



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



MAPAS DE ESCENARIOS DE PELIGROS POR CAÍDAS DE TEFRAS DE LOS VOLCANES SABANCAYA Y UBINAS

Informe Técnico N°030-2024/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima - Perú
Agosto, 2024

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Mapas de escenarios de peligros por caídas de téfras de los volcanes Sabancaya y Ubinas

Autores

Marco Rivera

Juan Cuno

David Valdivia

José Del Carpio

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz 169 Mayorazgo

Teléfono: 51-1-3172300

MAPAS DE ESCENARIOS DE PELIGROS POR CAÍDAS DE TEFRAS DE LOS VOLCANES SABANCAYA Y UBINAS

Lima – Perú
Agosto - 2024

RESUMEN

Los volcanes Sabancaya (5980 m s.n.m.) y Ubinas (5780 m s.n.m.) son los más activos del sur peruano. En los últimos siglos ambos volcanes han presentado erupciones explosivas de leve a moderada magnitud (erupciones de tipo vulcaniana).

Se han elaborado mapas de escenarios de peligro por caídas piroclásticas de ambos volcanes. Para el volcán Sabancaya se consideraron dos escenarios: vulcaniano y subpliniano. En caso de presentar erupciones vulcanianas (Índice de Explosividad volcánica: IEV 1-2), la zona de **alto peligro (rojo)** se halla a una distancia de 39 km al Este, y 44 km al oeste del cráter del volcán Sabancaya. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. La zona de **moderado peligro (naranja)** se halla entre 39 y 240 km al Este y entre 44 y 125 km al oeste del cráter del volcán Sabancaya. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de pocos milímetros de espesor. La zona de **bajo peligro (amarillo)** tiene una configuración elíptica, con distancias de más de 240 km al Este, 125 km al oeste y 100 km al sur del volcán Sabancaya. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de menos de 1.0 mm de espesor. Para el escenario de erupciones subplinianas, la zona de **alto peligro (rojo)** es el área proximal y se halla aproximadamente hasta 380 km al Este, 160 km al oeste y 200 km al sur. Durante erupciones subplinianas, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez de varios centímetros de espesor. La zona de **moderado peligro (naranja)** corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 380 km a 640 km al Este, de 160 km a 260 km al oeste y de 270 km al sur. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. La zona de **bajo peligro (amarillo)** comprende una distancia de más de 640 km al Este, de más de 260 km al oeste y de más de 370 km al sur del Sabancaya. En esta zona se depositaría cenizas de menos de 0.1 mm de espesor. En todos los casos, las

zonas más propensas a ser afectadas por las caídas de cenizas corresponden al valle del Colca y la altiplanicie volcánica.

Para el volcán Ubinas se consideraron dos escenarios: vulcaniano y subpliniano. En caso de presentar erupciones vulcanianas (IEV 1-2), la zona de **alto peligro (rojo)** se halla a una distancia de 15 km al este-sureste, y 8 km al oeste del cráter del volcán Ubinas. Durante erupciones vulcanianas esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de varios milímetros a centímetros de espesor. La zona de **moderado peligro (naranja)** se halla aproximadamente entre 15 y 56 km al este y entre 8 y 42 km al oeste del cráter del volcán Ubinas. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor. La zona de **bajo peligro (amarillo)** tiene una configuración elíptica, con una distancia de más de 240 km al este, 125 km al oeste y 100 km al sur del volcán Ubinas. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de menos de 1.0 mm de espesor. Para el escenario de erupciones subplinianas - plinianas (IEV 4-5), la zona de **alto peligro (rojo)** muestra una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 600 km al este, 320 km al oeste y 280 km al sur. De manera local, en caso de una erupción altamente explosiva se generarían caída de pómez de más de 0.5 m de espesor que cubriría zonas adyacentes del Ubinas, hasta un radio de 15 km alrededor del volcán. La zona de **moderado peligro (naranja)** tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 640 km a 740 km al este, de 320 km a 550 km al oeste y de 280 km a 380 km al sur. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de más de 1.0 mm de espesor. La zona de **bajo peligro (amarillo)** tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 740 km al este, de más de 550 km al oeste y de más de 380 km al sur. En esta zona se depositaría cenizas de menos de 0.1 mm de espesor. En todos los casos las zonas más propensas a ser afectadas por las caídas de cenizas corresponden al valle de Ubinas, donde se localizan poblados, terrenos de cultivos, pastizales y obras de infraestructura.

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Los peligros volcánicos: caídas de téfras

2.- CONTEXTO VULCANOLÓGICO

2.1.- Volcán Sabancaya

2.1.1.- Aspectos socio-económicos

2.1.2.- Historia eruptiva pasada

2.1.3.- Erupciones recientes

2.2.- Volcán Ubinas

2.2.1.- Aspectos socio-económicos

2.2.2.- Historia eruptiva pasada

2.2.3.- Erupciones recientes

3.- DATOS Y METODOLOGÍA

3.1.- Modelo Ash3D

3.2.- Parámetros de entrada para posibles escenarios eruptivos

3.2.1.- Erupción de tipo vulcaniana

3.2.2.- Erupción de tipo subpliniana - pliniana

4.- RESULTADOS

4.1.- Escenarios de peligros por caída de téfras volcán Sabancaya

4.1.1.- Escenario de erupción de tipo vulcaniana (IEV 1 - 2)

4.1.2.- Escenario de erupción subpliniana (IEV 3 - 4)

4.2.- Escenarios de peligros por caída de tefras volcán Ubinas

4.2.1 Escenario de erupción vulcaniana (IEV 1 - 2)

4.2.2 Escenario de erupción subpliniana o pliniana (IEV 3 - 5)

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

1.- INTRODUCCIÓN

En el Sur peruano existen 16 volcanes activos y potencialmente activos como Misti, Ubinas, Sabancaya, Tutupaca, Yucamane y Ticsani. La actividad de dichos volcanes está ligada al proceso de subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental sudamericana. La actividad volcánica registrada en el Sur del Perú al menos durante los últimos 2000 años, se caracterizó por ser de tipo explosiva, con erupciones de tipo pliniana, subpliniana y vulcaniana que tuvieron un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de 1 a 6, en una escala que va de 1 a 8 (Thouret et al., 2001, 2005; Adams et al., 2001; Gerbe y Thouret, 2005; Harpel et al., 2011; Rivera, 2010).

Según las crónicas históricas durante los últimos 500 años los volcanes peruanos activos emitieron productos volcánicos en forma de caídas de cenizas o flujos piroclásticos que causaron considerables daños en los poblados ubicadas alrededor de estos volcanes (Thouret et al., 2002; 2005; Rivera et al., 1998). En este periodo, uno de las más grandes erupciones registrados en el Perú y en Sudamérica fue la erupción explosiva del volcán Huaynaputina en el año 1600 d.C. que tuvo un IEV 6, y ocasionó la muerte de más de 1500 personas y un impacto en el clima global (Prival et al., 2020). Pero, además, existen volcanes que durante los últimos siglos vienen generando erupciones explosivas leves a moderadas, caso de los volcanes Ubinas y Sabancaya que generan efectos en la salud de la población y daños en el medio ambiente. Actualmente, desde una perspectiva de riesgo volcánico en el sur de Perú, una erupción explosiva de pequeña a moderada magnitud de cualquiera de los volcanes activos podría causar daños importantes en ciudades, terrenos de cultivos, reservorios de agua y el medio ambiente.

Respecto a los estudios e investigaciones especializados en vulcanología realizados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), estos están orientadas al pronóstico de erupciones, al conocimiento sobre el comportamiento dinámico de

los volcanes y los peligros volcánicos asociados con enfoque en la gestión del riesgo de desastres. El conocimiento detallado sobre la actividad eruptiva pasada de un volcán y el empleo de nuevas técnicas de simulación de los procesos volcánicos es crucial para comprender los procesos y proponer escenarios eruptivos futuros, además de identificar las zonas que pueden verse afectadas por productos volcánicos emitidos durante futuras erupciones.

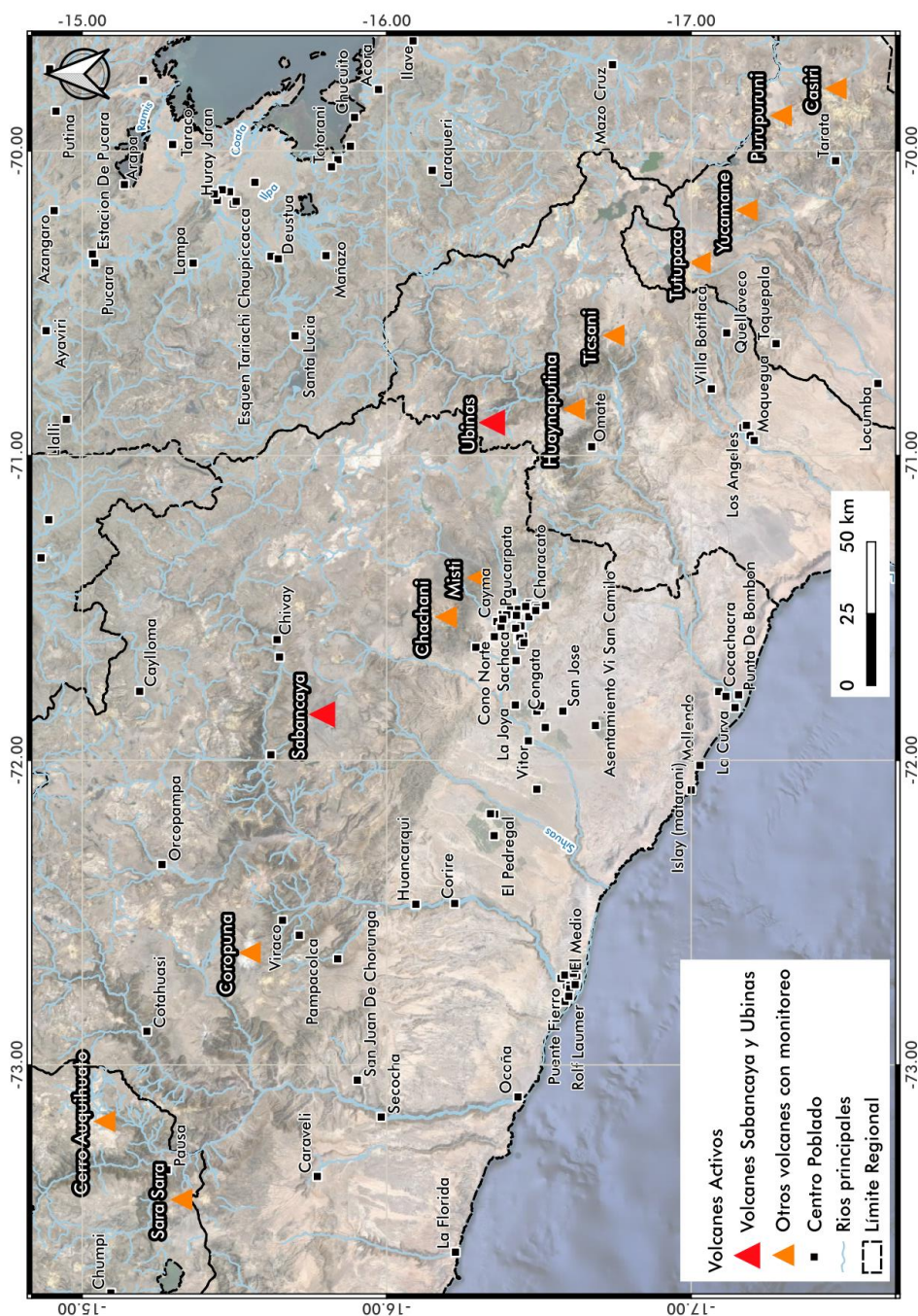


Figura 1.- Mapa de ubicación de los volcanes Sabancaya y Ubinas, y demás volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano.

