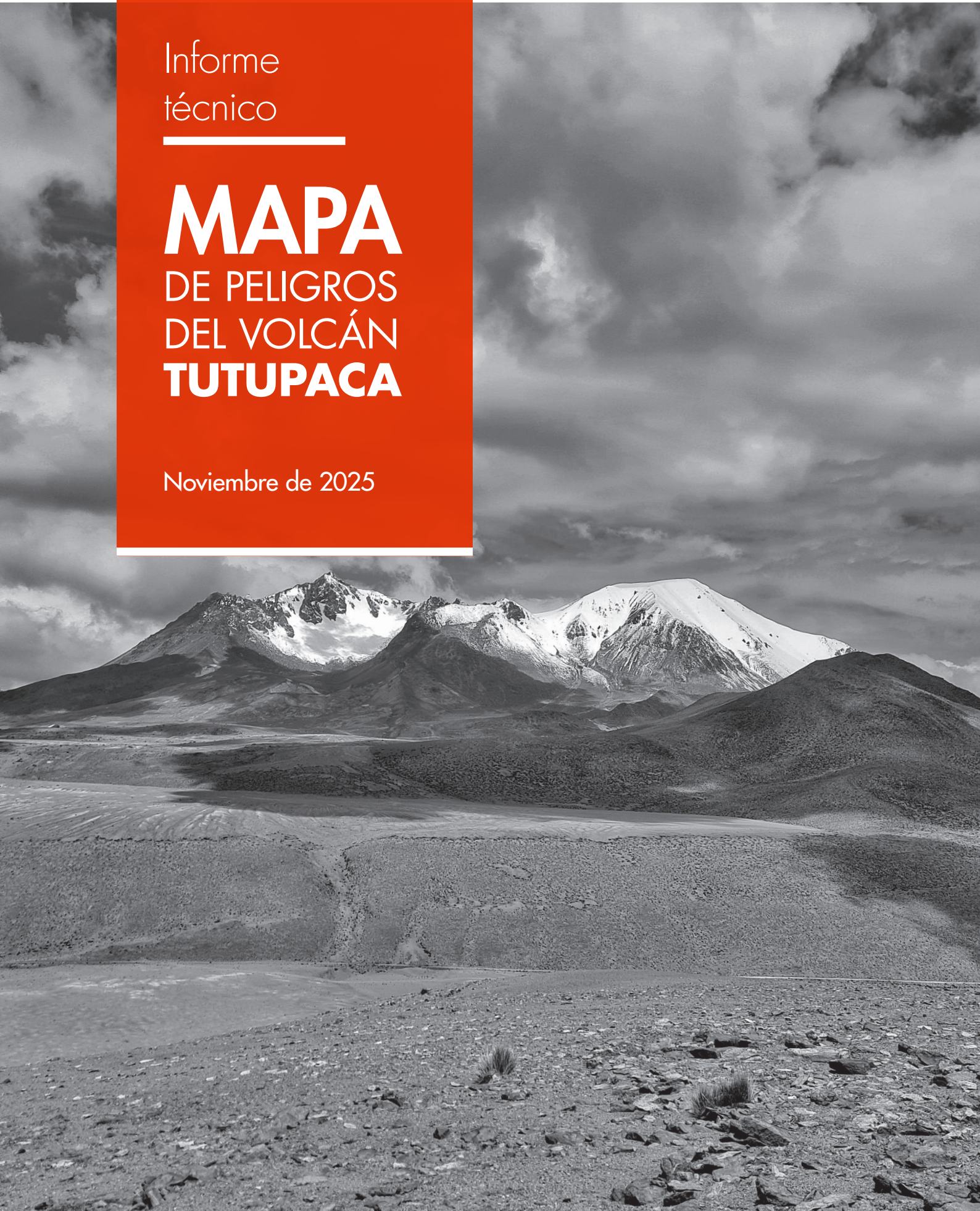


Informe  
técnico

---

# MAPA DE PELIGROS DEL VOLCÁN TUTUPACA

Noviembre de 2025





**Programa Presupuestal 068**  
REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS  
POR DESASTRES

ESTUDIOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

**Actividad**  
Generación de información y monitoreo de peligro volcánico



# INFORME TÉCNICO MAPA DE PELIGROS DEL VOLCÁN TUTUPACA



Lima, Perú  
Noviembre de 2025

# CRÉDITOS

Miguel Ángel Espichán Mariñas  
**Ministro del Ambiente**

Hernando Tavera  
**Jefe institucional del IGP**

Juan Carlos Gómez  
**Director de la Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida del IGP**

Mapa de peligros del volcán Tutupaca  
**Informe técnico**

Marco Rivera  
Juan Cuno  
John Cruz  
David Valdivia  
**Autores**

Marco Rivera  
Jorge Concha  
**Edición de contenido**

Jorge Concha  
**Diseño y diagramación**

Carátula: Vista del volcán Tutupaca

cenvul@igp.gob.pe  
<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/>  
A. H. José María Arguedas, mz. D, lt. 8, Sachaca, Arequipa  
Teléfono: +5154369212

## **Contacto**

Este informe ha sido elaborado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP)  
Calle Badajoz 169, Mayorazgo, Ate, Lima  
Teléfono: +5113172300

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



**REGEN**

Lima, noviembre de 2025

# PRESENTACIÓN



**Dr. Hernando Tavera**

Jefe institucional  
Instituto Geofísico del Perú

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

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

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

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

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

Quienes formamos parte del SINAGERD tenemos claro que no es posible gestionar el riesgo sin el respaldo de la ciencia. Confiamos en que esta misma perspectiva sea compartida por cada peruano y peruana. Sabemos que es un proceso, pero creemos que la generación periódica de productos científicos, como lo es en esta oportunidad este mapa de peligros del volcán Tutupaca, 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 Tutupaca se encuentra ubicado en la zona altoandina de la región Tacna, en la provincia y distrito de Candarave, a 108 km al norte de la ciudad de Tacna. Este volcán se considera como activo por haber presentado erupciones explosivas recientes en los años 1787 y 1802. El Tutupaca está constituido por dos edificios volcánicos, construidos sucesivamente: Tutupaca Occidental y el Tutupaca Oriental. Con base en estudios vulcanológicos previos y datos de campo, en caso de una eventual erupción del volcán Tutupaca se proponen cinco escenarios eruptivos: 1) una erupción de tipo vulcaniano con Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 1–2); 2) una erupción explosiva de tipo subpliniano (IEV 3–4); 3) una erupción explosiva de tipo pliniano (IEV 5); 4) una erupción con el crecimiento de domo o colapso del volcán, y 5) erupciones efusivas.

Con base en estudios previos y modelamiento de procesos volcánicos se han elaborado cinco mapas de peligros: a) Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal, que considera la ocurrencia de flujos de lava, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros, crecimiento de domo, caída de proyectiles balísticos y lahares. b) Mapa de peligros por caídas de ceniza para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano (IEV 1–2), en el cual la zona de alto peligro (rojo) se extiende hasta una distancia de 20 km al norte, 18 km al sur, 22 km al oeste y 18 km al este del volcán Tutupaca. Esta zona puede ser cubierta por una capa de ceniza de algunos centímetros a varios milímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se extiende entre 20 km y 80 km al norte, 18 km y 79 km al sur, 22 km y 92 km al oeste, y entre 18 km a 94 km al este del volcán Tutupaca. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de algunos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) es colindante con la zona de moderado peligro. Los límites se prolongan a una distancia de entre 80 km a 180 km al norte, 79 km a 156 km al sur, 95 km a 193 km al noroeste y 86 km a más de 193 km al sureste del volcán Tutupaca, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor. c) Mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de tipo subpliniano (IEV 3–4), en el cual la zona de alto peligro (rojo) muestra una configuración elíptica alrededor del volcán Tutupaca, con una distancia de 87 km al norte, 66 km al sur, 87 km al este y oeste del volcán Tutupaca. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez que formarían una capa de varios centímetros o decímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) tiene una configuración elíptica alrededor del volcán, que alcanza una distancia de entre 87 km a

199 km al norte, 88 km a 244 km al este y 66 km a más de 142 km al sur y sureste del volcán Tutupaca. Esta zona, colindante con la zona de alto peligro, puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de varios centímetros a milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, con una distancia de entre 199 km a 475 km al norte, 244 km a 473 km al noroeste y más de 200 km al sur y sureste del volcán Tutupaca. Esta zona, colindante con la zona de bajo peligro, puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de varios milímetros de espesor. d) Mapa de peligros por caídas piroclásticas asociadas a una erupción pliniana (IEV 5), en el cual la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se prolonga hasta una distancia de 205 km al oeste y 226 km al este del volcán Tutupaca, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez que formarían una capa de algunos metros a varios centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) comprende una distancia de entre 205 km a 435 km al noroeste y más de 226 km al sureste del volcán Tutupaca, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez que formarían una capa de varios decímetros a milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica y se prolonga desde 435 km a 850 km de distancia al noroeste y más de 800 km al sureste del volcán Tutupaca, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Por el norte, dicha zona se extiende entre 199 km a 475 km del volcán Tutupaca. Esta zona puede ser afectada con cenizas y lapilli de pómez que formarían una capa de varios milímetros de espesor. e) Mapa de peligro por lahares, en el cual la zona roja es considerada de alto peligro, y corresponde a la zona de mayor posibilidad de ser afectada por lahares poco voluminosos ( $350\,000\text{ m}^3$ ) asociados 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 moderado volumen ( $1\text{ Mm}^3$ ); finalmente, la zona amarilla es considerada de bajo peligro o de menor posibilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos ( $2\text{ Mm}^3$ ) asociados a erupciones de alto Índice de Explosividad Volcánica (IEV  $\geq 3$ ).

En caso de una eventual erupción del volcán Tutupaca, las zonas más propensas a ser afectadas por los productos volcánicos serían principalmente la provincia de Candarave (28 km al sureste del volcán), donde habitan cerca de 3482 pobladores, así como terrenos de cultivo, pastizales y obras de infraestructura. De igual manera, se vería afectado el ganado camélido que habita la zona.

# CONTENIDO

<b>7</b>	Presentación
<b>8</b>	Resumen
<b>12</b>	Introducción
<b>14</b>	Condiciones climatológicas
<b>15</b>	Aspecto socioeconómico
<b>17</b>	<b>Los peligros volcánicos</b>
<b>17</b>	Caída de piroclastos (tefras)
<b>18</b>	Flujos y oleadas piroclásticas
<b>18</b>	Lahares (flujos de lodo y escombros)
<b>18</b>	Avalanchas de escombros
<b>19</b>	Flujos de lava
<b>19</b>	Gases volcánicos
<b>20</b>	<b>El volcán Tutupaca</b>
<b>19</b>	Historia eruptiva
<b>24</b>	<b>Datos y metodología para la elaboración de mapas</b>
<b>24</b>	Metodología para la elaboración de mapas
<b>24</b>	<i>Softwares</i> empleados
<b>26</b>	Escenarios eruptivos considerados
<b>31</b>	<b>Resultados: mapas de peligros del volcán Tutupaca</b>
<b>31</b>	Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal
<b>33</b>	Mapa de peligros por caídas de cenizas durante una erupción vulcaniana (IEV 1–2)
<b>35</b>	Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción subpliniana (IEV 3–4)
<b>36</b>	Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción pliniana (IEV 5)
<b>38</b>	Mapa de peligros por lahares
<b>40</b>	<b>Conclusiones</b>
<b>42</b>	<b>Referencias</b>

# TUTUPACA



## Elevación

5801 m s. n. m.



## Región

Tacna



## Provincia

Candarave



## Última erupción

1802



## Población en un radio de 30 km

3988 personas



## Inicio de vigilancia en tiempo real

2018



## Instrumentos y técnicas de vigilancia

1 estación sísmica

1 inclinómetro

Sistemas satelitales



# 1. Introducción

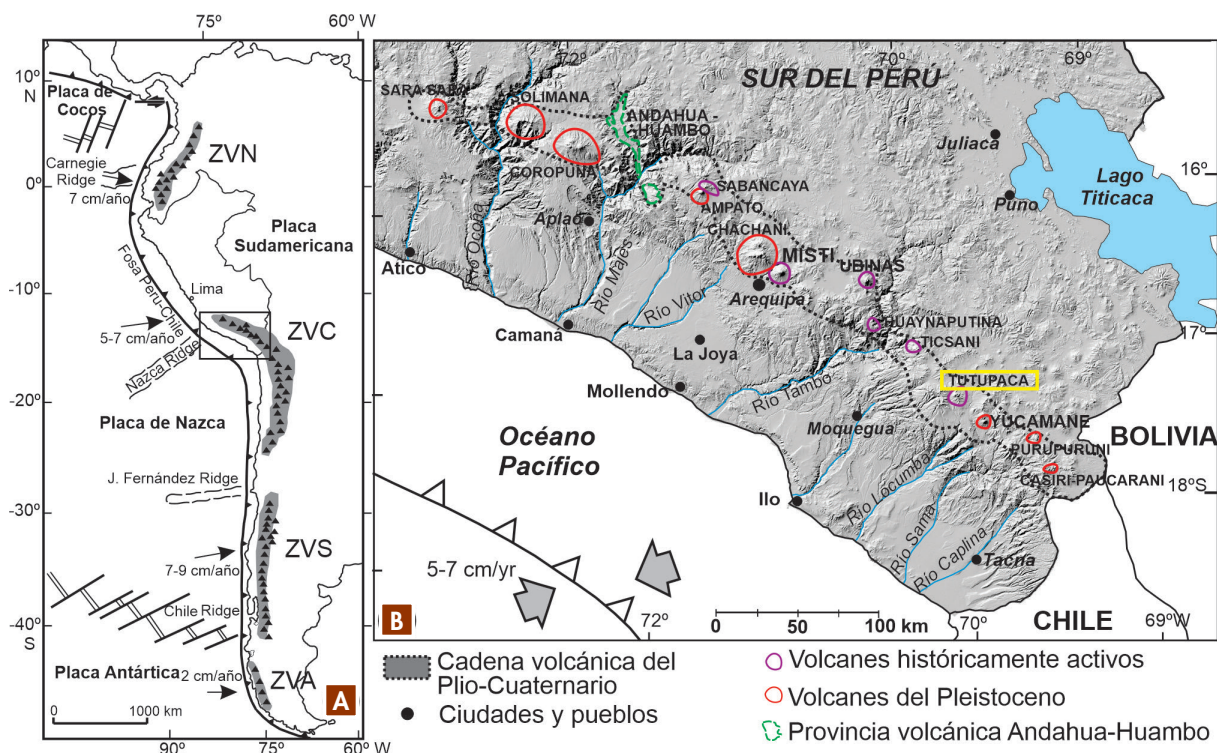
En el Perú, el vulcanismo reciente ocurre a lo largo de la cordillera occidental de los Andes (Figura 1), en las regiones de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna, donde se ubican 16 volcanes activos y potencialmente activos. Este sector de los Andes forma parte de la denominada Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC; De Silva & Francis, 1991). El vulcanismo en los Andes del sur peruano es el resultado de la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental sudamericana. Este vulcanismo se produce entre 190 km y 280 km al este del borde occidental del continente sudamericano, paralelo a la fosa Perú-Chile.

A lo largo de la cadena volcánica del sur peruano se distinguen al menos 12 volcanes de edad Pleistocena-Holocena: Sara Sara, Coropuna, Ampato-Sabancaya, Chachani, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucamane-Calientes, Purupuruni, Casiri, entre otros que han mostrado diversa actividad eruptiva durante su evolución (Figura 1). Además, se distinguen numerosos campos volcánicos y volcanes monogenéticos que corresponden a conos de

escorias y flujos de lava, como los volcanes de Andahua, Orcopampa, Huambo, Yura y Caylloma (Arequipa). Entre estos, los volcanes Sabancaya, Misti, Ubinas, Huaynaputina y Tutupaca han presentado actividad eruptiva durante los últimos 500 años, causando enormes estragos a varios poblados, terrenos de cultivo y obras de infraestructura localizados en sus inmediaciones. Basta mencionar los daños ocasionados por la erupción paroxismal del volcán Huaynaputina, en febrero de 1600 d. C., considerada como la más importante ocurrida en épocas históricas en los Andes, en la cual perdieron la vida más de 1500 personas (Thouret et al., 1999).

