Rivera, M., Thouret, J.C., Samaniego, P., Le Pennec, J.L. (2014). The 2006–2009 activity of Ubinas volcano (Peru): petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 270:122–141.
- Rivera, M., 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
- Romero, J.E., Morgavi, D., Arzilli, F., Daga, R., Caselli, A., Reckziegel, F., Viramonte, J., DíazAlvarado, J., Polacci, M., Burton, M., Perugini, D., (2016). Eruption dynamics of the 22–23 April 2015 Calbuco Volcano (Southern Chile): analyses of tephra fall deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 317, 15–29.
- 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.
- Samaniego, P., Rivera, M., Manrique, N., Schiavi, F., Nauret, F., Liorzou, C., Ancellin, M.-A. (2020). Linking magmatic processes and magma chemistry during the post-glacial to recent explosive eruptions of Ubinas volcano (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407, 107095.
- 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.
- Schwaiger, H., Denlinger, R., Mastin, L. (2012). Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition: *Journal of Geophysical Research*, 117. 20 pp. doi:10.1029/2011JB008968.
- Siebert, L., Simkin, 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, S., Rymer, H., Stix, J. (2000). *Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press: 617–626. San Diego, California, Estados Unidos.
- Simkin, T., Siebert, L. (1994). *Volcanoes of the World – A regional directory, gazetteer and chronology of volcanism during the last 10,000 years*. ed. Smithsonian Institution, Global Volcanism program, Washington DC. 348 p.
- Suni, J. (1999). *Estudio Geológico y Vulcanológico del volcán El Misti y sus alrededores*. Tesis de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional San Agustín, Facultad de Geología y Minas, 179 p
- Suzuki, T. (1983). "A theoretical model for dispersion of tephra", in: D. Shimozuru, I. Yokoyama (eds.), *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, pp. 93-113
- Thouret, J.-C., Guillaude, R., Huaman, D., Gourgau, A., Salas, G., Chorowicz, J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1, 165, 49-63.
- Thouret, J.C., Finizola, A., Fornari, M., Suni, J., Legeley-Padovani, A., Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano nearby the city of Arequipa, Peru. *Geol. Soc. Am. Bull.* 113 (12): 1593-1610.
- Thouret, J.-C., Rivera, M., Worner, G., Gerbe, M., Finizola, A., Fornari, M., Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology* 67, 557–589.
- Thouret J.C., Arapa E., Charbonnier S., Guerrero A., Kelfoun K., Cordoba G., Rodriguez D., Santoni O. (2022). Modeling tephra fall and sediment-water flows to assess their impact on a vulnerable building stock in the City of Arequipa, Peru. *Frontiers in Earth Science* 10, 865989
- 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.
- Ui, T.; Takarada, S. & Yoshimoto, M. (2000). Debris Avalanches. In *Encyclopedia of Volcanoes*, Sigurdsson, H. (editor.). Academic Press: 617–626. San Diego, California, Estados Unidos.
- Zamácola y Jáuregui, J. D. d. (1804). *Apuntes para la historia de Arequipa*: Primer festival del libro arequipeño: Arequipa, Edición 1958, 15 p.
- Vargas, K., Macedo, L., Lazarte, I., Cruz, J., 2021. *Análisis de los escenarios de peligros volcánicos con origen en el volcán Misti: Aplicación al Distrito de Mariano Melgar (Región Arequipa)*. Informe Técnico N°011-2021/IGP Ciencias de la Tierra Sólida. Instituto Geofísico del Perú. 41 p.
- Vargas-Franco, R.D., Thouret, J.C., Delaite, G., Westen, C., Sheridan, M.F., Siebe, C., Mariño, J., Souriot, T., Stinton, A. (2010). *Mapping and assessing volcanic and flood hazards and risks, with emphasis on lahars, in Arequipa, Peru*. The Geological Society of America Special Paper. (265-281)
- Walker G.P.L. (1971). Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. *J. Geol.* 79, p. 696-714.
- Walker, G.P.L. (1973). Lengths of lava flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 274, P. 107-118.

Información clave para ti

Puedes consultar el mapa de peligros del volcán Misti, 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

Volcán Misti: vista desde el sector este del volcán. El atardecer permite observar la simétrica figura del volcán más conocido del país.



@igp.peru



@igp_peru



@igp.peru



@igp_videos



@institutogeofisicodelperu



@igp.peru