El presente informe tiene el objetivo de presentar los mapas de peligros por caída de tefras de los volcanes Ubinas y Sabancaya (Figura 1), elaborados en base a la simulación numérica y datos de campo, en atención al oficio N.º 000417-2024-INDECI/SEC GRAL. Esta información contribuirá en el conocimiento de las zonas que pueden ser afectadas por las caídas de cenizas emitidas por los volcanes Sabancaya y Ubinas, información útil para la elaboración de planes de contingencia frente a erupciones volcánicas. Los resultados obtenidos constituyen información técnico científica que servirá para que las autoridades realicen acciones oportunas en el marco de la Gestión de Riesgo de Desastres.

1.1.- Los peligros volcánicos: caída de téfras

Estudios sobre peligros volcánicos efectuados por Tilling, (1989); Hoblitt et al. (1995) y Scott et al. (1997) determinaron que los procesos volcánicos generadores de peligro y riesgo incluyen: las caídas de téfras y proyectiles balísticos, los flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares, flujos de lava, los peligros asociados al crecimiento de domos de lava, las emisiones de gases y las avalanchas de escombros (Figura 2).

Entre estos tipos de peligros, las caídas de téfras (ceniza, lapilli, bloques) representan un peligro importante, dado que estos materiales luego de ser expulsados por erupciones volcánicas, son arrastrados por los vientos a decenas y centenas de kilómetros de los volcanes generando daños e impactos en las ciudades, medio ambiente, fuentes de agua, terrenos de cultivos, etc. Las téfras están constituidas por fragmentos de roca que varían de tamaño, desde cenizas (<2 mm) y lapilli (2-64 mm), hasta bloques y bombas (>64 mm). Con respecto a su densidad, esta puede variar desde pómez y escorias de baja densidad hasta cristales y fragmentos líticos muy densos (Tilling, 1989).

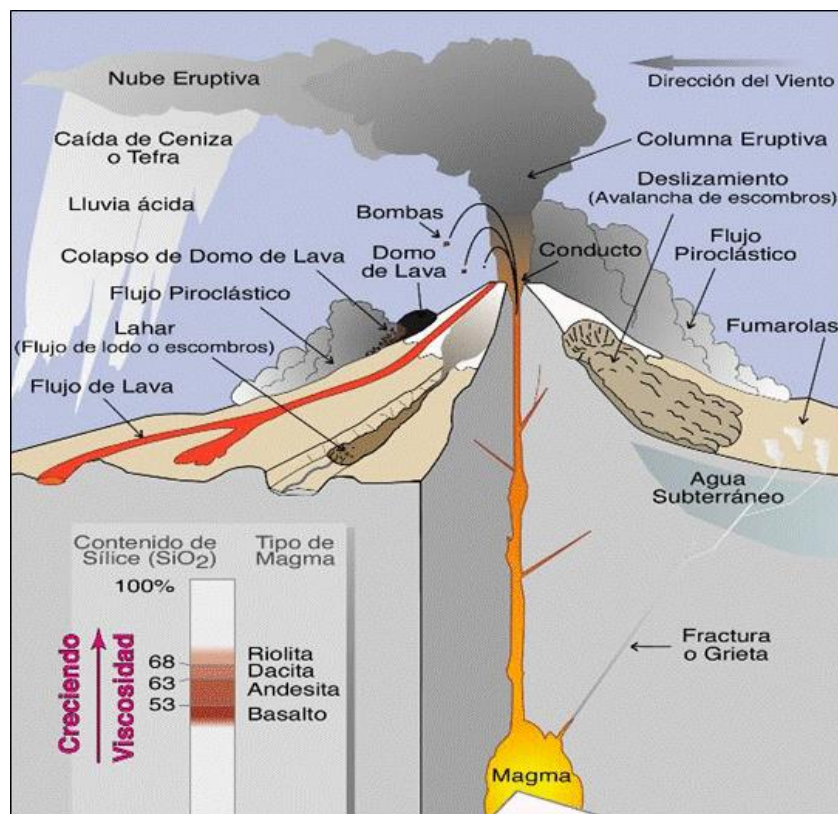


Figura 2.- Principales procesos volcánicos que pueden generar peligros y riesgos (Fuente USGS).

Asimismo, los depósitos de caída de téfras pueden variar de espesor según los tipos de erupciones volcánicas. Por ejemplo, durante grandes erupciones ($IEV > 2$), las superficies pueden quedar cubiertas con una capa de ceniza de > 1 cm; en tanto, la ceniza más fina puede ser arrastrada sobre áreas más extensas y distales del cráter del volcán. Como resultado, al incrementarse la distancia desde el centro de emisión, el espesor de las téfras o cenizas presentan una disminución.

La caída de ceniza representa el peligro volcánico de mayor potencial de impacto social, ambiental y económico para cualquier área urbana. Por lo tanto, la construcción de escenarios de peligro por caída de cenizas resulta ser una herramienta eficiente para disponer de información técnica-científica que sustente la correcta gestión del riesgo de desastres.

2.- CONTEXTO VULCANOLÓGICO

2.1. Volcán Sabancaya

El volcán Sabancaya está ubicado a 18 km al Sur del valle del Colca (Caylloma, Arequipa) y a 70 km al Noroeste de la ciudad de Arequipa (Figura 3). Desde noviembre de 2016 hasta la actualidad mantiene un proceso eruptivo vigente que diariamente viene generando decenas de explosiones volcánicas, acompañadas de emisiones de cenizas y gases. El incremento de dicha actividad pone en riesgo alrededor de 20 000 personas que habitan en los distritos de Chivay, Achoma, Cabanaconde, Callalli, Maca, Lari, Madrigal, Ichupampa, Yanque, Coporaque, Tapay, Lluta, Huambo y Huanca Actividad volcánica reciente.

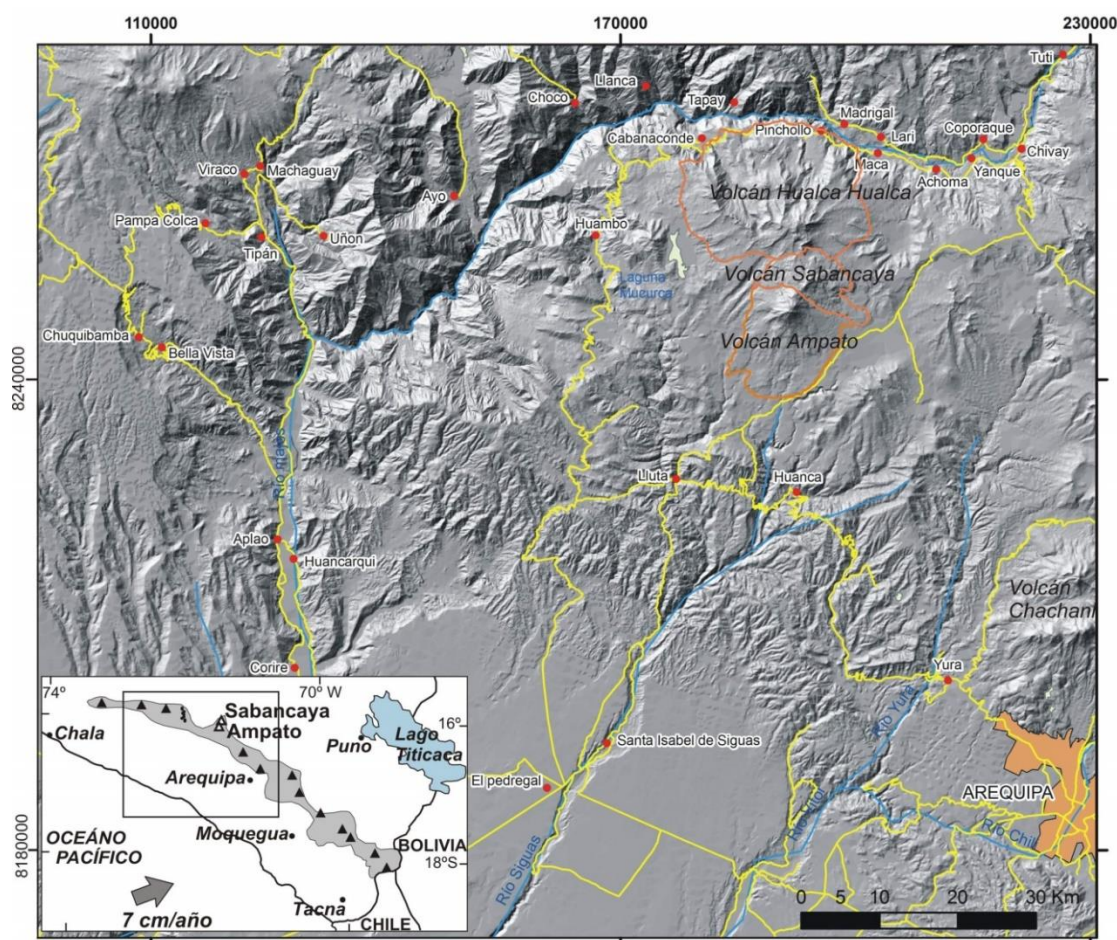


Figura 3.- Mapa de localización del volcán Sabancaya. En el cuadro inferior, la cadena volcánica Plio-cuaternaria y los volcanes activos y potencialmente activos del Sur peruano.

2.1.1. Aspectos socio-económicos

El departamento de Arequipa tiene ocho provincias: Arequipa, Caylloma, Caraveli, Islay, La Unión, Camaná, Castilla y Condesuyos. Solo las provincias de Caylloma, Castilla y Arequipa se encuentran bajo influencia de cualquier erupción del volcán Sabancaya.

Los datos de población y vivienda de la zona de estudio, perteneciente al departamento de Arequipa, han sido tomados del Compendio Estadístico del INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática), del año 2018, en la cual se trabaja con información del último censo correspondiente al año 2017: Censo XII de población y VII de vivienda (Tabla 1).

La provincia de Caylloma, donde se localiza el volcán Sabancaya cuenta con una población total de 22966 habitantes. Dentro de una radio de 50 km alrededor del volcán Sabancaya, se localiza los siguientes poblados: Chivay, Coporaque, Yanque, Tuti, Achoma, Huanca, Lluta, Huambo, Tapay, Maca, Cabanaconde, Ichupampa, Callalli, Lari, Sibayo, Madrigal, Tisco, Santiago de Chuca, Choco y Pinchollo que pertenecen a 18 distritos (Tabla 1), las cuales albergan una población total (rural y urbana) de 22 966 habitantes. Todos pertenecientes a la provincia de Caylloma. El número de viviendas de estos dieciocho distritos es de 15 095 viviendas.