Uno de los volcanes activos del sur peruano es el Tutupaca, conformado por el edificio Tutupaca Occidental (353989.00 E, 8116970 N) y edificio Tutupaca Oriental (355264 E, 8116456). Este volcán se encuentra ubicado al extremo norte de la región Tacna, en la jurisdicción de la provincia y distrito de Candarave, aproximadamente a 108 km al norte de la ciudad de Tacna (Figuras 2 y 3). El volcán Tutupaca es considerado como un volcán activo debido a que presentó erupciones recientes en los años 1787 y 1802 d. C. (Samaniego et al., 2015; Mariño et al., 2021).

El volcán Tutupaca puede reactivarse en el futuro



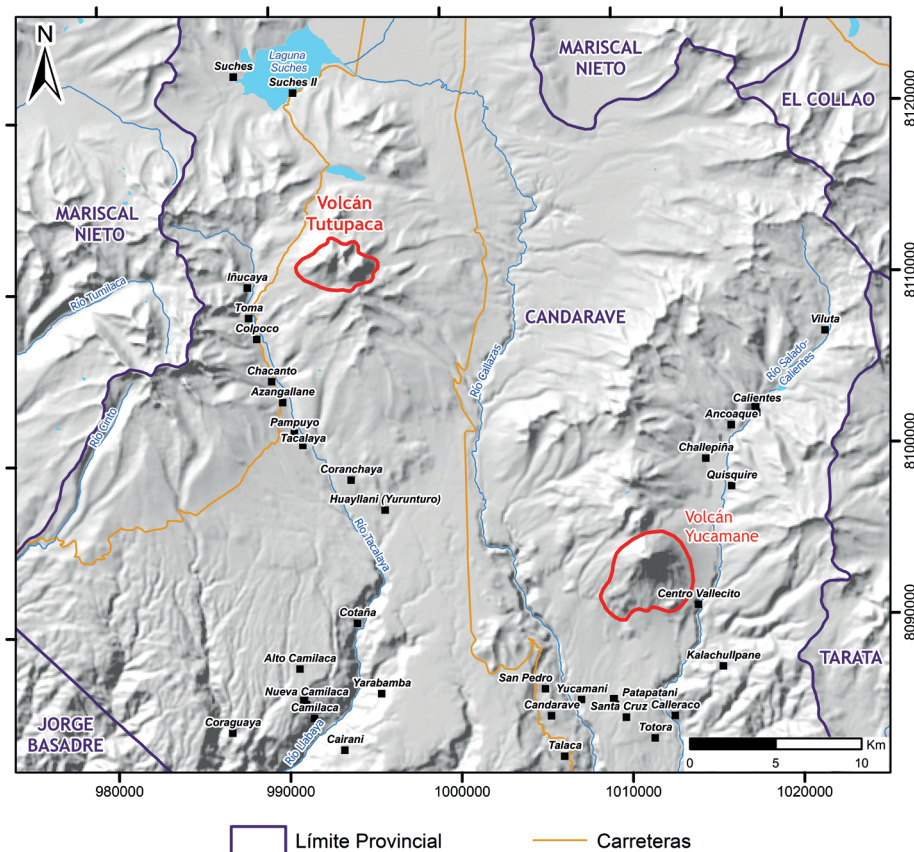
**Figura 1.** (A) Mapa de ubicación de las zonas volcánicas de Sudamérica: norte (ZVN), central (ZVC), sur (ZVS) y austral (ZVA). (B) Sector norte de la ZVC, en el sur del Perú. El volcán Tutupaca está ubicado en el extremo sur de la cadena volcánica Pliocuaternaria del sur peruano.



**Figura 2.** Vista del sector noreste del volcán Tutupaca.

y generar una erupción cuyos productos pueden afectar áreas aledañas, en donde la población se dedica principalmente a la agricultura y ganadería, y existe además actividad minera importante. El objetivo del presente trabajo es presentar los mapas de peligros del volcán Tutupaca, los cuales tienen como propósito brindar a la sociedad, instituciones del

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



**Figura 3.** Mapa de ubicación del volcán Tutupaca y poblados aledaños.

## 1.1 Condiciones climatológicas

El factor climático varía de acuerdo con la altitud, latitud, longitud y otros factores como la cercanía de las lagunas, lagos, etc., lo que origina un contraste de climas bien diferenciados respecto a la parte superior del volcán Tutupaca (localizado entre los 4500 y 5500 m s. n. m.) y la parte inferior del volcán (3800–4500 m s. n. m.), donde se localiza la altiplanicie volcánica o superficie puna.

En este estudio se presentan datos de temperatura y precipitación del área donde se localiza el volcán Tutupaca. Los datos corresponden a dos estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), ubicadas en las localidades de Cairani y Carumas (Tabla 1), próximas a las inmediaciones del volcán Tutupaca. Los datos corresponden al periodo comprendido entre 1965 y 2025.

### 1.1.1 Temperatura

En la zona del volcán Tutupaca, el clima es frígido durante casi todo el año y predominantemente seco en invierno, otoño y primavera. En esta zona, la temperatura diurna está por encima de los 5 °C; sin embargo, por las noches, casi siempre es inferior a 0 °C. En esta zona se torna difícil la vida del hombre, animales y las plantas; en los meses de junio, julio y agosto, las aguas de los manantiales y riachuelos se congelan superficialmente y forman capas de hielo.

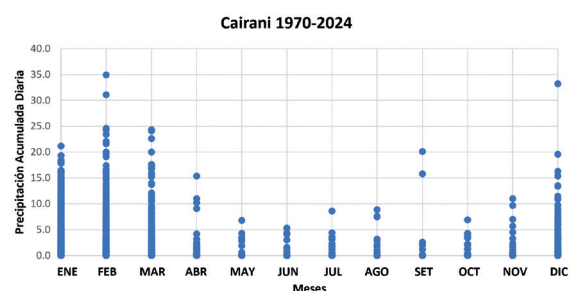
De acuerdo con los registros de la estación meteorológica Cairani, ubicada a 3443 m s. n. m., la temperatura máxima promedio registrada entre los años 2020 y 2024 fue de 15.4 °C. La temperatura mínima promedio fue de 3.9°C, mientras que la temperatura máxima fue de 20.1 °C y la temperatura mínima fue de –1 °C.

**Tabla 1.** Ubicación de las estaciones meteorológicas de Cairani y Carumas operadas por SENAMHI en inmediaciones del volcán Tutupaca.

Nombre	Coordenadas		Altitud (m s. n. m.)	Periodo de Registro	Cuenca
	Latitud	Longitud			
Cairani	-17.2833	-70.3667	3443	1970–2024	Locumba
Carumas	-16.8131	-70.6944	2976	1965–2025	Locumba

### 1.1.2 Precipitación

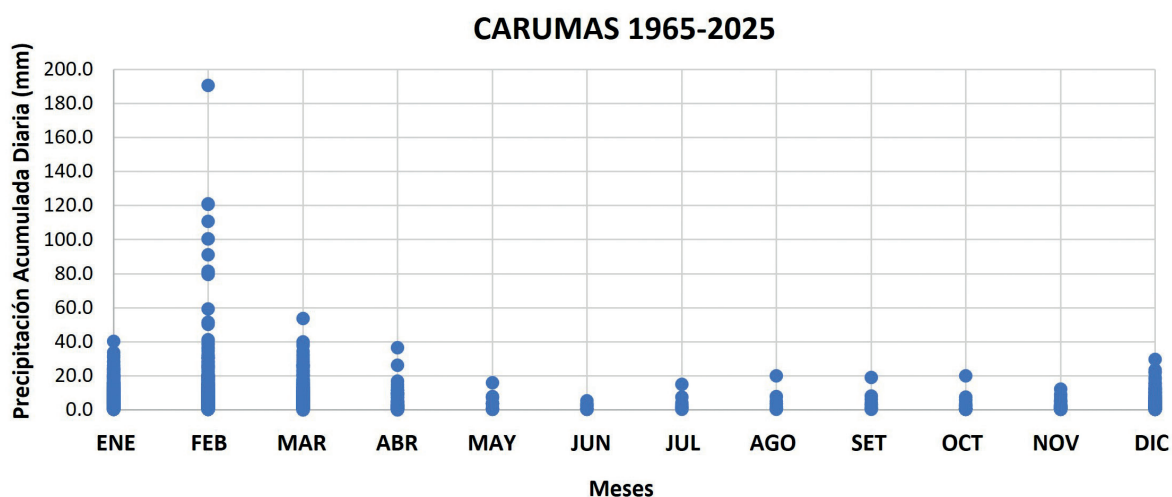
De acuerdo con los registros del periodo 1970–2024 de la estación pluviométrica de Cairani, entre los meses de diciembre y marzo, las precipitaciones diarias fueron de hasta 35 mm. Sin embargo, entre los meses de abril y noviembre, las precipitaciones diarias registradas fueron de hasta 20.1 mm (Figura 4).



**Figura 4.** Precipitación diaria registrada entre enero de 1970 y diciembre de 2024 en la estación meteorológica Cairani (SENAMHI, 2025).

En la estación meteorológica de Carumas, ubicada a 30 km al norte del volcán Tutupaca, se registraron las mayores precipitaciones en los meses de diciembre a abril, con un registro promedio diario de 50 mm. Cabe mencionar que en el mes de febrero, en el periodo 1965–2025, se han registrado precipitaciones inusuales que variaron de 79.5 mm y 190.7 mm, mientras que en los meses entre abril y noviembre se registraron precipitaciones de hasta 36 mm. En el mes de junio se registraron escasas precipitaciones (Figura 5).

De acuerdo con los datos obtenidos, las precipitaciones son variables durante el año, confirmando que en un radio de 30 km del volcán Tutupaca, las mayores precipitaciones pluviales ocurren en los meses de diciembre a abril, mientras que en los meses de mayo a noviembre las precipitaciones son escasas (Figuras 4 y 5).



**Figura 5.** Precipitación acumulada diaria registrada por la estación meteorológica de Carumas, entre abril de 1965 y febrero de 2025 (SENAMHI, 2025).

## 1.2 Aspecto socioeconómico

### 1.2.1 Población y vivienda

La mayor población se concentra en la parte sur del volcán Tutupaca, en las provincias de Candarave y Tarata. Los datos de población que se presentan en la Tabla 2 consignan los resultados del último censo nacional (XII de población y VII de vivienda) efectuado en el año 2017 por el INEI (INEI, 2018).

**Tabla 2.** Resultado del censo del INEI-censo XII de población y VII de vivienda de 2017.

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

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

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

Por su parte, Tarata, ciudad capital de la provincia de Tarata, está ubicada a 37 km al sureste del volcán Tutupaca. En 2017, dicha ciudad contaba con una población de 3642 habitantes (INEI, 2018). Los distritos de esta provincia que se encuentran dentro del área de influencia del volcán Tutupaca son: Susapaya (518 habitantes), Sitajara (350 habitantes) y Ticaco (581 habitantes) (Tabla 2).

Con respecto a la cantidad de viviendas existentes en los poblados aledaños al volcán Tutupaca, según el INEI (2018), en la provincia de Candarave, en los distritos Candarave, Cairani, Camilaca, Curibaya, Huanuara y Quilahuani existen más de 4435 viviendas (Tabla 2), las cuales, en su gran mayoría, son de adobe y tapia. Las demás viviendas son de ladrillo y cemento, otras de piedra y barro, así como de madera y

de otros materiales. Consideramos que durante los últimos años no hubo un mayor aumento de viviendas, pero sí una ligera renovación del tipo de construcción, es decir, algunas viviendas de adobe o barro fueron reemplazadas por material noble (cemento y ladrillo).

Según el censo del INEI de 2017, en los distritos de Sitajara, Susupaya y Ticaco (provincia Tarata) hay aproximadamente 1455 viviendas (Tabla 2). Las viviendas en estos distritos son principalmente de adobe y tapia.

## 1.2.2 Actividades económicas principales

La principal actividad económica que se desarrolla en inmediaciones del volcán Tutupaca es la agricultura y, en menor medida, la crianza de animales vacunos y camélidos. Esta última actividad, principalmente, se desarrolla con mayor énfasis en la zona del altiplano, por encima de los 3900 m s. n. m. También una parte de la población de las provincias de Candarave y Ticaco realiza trabajos rutinarios de construcción civil. Asimismo, otra parte de la población labora en empresas mineras o entidades del estado, tales como instituciones educativas, municipalidades, postas médicas, comisarías, Ministerio de Agricultura, Banco de la Nación, etc. Otra actividad desarrollada y que merece ser incentivada es el turismo, dado que la zona alberga impresionantes paisajes naturales, así como una flora y fauna diversa.

## 2. Los peligros volcánicos

Diversos estudios vulcanológicos han compilado los principales peligros que pueden generar los volcanes en caso de una erupción, los cuales corresponden a caídas de ceniza y pómez, la ocurrencia de flujos de lava, flujos y oleadas piroclásticas, flujos de escombros (lahares), avalanchas de escombros y gases volcánicos (Blong, 1984; Tilling, 1989; Blong, 2000; Bignami et al., 2012), todos ellos representados en la Figura 6. A continuación se describen estos fenómenos para el caso del volcán Tutupaca.

### 2.1 Caída de piroclastos (tefras)

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

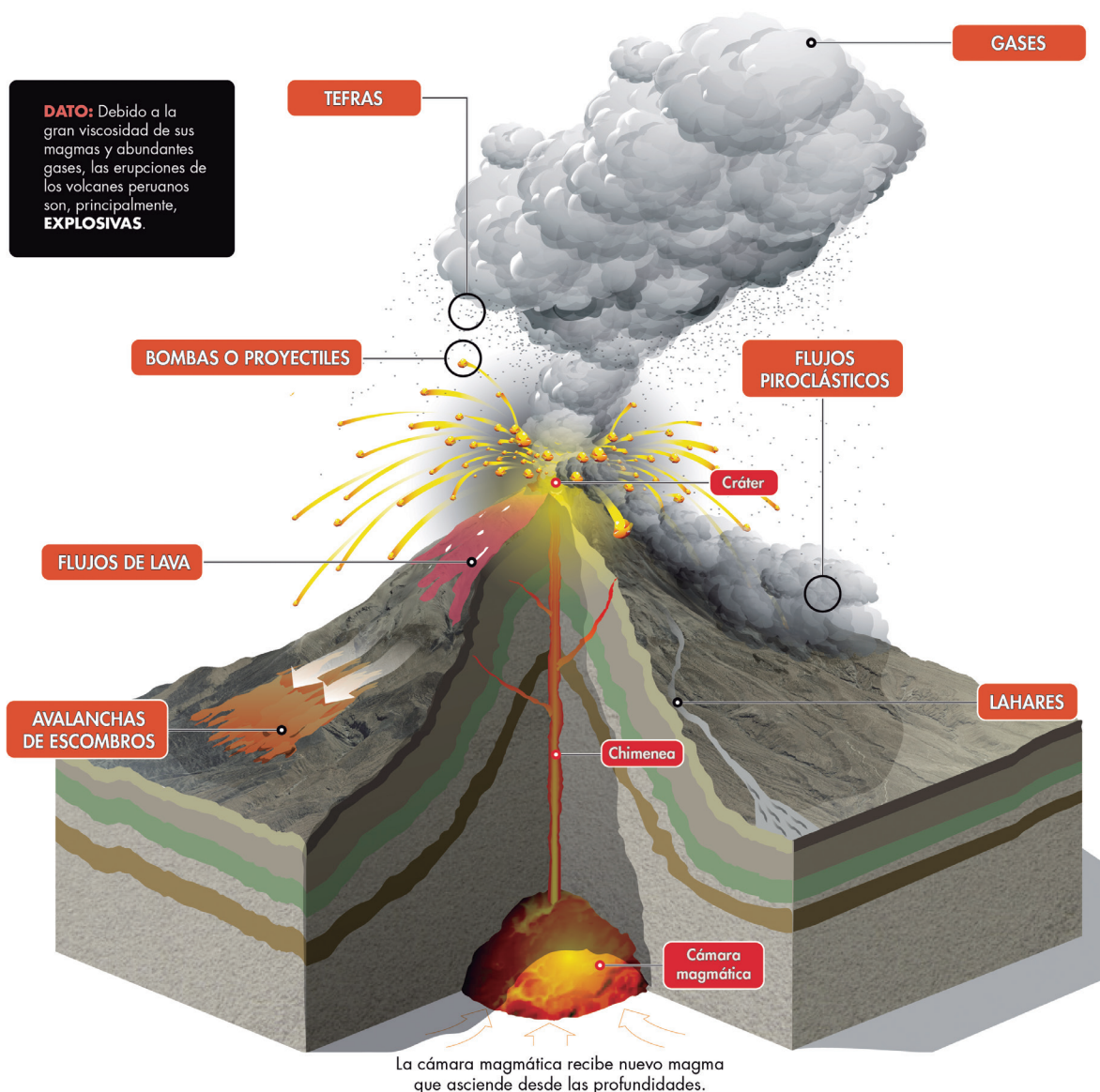


Figura 6. Tipos de peligros volcánicos que puede presentar un volcán como el Tutupaca.