Además, existen otros distritos pertenecientes a las provincias de Castilla y Arequipa, localizados a una distancia de 50 km del volcán Sabancaya. En la provincia de Castilla, los distritos de Chachas, Ayo, Uñón, Huancarqui y Choco tienen una población aproximada de 2937 habitantes, tanto rural como urbana. En la provincia de Arequipa, los distritos de Santa Isabel de Sigvas y Yura tienen una población total (tanto rural como urbana) de 35 998 habitantes. Los pobladores que habitan en áreas aledañas al volcán Sabancaya se dedican a las siguientes actividades: agricultura, ganadería, turismo, artesanía y otras actividades.

Tabla 1.- Datos del censo del INEI del año 2017, sobre vivienda y población rural y urbana existente dentro del área de influencia del volcán Sabancaya.

Provincia	Distrito	Altura (msnm)	Población Total	Viviendas
Caylloma	Chivay	3632	5770	2364
Caylloma	Coporaque	3583	1089	572
Caylloma	Yanque	3420	2117	1316
Caylloma	Tuti	3837	621	490
Caylloma	Achoma	3487	841	594
Caylloma	Huanca	3078	1010	809
Caylloma	Lluta	2999	718	734
Caylloma	Huambo	3308	670	803
Caylloma	Tapay	2984	772	420
Caylloma	Maca	3279	701	524
Caylloma	Cabanaconde	3296	2096	1618
Caylloma	Ichupampa	3397	555	421
Caylloma	Callalli	4211	1458	1197
Caylloma	Lari	3358	904	564
Caylloma	Sibayo	3855	669	430
Caylloma	Madrigal	3271	648	555
Caylloma	Tisco	4211	1441	1095
Caylloma	Santiago de Chuca	4457	886	589
Castilla	Chachas	3059	1646	1104
Castilla	Ayo	1982	242	204
Castilla	Uñón	2730	207	144
Castilla	Huancarqui	599	1472	769
Castilla	Choco	2500	702	716
Arequipa	Santa Isabel de Sigvas	1344	682	604
Arequipa	Yura	2529	33346	35394
TOTAL			61263	54030

En el entorno del volcán Sabancaya existen importantes obras civiles descritas a continuación:

- Obras de conducción (túneles, canales) del Proyecto Especial Majes-Sigvas.
- Línea de transmisión energética Socabaya-Mantaro.

- Centrales hidroeléctricas de Lluta (280 MW), Lluclla (380 MW), Mocollo.
- Sistema de irrigación en los valles de Sihuas y Majes.
- Sistema vial: Chivay-Cabanaconde-Huambo; Arequipa-Chivay-Espinar-Cusco; Arequipa-Caylloma-Orcopampa-Arcata y carreteras vecinales.

2.1.2. Historia eruptiva pasada

El volcán Sabancaya cubre un área de 65 a 70 km² y tiene un volumen de 6-10 km³ (Samaniego et al., 2016). En su cumbre del cono norte, contiene un cráter ligeramente alargado de norte a sur de 480 m de largo x 310 m de ancho, al norte del cual se distinguen restos de un domo de lava de 280 m de diámetro que se desarrolló entre los años 2019 y 2024.

Con base a los trabajos de Samaniego et al. (2016) y Rivera et al. (2016) la historia eruptiva del volcán Sabancaya se define en tres etapas de construcción:

- (1) Un edificio volcánico basal (unidad Sabancaya I), el cual está constituido por una secuencia de flujos de lava de composición andesítica y dacítica (60.6-65.6 wt.% SiO₂) que se emplazaron sobre las rocas más antiguas de los volcanes Ampato y Hualca Hualca (Figura 2). Estos flujos de lava tienen espesores de 40-80 m, y forman una sucesión de flujos de lava de 300-400 m de espesor, que se extiende hacia el oeste y este del volcán. Una muestra de lava, correspondiente a la unidad SA-1 arrojó una edad de 6.30 ± 0.31 ka (Samaniego et al., 2016). El flujo de lava, emplazado en el sector occidental del volcán datado en 5440 ± 40 años AP por Gerbe & Thouret (2005), también pertenece a esta etapa.



Figura 2.- Vista del sector Este del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Al pie del volcán Sabancaya se distinguen flujos de lava "Sabancaya I, II y III".

(2) En una etapa intermedia (unidad Sabancaya II) se emplazaron flujos de lava andesíticas y dacíticas (60.0-64.5 wt.% SiO₂) que conforman el cono medio del volcán. Asociada con esta unidad, se emplazaron al menos tres flujos de lava andesíticas subhorizontales en el sector de Sallalli (unidad Sabancaya III). Bulmer et al. (1998) y Samaniego et al. (2016) mencionan que esta secuencia provendría de un ventó satélite ubicado a 4 km al suroeste del cráter. Dos de estos flujos de lava fueron datados con el método cosmogénico ³He arrojando edades de 6.65 ± 0.32 ka y 12.34 ± 0.55 ka. Posteriormente, Bromley et al. (2019) realizaron dataciones con el método cosmogénico de He de dos muestras tomadas de la misma zona de Samaniego et al. (2016). La primera muestra del flujo SA-3 arrojó una edad de 5.2 ± 0.1 ka, y la segunda muestra del flujo de lava superior arrojó una edad de 4.1 ± 0.1 ka. En base a estos argumentos, Bromley et al. (2019) sugieren que el volcán Sabancaya se construyó durante el Holoceno.

Juvigné et al. (1998) y Samaniego et al. (2016) en los bofedales ubicados en el sector este del Sabancaya, encontraron capas de ceniza de 5 a 30 cm de espesor emitidas por dicho volcán. Juvigné et al. (1998) mostraron que existen entre 4 y 5 capas de cenizas centimétricas emplazados entre 11 000 y 8 000 años. Posteriormente, Samaniego et al. (2016) encontraron capas

de ceniza en las turberas de Sallalli, Colihuirí y Quebrada Huaraya (inmediaciones del Sabancaya) las cuales arrojaron edades de menos de 4 500 años. En la Quebrada Huaraya, Samaniego et al. (2016) encontraron una capa de ceniza de 5 a 10 cm de espesor, que yace sobre una turba que fue datada en 265 ± 30 años A.P. Esta edad está acorde con la fecha de 300 ± 50 años A.P. obtenida por Juvigné et al. (2008) y confirma la ocurrencia de erupciones explosivas durante el siglo XVII o XVIII (Travada, 1958; Zamácola, 1888). En efecto, el volcán Sabancaya según las crónicas ha registrado 3 erupciones en los últimos 300 años: en 1750, 1784 y 1988-1998 (Thouret et al., 1994; Gerbe y Thouret, 2004; Siebert et al., 2010).

2.1.3. Erupciones recientes

a) Actividad eruptiva 1986-1998

Según estudios de Thouret et al. (1994), Gerbe y Thouret (2004), Juvigné et al. (2008), entre 1986 y 1989 el volcán Sabancaya presentó emisiones de fumarolas. Durante abril de 1989, las columnas de gases ascendieron hasta 800 m de altura. Esta actividad permaneció por los siguientes meses. Entre el 13 y 19 de abril de 1990 ocurrieron explosiones cada 20 a 30 minutos que produjeron columnas de ceniza que ascendieron entre 3 y 4 km de altura. Entre el 28 de mayo al 3 de junio de 1990, se apreció un incremento gradual de la actividad volcánica. Durante esas fechas se reportaron más de 3 explosiones por día que generaron columnas eruptivas de 700 a 800 m de altura. En junio de 1990 la actividad se incrementa generando explosiones con emisiones importantes de gases y ceniza de 2 a 3 km por encima del cráter. Las cenizas emitidas durante las explosiones eran de poco volumen, y fueron dispersadas alrededor del cráter. Los bloques balísticos centimétricos alcanzaron una distancia de algunos cientos de metros a pocos kilómetros de distancia respecto al volcán, mientras que la ceniza alcanzó entre 20 a 30 km de distancia.

En abril y mayo de 1991 ocurren explosiones que generaron columnas de ceniza de color gris que ascendieron entre 3 y 4 km de altura (Figura 3), y luego produjeron caídas de ceniza que se acumularon hasta 2 mm de espesor en el sector de Cajamarca (a 9 km al SE del cráter del volcán Sabancaya).



Figura 3.- Fotografía que muestra una erupción del tipo vulcaniana ocurrida el 15 de abril de 1991. Fotografía tomada por Pierre V. desde el flanco este del volcán Sabancaya.

A inicios de 1994, el Sabancaya presentó permanentes emisiones de gases y ceniza. En marzo de 1994, la actividad explosiva fue moderada y las columnas de gases y ceniza alcanzaron algunos cientos metros de altura. La columna eruptiva más alta alcanzó 2.5 km de altura y fue de color gris oscura. En esta oportunidad, las cenizas fueron dispersadas en dirección oeste.

La actividad explosiva, pero en niveles bajos, continuó hasta el año 2000 en el que se apreciaron emisiones de gases se elevaron entre 200 a 300 m de altura sobre la cima. Las plumas predominantes eran de color blanco y el resto eran de color gris.

La actividad eruptiva 1988-1998 depositó una capa de ceniza de 1 cm de espesor a 12 km al este del cráter del Sabancaya (Figura 4), lo que sugiere que el eje de dispersión de la ceniza durante ese periodo de actividad fue predominantemente hacia el este del volcán (Thouret et al., 1994).

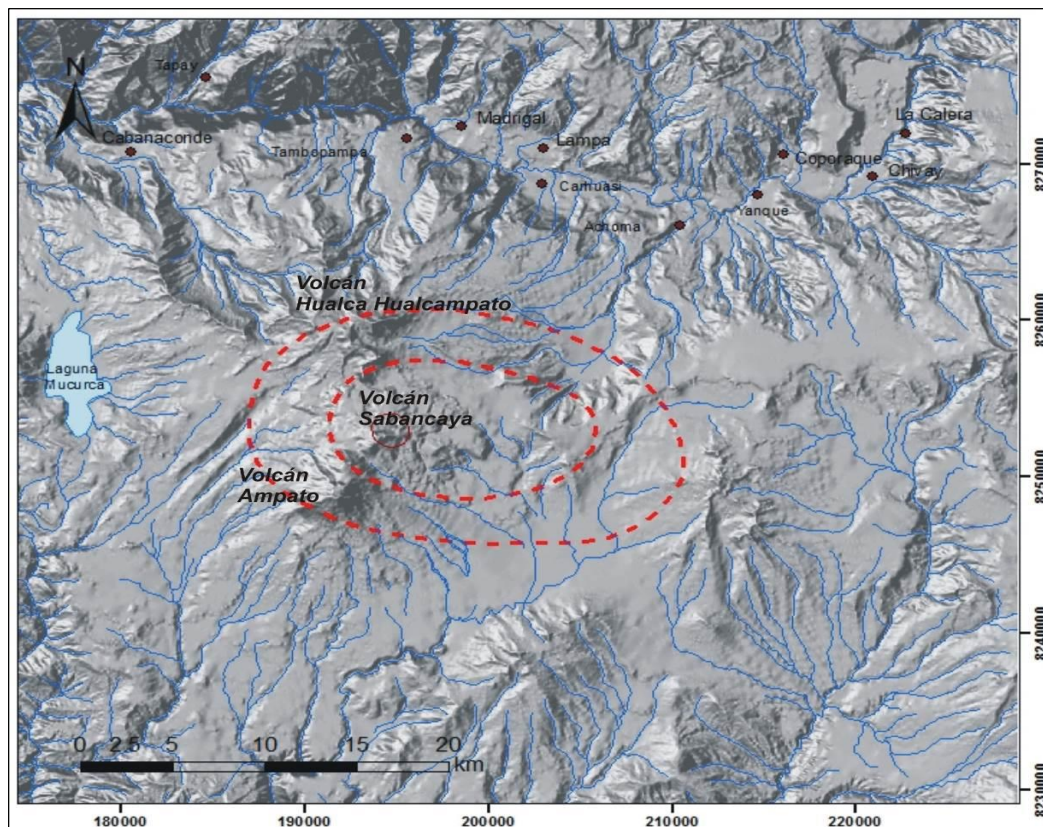


Figura 4.- Mapa de distribución de cenizas durante la actividad eruptiva del volcán Sabancaya 1988-1998 (tomado de Thouret et al., 1994).

b) Actividad 2016 - hasta el presente

Según Rivera et al. (2023) a fines de 2012, se detecta un ligero incremento de las emisiones de gases en el volcán Sabancaya, que ascendían entre 100 y 200 m de altura sobre la cima del volcán. Entre el 15 y 18 de febrero de 2013, se genera importante emisión de gases. Durante los siguientes meses de 2013, el Sabancaya emitió gases blanquecinos y azulinos que ascendieron entre 800 y 1 200 m de altura sobre la cima del volcán. Durante el 2014, la actividad fumarólica fue incrementando gradualmente. Posteriormente, el 6 de noviembre del 2016, se generan las primeras explosiones que se caracterizaron por la emisión de cenizas y gases que ascendieron, en promedio, 3 000 m de altura. En los periodos de mayor actividad estas columnas de gases y cenizas alcanzan alturas de hasta 5 500 m sobre la cima del volcán (por ej., el 4 julio de 2017), y con presencia de bloques balísticos (de 20 cm aproximadamente con un alcance de 500 m).

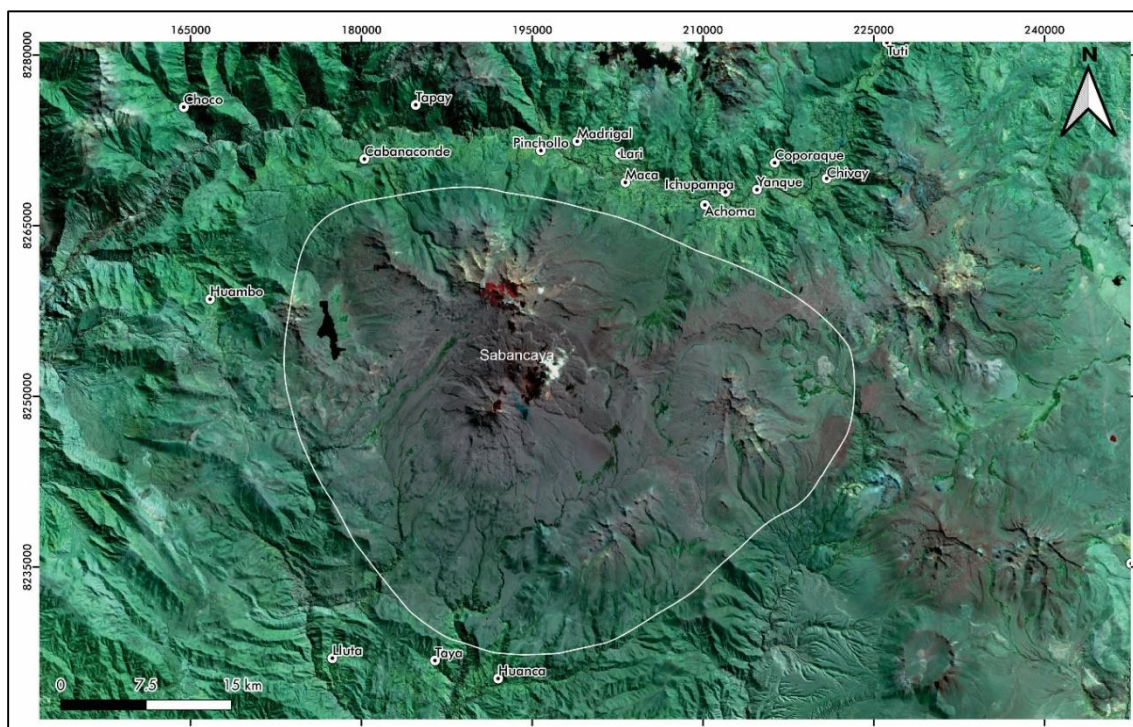


Figura 5.- Dispersión de ceniza de los 10 primeros meses del proceso eruptivo del Sabancaya iniciado en 2016, obtenidos a partir de imágenes satelitales LANDSAT-8

Durante los años posteriores: 2018 a 2023 las cenizas emitidas fueron dispersadas en un radio promedio de 40 km del volcán (Figuras 5 y 6), afectando los poblados de Coporaque, Ichupampa, Achoma, Lari, Madrigal, Maca, Cabanaconde, Tapay, Huanca, Lluta y Huambo.



Figura 6. Imagen de una explosión del volcán Sabancaya registrada el 24 septiembre de 2021.

Además, desde 2017 hasta la actualidad, en el interior del cráter del Sabancaya se visualiza el crecimiento y destrucción de domos de lava.

2.2. Volcán Ubinas

El volcán Ubinas se encuentra ubicado aproximadamente a 70 km al NE de la ciudad de Arequipa (Figura 7), edificado en la cabecera de los valles de Ubinas y Para. Este volcán posee un volumen aproximado de 54 km³, tiene forma casi simétrica y está conformado por una potente intercalación de flujos de lavas y flujos piroclásticos. El cono tiene ~1200 m de altura y es ligeramente alargado de sureste a noroeste.

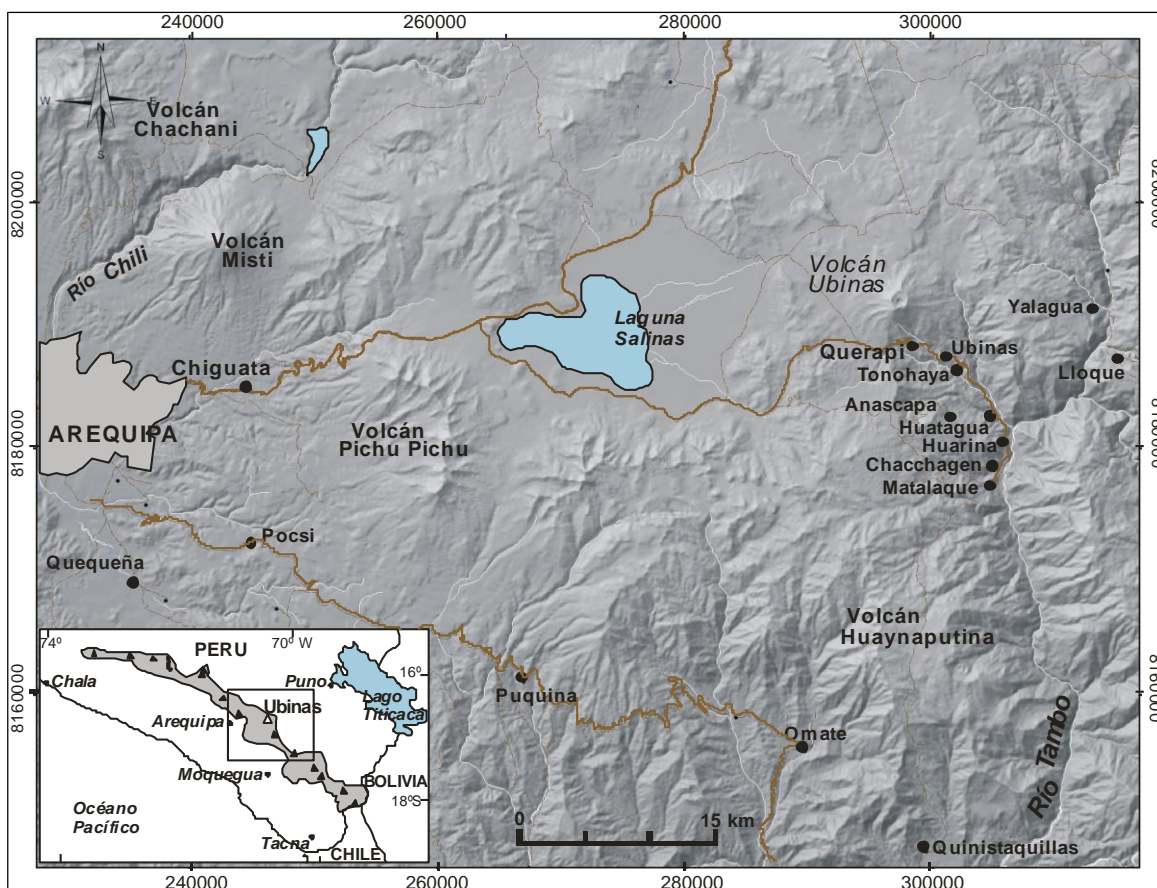


Figura 7.- Mapa de ubicación del volcán Ubinas, poblados aledaños y la ciudad de Arequipa. En el cuadro inferior izquierdo, se presenta la cadena volcánica Cuaternaria del Sur peruano.

2.2.1. Aspectos socio-económicos

Los datos de población y vivienda del área de influencia del volcán Ubinas han sido tomados tanto del censo sobre población y vivienda, a nivel de Distrito y Provincia, efectuado por Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en el año 2017 (Tabla 2).

Tabla 2. Resultado del censo nacional del INEI - XII de Población y VII de Vivienda del 2017.

Provincia	Distrito	Altura msnm)	Población Total	Viviendas
Arequipa	San Juan de Tarucani	4217	1377	946
Gral. Sánchez Cerro	Chojata	3634	708	786
Gral. Sánchez Cerro	Coalaque	2300	948	733
Gral. Sánchez Cerro	Ichuña	3794	2901	2966
Gral. Sánchez Cerro	Lloque	3325	570	379
Gral. Sánchez Cerro	Matalaque	2577	455	544
Gral. Sánchez Cerro	Ubinas	3395	1741	1468
Gral. Sánchez Cerro	Yunga	3619	864	484
TOTAL			9 564	8 306

En áreas aledañas al Ubinas (entre 20 y 40 km del volcán) se ubican ocho distritos, situados dentro del área de influencia del volcán. Entre ellos se encuentran: San Juan de Tarucani, perteneciente al departamento de Arequipa, y Chojata, Coalaque, Ichuña, Lloque, Matalaque, Ubinas (Figura 8) y Yunga, pertenecientes al Departamento de Moquegua. En estos distritos en total existe una población de 9 564 habitantes. El número de viviendas de estos ocho distritos es de 8 360.

En cuanto a la actividad económica, la población del valle de Ubinas se dedica principalmente a la actividad agrícola, ganadera y pecuaria. Además, en áreas aledañas al volcán Ubinas existen obras civiles importantes que podrían ser afectados en caso de una importante erupción del volcán Ubinas, como:

- Las represas Aguada Blanca y El Frayle (principales fuentes de agua y de electricidad de la ciudad de Arequipa).
- Central Hidroeléctrica de Charcani I al V.
- Empresa Minera de Borateras Salinas "INKABOR".
- Carretera afirmada Arequipa - Santa Lucia de Salinas - Moche - Logen - Ubinas –Matalaque.
- Carretera afirmada Arequipa - Santa Lucia de Salinas - Tite - Yalagua.