La distancia alcanzada por los fragmentos de roca dependerá de la magnitud de la erupción, densidad de los fragmentos y de la velocidad del viento al momento de la erupción. Las partículas pueden cubrir y afectar extensas áreas, de algunas centenas a varios cientos de km<sup>2</sup> (Cas & Wright, 1987).

Las partículas volcánicas que caen 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, entre otros (Tilling, 1989).

En el sur peruano, todos los volcanes activos, como el volcán Tutupaca, han presentado a lo largo de su evolución actividad explosiva, con emisión de volúmenes variables de ceniza, lapilli de pómez, escorias y flujos piroclásticos. Los productos de las erupciones recientes han afectado poblados, obras de infraestructura y el medio ambiente. Son ejemplos del impacto de este tipo de actividad los efectos nocivos provocados por la gran erupción pliniana del volcán Huaynaputina, ocurrida en el año de 1600 d. C., que afectó todo el sur peruano, así como los efectos ocasionados por la actividad explosiva moderada y recurrente de los volcanes Ubinas y Sabancaya observada en los últimos 500 años y también en periodos actuales.

## 2.2 Flujos y oleadas piroclásticas

Durante erupciones explosivas importantes se pueden generar flujos piroclásticos, conocidos como corrientes de densidad piroclástica. Estos corresponden a mezclas de ceniza, fragmentos de roca volcánica y gases calientes (300 °C a 800 °C) (Nakada, 2000). Los flujos piroclásticos descienden por los flancos de un volcán a ras de la superficie y a grandes velocidades, comprendidas entre 100 m/s y 300 m/s (Hoblitt et al., 1995). Poseen 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 sale con facilidad del valle, sobrepasando relieves importantes como lomas o cerros y afectando áreas considerables. Estos flujos y oleadas destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso (Tilling, 1989).

Los estudios vulcanológicos realizados durante las últimas décadas muestran que la gran mayoría de los volcanes activos del sur peruano, como Misti,

Ubinas, Yucamane, Tutupaca, Ticsani, Sara Sara, Chachani (Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Mariño & Thouret, 2003; Samaniego et al., 2015; Rivera et al., 2020a; Rivera et al., 2020b; Aguilar et al., 2022), presentaron durante su evolución erupciones explosivas con emisiones de flujos piroclásticos que yacen en sus alrededores.

## 2.3 Lahares (flujos de lodo y escombros)

Los lahares son mezclas de productos volcánicos (ceniza, lapilli, bloques, etc.), removilizadas por el agua que fluyen rápidamente por las quebradas y valles que surcan los flancos de un volcán. Los lahares pueden ocurrir durante o después de una erupción volcánica.

Lahares producidos durante una erupción pueden generarse por lluvias intensas que removilizan todo el material volcánico que yace en las laderas de un volcán o por la interacción de un flujo de lava o flujo piroclástico que funde la nieve o hielo que permanece en la cumbre o los flancos de un volcán. Un ejemplo de esto último ocurrió en Armero (Colombia), en 1985, donde una erupción explosiva de tamaño moderado (IEV 3) fundió la cobertura de hielo que permanecía en la cima de este volcán (Pierson et al., 1990), generando un lahar que, durante su recorrido, inundó la ciudad de Armero y ocasionó la muerte de más de 25 000 personas.

La mayoría de los volcanes activos o potencialmente activos en los Andes peruanos, como Misti, Ubinas, Yucamane, Ticsani, Sara Sara, Huaynaputina, Coropuna y otros, presentan este tipo de peligro, sobre todo en periodos de lluvia (diciembre a marzo) cuando ocurren lluvias intensas que caen en sus laderas o cumbres. El volumen y distancia por recorrer por el lahar está en función del volumen de agua, el volumen del material suelto, la temperatura del material emitido y la pendiente del volcán.

## 2.4 Avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros se generan por el colapso o derrumbe de un sector o la cima de un volcán debido a erupciones explosivas de gran magnitud, por la intrusión de domos de lava, la poca resistencia de las rocas del basamento al peso del volcán, la pendiente elevada del volcán, el grado de alteración hidrotermal de sus rocas

oun sismo importante, etc. (Ui et al., 2000). A mayor volumen, las avalanchas de escombros se desplazarían a mayor velocidad y a mayor distancia. En el caso de la erupción de 1980 del volcán Mont St. Helens (EE. UU.), la avalancha generada se desplazó a aproximadamente 24 km del volcán, y a una velocidad que varió entre 113 km/h y 240 km/h (Brantley & Myers, 1997).

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

En el sur del Perú, varios volcanes activos y potencialmente activos, como el Misti, Ticsani, Tutupaca, Ubinas y Sara Sara, han presentado derrumbes de flanco que generaron depósitos de avalanchas de escombros distribuidos en áreas aledañas (Thouret et al., 2001; Mariño & Thouret, 2003; Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2015, Rivera et al., 2020a).

## 2.5 Flujos de lava

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

Los flujos de lava calcinan, destruyen y entierran todo a su paso; no obstante, no representan un peligro alto para las personas debido a su baja velocidad (Tilling, 1989), ya que permiten contar con tiempo suficiente para evacuar o escapar. Sin embargo, si interactuaran con la nieve que permanece en la cima del volcán, podrían generar lahares o flujos de lodo que descenderían por sus flancos.

En el sur peruano, todos los volcanes activos y potencialmente activos, como el volcán Tutupaca a lo largo de su evolución, han presentado actividad efusiva con la emisión de flujos de lava que se emplazaron en áreas proximales. En efecto, en el volcán Tutupaca, las lavas del Pleistoceno superior han alcanzado distancias de hasta 4 km desde su centro de emisión.

## 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, y contaminación de aguas y suelos. Frecuentemente, los efectos nocivos están restringidos a un radio menor de 10 km del volcán (Tilling, 1989).

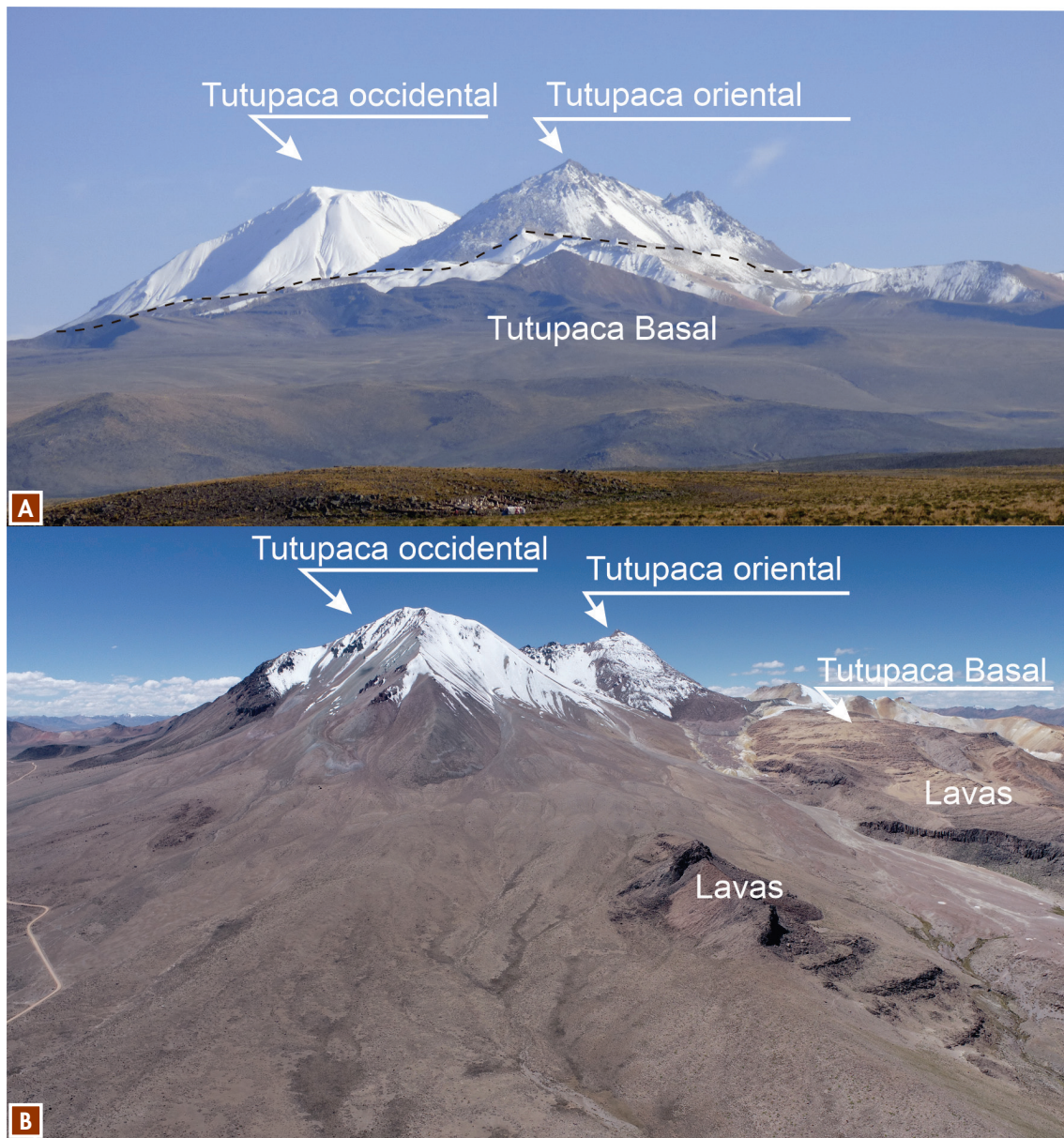
## 3. El volcán Tutupaca

### 3.1.1 Edificio Tutupaca Basal

#### 3.1 Historia eruptiva

Tutupaca es un complejo volcánico constituido de dos edificios: Tutupaca Occidental y Tutupaca Oriental (Figura 7). Ambos edificios corresponden a conos de lava y domos dacíticos edificadas sobre una secuencia de rocas volcánicas intensamente erosionadas e hidrotermalizadas emplazadas durante el Pleistoceno, denominada por Samaniego et al. (2015) como edificio Tutupaca Basal.

El edificio basal, denominado así inicialmente por Samaniego et al. (2015), está compuesto principalmente por secuencias de flujos de lavas que sobreyacen a un basamento volcánico del Mioceno-Plioceno (Figura 7). Las lavas del edificio basal son de composición andesítica y dacítica (58–67 wt% SiO<sub>2</sub>). Estas se encuentran erosionadas y cubiertas por depósitos morrénicos. Asimismo, a este edificio se le asocia temporalmente domos de lava alineados en dirección NO-SE, distribuidos hasta una distancia de 12 km de longitud del cono oriental (Mariño et al., 2021), los cuales han sido datados por el método K-Ar en 290 ± 27 ka y



**Figura 7.** A) Vista de los edificios oriental y occidental del volcán Tutupaca. B) Vista del sector suroeste del edificio Tutupaca Occidental, emplazado sobre secuencias de lavas subhorizontales del edificio Tutupaca Basal.

240 ± 37 ka (Sánchez et al., 1994; Martínez & Cervantes, 2003).

Las lavas y demás secuencias volcánicas del edificio basal presentan alteración hidrotermal, interpretada como parte de un sistema hidrotermal activo (Steinmüller, 2001; Cruz & Matsuda, 2015). Dataciones radiométricas K-Ar realizadas por Mariño et al. (2021) en flujos de lava ubicados al suroeste y este del edificio arrojan edades de 1135 ± 17 ka y 1040 ± 16 ka, respectivamente.

Adicionalmente, se ha identificado una secuencia de flujos de lava más jóvenes que constituyen la parte superior del edificio basal. Flujos de lavas de esta secuencia han sido datados por Mariño et al. (2021) mediante el método K-Ar, obteniéndose edades de 832 ± 21 ka y 750 ± 11 ka.

### 3.1.2 Edificio Tutupaca Occidental

Es un cono de aproximadamente 2.8 km de diámetro y 900 m de alto; está conformado por flujos de lava y domos de composición dacítica y andesítica (Manrique et al., 2020). Una datación K-Ar realizada por Mariño et al. (2021) en uno de los domos del sector occidental arrojó una edad de 33 ± 5 ka.

En la parte superior del edificio volcánico se identifican flujos de lavas que han sido afectadas por la intensa actividad glacial (Figura 7). También se ha identificado un depósito de flujos piroclásticos a 8 km y 12 km al este y suroeste del volcán

Tutupaca. Este depósito cubre una secuencia de flujos de lava pertenecientes al edificio Tutupaca Basal.

Asimismo, existe un depósito de avalancha de escombros que aflora al oeste y suroeste del cono occidental del Tutupaca, en ambas márgenes del río Tacalaya. Este depósito tiene entre 40 m y 100 m de espesor y estaría asociado al colapso del edificio Tutupaca Occidental (Mariño et al., 2021).

Finalmente, existen secuencias de depósitos de caída piroclástica ubicados entre 15 km y 28 km al sur del volcán Tutupaca. Un depósito de esta zona ha sido datado mediante el método <sup>14</sup>C, arrojando una edad de 9980 ± 50 AP (Mariño et al., 2021). Esta secuencia pliniana evidencia un periodo de erupciones explosivas de tipo pliniano a subpliniano ocurridas durante la actividad del edificio Tutupaca Occidental (Samaniego et al., 2015).

### 3.1.3 Edificio Tutupaca Oriental

Está constituido por un conjunto de domos y flujos de lava de composición dacítica (64–66 wt% SiO<sub>2</sub>) que están cortados por un anfiteatro en forma de herradura abierta hacia el noreste (Figura 8). El edificio Tutupaca Oriental se emplazó sobre depósitos volcánicos remanentes del edificio Tutupaca Occidental y Tutupaca Basal.

Este edificio ha experimentado al menos dos colapsos de flanco asociados a erupciones explosivas, que dieron origen a avalanchas de escombros y depósitos de flujos piroclásticos:



**Figura 8.** Vista del edificio Tutupaca Oriental y su reciente anfiteatro. Además, se distinguen los depósitos de flujos piroclásticos y avalanchas de escombros generados durante la actividad explosiva reciente (años 1787–1789 y 1802).

- Depósito de avalancha de escombros “Azufre”

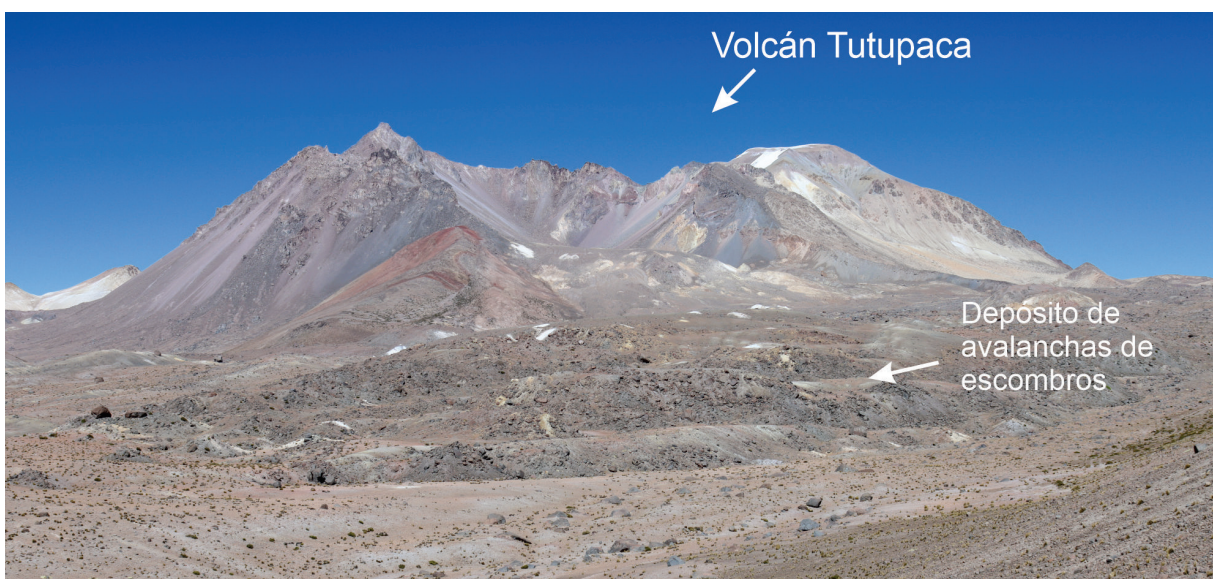
Este depósito aflora en el sector de la quebrada Azufre Grande, al este y sureste del cono Tutupaca Oriental (Figura 9), a una distancia de 7 km del cono (quebrada Zuripujo). Según los resultados de cuatro dataciones cosmogénicas  $^{10}\text{Be}$ /feldespato efectuadas por Mariño et al. (2021), el depósito fue emplazado hace aproximadamente  $6.8 \pm 0.8$  ka.

- Depósito de avalancha de escombros “Paipatja”

Este depósito yace al noreste del cono Tutupaca Oriental, en el sector de Pampa Paipatja, visible hasta una distancia de 10 km del anfiteatro del cono Tutupaca Oriental. Cubre un área de 12–13 km<sup>2</sup> y un volumen mínimo de 0.6 km<sup>3</sup>. Según Samaniego et al. (2015), estaría asociado a la última erupción explosiva del volcán Tutupaca de 1802, la cual generó la formación de la caldera en forma de herradura actualmente visible (Figura 10).



**Figura 9.** Vista del sector sureste del volcán Tutupaca donde se distingue el depósito de avalancha de escombros “Azufre”.



**Figura 10.** Vista del sector noreste del volcán Tutupaca donde se distingue el depósito de avalancha de escombros generado durante la actividad explosiva reciente (años 1787–1789 y 1802).

- Depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza “Zuripujo”

Este depósito yace al este y noreste del cono Tutupaca Oriental (Figura 11), hasta una distancia de 10 km, en áreas aledañas al depósito de avalancha de escombros “Paipatja”. Tiene hasta 5 m de espesor y está conformado por dos a tres capas. Los bloques juveniles son densos y porfiríticos, que miden eventualmente hasta 1 m de diámetro.

- Depósito de flujo piroclástico “Paipatja”

Este depósito de flujo piroclástico yace al noreste del cono Tutupaca Oriental, en la zona

de altiplanicie, visible hasta una distancia de 10 km (Samaniego et al., 2015). Este depósito tiene hasta 2 m de espesor. Es masivo y contiene bloques de lava porfiríticos (20–30%) de hasta 20 cm de diámetro dentro de una matriz de ceniza.

Las dataciones <sup>14</sup>C realizadas por Samaniego et al. (2015) de los depósitos de flujo piroclástico de bloques y ceniza “Zuripujo” (Figura 6) arrojaron edades de 230 ± 30, 220 ± 30 y 190 ± 30 años AP. Estas edades <sup>14</sup>C obtenidas coinciden con el periodo comprendido entre 1731 y 1802, el cual abarca las dos erupciones históricas registradas en los años 1787–1789 y 1802, reportadas por Zamácola y Jáuregui (1804) y Valdivia (1847). En efecto, Samaniego et al. (2015) proponen que dicho depósito y el depósito de avalancha de escombros “Paipatja” corresponden al mismo evento explosivo y colapso de flanco sectorial, ocurridos simultáneamente.



**Figura 11.** Vista del depósito de flujo piroclástico “Zuripujo” que aflora a 10 km al noreste del volcán Tutupaca, generado durante la erupción de 1787–1802.

## 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. del volcán Tutupaca, disponible en tesis universitarias, boletines y revistas científicas.
- Procesamiento de imágenes de satélite Landsat del volcán Tutupaca para el reconocimiento y delimitación de los depósitos volcánicos.
- Trabajos de campo para el reconocimiento de secuencias volcánicas emitidas en el pasado por el volcán Tutupaca.
- Elaboración de un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés), 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 los *softwares* LaharZ (Schilling, 1998) y VolcFlow (Kelfoun & Druitt, 2005).
- Elaboración de gráficos y tablas diversas.
- Elaboración de los mapas de peligros volcánicos.

### 4.2 Softwares empleados

#### 4.2.1 Modelo Ash3d

El Ash3D (Mastin et al., 2009) es un *software* que se basa en los principios eulerianos tridimensionales, desarrollado por el Servicio Geológico de los

Estados Unidos, cuyos fundamentos son descritos por Schwaiger et al. (2012). Es una herramienta utilizada para calcular la cantidad de ceniza depositada y su concentración en el aire; además, puede usarse para recrear eventos pasados y realizar escenarios futuros de dispersión de ceniza en caso de erupciones volcánicas. Ash3D modela el transporte de ceniza volcánica dividiendo la atmósfera en una cuadrícula tridimensional y calculando el flujo de masa a través de las paredes celulares (Mastin et al., 2009).

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

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

#### • Parámetros utilizados en la simulación Ash3D

En la simulación de depositación de cenizas del volcán Tutupaca para el escenario de erupciones explosivas de tipo vulcanianos (IEV 1–2), con el *software* Ash3D, se consideró un volumen DRE de ceniza de  $0.002 \text{ km}^3$ , volumen emitido frecuentemente en erupciones explosivas de tipo vulcanianos, como la presentada por el volcán Tungurahua (Ecuador) el 14 de julio de 2006

(Bustillos & Samaniego, 2011) y por el volcán Ubinas durante los últimos 500 años (Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2020). También se consideró una altura de la pluma volcánica de 6.5 km (Tabla 3).

**Tabla 3.** Parámetros utilizados para la simulación de dispersión de ceniza con el código Ash3D, para el escenario de una erupción explosiva de IEV 1–2.

Escenario eruptivo	IEV 1–2
Duración de la simulación	24 horas
Duración de la erupción	3 horas
Altura sobre el nivel del cráter	6.5 km
Altura sobre el nivel del mar	12.3 km
Volumen DRE (km <sup>3</sup> )	0.002

En la simulación para la depositación de cenizas del volcán Tutupaca para un escenario de erupción subpliniana (IEV 3–4) se consideró un volumen DRE de ceniza de 0.3 km<sup>3</sup>. Los parámetros eruptivos utilizados son presentados en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Parámetros eruptivos utilizados para la simulación de dispersión de tefras con el código Ash3D, para el escenario de erupción subpliniana de IEV 3–4.

Escenario eruptivo	IEV 3–4
Duración de la simulación	24 horas
Duración de la erupción	7 horas
Altura sobre el nivel del cráter	16 km
Altura sobre el nivel del mar	21 km
Volumen DRE (km <sup>3</sup> )	0.3

En la simulación para la depositación de cenizas del volcán Tutupaca para un escenario de erupción pliniana (IEV 5) se consideró un volumen DRE

de ceniza de 1.3 km<sup>3</sup>. Los parámetros eruptivos utilizados son presentados en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Parámetros eruptivos utilizados para la simulación de dispersión de tefras con el código Ash3D, para el escenario de erupción pliniana de IEV 5.

Escenario eruptivo	IEV 5
Duración de la simulación	24 horas
Duración de la erupción	10 horas
Altura sobre el nivel del cráter	21 km
Altura sobre el nivel del mar	26 km
Volumen DRE (km <sup>3</sup> )	1.3

En todos los casos se consideraron las direcciones del viento predominantes SE y SO del volcán Tutupaca. Los datos de vientos fueron tomados del Centro Nacional de Predicción Ambiental de los EE. UU.

#### 4.2.2 Modelo LaharZ

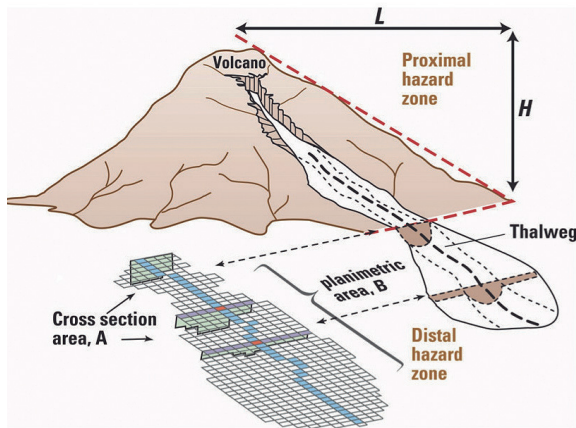
LaharZ es un programa que permite delimitar las zonas de inundación por lahares (flujos de lodo y escombros) que se originan en los drenajes que nacen en los flancos de un volcán (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998). El programa se basa en una correlación empírica entre el volumen de un evento lahárico y el área planimétrica en sección transversal inundada por dicho lahar (Figura 12). Con base en la recopilación de datos de campo de 27 eventos laháricos bien estudiados alrededor del mundo, Iverson et al. (1998) dedujeron dos ecuaciones que relacionan los volúmenes con las áreas mencionadas anteriormente.

$$A = 0.05V^{2/3}$$

$$B = 200V^{2/3}$$

En donde A es el área transversal máxima inundada por el lahar, B es el área planimétrica total inundada y V es el volumen del lahar (Figura

12). El programa LAHARZ fue diseñado para ejecutarse dentro de un sistema de información geográfica (ArcGIS) que emplea las ecuaciones anteriores, un modelo digital de elevación (DEM) y los volúmenes de los lahares, previamente definidos por el usuario para delimitar zonas potenciales de inundación, de manera automatizada y rápida. El DEM empleado ha sido elaborado con base en imágenes satelitales.



**Figura 12.** Relaciones entre la distancia ( $L$ ) y la altura ( $H$ ) por donde recorrerían los lahares, así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B) inundadas por un lahar (Schilling, 1998).

Además, para delimitar las zonas de alcance de los flujos piroclásticos y avalanchas de escombros se empleó la metodología denominada “cono de energía” (Malin & Sheridan, 1982), que ha sido muy utilizada para definir las zonas de peligro proximales y mediales alrededor de un volcán. Este método postula que el alcance horizontal ( $L$ ) de un flujo piroclástico o avalancha de escombros es función de la diferencia de alturas ( $H$ ) entre el punto de generación del flujo o la cima de un volcán y el punto de alcance del depósito (Figura 12). La relación  $H/L$  es un indicador de la movilidad del flujo. Así, para una relación  $H/L$  cercana a 0.1, los flujos poseen gran movilidad y, por tanto, alcanzan mayor distancia, mientras que para una relación  $H/L$  cercana a 0.3 poseen poca movilidad. Los alcances de los flujos piroclásticos y avalanchas de escombros fueron delimitados con el programa LAHARZ\_py.

### 4.2.3 Programa VolcFlow

VolcFlow es un código euleriano de diferencias finitas escrito en el programa MATLAB. Este

código determinista se basa en la conservación de ecuaciones de masa y momento para simular fluidos newtonianos o de Bingham bajo ciertos criterios reológicos (Kelfoun & Druitt, 2005). Utiliza parámetros de flujo reológico como viscosidad, densidad, cohesión, ángulos de fricción interna y basal. El código VolcFlow resuelve ecuaciones en un sistema de coordenadas local relacionado con la topografía del terreno, con  $x$  y  $y$  paralelas a la superficie topográfica y  $h$  (profundidad) perpendicular a estas. El código VolcFlow se ha utilizado ampliamente para simular diferentes flujos gravitacionales, como lahares y avalanchas de escombros, especialmente en volcanes (Kelfoun & Druitt, 2005; Cárdenas et al., 2013; Gueugneau, 2014; Vásconez et al., 2019; Warwick et al., 2022). Detalles sobre el código VolcFlow y sus aplicaciones para simulaciones de lahares se pueden encontrar en Cárdenas et al. (2013) y Vásconez et al. (2019).

### 4.3 Escenarios eruptivos considerados

Estudios geológicos efectuados por Samaniego et al. (2015) y Mariño et al. (2021) muestran que las secuencias volcánicas del volcán Tutupaca se emplazaron desde el Pleistoceno superior al reciente. Durante la época histórica, específicamente en los años 1787–1789 y 1802, el Tutupaca presentó una importante actividad explosiva con IEV 3 (Samaniego et al., 2015). En tal sentido, dado que este volcán presentó actividad eruptiva reciente, es posible que vuelva a reactivarse y erupcionar en el futuro.

Para establecer los escenarios eruptivos, se han considerado estudios previos efectuados por Samaniego et al. (2015), Mariño et al. (2021) y datos de campo que tienen en cuenta el estado y la morfología actual que presenta el volcán Tutupaca y otros aspectos que se describen a continuación:

- Los tipos de dinamismos eruptivos reconocidos en el volcán Tutupaca, con base en los tipos de depósitos encontrados, los cuales podrían volver a repetirse.
- La magnitud de las erupciones del volcán Tutupaca con base en estudios previos.
- El comportamiento de otros volcanes peruanos u otros de la zona volcánica central de los Andes, considerados como “análogos” al volcán Tutupaca.

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

### 4.3.1 Erupción de tipo vulcaniano (IEV 1–2)

Las erupciones vulcanianas (Figura 13) son erupciones explosivas moderadas a leves que emiten materiales piroclásticos como ceniza, bloques, bombas y, eventualmente, lapilli de pómez. Las explosiones se dan en intervalos de minutos a horas e incluso días. Luego de las explosiones se generan columnas de gases y ceniza de menos de 20 km de altura (Sigurdsson et al., 2000). Incluso, en dichas erupciones se generan a veces flujos piroclásticos y lahares asociados. La ceniza emitida durante dicha erupción puede ser dispersada a algunas decenas de kilómetros de distancia y sobrepasar algunas centenas de kilómetros.

En el sur peruano, los volcanes Misti, Ubinas y Sabancaya han presentado en el pasado reciente erupciones vulcanianas con Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 1 y 2 (Thouret et al., 2001; Gerbe & Thouret, 2004; Rivera et al., 2014; Rivera et al., 2016; Machacca et al., 2023).

El volcán Sabancaya, en su proceso eruptivo 1990–1998, generó emisiones de cenizas que fueron dispersadas por el viento entre 20 km y 30 km de distancia, principalmente al este del volcán (Gerbe & Thouret, 2004; Thouret et al., 1994). Posteriormente, en su proceso eruptivo 2016–2025, la dispersión de ceniza fue predominantemente en direcciones este, sureste y

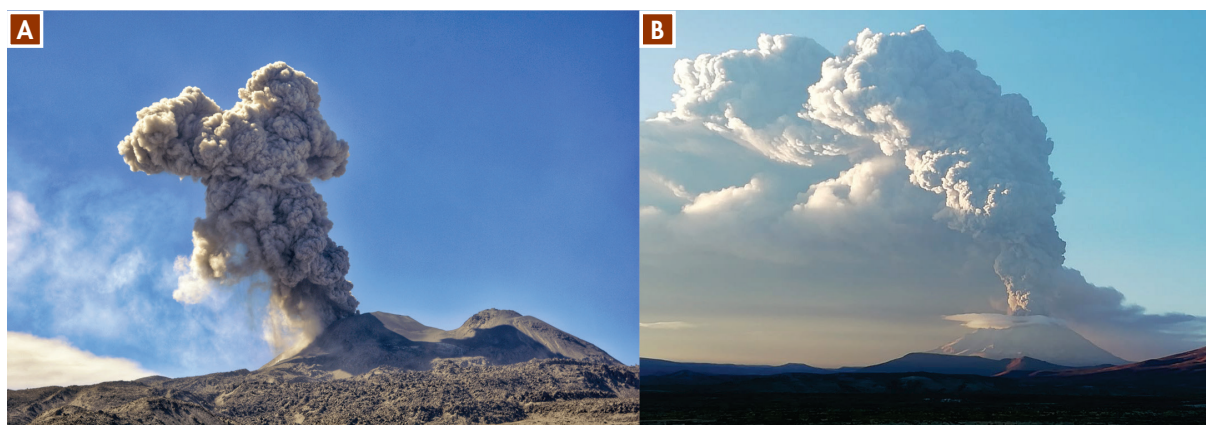
noreste del volcán (Figura 13).

Por otro lado, el volcán Misti ha generado una erupción explosiva de IEV 1–2 entre los años 1440 y 1470 d. C. (Thouret et al., 2001). Dicha erupción emplazó caídas de ceniza de color oscuro que poseen aproximadamente 10 cm de espesor en la parte superior del cono volcánico, y 1 cm de espesor a 20 y 30 km al oeste del cráter del volcán, respectivamente, es decir, en la ciudad de Arequipa.