Figura 8.- El poblado de Ubinas es uno de los siete poblados localizados en el valle de Ubinas, amenazado por la actividad del volcán Ubinas.

2.2.2. Historia eruptiva pasada

Los estudios vulcanológicos realizados por Thouret et al. (2005), Rivera (2010) y Samaniego et al. (2020) sobre el volcán Ubinas, muestran que este tuvo al menos dos etapas de evolución:

- (1) "Ubinas I" (>370 000 años), durante el cual el Ubinas presentó una actividad principalmente efusiva, que emplazó flujos de lava andesíticos visibles en la base del volcán (Figura 9). Posteriormente, se destruyó el flanco Sur del volcán generando

depósitos de avalanchas de escombros de $\sim 2.8 \text{ km}^3$, distribuidos en la parte baja del flanco sur, visibles a más de 12 km al sureste del volcán.



Figura 9.- Vista del flanco Norte del volcán Ubinas, donde se distinguen las lavas emplazadas en los periodos "Ubinas I" y "Ubinas II".

(2) "Ubinas II" (370 000 años hasta el presente). Inicialmente entre $\sim 370\,000$ y $270\,000$ años A.P. en el Ubinas se produjo el crecimiento y destrucción de domos de lava, seguido o asociado al emplazamiento de lavas que conforman el cono superior del volcán. Posteriormente, se produjo una erupción explosiva que generó una secuencia de flujos piroclásticos de pómez y cenizas que aflora entre 7 y 8 km al sureste del cráter y cuyo volumen fue de $\sim 1,8 \text{ km}^3$, ocurrido hace $269\,000 \pm 14$ años. Posteriormente, entre $\sim 250\,000$ y $170\,000$ años A.P., se produjo el crecimiento y destrucción de domos de lava. Entre $170\,000$ y $20\,000$ años A.P. predomina una importante actividad efusiva que terminó por formar el cono superior del volcán.

En una última etapa, ocurrida hace menos de 20 000 años A.P. se produjeron importantes erupciones explosivas, entre ellas de tipo plinianas. Una de las erupciones plinianas más antiguas, de hace 14 000 años A.P. ha depositado una capa de pómez riolíticos de 4.5 m de espesor, a 9 km al sur del cráter (visibles en los sectores de Sacohaya y Anascapa), sobre el cual existe otro depósito de caída pliniana de 1.2 m de espesor, constituido de lapilli pómez, datado en 7 480 años A.P (Thouret et al., 2005). Hace cerca de 3 670 años ocurrió un segundo derrumbe del flanco Sur del volcán que depositó una avalancha de escombros de $\sim 1.2 \text{ km}^3$. Estos depósitos formaron montículos al pie de la pared sur del cono (Querapi). Hace 980 ± 60 años A.P. ocurrió la última erupción pliniana del Ubinas que depositó una capa de caída de lapilli pómez andesíticos de 2.8 m de espesor a 6 km al sureste del volcán (Figura 10).

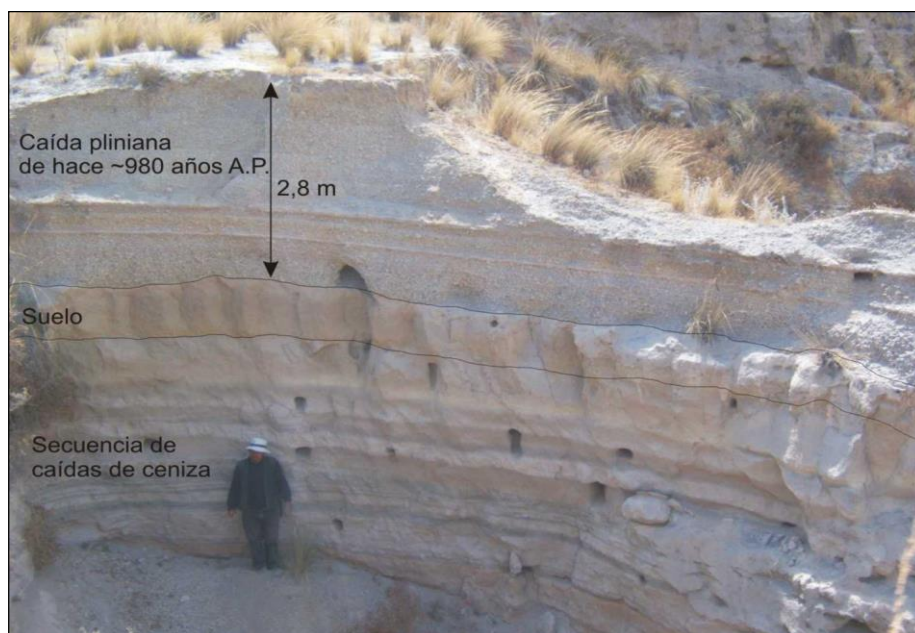


Figura 10.- Secuencia piroclástica visible en el sector de Corohuayo (6.5 km al este del Ubinas) en el cual se distingue el depósito de caída pliniana de hace ~ 980 años que cubre delgados niveles de cenizas grises.

Desde el año de 1550 d.C. hasta la actualidad, el Ubinas ha presentado aproximadamente 28 eventos volcánicos referidos a erupciones explosivas con importantes emisiones de gases, de magnitud baja (IEV 1-3), como la actividad eruptiva 2006-2009; 2013-2016; 2019; 2023.

Tabla 3. Resumen sobre las características de la actividad eruptiva histórica a reciente del volcán Ubinas

AÑO	INICIO	FINAL	TIPO DE ACTIVIDAD	IEV	OBSERVACIONES
1550			Erupción central y explosiva	3 ?	
1599	07 Feb.	22 Feb.	Erupción explosiva moderada	2	Cenizas grises cayeron cerca de Arequipa.
1600			Erupción explosiva		
1662			Erupción explosiva	2 ?	Las cenizas alcanzaron hasta las pampas de Sama y Locumba.
1677			Erupción explosiva de gran magnitud	3	Probablemente cayeron cenizas y flujos de escorias encontradas al NW y N del volcán.
1778			Erupción explosiva		
1784			Erupción central y explosiva	2	Alta actividad fumarólica y emisión de cenizas.
1826			Erupción explosiva	2	
1830			Erupción explosiva	2	
1862			Erupción explosiva	2	
1865			Erupción explosiva	2	Emisión de cenizas grises.
1867	24-May	28-May	Erupción explosiva	2	
1869		Octubre	Erupción explosiva	2	
1906		Octubre	Erupción explosiva	2	
1907		Octubre	Erupción explosiva	2	
1912-1913 ?			Erupción explosiva	2	Cenizas cayeron sobre Ubinas, Chojata y Yalahua afectó tierras de cultivo y murieron ganados por epidemias.
1923-1925 ?			Erupción explosiva		Cenizas grises cayeron cerca de la ciudad de Arequipa.
1936	03 Ene.	Julio	Erupción explosiva y fumarólica	2	En el valle de Ubinas las cenizas destruyeron los cultivos.
1937	Mayo	Julio	Erupción central y explosiva	2	Las cenizas destruyeron terrenos de cultivo y generaron epidemias en el valle de Ubinas.
1951	Mayo	21 Oct.	Erupción central y explosiva	2	En el valle de Ubinas las cenizas causaron daños.
1956	Junio		Erupción explosiva y fumarólica	2	Emisión de cenizas causaron daños en los terrenos de cultivo y en poblados del valle de Ubinas.
1969	Mayo	Dic. ?	Erupción explosiva	2	En el valle de Ubinas las cenizas destruyeron los cultivos y afectaron a la población.
1995-1996	Dic.	Abril ?	Alta actividad fumarólica	1	Alarmó a la población en general, fue reportado por el IGP e IRD.
2006-2009	Marzo	Junio	Erupción explosiva: freatomagmática, vulcaniana	2	Las cenizas afectaron la salud de la población. Los habitantes de cinco poblados del valle de Ubinas fueron evacuados en junio del 2006 a la

					zona de Chacchagen.
2013-2017	Setiembre		Erupción explosiva: vulcaniana	2	Las cenizas fueron dispersadas en diversas direcciones a más de 20 km del Ubinas.
2019	Junio	Setiembre	Actividad explosiva: vulcaniana	2	Las cenizas fueron dispersadas a más de 250 km de distancia en dirección Este y SE del Ubinas. Las cenizas afectaron la salud de la población del valle de Ubinas.

2.2.3. Erupciones recientes

a) Actividad eruptiva 2006 – 2009

Este proceso eruptivo se inició el 25 de marzo de 2006. El análisis de los registros sísmicos y el tipo de actividad ha permitido dividir el proceso eruptivo 2006-2009 en 3 periodos: (1) desde abril de 2006 a agosto de 2007, se registró la mayor actividad sísmica de tipo Largo Periodo, ligada a la circulación de fluidos magmáticos. El 14 de abril se produjo la primera explosión que arrojó fragmentos de lava incandescente. El día 19 de abril de 2006, se logra visualizar un cuerpo de lava en el fondo del cráter del volcán.

Durante los días siguientes la actividad volcánica se incrementó, y las cenizas emitidas alcanzaron entre 1000 y 3500 m de altura. Posteriormente, durante mayo a agosto de 2006 la actividad se mantuvo constante, generándose explosiones volcánicas con caídas de cenizas en un radio mayor de 15 km alrededor del volcán. A partir de septiembre 2006 hasta julio de 2007 la actividad volcánica fue disminuyendo, las explosiones volcánicas se hicieron más esporádicas. (2) Entre septiembre de 2007 a septiembre de 2008, se registra un decrecimiento en el número de las señales sísmicas de tipo Largo Periodo (LP); sin embargo, continuaron detectándose explosiones. La actividad más importante fue observada entre enero y abril de 2008, con columnas eruptivas de ceniza y gases de hasta 3 000 m de altura. Posteriormente de mayo a septiembre de 2008 las columnas de gases

alcanzaron alturas de 600 a 800 m, y a veces algunos picos de 2 000 a 2 500 m y (3) periodo ocurrido desde octubre de 2008 a julio de 2009, en el cual se hizo más notorio el decaimiento de la actividad volcánica. El último evento explosivo fue detectado el 14 de junio de 2009. Durante este proceso eruptivo se registraron en total 162 explosiones.

b) Actividad eruptiva 2013 – 2017

Este proceso eruptivo se inició el 2 de septiembre de 2013. El análisis de los registros sísmicos y el tipo de actividad ha permitido dividir el proceso eruptivo 2013-2017 en 4 fases: Fase 1, ocurrida entre marzo y octubre de 2013, caracterizado por el incremento de sismos de tipo Volcano-Tectónico, y el registro frecuente de señales de tipo Tornillo, especialmente entre el 8 de marzo y 15 de junio (33 eventos por día). En este periodo ocurrieron 10 explosiones volcánicas. Fase 2, comprende desde diciembre de 2013 a noviembre de 2014. Desde diciembre 2013 a enero 2014, se registró un incremento en el número de sismos de tipo Volcano-Tectónico. Entre el 1 y 31 de marzo de 2014, el promedio de ocurrencia de eventos de tipo Híbrido se incrementó hasta un máximo de 182 eventos por día con un pico de energía máxima de 29 Megajoules (MJ). Durante esta fase se registró el mayor número de explosiones volcánicas (604 eventos). Entre febrero a fines de julio de 2014 las columnas de gases y cenizas alcanzaron alturas de hasta 5 000 m (22 de abril 2014). Las cenizas, se dispersaron en un radio de 20 km alrededor del volcán. Una de estas explosiones (23 de abril de 2014), generó una columna de gases y cenizas, la cual fue dispersada a 70 km al oeste del volcán, en dirección de la ciudad de Arequipa. Entre agosto a diciembre de 2014 con columnas fumarólicas en promedio alcanzaron los 500 m. Fase 3, ocurrido entre el 7 de diciembre de 2014 al 7 de noviembre de 2015. Entre los meses de diciembre 2014 hasta marzo de 2015 las alturas de las plumas fumarólicas no superaron los 1 500 m de altura. Posteriormente, desde abril hasta octubre de 2015 las columnas de gases y cenizas alcanzan los 4 000 m de altura (26 de julio y 28 de septiembre 2015). Fase 4, ocurrido entre

diciembre de 2015 al 24 de enero de 2017, este periodo se caracterizó por el registro de señales sísmicas de tipo Volcano-Tectónico con valores promedio por debajo de 4 eventos diarios. Las emisiones de gases en el volcán Ubinas experimentaron un incremento desde el día 13 de setiembre de 2016 llegando hasta 1 200 m sobre la cima del volcán. Posteriormente, los días 2 y 3 de octubre de 2016 se empezaron a registrar emisiones de ceniza que alcanzaron alturas de hasta de 2 000 m sobre la cima del volcán. Luego, desde el 3 de octubre de 2016, se registra la ocurrencia de 8 explosiones. Finalmente, el 24 de enero de 2017 se registró la última explosión de este proceso eruptivo.

c) Actividad eruptiva 2019

El 18 de junio de 2019 se detectó un enjambre de sismos de tipo Volcano-Tectónico bajo el volcán Ubinas, a una profundidad aproximada de 7.5 km. Posteriormente, desde el 19 de junio al 10 de julio se registraron señales sísmicas de tipo Tornillo, las mismas que se incrementaron a razón de 2 a 8 eventos por día. El día 24 de junio se registra una emisión de cenizas de 1.5 km de altura que marca el inicio de este proceso eruptivo. En ese mismo periodo, del 19 de junio al 13 de julio, se registró un incremento en el número y la energía de las señales sísmicas de tipo Híbrido, con la ocurrencia promedio de 23 eventos por día. La actividad explosiva se inició el 19 de julio, con el registro de tres importantes explosiones. En ese día, el Ubinas generó una columna eruptiva sostenida que sobrepasó los 5 000 m de altura sobre la cima del volcán (Del Carpio & Rivera, 2019). Posteriormente, las cenizas emitidas fueron dispersadas por los vientos hacia zonas distales del volcán, en dirección sur y este afectando principalmente poblados cercanos del valle de Ubinas y algunas localidades de las regiones de Moquegua, Tacna, Puno, así como, algunas ciudades de Bolivia, como La Paz.

Posteriormente, entre el 28 de julio y 12 de noviembre de 2019 se generaron 5 explosiones volcánicas que generaron columnas de gases y

cenizas de más de 4 km de altura sobre la cima del volcán, la última de ellas fue registrada el 12 de setiembre 2019.

d) Actividad eruptiva 2023

El 22 de junio de 2023 el volcán Ubinas inicio un nuevo proceso eruptivo, un mes después de presentar signos de intranquilidad sísmica. La fase magmática de este actual proceso eruptivo empezó el día 4 de julio con el registro de explosiones volcánicas que generaron columnas de gases y cenizas que alcanzaron alturas de hasta 5.4 km por encima del cráter. Así mismo, en determinadas fechas se ha registrado la expulsión de proyectiles balísticos y la emisión de mayores volúmenes de ceniza que vienen afectando a los distritos aledaños ubicados en un radio menor de 30 km del volcán. Desde septiembre de 2023 hasta agosto de 2024 la actividad del Ubinas mostró niveles bajos.

.3.- DATOS Y METODOLOGÍA

La caída de ceniza representa el peligro volcánico de mayor potencial de impacto social, ambiental y económico para cualquier área urbana; para construir estos escenarios hoy en día, se hace uso de modelos numéricos como el software Ash3d, para conocer de manera cuantitativa sobre el área de dispersión de ceniza en caso de una posible erupción.

3.1.-Modelo Ash3d

El Ash3d (Mastin et al., 2009) es un software basado en los principios Eulerianos tridimensionales, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos y sus fundamentos son descritos por Schwaiger et al. (2012). Es una herramienta utilizada para calcular la cantidad de ceniza depositada y su concentración en el aire, además puede usarse para recrear eventos pasados y realizar escenarios de dispersión de ceniza futuros. 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 téfra en una columna de células sobre el volcán y distribuye la masa verticalmente usando el sistema Suzuki (Suzuki, 1983; Carey, 1996), posteriormente resuelve la ecuación de advección, difusión y sedimentación para simular el transporte y depósito de partículas de ceniza eyectadas a la atmósfera, por medio de una columna eruptiva generada por la actividad volcánica de tipo explosiva (Schwaiger et al., 2012). La advección del viento se calcula usando datos preexistentes que varían con el tiempo y métodos, que usan volúmenes finitos de material. La velocidad de caída, distribución y duración del transporte se ve influenciada por el tamaño de grano designada por el programa; y la distribución vertical de la masa y elevación son calculadas usando la ecuación de Suzuki (1983).

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

3.2.-Parámetros de entrada para posibles escenarios eruptivos

En base al comportamiento eruptivo pasado y reciente del volcán Ubinas se escogieron dos escenarios eruptivos para dicho volcán: erupción vulcaniana y subpliniana-pliniana; y dos escenarios eruptivos para el volcán Sabancaya: erupción vulcaniana y subpliniana. Luego del cual, se realizaron 1000 simulaciones para cada escenario de posible erupción explosiva de los volcanes Ubinas y Sabancaya muestreando al azar las condiciones del viento de acuerdo al registro histórico disponible, así como el software Ash3d. La simulación de dispersión de cenizas fue realizada por Larry Mastin del USGS.

Para la elaboración de los escenarios eruptivos se han considerado la presencia de depósitos de ambos volcanes, antes descritos, así como, los siguientes aspectos:

- Probables dinamismos eruptivos futuros, es decir, los tipos de erupciones que podrían presentar tanto el volcán Sabancaya, como el Ubinas.
- La magnitud de las erupciones pasadas, establecida en función del trabajo de campo y de la distribución de los productos volcánicos.
- El comportamiento de otros volcanes peruanos, considerados como «análogos» al Sabancaya y Ubinas.

Los escenarios considerados en este estudio son detallados a continuación:

3.2.1.- Erupción de tipo vulcaniana

Las erupciones vulcanianas son erupciones explosivas moderadas a violentas que emiten cenizas, bloques, y eventualmente pómez. Las explosiones se dan en intervalos de minutos a horas e incluso días, como resultado de estas explosiones se generan columnas eruptivas de gases y cenizas de menos de 10 km de altura (Sigurdsson, 2000).

En el caso del volcán Sabancaya, este presentó dinamismos de tipo vulcaniano ocurrida entre los años 1988 y 1998, en la cual la ceniza fue dispersada entre 20 y 30 km al este del volcán y luego de las explosiones se expulsaron proyectiles balísticos en un radio de 2 km alrededor del cráter (Gerbe & Thouret, 2004; Thouret et al., 1994). Posteriormente desde el año 2016 hasta la actualidad vienen generando explosiones que generan eventualmente columnas de gases y cenizas de hasta 5 000 m de altura. Por lo antes citado, se concluye que la posibilidad de ocurrencia de erupciones vulcanianas en el Sabancaya es alta.

En tal sentido, para las simulaciones de dispersión de ceniza del volcán Sabancaya se consideró parámetros eruptivos descritos en la Tabla 4, como la duración de la erupción, la altura de la columna eruptiva sobre el nivel del mar y el volumen DRE de 0.01 km³, volumen frecuente en erupciones explosivas leves a moderadas de tipo vulcanianas (Tabla 5) como la presentada en 1988-1998, la actividad actual (2016-hasta la actualidad).

Tabla 4. Parámetros eruptivos utilizados para la dispersión de cenizas en el volcán Sabancaya para una erupción de IEV 1-2.

SABANCAYA IEV 1-2					
ALTITUD	5980 m.s.n.m.				
Escenario eruptivo	Duración de la simulación	Duración de la erupción	Altura sobre el nivel del cráter (km)	Altura sobre el nivel del mar (km)	volumen DRE (km ³)
IEV 1-2	24 horas	3 horas	6.5	12.5	0.01

Con respecto a la altura de la columna de cenizas, se utilizó información de otros volcanes a nivel global que presentaron erupciones vulcanianas (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros eruptivos calculados en volcanes análogos que presentaron erupciones vulcanianas con IEV 1-2.

ERUPCIONES VULCANIANAS (IEV 1-2)					
Volcán	Fecha	Volumen bulk de caídas (km ³)	Volumen DRE (km ³)	Altura de la columna sobre el nivel del cráter	Referencia
Tungurahua	ago-01	0.0060	-	-	Bustillos & Samaniego, (2011)
	14-jul-06	0.0061	-	-	
	feb-08	0.0015	-	-	
	28-may-10	0.0021	-	-	
	22-nov-10	0.0005	-	-	
	4-dic-10	0.0017	-	-	
Ubinas	Período 2008-2009	0.0040	-	-	Rivera et al. (2011)
Ubinas	19 de julio del 2019	0.0004	-	6.5	Ramos et al. (2019)
Ubinas	junio a setiembre del 2023	0.0003	-	5.5.	Mariño et al. (2023)
Sabancaya	Período 1990-1992	0.0250	-	1-5 km	Thouret et al. (1994)
Sabancaya	Periodo noviembre del 2016 - agosto 2018	0.04	0.02	< 6 km	Fries et al. (2023)
Misti	1440-1470	0.0060	-	-	Thouret et al. (2001)

Por su parte, el volcán Ubinas en los últimos 500 años ha desarrollado erupciones vulcanianas, así como en las últimas décadas 2006-2009; 2013-

2107; 2019 y 2023-2024. Existe una gran posibilidad que la próxima actividad eruptiva del Ubinas sea de tipo moderada, es decir vulcaniana. Durante una erupción vulcaniana se generarán cenizas, y desde luego viajarán influenciados por la dirección y la velocidad de los vientos que prevalecen para esas zonas.

Para el caso del volcán Ubinas se consideraron los parámetros eruptivos descritos en la Tabla 6, como la duración de la erupción, la altura de la columna eruptiva sobre el nivel del mar y el volumen DRE de 0.0018 km³, volumen frecuente en erupciones explosivas leves a moderadas de tipo vulcanianas (Tabla 5), como la presentada por el volcán Ubinas durante los últimos 500 años (Thouret et al., 2005; Rivera et al., 2014; Samaniego et al., 2020).

Tabla 6. Parámetros eruptivos utilizados en el volcán Ubinas para una erupción de IEV 1-2.