El volcán Ubinas, durante la erupción del 19 de julio de 2019 que tuvo un IEV 2, generó una columna de cenizas y gases de más de 5500 m de altura sobre la cima del volcán (Figura 13). Posteriormente, las cenizas emitidas fueron dispersadas por los vientos hacia zonas distales del volcán, en direcciones sur y sureste, afectando principalmente poblados del valle de Ubinas y algunas localidades de las regiones de Moquegua, Tacna, Puno, así como algunas ciudades de Bolivia, como La Paz. Durante la erupción de 2019 se registraron depósitos de caídas de ceniza de 1 mm de espesor a 20 km de distancia al sureste del volcán Ubinas (Aguilar et al., 2019).

El volcán Tutupaca puede generar una erupción explosiva de tipo vulcaniano, con IEV 2, cuyos productos, principalmente cenizas, pueden afectar las áreas aledañas al volcán.

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



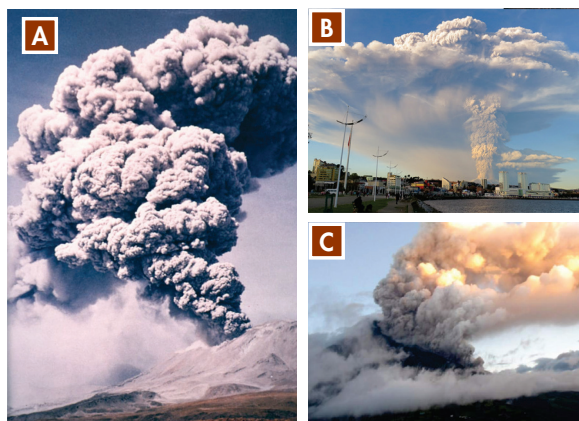
**Figura 13.** Vista de volcanes que presentaron erupciones vulcanianas de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 1–2: A) actividad explosiva de julio de 2024 del volcán Sabancaya. b) Erupción del 19 de julio de 2019 del volcán Ubinas.

### 4.3.2 Erupción de tipo subpliniano (IEV 3–4)

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

Existen algunos ejemplos de erupciones subplinianas con IEV 3 ocurridas en Sudamérica. Por ejemplo, el volcán Nevado del Ruiz (Colombia) en 1985 generó una erupción subpliniana con IEV 3, la cual dejó un depósito de ceniza en áreas aledañas. La isópaca de 1 cm de espesor se midió a 35 km de distancia del volcán Nevado del Ruiz (Naranjo et al., 1986).

El 16 de agosto de 2006, el volcán Tungurahua (Ecuador) produjo una violenta erupción que generó una columna de lapilli de pómez, ceniza y gases de 16 km de altura, la cual fue dispersada principalmente en dirección oeste, a más de 100 km de distancia, hacia el océano Pacífico. En aquel entonces, eyectó entre  $47\text{--}67 \times 10^6 \text{ m}^3$  de tefra, catalogada como erupción subpliniana de IEV 3 (Eychenne et al., 2012). Además, generó flujos y oleadas piroclásticas (corrientes de densidad piroclástica) y un flujo de lava. La ceniza depositada alcanzó 10 cm de espesor a 10 km del volcán, y 1 cm a 20 km.



**Figura 14.** Vista de volcanes que presentaron erupciones explosivas subplinianas de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 3 y 4. A) Volcán Lascar: erupción del 19 de abril de 1993 (tomado de Ckelar Volcanes). B) Volcán Calbuco: erupción del 23 de abril de 2015 (fotografía: Barria C.). C) Volcán Tungurahua: erupción del 16 de agosto de 2006 (fotografía: Bustillos, J.).

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

Por otro lado, durante erupciones de tipo subpliniano con IEV 4, la columna de tefras puede alcanzar hasta 20 km de altura o incluso más. Estas erupciones suelen liberar entre  $0.1 \text{ km}^3$  y  $1 \text{ km}^3$  de tefra. En el pasado, en el continente sudamericano y en especial en el Perú, los volcanes como Misti, Ubinas, Ticsani, etc. han generado este tipo de erupciones explosivas.

El volcán Lascar (Chile), durante los días 19 y 20 de abril de 1993 (Figura 14), generó una erupción subpliniana de IEV 4 que produjo una columna eruptiva de lapilli de pómez, ceniza y gases de 25 km de altura, emitiendo un volumen total de  $10^8 \text{ m}^3$  de magma (Pavez et al., 2006). Los flujos piroclásticos generados durante dicha erupción se emplazaron hasta 8.5 km de distancia al noroeste y 4 km al sureste de la cima (Spark et al., 1997). La pluma eruptiva fue arrastrada cientos de kilómetros hacia el sureste, llegando incluso hasta las costas atlánticas de Argentina y Brasil. Los máximos espesores medidos se encuentran en la ladera este del volcán Lascar, a 5 km del cráter, donde miden hasta 80 cm de espesor, con lapilli de pómez de hasta 0.4 m de diámetro. Los espesores medidos disminuyen rápidamente a medida que se alejan del cráter, alcanzando entre 3 cm y 5 cm de espesor en la laguna Aguas Calientes, a 25 km al sureste del cráter; 1 cm a 3 cm en el Alto del Lari, a 45 km del volcán; y 1 cm en Paso de Sico, a 70 km al sureste del volcán Lascar (Viramonte et al., 1995).

Asimismo, el volcán Calbuco, ubicado al sur de Chile, produjo durante los días 22 y 23 de abril de 2015 una erupción subpliniana de IEV 4, con un volumen de piroclastos emitido de  $0.38 \text{ km}^3$  que generó una columna de gases y ceniza de 15 km a 17 km de altura (Segura, 2016). De igual manera, generó flujos piroclásticos de  $0.03 \text{ km}^3$  que viajaron hasta 6 km de distancia al noreste del volcán (Castruccio et al., 2016; Romero et al., 2016).

En el Perú, en la región de Moquegua, los volcanes Ubinas y Ticsani también han presentado

erupciones subplinianas con IEV 4. La erupción pliniana del volcán Ticsani, de IEV 4, emplazó una caída de lapilli de pómez que fue dispersada a más de 50 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003).

El volcán Tutupaca puede generar una erupción subpliniana de IEV 3 o 4, cuyos productos, en este caso tefras (ceniza, lapilli de pómez, etc.), pueden afectar severamente áreas aledañas al volcán. Cabe mencionar que durante las erupciones subplinianas (IEV 3–4) también pueden generarse flujos piroclásticos de moderado volumen y limitado alcance (Sigurdsson et al., 2000). Dependiendo de la pendiente del terreno, estos flujos pueden alcanzar distancias de más de 6 km del cráter, lo que afectaría la vida de algunos pobladores de estancias que habitan en áreas próximas al volcán. Una erupción subpliniana del volcán Tutupaca también podría generar lahares, especialmente si los flujos y oleadas piroclásticas extremadamente calientes se emplazan sobre la cobertura de hielo o nieve presente en los meses de diciembre a marzo en la cumbre y cono superior del Tutupaca Occidental, lo cual podría originar su fusión.

### 4.3.3 Erupción pliniana (IEV 5)

Las erupciones plinianas son las erupciones explosivas más violentas, debido a que el magma que los genera es silíceo, viscoso y posee alto contenido de gases magmáticos. En dichas erupciones, las columnas eruptivas pueden alcanzar alturas mayores a 20 km y los materiales emitidos pueden caer y afectar más de 800 km<sup>2</sup> (Cas & Wright, 1987). Durante estas erupciones se generan depósitos voluminosos de caída de lapilli de pómez y ceniza; asimismo, se pueden generar flujos piroclásticos de pómez y ceniza, además de oleadas piroclásticas. También es frecuente encontrar lahares asociados a este tipo de erupciones, los mismos que alcanzan decenas a cientos de kilómetros de distancia respecto al volcán.

En el sur del Perú, los volcanes activos o potencialmente activos, como Misti, Ubinas, Ticsani, Yucamane, Ampato, Sara Sara y Chachani, han presentado en el pasado erupciones plinianas (Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Mariño & Thouret, 2003; Samaniego et al., 2016; Rivera et al., 2020a; Aguilar et al., 2022). La erupción de hace 2000 años AP, del volcán Misti fue de tipo pliniano (IEV 5) y generó depósitos de caída de lapilli de

pómez que afloran en toda el área de Arequipa (Harpel et al., 2011). A más de 12 km del cráter del volcán, el depósito de lapilli de pómez tiene entre 10 cm a 20 cm de espesor. Asimismo, la erupción generó flujos piroclásticos de pómez y ceniza que poseen espesores mayores a 3 m a más de 11 km del cráter. Además, la erupción generó lahares que alcanzaron más de 20 km de distancia del volcán (Thouret et al., 2001).

No se han encontrado depósitos de caída de erupciones explosivas plinianas de IEV 5 asociados al edificio Tutupaca Oriental. Sin embargo, a 15 km y 28 km al sur del volcán existe una secuencia de seis depósitos de caída piroclástica que han sido asociados al edificio Tutupaca Occidental. De estos, al menos los depósitos “Gris marrón” y “Pómez gris” podrían estar asociados con erupciones plinianas de IEV 5 (Mariño et al., 2021). Esto se fundamenta en que los depósitos muestran espesores decimétricos y pómez y líticos con tamaños centimétricos.

### 4.3.4 Crecimiento de domo o colapso de un sector del volcán

Un domo de lava se forma antes y durante una erupción volcánica, específicamente cuando el magma es demasiado viscoso para fluir más de unas decenas o cientos de metros (Francis, 1993). Durante el crecimiento de un domo, los flancos de dicho domo son inestables y pueden colapsar, dando lugar a la formación de flujos piroclásticos. La mayor amenaza asociada al crecimiento de un domo de lava radica en la generación de explosiones laterales dirigidas o “blast” que eyectan flujos piroclásticos y producen el colapso de un sector del volcán, como ocurrió en 1980 durante la erupción del volcán Mount Saint Helens (EE. UU.). Este tipo de flujos pueden producirse sin previo aviso y desplazarse a velocidades mayores a 50 m/s, alcanzando más de 10 km desde su fuente (Miller, 1989).

Cabe mencionar que el edificio Tutupaca Oriental está formado por varios domos y flujos de lava. Este volcán, durante el Holoceno, ha experimentado al menos dos colapsos de flanco que emplazaron avalanchas de escombros denominadas 1) avalancha de escombros “Azufre”, con una edad de  $6.8 \pm 0.8$  ka (Mariño et al., 2021) y 2) avalancha de escombros “Paipatja”, asociada a la última erupción explosiva ocurrida en el año 1802 (Samaniego et al., 2015).

El edificio Tutupaca Oriental, en la erupción del año 1802, desarrollo en su interior el crecimiento de domos de lava que produjeron una explosión lateral dirigida y ocasionaron el colapso del flanco oeste, emplazando avalanchas de escombros y flujos piroclásticos de bloques y ceniza. El depósito de avalancha se encuentra hasta 6 km de distancia de la fuente, mientras que los depósitos de flujos piroclásticos alcanzaron hasta 10 km de distancia de la fuente.

#### 4.3.5 Erupción de tipo efusiva con emisión de lavas

Una erupción efusiva consiste en la emisión pasiva de flujos de lava (Figura 15). De acuerdo con los estudios vulcanológicos, durante el pasado,

el volcán Tutupaca ha emitido flujos de lavas de composición andesítica y dacítica, es decir, flujos moderadamente viscosos. Las lavas han alcanzado distancias de más de 6 km.

Actualmente, si se produjera una erupción efusiva, las lavas serían similares a las emitidas en épocas anteriores. En caso de una erupción es probable que las lavas sean emitidas del edificio Tutupaca Oriental. Dichas lavas tendrían que desplazarse en dirección este y noreste del volcán.

Si se produjera una erupción efusiva del Tutupaca Occidental (poco posible) con emisión de flujos de lava, puede presentarse el descongelamiento de la nieve o hielo que se encuentra en la cumbre del volcán entre los meses de diciembre a marzo, lo que daría lugar a la formación de lahares o flujos de lodo que descenderían hacia las partes bajas, siendo más peligrosos que los flujos de lava.



**Figura 15.** Vista de flujos de lavas del volcán Pacaya (Guatemala), emitidos entre el 5 de febrero y 23 de abril de 2021. Las lavas han viajado hasta 3.7 km del volcán.

## 5. Resultados: mapas de peligros del volcán Tutupaca

Se presentan cinco mapas de peligros que consideran una erupción del volcán Tutupaca. Estos corresponden al 1) mapa de peligros múltiples para la zona proximal; 2) mapa de peligros por caídas de ceniza para un escenario de erupciones explosivas leves a moderadas, de tipo vulcaniano (IEV 1–2); 3) mapa de peligros por caída de tefras para un escenario de erupciones explosivas de tipo subpliniano (IEV 3–4); 4) mapa de peligros por caída de tefras para un escenario de grandes erupciones explosivas, de tipo pliniano (IEV 5); y 5) mapa de peligros por lahares.

Para una mejor visualización, cuatro de estos mapas, a diferente escala, han sido integrados en un solo formato (ver mapa de peligro).

### 5.1 Mapa de peligros volcánicos múltiples para la zona proximal

La zonificación de peligros del mapa proximal se realizó para peligros múltiples, es decir, para el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas de escombros, lahares, crecimiento de domos y eyección de proyectiles balísticos. Las áreas que cubrirían dichos eventos fueron integradas, producto del cual se tiene el mapa principal que considera peligros múltiples (Figura 16). Además, las zonas de alto, moderado y bajo peligro fueron determinadas con base en escenarios eruptivos establecidos en función del Índice de Explosividad Volcánica (IEV).

#### 5.1.1 Zona de alto peligro (rojo)

Comprende un área alargada de este a oeste que involucra el edificio Tutupaca Occidental, Tutupaca Oriental, diversas quebradas y el valle del río Tacalaya, las cuales pueden ser severamente afectadas por la ocurrencia de lahares (flujos de lodo), flujos piroclásticos, flujos de lava, proyectiles balísticos, crecimiento de domos y avalanchas de escombros. Cualquier tipo de erupción puede afectar dicha área, incluso las de baja magnitud (IEV 1–2), como las ocurridas durante el Holoceno.

Los límites de la zona de alto peligro se encuentran entre 2 km y 6 km de distancia del edificio Tutupaca Oriental (Figura 16). Las mayores distancias (4 km a 6 km) se encuentran en los sectores oeste, noreste y suroeste del edificio Tutupaca Oriental, mientras que las menores distancias (2 km a 3 km) están al norte y sur del edificio Tutupaca Oriental.

Los límites de la zona de alto peligro coinciden con el alcance de un gran número de flujos de lavas del volcán Tutupaca que se encuentran entre 1 km y 4 km de distancia desde su punto de emisión (Figura 16). Por otro lado, los proyectiles balísticos generados durante erupciones vulcanianas (IEV 1–2) han alcanzado distancias limitadas a las zonas muy próximas al cráter, típicamente menores a 3 km, en varios volcanes del sur peruano. Por ejemplo, durante la erupción del volcán Ubinas 2006–2009, el alcance máximo de proyectiles balísticos fue cercano a 2.5 km (Rivera et al., 2014). Asimismo, durante la explosión del volcán Sabancaya del 13 de septiembre de 2025, los bloques balísticos alcanzaron poco menos de 3 km del cráter (Centeno et al., 2025). Igualmente, gran parte de los flujos piroclásticos generados durante erupciones vulcanianas recorrieron distancias menores de 6 km del volcán. Por ejemplo, durante la erupción del volcán Tungurahua (Ecuador) en 2010, se generaron flujos piroclásticos que se emplazaron por las quebradas de los flancos sur y sureste de dicho volcán (Hall et al., 2013). De este modo, la zona de alto peligro podría verse afectada por una erupción asociada al crecimiento de un domo de lava, como ha ocurrido en el pasado.

En resumen, la zona de alto peligro (rojo) se encuentra entre 2 km y 6 km de distancia respecto al edificio Tutupaca Oriental. Esta zona puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones explosivas leves a moderadas de IEV 1–2. Asimismo, puede ser afectada por flujos de lava, crecimiento de domo, lahares, proyectiles balísticos y avalanchas de escombros.

#### 5.1.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona comprende el sector sur del volcán Tutupaca, donde se distinguen colinas alargadas que están constituidas de rocas lávicas. Asimismo, comprende la altiplanicie volcánica que colinda



directamente con el volcán Tutupaca y el valle del río Tacalaya. Esta zona se extiende entre 6 km y 8 km de distancia al suroeste, noroeste y oeste del edificio Tutupaca Oriental. Igualmente, se extiende entre 2 km y 6 km de distancia al norte, sur, sureste y este del edificio Tutupaca Oriental (Figura 16). Esta zona puede ser cubierta por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares, proyectiles balísticos y avalanchas de escombros en caso de que la erupción explosiva sea moderada a alta (IEV 3–4).