VOLCÁN UBINAS (IEV 1-2)					
ALTITUD UBINAS	5762 m s.n.m.				
Escenario eruptivo	Duración de la simulación	Duración de la erupción	Altura sobre el nivel del cráter (km)	Altura sobre el nivel del mar (km)	Volumen DRE (km ³)
IEV 5	24 horas	13 horas	6.8	12.5	0.0018

3.2.2.- Erupción de tipo subpliniana – pliniana

Las erupciones subplinianas y plinianas son las erupciones explosivas más violentas, debido a que el magma, en la mayoría de los casos es rico en sílice y posee alto contenido de gases. En dichas erupciones, las columnas eruptivas pueden alcanzar alturas mayores a los 10 km y los materiales emitidos pueden afectar más de 800 km² (Cas y Wright, 1987). Durante estas erupciones se generan depósitos voluminosos de caída de lapilli de pómez y ceniza, asimismo se pueden generar flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas.

El volcán Ubinas ha presentado este tipo de erupciones subplinianas y plinianas (Rivera et al., 1998; Thouret et al., 2005; Samaniego et al., 2020), sin embargo, el Sabancaya no ha presentado este tipo de erupciones, pero no se descarta que en el futuro pueda presentar dicho tipo de erupción. Para el caso del volcán Sabancaya se consideró un escenario de erupción subpliniana (IEV 3-4), con un volumen DRE de ceniza de 0.3 km^3 , basado en la erupción subpliniana del volcán Popocatepetl (México) de hace 4965 A.P. (Tabla 7), el cual es similar a otros volcanes del globo.

Tabla 7. Parámetros de erupciones subplinianas con IEV 3-4 calculados en volcanes análogos.

Volcán	Edad/año	IEV	Volumen bulk de caídas (km^3)	Volumen DRE (km^3)	Altura de columna sobre el nivel del mar (km)	Referencia
Calbuco	Erupción 2015	4	0.267 - 0.277	0.11-0.13	17.4	Romero et al. (2016)
Calbuco	Erupción 2015	4	0.38	0.15	15-17	Castrucio et al. (2010)
Tungurahua	16-ago-06	3	0.046	-	-	Bustillos & Samaniego, (2011)
Popocatepetl	4965 A.P.	4	1.21	0.3	> 30	Arana-Salinas et al. (2010)
Fuego	14 de octubre 1974	3-4	-	0.021	14	Rose et al. (2008)
Láscar	19 de abril de 1993	-	-	0.19	10-20	Romero et al. (2015)
Chaitén	08 de mayo de 2008	-	-	0.3	15-22	Romero et al. (2015)
Caulle	04 de junio del 2011	-	-	0.27	13.5	Romero et al. (2015)
El Chichon	marzo-abril de 1982	-	-	0.38	-	Varekamp et al. (1984)
Villarrica	Chaimilla	4	0.6	-	-	Costantini et al. (2011)
Arenal	AR-5/ET-13	4	0.15	0.06	-	Crosweller et al. (2012), Soto et al. (2006)
Sakurajima	Anei	4	0.18	0.0486	-	Todde et al. (2017)
Sakurajima	Taisho	4	0.33	0.0883	15	Todde et al., (2017)

Además, se consideraron parámetros eruptivos como una altura de la columna sobre el nivel del cráter de 13 km, valor promedio respecto a algunas erupciones subplinianas registrados en el mundo. Con respecto a la duración de la erupción, se tomó un tiempo de 6 horas (Tabla 8).

Tabla 8. Parámetros eruptivos utilizados en el volcán Sabancaya para una erupción de IEV 3-4.

SABANCAYA IEV 3-4					
ALTITUD	5980 m s.n.m.				
Escenario eruptivo	Duración de la simulación	Duración de la erupción	Altura sobre el nivel del cráter (km)	Altura sobre el nivel del mar (km)	Volumen DRE (km ³)
IEV 3-4	24 horas	6 horas	13.0	19	0.3

Para las simulaciones del volcán Ubinas se consideró un volumen DRE de 1.3 km³ (Tabla 9), tomando como ejemplo el volumen de pómez emitido durante la erupción pliniana (IEV 4-5) de hace 33.7 mil años A.P (Tabla 10) del volcán Misti (Harpel et al., 2023). Dicha erupción generó una pluma de pómez y ceniza que tuvo entre 24 y 36 km de altura sobre el nivel del mar.

Tabla 9. Parámetros eruptivos utilizados en el volcán Ubinas para una erupción con IEV 4-5

VOLCÁN UBINAS (IEV 5)					
ALTITUD UBINAS	5762 m s.n.m.				
Escenario eruptivo	Duración de la simulación	Duración de la erupción	Altura sobre el nivel del cráter (km)	Altura sobre el nivel del mar (km)	Volumen DRE (km ³)
IEV 5	24 horas	10 horas	23.2	29	1.3

Además, para la simulación de dispersión de ceniza por una erupción pliniana se consideró una duración de 10 horas y una altura de la pluma de 29 km sobre el nivel del mar, basado en el promedio de alturas de diferentes erupciones plinianas de IEV 5 ocurridas a nivel mundial (Tabla 10).

Tabla 8. Parámetros calculados en volcanes análogos que presentaron erupciones con IEV 4-5.

ERUPCIONES PLINIANAS (IEV 4-5)					
Volcán	Nombre caída de téfra	Volumen bulk de la caída (km ³)	Volumen bulk DRE (km ³)	Altura de columna sobre el nivel del mar (km)	Referencia
	2000	0.2-1.41	0.5	22-29	Harpel et al. (2011)
Misti	Sacarosa	3.2	1.1 - 1.3	24-36	Harpel et al. (2023)
Ubinas	1000 años A.P.	2.8	-	-	Rivera et al. (2011)
Popocatepetl	4965 años A.P.	1.21	0.3	> 30	Arana-Salinas et al. (2010); Bonasia et al. (2014)
Colima	1913	1.4	0.57	23	Saucedo et al., (2010)
Cosigüina	1835 AD	4.25	2.3	-	Crosweiler et al. (2012)
Tres Vírgenes	La virgen	1.14	0.46	-	Crosweiler et al. (2012)
Quizapu	10 de abril de 1932	-	4.05	29	Romero et al. (2015)
Hudson	1991	-	2.74	13-25	Romero et al. (2015)

En el volcán Ubinas, la ocurrencia de una erupción subpliniana o pliniana en un corto o mediano plazo (meses o años) tiende a ser poco probable. Sin embargo, es necesario realizar la estimación sobre una posible erupción subpliniana o pliniana, toda vez que este tipo de actividad se ha manifestado más de dos veces. La última erupción pliniana ocurrió hace 980 años A.P., cuyos depósitos cubrieron un área de 800 km² y cuyo eje máximo se prolongó a más de 40 km en dirección este-sureste, donde el espesor del depósito alcanzó 25 cm.

.4.- RESULTADOS

La zonificación de peligros en los mapas está basada en las áreas afectadas en erupciones pasadas, en las características morfológicas del área circundante al volcán y en base a erupciones presentadas por volcanes “análogos”. De este modo se diferenciaron tres zonas de peligro en función de su grado de peligrosidad: alto, moderado y bajo peligro, cuyos límites fueron trazados considerando el alcance máximo de los productos emitidos en erupciones pasadas y en base a simulación numérica.

Para evaluar los peligros asociados a la caída de ceniza de los volcanes Sabancaya y Ubinas, establecimos un registro de los tipos de erupciones presentado a lo largo de sus historias eruptivas. Desde luego se supone que una próxima erupción no diferirá mucho de las anteriores en sus características y que el área afectada también será similar. Todo lo expuesto a continuación referente a los peligros de ambos volcanes, se refleja en los mapas de peligro volcánico presentados en este estudio.

En los mapas existen líneas que limitan las zonas sujetas a un grado de peligro. Por la naturaleza del mapa no implican que inmediatamente por fuera de ella se esté absolutamente exenta del peligro y riesgo o que al interior de las mismas necesariamente tenga que ser afectada.

A continuación, se describen los resultados obtenidos del modelamiento de dispersión y caída de ceniza para una posible erupción del volcán Sabancaya sobre la base de 2 escenarios eruptivos: vulcaniano (IEV 1-2) y subpliniano (IEV 3-4), y para el volcán Ubinas, sobre la base de 2 escenarios eruptivos: vulcaniano (IEV 1-2) y pliniano (IEV 5). Para este proceso, se consideró direcciones del viento predominantes y los depósitos de cenizas obtenidos en cada escenario fueron correlacionados con la información contenida en la literatura histórica de anteriores erupciones.

4.1.-Escenarios de peligros por caída de téfras volcán Sabancaya

Para la zonificación de peligros se consideraron los dos escenarios explosivos: erupciones vulcanianas con IEV 1-2, y subplinianas con IEV 3-4.

4.1.1. Escenario de erupción de tipo vulcaniana (IEV 1-2)

El mapa de peligros por caídas piroclásticas para del volcán Sabancaya, se ha dividido en tres zonas: zona de alto peligro en rojo, zona de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo (Figura 11).

a) Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro, es el área proximal y se halla aproximadamente dentro de un radio entre 39 y 44 km de distancia del volcán Sabancaya (Figura 11). Durante erupciones vulcanianas con IEV 2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. Está basado en la dispersión de cenizas de erupciones vulcanianas de los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti.

b) Zona de moderado peligro (naranja)

Los límites de la zona de moderado peligro se hallan aproximadamente entre 84 y 100 km al este y entre 155 y 184 km al oeste del cráter del volcán Sabancaya (Figura 12). Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de pocos milímetros de espesor (Figura 1). Esto está basado en la dispersión de cenizas de la erupción vulcaniana del volcán Sabancaya de 1988-1998 (IEV 2), durante la cual caídas de ceniza de 1 mm de espesor alcanzaron cerca de 30 km de distancia del cráter en dirección este (Thouret et al., 1994). Asimismo, está basado en la dispersión de cenizas de la erupción actual del volcán Sabancaya (2016 - a la actualidad), durante el cual caídas de ceniza de 1 mm de espesor

alcanzaron cerca de 20 km de distancia del cráter en dirección este del volcán.