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

Se consideró este escenario dado que, al pie de los flancos este y noroeste del volcán Tutupaca, se encuentran depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza emitidos durante la erupción del año 1802. Asimismo, en dicha zona se distinguen depósitos de avalanchas de escombros ligados al colapso de dicho volcán, generados durante dicha erupción.

En resumen, la zona de moderado peligro (naranja), que se sitúa entre 2 km y 8 km de distancia con respecto al volcán Tutupaca, puede ser afectada por flujos piroclásticos y por proyectiles balísticos generados durante erupciones explosivas de tipo subplinianas de IEV 3–4, así como por flujos de lavas y avalanchas de escombros.

### 5.1.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

Esta zona se proyecta entre 8 km y 12 km hacia los sectores noreste, este y sureste del edificio Tutupaca Oriental. Asimismo, se proyecta entre 8 km y 11 km al oeste y suroeste del edificio Tutupaca Oriental, y entre 6 km y 10 km al norte de dicho volcán. Esta zona puede ser afectada por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares (flujos de barro) y avalanchas de escombros, en caso de que la erupción explosiva sea muy violenta, es decir, de tipo pliniano (IEV 5).

Los alcances antes descritos coinciden con el alcance de un flujo piroclástico de pómez y

ceniza generado por el volcán Tutupaca durante el Pleistoceno superior, que se desplazó a 8 km de distancia hacia el suroeste del volcán. Asimismo, coincide con la distancia alcanzada por el depósito de blast o flujo del volcán Yucamane, datado en  $36\,450 \pm 250$  años AP, que aflora hasta 11 km al oeste de dicho volcán (Rivera et al., 2020b). Según la literatura, los depósitos de lateral blast pueden recorrer decenas de kilómetros. Por ejemplo, el depósito de lateral blast del volcán Chachimiro (Ecuador), ocurrido entre 3640 y 3510 años AP (Bernard et al., 2014), viajó a más de 10 km de distancia de dicho volcán.

También varios flujos piroclásticos generados durante erupciones plinianas de IEV 5 por volcanes del sur del Perú han recorrido distancias similares. Por ejemplo, los flujos piroclásticos de pómez y ceniza de la erupción del volcán Misti, de hace 2000 años AP, alcanzaron distancias de alrededor de 12 km del cráter del Misti (Cobeñas et al., 2012).

En resumen, la zona de bajo peligro (amarillo) está localizada entre 6 km y 12 km de distancia del edificio Tutupaca Oriental. Esta zona puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones plinianas (IEV 4–5), así como por depósitos de “blast” durante erupciones laterales dirigidas, avalanchas de escombros y lahares. Según el registro histórico, la probabilidad de ocurrencia de este tipo de erupciones es muy baja.

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

En el mapa de peligros para un escenario de erupción vulcaniana (IEV 1–2) del volcán Tutupaca se han definido tres zonas de peligro: alto peligro (en rojo), moderado peligro (en naranja) y bajo peligro (en amarillo). El foco de emisión sería el edificio Tutupaca Oriental, debido a que ha presentado erupción en los años 1787 y 1802, según el conocimiento de la estratigrafía, geología y geocronología de dicho volcán (Samaniego et al., 2015).

### 5.2.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro comprende un área semicircular que involucra el volcán Tutupaca y áreas aledañas. Esta zona se prolonga hasta

una distancia de 20 km al norte, 18 km al sur, 22 km al oeste y 18 km al este del volcán Tutupaca (Figura 17). Esta zona puede ser cubierta por una capa de ceniza de varios centímetros a milímetros de espesor. Esto también se basa en la dispersión de cenizas de erupciones vulcanianas presentadas por los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti. En efecto, durante la erupción vulcaniana del volcán Sabancaya de 1988–1998 (IEV 2), a 8 km al este del volcán, se depositaron cenizas de 1 cm de espesor (Thouret et al., 1994). En la erupción del volcán Ubinas de los años 2013–2017 (IEV 2), a 6 km al sureste del Ubinas, se depositó una capa de ceniza de entre 0.5 cm y 1 cm de espesor. En la erupción vulcaniana del volcán Misti del siglo XV (IEV 2), a 10 km de distancia, se depositó una capa de ceniza de aproximadamente 4 cm de espesor (Thouret et al., 2001).

### 5.2.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Esta zona colinda directamente con la zona de alto peligro. Se extiende entre 20 km y 80 km al norte, 18 km y 79 km al sur, 22 km y 92 km al oeste, y entre 18 km y 94 km al este del volcán Tutupaca. La zona de moderado peligro puede ser afectada por la caída de cenizas que formarían una capa de algunos milímetros de espesor (Figura 17). Estos valores son coherentes con aquellos registrados durante la erupción vulcaniana de IEV 2 del volcán Ubinas de los años 2006–2009, la cual dejó una capa de ceniza de 1 mm de espesor en un radio de 30 km del cráter del volcán (Rivera et al., 2014).

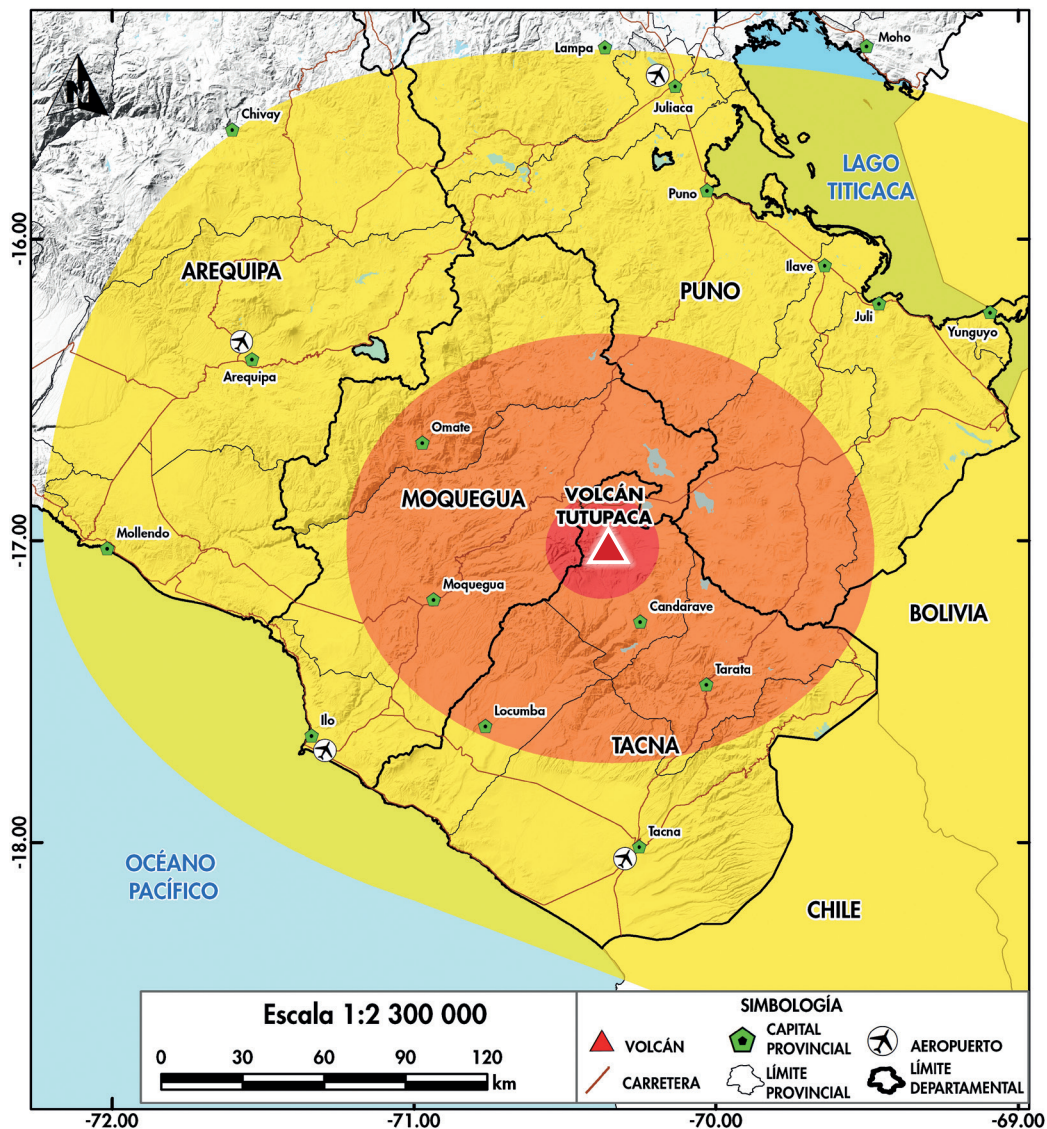


Figura 17. Mapa de peligros por caídas de ceniza del volcán Tutupaca para un escenario de erupción de tipo vulcaniano (IEV 1–2).

### 5.2.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica, cuyos límites se hallan a una distancia de 80 km a 180 km al norte, 79 km a 156 km al sur, 95 km a 193 km al noroeste y de 86 km a 193 km al sureste del volcán Tutupaca, en este último caso sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Durante erupciones vulcanianas, esta zona puede ser afectada por caída de cenizas que formarían una capa de menos de 1 mm de espesor. 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 20 km al sureste del cráter del Ubinas (Aguilar et al., 2019).

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

#### 5.3.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro (color rojo) comprende un área semi-elíptica, en cuyo centro se ubica el volcán Tutupaca. Dicha zona se extiende a una distancia de 87 km al norte, 66 km al sur, 87 km al este y oeste del volcán Tutupaca. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli pómez que formarían una capa de varios centímetros o decímetros de espesor (Figura 18). Es posible

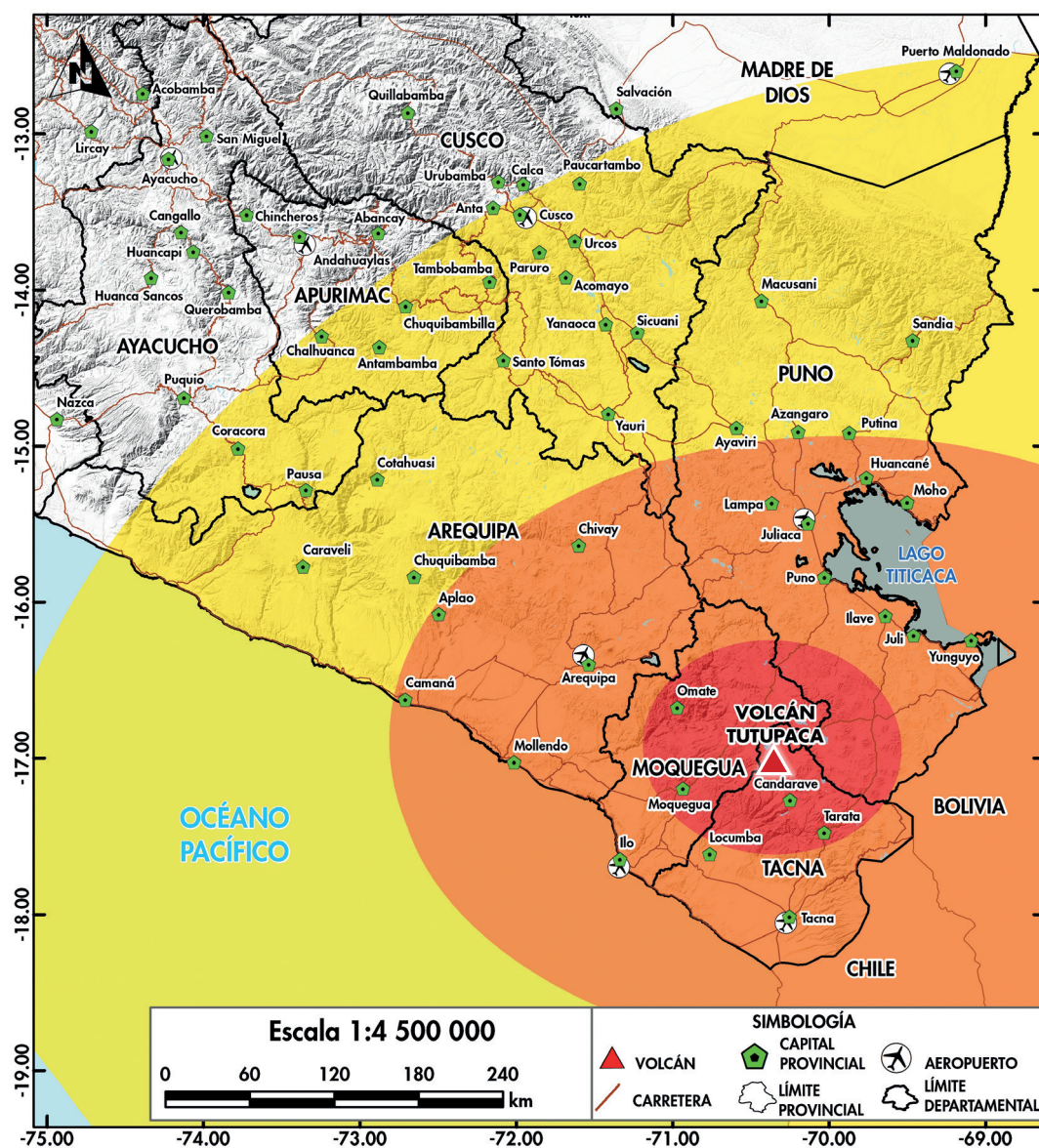


Figura 18. Mapa de peligros por caídas de ceniza del volcán Tutupaca para un escenario de erupción explosiva de tipo subpliniano (IEV 3-4).

que en un radio de 20 km del volcán Tutupaca se deposite una capa de ceniza de hasta 30 cm de espesor. Durante la erupción subpliniana del volcán Tungurahua (Ecuador) de agosto de 2006, la cual tuvo un IEV 3, se reportaron espesores de ceniza de entre 4 cm y 5 cm, a 10 km de distancia del cráter (Eychenne et al., 2012).

### 5.3.2 Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de moderado peligro (naranja) corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Dicha zona tiene una configuración elíptica, cuyos límites se hallan a una distancia de 87 km a 199 km al norte, 88 km a 244 km al este y de 66 km a más de 142 km al sur y sureste del volcán Tutupaca. Esta zona, colindante con la zona de alto peligro, puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de varios centímetros a milímetros de espesor (Figura 18). Esta hipótesis se basa en algunos ejemplos, como en el caso de la erupción subpliniana de IEV 3 del volcán Nevado del Ruiz (Colombia) ocurrida en noviembre de 1985, durante la cual la ceniza tuvo 2 cm de espesor a 30 km de distancia del volcán. En el caso de la erupción del volcán Tungurahua de agosto de 2006 (IEV 3, Eychenne et al., 2012), se reportaron espesores de 0.7 cm a 0.8 cm a 20 km del volcán.

Durante erupciones subplinianas con IEV 4, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez que formarían una capa de varios decímetros de espesor (Figura 18). Este hecho se basa en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones subplinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Ticsani de 11 000 años AP (IEV 4) emplazó caídas de ceniza de alrededor de 50 cm de espesor a 30 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003). Además, durante la erupción subpliniana (IEV 4) del volcán Calbuco en Chile, en 2015, las cenizas emitidas formaron una capa de 1.5 cm de espesor a 220 km al noroeste del cráter, en la localidad de Collón Cura, Argentina (Romero et al., 2016).

### 5.3.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de moderado peligro, cuyos límites se hallan

aproximadamente a una distancia de 199 km a 475 km al norte, 244 km a 473 km al noroeste y más de 200 km al sur y sureste del volcán Tutupaca. Esta zona de bajo peligro puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de varios milímetros de espesor (Figura 18).

Esto se basa en la erupción subpliniana de IEV 3 del volcán Nevado del Ruiz (Colombia) de noviembre de 1985, la cual emplazó caídas de ceniza de entre 2 mm y 3 mm de espesor a 50 km de distancia. Por su parte, luego de la erupción del volcán Tungurahua de agosto de 2006 (IEV 3; Eychenne et al., 2012), se reportaron espesores de ceniza de 6 mm a 10 km de distancia del volcán.

Durante erupciones subplinianas de IEV 4, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de varios milímetros a algunos centímetros de espesor. Esta hipótesis se basa en la erupción explosiva de IEV 4 del volcán Lascar (Chile), de abril de 1993, durante la cual la pluma eruptiva fue arrastrada cientos de kilómetros hacia el sureste, llegando incluso hasta las costas atlánticas de Argentina y Brasil. Los máximos espesores medidos se encuentran en la ladera este del volcán Lascar, a 5 km del cráter, donde miden hasta 80 cm de espesor, con lapilli de pómez de hasta 0.4 m de diámetro. Los espesores medidos disminuyen rápidamente a medida que se alejan del cráter, alcanzando entre 3 cm y 5 cm de espesor a 25 km al sureste del cráter; 1 cm a 3 cm de espesor, a 45 km del volcán; y 1 cm a 70 km al sureste del volcán Lascar (Viramonte et al., 1995). Durante la erupción subpliniana (IEV 4) del volcán Calbuco en Chile, en 2015, las cenizas dejaron una capa de menos de 1 mm de espesor a 510 km al noroeste del cráter, en la localidad de Neuquén, Argentina (Romero et al., 2016).

## 5.4. Mapa de peligros por caídas piroclásticas durante una erupción pliniana (IEV 5)

Al sur del volcán Tutupaca, entre 18 km y 25 km de distancia, yace una secuencia de depósitos de caída de lapilli de pómez de espesores centimétricos, cada uno; algunos de ellos asociados a erupciones plinianas generadas por este volcán, probablemente durante el Pleistoceno superior (Mariño et al., 2021). En una eventual reactivación, el Tutupaca puede generar este tipo de erupciones.

En tal sentido, se ha elaborado un mapa de peligros para un escenario de una erupción pliniana que puede presentar el volcán Tutupaca. Dicho mapa muestra tres zonas de peligro: zona de alto peligro en rojo, zona de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo (Figura 19).

### 5.4.1 Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro tiene forma elíptica y corresponde al área proximal. Se prolonga hasta una distancia de 205 km al oeste y 226 km al

este del volcán Tutupaca (Figura 19), en este último caso sobrepasando la frontera Perú-Chile. Durante erupciones plinianas de IEV 5, la zona de alto peligro puede ser afectada por caídas de lapilli de algunos metros a varios centímetros de espesor. Este escenario puede ser similar a la depositación de lapilli de pómez generada por una erupción pliniana presentada por el Tutupaca en el Pleistoceno superior (Mariño et al., 2021) o por el volcán Misti hace 2000 años AP. En efecto, la erupción pliniana del volcán Misti de hace 2000 años dejó una capa de lapilli de pómez de 63 cm de espesor a 8 km al suroeste de la cima del volcán Misti (Harpel et al., 2011).

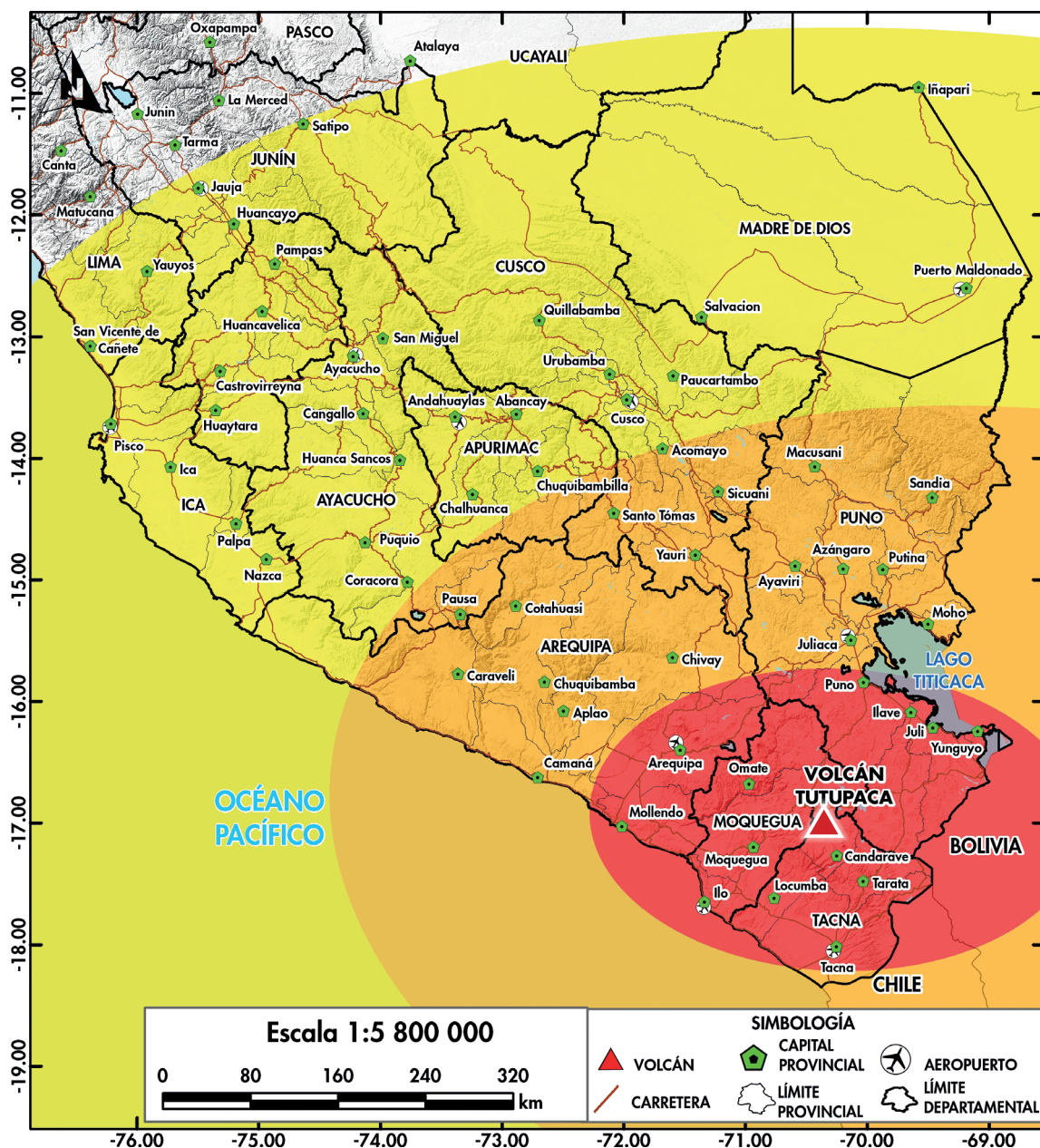


Figura 19. Mapa de peligro por caída de tefras del volcán Tutupaca para un escenario eruptivo tipo pliniano con IEV 5 (simulación USGS, 2025).

### 5.4.2 Zona de moderado peligro (naranja)

Los límites de la zona de moderado peligro se hallan aproximadamente entre 205 km a 435 km de distancia al noroeste y de más de 226 km al sureste de la cima del volcán Tutupaca, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia (Figura 19). Durante erupciones plinianas con IEV 5, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez de decímetros a milímetros de espesor, pero no mayores a lo estimado en el escenario de alto peligro.

Este escenario podría ser similar a la erupción del volcán Misti ocurrida hace 2000 años AP, que dejó depósitos de caída de lapilli de pómez de 20 cm de espesor a una distancia de 13.5 km al suroeste del cráter (Cobeñas et al., 2012).

### 5.4.3 Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro tiene una configuración elíptica y se halla de 435 km a 850 km de distancia al noroeste y más de 800 km al sureste del volcán Tutupaca, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia (Figura 19). Por el norte, la zona de bajo peligro se extiende de 199 km a 475 km de distancia del volcán Tutupaca. Durante una erupción pliniana con IEV 5, esta área puede ser afectada por caídas de lapilli de varios milímetros de espesor.

Dicha estimación es similar a la zona afectada durante la erupción pliniana de IEV 5 del volcán Mount Saint Helens (Washington, EE. UU.) en 1980, que generó una columna eruptiva de lapilli de pómez de aproximadamente 19 km de altura. Posteriormente, el lapilli de pómez y la ceniza viajaron hacia el este del volcán, influenciados por los vientos a través de los Estados Unidos, y causaron oscuridad total en Spokane, Washington, a 400 km del volcán. Se reportó un espesor de ceniza de 1.3 cm a 480 km del volcán (Harris, 1988).

## 5.4 Mapa de peligros por lahares

En el sur del Perú, se han realizado algunas estimaciones de volúmenes de lahares que descendieron por las quebradas que se prolongan del volcán Misti (Delaite et al., 2005; Thouret et al., 2022) y quebradas que se prolongan de los

volcanes Ubinas y Sabancaya. En el volcán Misti, Delaite et al. (2005) consideraron volúmenes de lahares del orden de 0.5 a 11 millones de m<sup>3</sup> para la simulación de lahares generados por erupciones volcánicas. Recientemente, Thouret et al. (2022), para la construcción de escenarios de peligros por descenso de lahares del volcán Misti, (Arequipa), asociados a lluvias intensas, consideraron tres volúmenes de lahar de 150 000 m<sup>3</sup>, 350 000 m<sup>3</sup> y 500 000 m<sup>3</sup>.

En el caso del volcán Tutupaca, es necesario considerar la presencia de nieve y hielo presente en las laderas del volcán, principalmente en el cono o edificio Tutupaca Occidental, en la mayor parte del año. Tomando en consideración dichos datos y las condiciones meteorológicas que imperan de la zona, se escogió un volumen de 350 000 m<sup>3</sup> para lahares generados durante erupciones explosivas leves (IEV 1–2) que, incluso, podrían estar asociados a lluvias intensas. Asimismo, se consideraron dos volúmenes, de 1 y 2 millones de m<sup>3</sup>, para lahares generados durante erupciones explosivas importantes (IEV 3–5) que podrían provocar la fusión del hielo y la nieve que yacen en las laderas de ambos conos, tanto en el edificio occidental como en el edificio oriental. El modelamiento de lahares se realizó con el *software* VolcFlow sobre las principales quebradas ubicadas en los flancos del volcán Tutupaca.

En el mapa de peligros por lahares obtenido (Figura 20) se muestra una zona roja, considerada la zona de alto peligro, que corresponde a las áreas que podrían ser afectadas por lahares de 350 000 m<sup>3</sup>. Estos lahares podrían estar asociados a erupciones de bajo Índice de Explosividad Volcánica (IEV 1–2) o a lluvias intensas. La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de 1 millón de m<sup>3</sup>. La zona amarilla, considerada de bajo peligro, puede ser afectada por lahares de 2 millones de m<sup>3</sup>. Según el registro histórico, la probabilidad de ocurrencia de estos dos tipos de eventos últimos es baja.

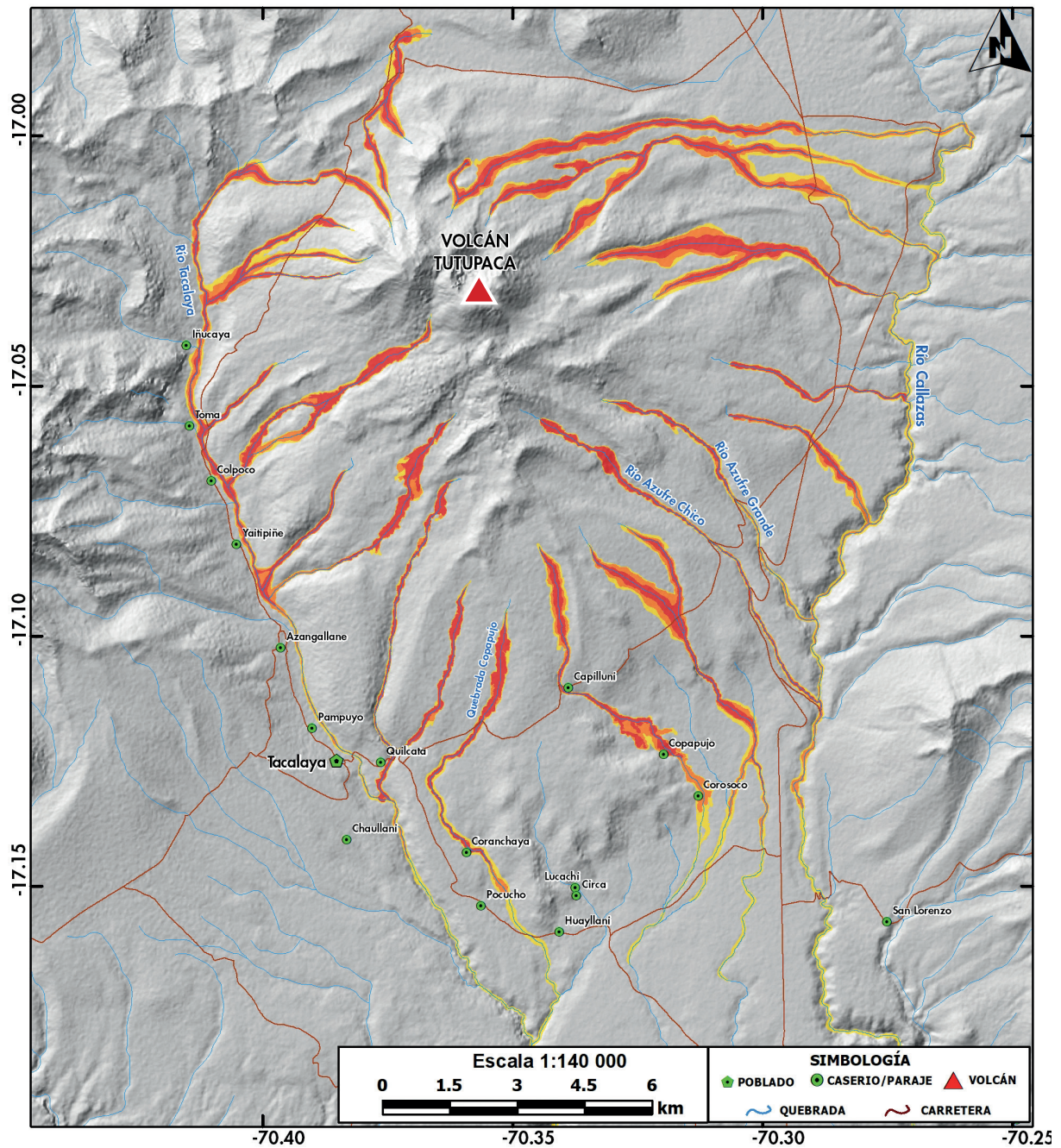


Figura 20. Mapa de peligros por lahares del volcán Tutupaca.

# Conclusiones .....□

- El volcán Tutupaca está conformado por dos edificios volcánicos construidos sucesivamente: Tutupaca Occidental y Tutupaca Oriental. El edificio más reciente, Tutupaca Oriental, presentó en 1787 y 1802 erupciones explosivas de tipo subpliniano (IEV 3) que emplazaron caídas de ceniza, flujos piroclásticos y una avalancha de escombros.
- Se han identificado cinco escenarios eruptivos en caso de una erupción del volcán Tutupaca. Desde luego, el más propenso a reactivarse por presentar actividad reciente es el edificio Tutupaca Oriental. Los escenarios de mayor a menor posibilidad son los siguientes: 1) erupción de tipo vulcaniano (IEV 1–2); 2) erupción explosiva subpliniana (IEV 3–4); 3) erupción explosiva pliniana (IEV 5); 4) erupción con crecimiento de domo y colapso de un sector del volcán; y 5) erupción efusiva con emisión de lavas. En cualquiera de los casos, los productos emitidos pueden afectar los poblados, terrenos de cultivo y obras de infraestructura localizados en inmediaciones del volcán.
- Con base a los estudios efectuados, se presentan cinco mapas de peligro volcánico: mapa proximal de peligros múltiples (por flujos de lava, flujos piroclásticos, proyectiles balísticos, crecimiento de domo, avalanchas de escombros). Este mapa muestra una zona de alto peligro (rojo) que se encuentra entre 2 km y 6 km de distancia del cono Tutupaca Oriental. La zona de moderado peligro (naranja) se encuentra entre 6 km y 8 km de distancia del volcán; y la zona de bajo peligro (amarillo) está entre 8 km y 12 km del volcán Tutupaca.
- Mapa de peligros por caídas de ceniza para un escenario de tipo vulcaniano (IEV 1–2), donde la zona de alto peligro (rojo) se extiende a una distancia de 20 km al norte, 18 km al sur, 22 km al oeste y 18 km al este del volcán Tutupaca. La zona de alto peligro puede ser afectada por una capa de ceniza de algunos centímetros a varios milímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) se extiende entre 20 km y 80 km al norte, 18 km y 79 km al sur, 22 km y 92 km al oeste, y entre 18 km y 94 km al este del volcán Tutupaca. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de algunos milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) es colindante con la zona de moderado peligro, cuyos límites se hallan a una distancia de 80 km a 180 km al norte, 79 km a 156 km al sur, 95 km a 193 km al noroeste y 86 km a más 193 km al sureste del volcán Tutupaca, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de menos de 1 mm de espesor.
- Mapa de peligros por caídas piroclásticas para un escenario de tipo subpliniano (IEV 3–4), donde la zona de alto peligro (rojo) se extiende a una distancia de 87 km al norte, 66 km al sur, 87 km al este y oeste del volcán Tutupaca. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli pómez que formarían una capa de varios centímetros o algunos decímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Dicha zona tiene una configuración elíptica, cuyos límites se hallan a una distancia de 87 km a 199 km al norte, de 88 km a 244 km al oeste y de 66 km a más de 140 km al sur y sureste del volcán Tutupaca. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían capas de varios centímetros a milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de moderado peligro, la cual tiene una configuración elíptica, con una distancia de 199 km a 475 km al norte, 244 km a 473 km al noroeste y más de 200 km al sur y sureste del volcán Tutupaca. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza que formarían una capa de varios milímetros de espesor.
- En el mapa de peligros por caídas piroclásticas para el escenario de una erupción pliniana (IEV 5), la zona de alto peligro (rojo) es el área proximal y se prolonga hasta una distancia de 205 km al oeste y 226 km al este del volcán Tutupaca, sobrepasando la frontera que el Perú comparte con Bolivia y Chile. Durante una erupción pliniana, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez que formarían una capa de algunos metros a varios centímetros de espesor. La zona de moderado peligro (naranja) colinda inmediatamente con la zona de alto peligro. Esta zona comprende una distancia entre 205 km a 435 km al noroeste y más de 226 km al sureste de la cima del volcán Tutupaca, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Esta zona puede ser afectada

por caídas de ceniza y lapilli de pómez que formarían una capa de varios decímetros a milímetros de espesor. La zona de bajo peligro (amarillo) tiene una configuración elíptica y se halla a 435 km a 850 km de distancia al noroeste y más de 800 km al sureste del volcán Tutupaca, sobrepasando la frontera Perú-Bolivia. Por el norte, dicha zona se extiende entre 199 km a 475 km del volcán Tutupaca. En esta zona se depositarían cenizas de varios milímetros de espesor.

- En el mapa de peligros por lahares, la zona roja, considerada de alto peligro (rojo), puede ser afectada por lahares de poco volumen (de hasta 350 000 m<sup>3</sup>); la zona de moderado peligro (naranja) puede ser afectada por lahares de hasta 1 millón de m<sup>3</sup>; mientras que la zona de bajo peligro (amarillo) puede ser afectada por lahares de hasta 2 millones de m<sup>3</sup>.
- Los mapas de peligro volcánico presentados en este estudio constituyen documentos técnicos útiles para las instituciones del SINAGERD, autoridades locales y regionales (Gobierno Regional de Tacna, municipalidades provinciales y distritales, etc.) y población, pues contribuirá para una adecuada formulación de proyectos de desarrollo, la elaboración de planes de prevención y el manejo de una eventual crisis volcánica del Tutupaca.

# Referencias □

- Aguilar, R., Thouret, J.-C., Samaniego, P., Wörner, G., Jicha, B., Paquette, J.-L., Suaña, E., & Finizola, A. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: The Chachani Volcano Cluster, Southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 426, Article 107539. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107539>
- 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.
- Bernard, B., Hidalgo, S., Robin, C., Beate, B., & Quijuzaca, J. (2014). The 3640–3510 BC rhyodacite eruption of Chachimbiro compound volcano, Ecuador: A violent directed blast produced by a satellite dome. *Bulletin of Volcanology*, 76, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0784-4>
- Bignami, C., Bosi, V., Costantini, L., Cristiani, C., Lavigne, F., Thierry, P., (Eds.). (2012). *Handbook for volcanic risk management: Prevention, crisis management, resilience* (198 p.). MIAVITA team.
- Blong, R.J. (1984). *Volcanic hazards: A sourcebook on the effects of eruptions*. Academic Press.
- Blong, R.J. (2000). Volcanic hazard and risk management. In H. Sigurdsson, B.F. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 1215–1228). Academic Press.
- Brantley, S.R., & Myers, B. (1997). *Mount St. Helens – From the 1980 eruption to 1996*: U.S. Geological Survey Fact Sheet 70-97, 2 p.
- Bustillos, J., & Samaniego, P. (2011). Volcán Tungurahua: Tamaño de las erupciones explosivas. In D. Andrade (Ed.), *Memorias de las séptimas jornadas en ciencias de la Tierra* (pp. 131–134). Encuentro sobre Riesgos y Desastres, Quito (Ecuador).
- Cárdenas, E.A., Porras, P., & Morales, L.Y. (2013). Using VolcFlow software to simulate pyroclastic flows from the Cerro Machín volcano, Tolima, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 2(3), 157–172.
- Carey, S. (1996). Modeling of tephra fallout from atmospheric eruptions. In L.A. Scarpa & R.I. Tilling (Eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards* (pp. 429–463). Springer-Verlag.
- Cas, R.A.F., & Wright, J.V. (1987). *Volcanic successions, modern and ancient*. Allen and Unwin Ltd.
- Castruccio, A., Clavero, J., Segura, A., Samaniego, P., Roche, O., Le Pennec, J.-L., & Droguett, B. (2016). Eruptive parameters and dynamics of the April 2015 sub-Plinian eruptions of Calbuco volcano (Southern Chile). *Bulletin of Volcanology*, 78, 62. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1027-3>
- Centeno, R., Machacca, R., Vargas, K., Alvarez, Y., Anccasi, R., Antayhua, Y., Cruz, J., Valdivia, D., Quispe, L., Baca, J., Lazarte, I., Rivera, P. (2025). *Actividad eruptiva reciente del volcán Sabancaya: De la calma aparente a la reactivación explosiva (septiembre 2024 – septiembre 2025)*. Informe Técnico 027-2025/IGP, Ciencias de la Tierra Sólida.
- Cruz, V., & Matsuda, K. (2015). Geochemical study of thermal waters in the Tutupaca geothermal zone, Tacna, South of Peru. In *Proceedings World Geothermal Congress* (19–25 April 2015, Melbourne, Australia).
- 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 Geomorphology*, 140(Supplement), 209–231.
- De Silva, S., & Francis, P. (1991). *Volcanoes of the Central Andes*. Springer-Verlag.
- Eychenne, J., Le Pennec, J.-L., Troncoso, L., Gouhier, M., & Nedelec, J.-M. (2012). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology*, 74(187–205). <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0517-s>
- Francis, P. (1993). *Volcanoes: A planetary perspective*. Oxford University Press.
- Gerbe, M., & Thouret, J. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990–98 explosive activity of Nevado Sabancaya, Southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66, 541–561.

- Gueugneau, V. (2014). *Évaluation du logiciel VolcFlow pour la simulation numérique de lahars et application aux risques associés* (Master's thesis). Université Blaise Pascal Clermont II, France.
- Harpel, C., De Silva, S., & Salas, G. (2011). The 2 ka eruption of Misti Volcano, southern Peru—the most recent plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. *Geological Society of America, Special Papers*, 484, 1–72.
- Harris, S.L. (1988). *Fire Mountains of the West: The Cascade and Mono Lake Volcanoes*. Mountain Press Publishing Company.
- Hoblitt, R., Walder, J., Driedger, C., Scott, K., Pringle, P., & Vallance, J. (1995). *Volcano hazards from Mount Rainier*. Open-File Report 95-273, U.S. Geological Survey, Department of the Interior.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2018). *Censos Nacionales 2017: XII de Población y VII de Vivienda*. Resultados definitivos. INEI.
- 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.
- Kelfoun, K., & Druitt, T. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 110, B12202. <https://doi.org/10.1029/2005JB003746>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107767>
- Malin, M.C., & Sheridan, M.F. (1982). Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 217(4560), 637–640. <https://doi.org/10.1126/science.217.4560.637>
- Manrique, N., Samaniego, P., Médard, E., Schiavi, F., & Mariño, J. (2020). Pre-eruptive magmatic processes associated with the historical (218 ± 14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru). *Bulletin of Volcanology*, 82(1). <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1341-2>
- Mariño, J., & Thouret, J. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 1–27. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/1261>
- Mariño, J., Samaniego, P., Manrique, N., Valderrama, P., Roche, O., van Wyk de Vries, B., Guillou, H., Zerathe, S., Arias, C., & Liorzou, C. (2021). The Tutupaca volcanic complex (Southern Peru): Eruptive chronology and successive destabilization of a dacitic dome complex. *Journal of South American Earth Sciences*, 109, 103227. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103227>
- Martínez, W., & Cervantes, J. (2003). Rocas ígneas en el sur del Perú: Nuevos datos geocronométricos, geoquímicos y estructurales entre los paralelos 16° y 18°30' Latitud Sur. *INGEMMET, Boletín, Serie D: Estudios Regionales*, 26, 140.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.006>
- Miller, C. (1989). *Potential hazards from future volcanic eruptions in California*. U.S. Geological Survey Bulletin, 1847, 17 p.
- Nakada, S. (2000). Hazards from pyroclastic flows and surges. In H. Sigurdsson, B.F. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 945–955). Academic Press.
- Naranjo, J., Sigurdsson, H., Carey, S., & Fritz, W. (1986). Eruption of the Nevado Del Ruiz Volcano, Colombia, on 13 November 1985: Tephra Fall and Lahars. *Science*, 233, 961–963. <https://doi.org/10.1126/science.233.4762.961>
- Pavez, A., Remy, D., Bonvalot, S., Diament, M., Gabalda, G., Froger, J.-L., Julien, P., Legrand, D., & Moisset, D. (2006). Insight into ground deformations at Láscar volcano (Chile) from SAR interferometry, photogrammetry and GPS data: Implications on volcano dynamics and future space monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 100, 307–320. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.05.006>

org/10.1016/j.rse.2005.11.017

- Pierson, T., Janda, R., Thouret, J., & Borrero, C. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1-4), 17–66. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90042-K](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90042-K)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.06.017>
- Rivera, M., Cueva, K., Vela, J., Samaniego, P., Manrique, N., & Soncco, Y. (2020a). Geología y evaluación de peligros del volcán Sara Sara (Ayacucho). *INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 78, 154 p., 2 mapas.
- Rivera, M., Samaniego, P., Vela, J., Le Pennec, J.L., Guillou, H., Paquette, J.L., Liorzou, C., (2020b). The eruptive chronology of the Yucamane-Calientes compound volcano: A potentially active edifice of the Central Andes (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 393, 106787. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106787>
- Romero, J.E., Morgavi, D., Arzilli, F., Daga, R., Caselli, A., Reckziegel, F., Viramonte, J., Díaz-Alvarado, J., Palacci, M., Burton, M., Perugini, D. (2016). Eruption dynamics of the 22–23 April 2015 Calbuco volcano (Southern Chile): Analyses of tephra fall deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 317, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.02.027>
- Samaniego, P., Rivera, M., Manrique, N., Schiavi, F., Nauret, F., Liorzou, C., & Ancellin, M.-A. (2020). Linking magmatic processes and magma chemistry during the post-glacial to recent explosive eruptions of Ubinas volcano (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107095>
- Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., Delgado, R., Valderrama, P., & Scao, V. (2016). The eruptive chronology of the Ampato–Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, 110–128. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.004>
- Samaniego, P., Valderrama, P., Mariño, J., van Wyk de Vries, B., Roche, O., Manrique, N., Chédeville, C., Liorzou, C., Fidel, L., & Malnati, J. (2015). The historical ( $218 \pm 14$  aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru). *Bulletin of Volcanology*, 77, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0937-8>
- Sánchez, A., de la Cruz, N., Quispesivana, L., Rodríguez, W., Lopez, J.C., Enriquez, J., Mongue, R., Quispesivana, W., Imana, E., Leon, W., Guzman, A., Olivares, P., Morche, W., Aliaga, M., Canchaya, S., Aranda, A., & Ramírez, L. (1994). *Estudio geovolcánico e inventario sistemático de manifestaciones geotermales del lote Tutupaca*. INGEMMET & ELECTROPERU, Lima, pp. 1–3 (Informe Interno).
- 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.F., Denlinger, R.P., & Mastin, L.G. (2012). Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition. *Journal of Geophysical Research*, 117, B04204. <https://doi.org/10.1029/2011JB008968>
- Segura, A. (2016). *Erupción subpliniana de abril de 2015 del volcán Calbuco, Andes del Sur: Génesis, dinámica y parámetros físicos de la columna eruptiva y depósitos piroclásticos de caída asociados* (Tesis de maestría). Universidad de Chile, 99 p. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142799>
- Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S.R., Rymer, H., & Stix, J. (Eds.) (2000). *The encyclopedia of volcanoes* (1st ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-054798-5.50004-9>
- Spark, R.S.J., Gardeweg, M.S., Calder, E., & Matthews, S.J. (1997). Erosion by pyroclastic flows on Lascar Volcano, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 58(7), 557–565. <https://doi.org/10.1007/s004450050104>
- Steinmüller, K. (2001). Modern hot springs in the southern volcanic Cordillera of Peru and their relationship to Neogene epithermal precious-metal deposits. *Journal of South American*

*Earth Sciences*, 14, 377–385. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00004-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00004-1)

- Suzuki, T. (1983). A theoretical model for dispersion of tephra. In D. Shimozuru & I. Yokoyama (Eds.), *Arc Volcanism: Physics and Tectonics* (pp. 93–113). Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo.
- Thouret, J.-C., Arapa, E., Charbonnier, S., Guerrero, A., Kelfoun, K., Córdoba, G., & Santoni, O. (2022). Modeling tephra fall and sediment–water flows to assess their impacts on a vulnerable building stock in the city of Arequipa, Peru. *Frontiers in Earth Science*, 10, Article 865989. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.865989>
- Thouret, J., Rivera, M., Wörner, G., Gerbe, M., Finizola, A., Fornari, M., & Gonzales, K. (2005). Ubinas: The evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 67, 557–589. <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0393-1>
- Thouret, J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., & Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 113, 1593–1610. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2001\)113<1593:GOEMVN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113<1593:GOEMVN>2.0.CO;2)
- Thouret, J.-C., Davila, J., & Eissen, J.-P. (1999). Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, A.D. 1600, Southern Peru. *Geology*, 27, 435–438. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0435:LEIHTI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0435:LEIHTI>2.3.CO;2)
- Thouret, J., Guillande, R., Huaman, D., Gourgaud, A., Salas, G., & Chorowicz, J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 165(1), 49–63. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.165.1.49>
- Tilling, R. (1989). Volcanic hazards and their mitigation: Progress and problems. *Reviews of Geophysics*, 27(2), 237–269. <https://doi.org/10.1029/RG027i002p00237>
- Uji, T., Takarada, S., & Yoshimoto, M. (2000). Debris avalanches. In H. Sigurdsson, B.F. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer, & J. Stix (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 617–626). Academic Press.
- Valdivia, J.G. (1847). Fragmentos para la historia de Arequipa. *Folleto de El Deber, Arequipa*, pp. 109–111.
- Vásconez, F., Vásconez, R., & Mothes, P. (2019). Flujos de lodo del volcán Carihuairazo provocados por el terremoto de Ambato, Ecuador, en 1698 y su reconstrucción numérica con perspectivas a futuro. *Revista Geofísica*, 69, 11–29. <https://doi.org/10.35424/rgf.v0i69.823>
- Viramonte, J., Becchio, R., Bolli, M.I., Petrinovic, I., Seggiaro, R., & Tejada, A. (1995). *Informe sobre la erupción del volcán Lascar de abril de 1993*. Instituto Geonorte, UNSA, 13 p.
- Warwick, R., Williams-Jones, G., Kelman, M., & Witter, J. (2022). A scenario-based volcanic hazard assessment for the Mount Meager Volcanic Complex, British Columbia. *Journal of Applied Volcanology*, 11, 5. <https://doi.org/10.1186/s13617-022-00114-1>
- Zamácola, J.D., & Jaúregui, J. (1804). *Apuntes para la historia de Arequipa*, vol. 49. Imp. De La Bolsa-Guanamarca.

# Información clave para ti

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

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



APP #IGP



Web IGP



REGEN

**Volcán Tutupaca:** vista desde el poblado de Huaytire, al norte del volcán.







@igp.peru



@igp\_peru



@igp.peru



@igp\_videos



@institutogeofisicodelperu



@igp.peru