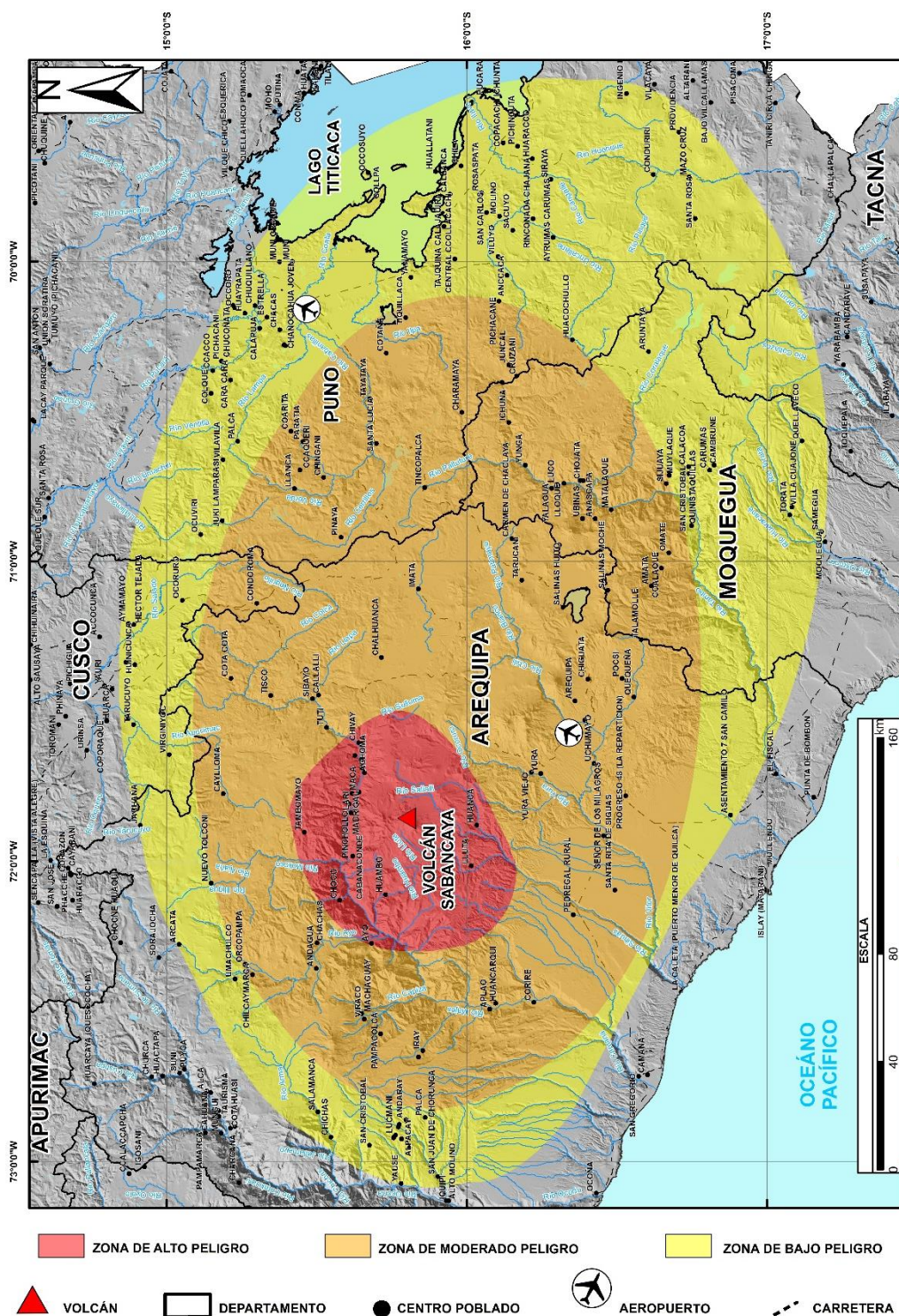


Figura 11.- Mapa de escenario de peligro por caída de cenizas del volcán Sabancaya para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano con VEI 1-2 (simulación USGS, 2023).

c) Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro tiene una configuración elíptica, con una distancia de más de 400 km al este, 320 km al oeste y 100 km al sur del volcán Sabancaya (Figura 12). Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de menos de 1.0 mm de espesor (Figura 11). Además, este escenario está basado en la erupción actual del volcán Sabancaya (2016 - a la actualidad), durante el cual caídas de ceniza de menos de 1 mm de espesor alcanzaron distancias de más de 30 km del cráter en dirección este del volcán.

4.1.2.-Escenario de erupción subpliniana (IEV 3 - 4)

No se han encontrado depósitos asociados a erupciones subplinianas en inmediaciones del volcán Sabancaya, pero si existen varios depósitos asociados al volcán Ampato. La posibilidad de ocurrencia de erupciones subplinianas en el Sabancaya es muy baja. Aunque por analogía con otros volcanes similares, la posibilidad de ocurrencia no puede ser excluida.

a) Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro, es el área proximal y se halla aproximadamente a una distancia de más de 400 km al este, 320 km al oeste y 280 km al sur del volcán Sabancaya (Figura 12). Durante erupciones subplinianas con IEV 3, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez de varios centímetros de espesor. También durante la erupción del volcán Tungurahua (Ecuador) de agosto 2006, de IEV 3, se reportaron espesores de caídas de ceniza de entre 4 y 5 cm a 10 km de distancia del cráter y en el eje de dispersión de la pluma (Eychenne et al., 2012).

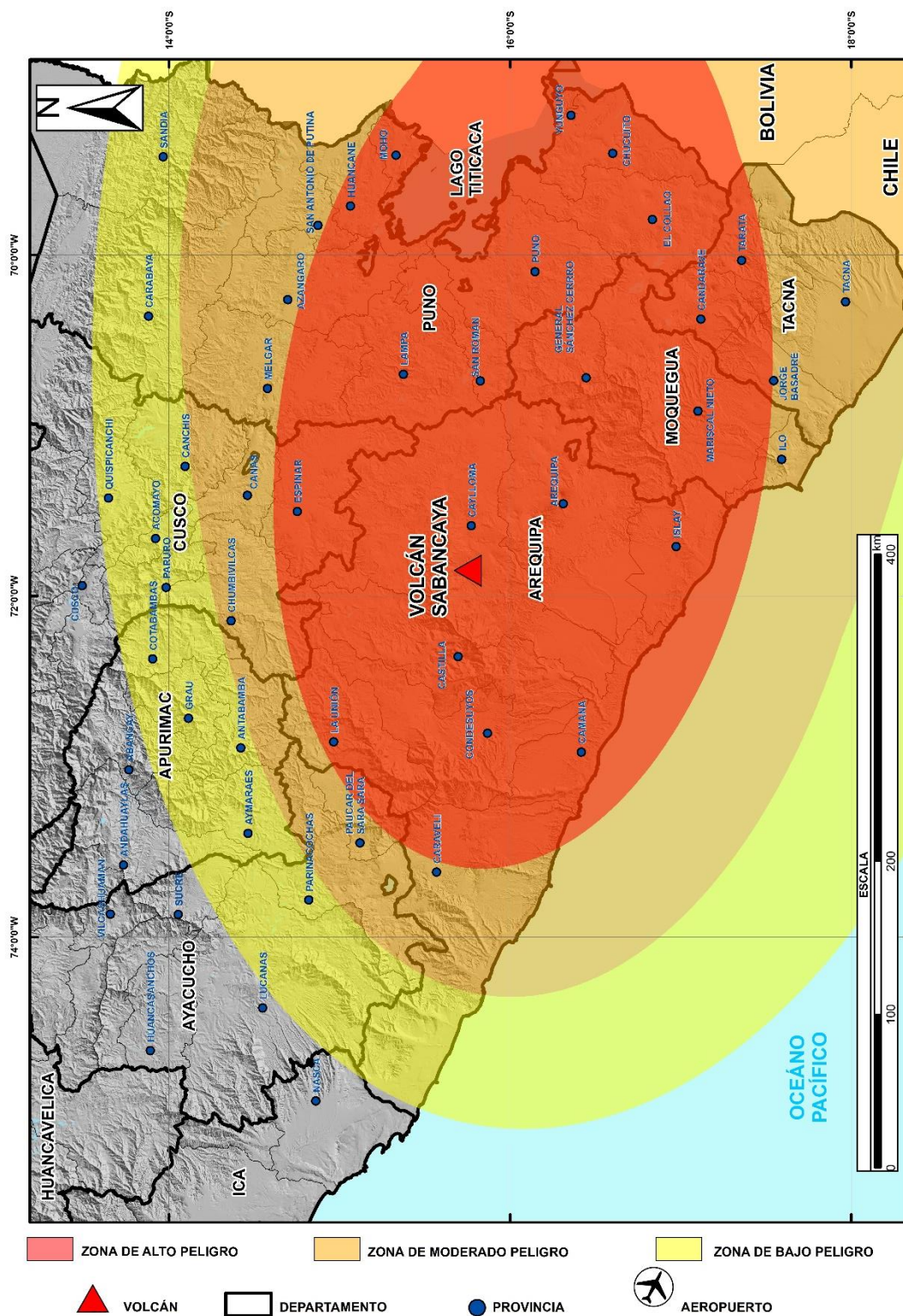


Figura 12.- Mapa de escenario de peligro por caída de téfras del volcán Sabancaya para un escenario eruptivo tipo subpliniano con VEI 3-4 (simulación USGS, 2023).

Durante erupciones plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor (Figura 12). Está basado en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Ticsani de 11 000 años AP. (IEV 4), emplazó caídas de ceniza de alrededor de 3 m de espesor a 10 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).

b) Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro, es el área proximal y se halla aproximadamente a una distancia de más de 400 km al este, 320 km al oeste y 280 km al sur del volcán Sabancaya (Figura 12). Durante erupciones subplinianas con IEV 3, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez de varios centímetros de espesor. También durante la erupción del volcán Tungurahua (Ecuador) de agosto 2006, de IEV 3, se reportaron espesores de caídas de ceniza de entre 4 y 5 cm a 10 km de distancia del cráter y en el eje de dispersión de la pluma (Eychenne et al., 2012).

Durante erupciones plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor (Figura 12). Está basado en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Ticsani de 11 000 años AP. (IEV 4), emplazó caídas de ceniza de alrededor de 3 m de espesor a 10 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).

c) Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de moderado peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 550 a 642 km al

este, de 255 a 268 km al oeste y de 271 km al sur (Figura 12). Durante erupciones subplinianas con IEV 3, esta zona de moderado peligro puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. Esto basado en algunos ejemplos, como en el caso de la erupción de noviembre de 1985 del volcán nevado del Ruiz, durante el cual la ceniza alcanzó cerca de 2 cm de espesor a 30 km de distancia del volcán. Mientras que en el caso de la erupción del volcán Tungurahua de agosto 2006 (IEV 3, Eychenne et al., 2012) se reportaron espesores de 0.7 a 0.8 cm a la misma distancia.

Durante erupciones plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez, de varios decímetros de espesor (Figura 16). Está basado en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Ticsani de 11 000 años AP (IEV 4), emplazó caídas de ceniza de alrededor de 50 cm de espesor a 30 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).

d) Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de moderado peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 825 km al este, de más de 341 km al oeste y de más de 371 km al sur (Figura 14). En esta zona se depositaría cenizas de menos de 0.1 mm de espesor. Los vientos van a influenciar en su distribución de la caída de ceniza. Está basado en las erupciones de los volcanes Nevado del Ruiz de noviembre de 1985, que a 50 km de distancia emplazó caídas de ceniza de entre 2 y 3 mm de espesor. Por su parte, luego de la erupción del volcán Tungurahua de agosto 2006 (IEV 3, Eychenne et al., 2012) se reportaron espesores de ceniza de 6 mm a la misma distancia.

Durante erupciones plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor. Está basado en el mapa

de isópacas de la erupción del volcán Ticsani de hace 11 000 años AP. (IEV 4), que emplazó caídas de ceniza de alrededor de 1 cm de espesor, a 50 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).

4.2. Escenarios de peligros por caída de téfras volcán Ubinas

En caso de una erupción del Ubinas se distinguen dos escenarios:

4.2.1. Escenario de erupción vulcaniana (IEV 1 – 2)

En el mapa de peligro, se ha definido tres zonas de alto, moderado y bajo peligro, con posibilidad de depositación de cenizas y lapilli, influenciados por las direcciones de los vientos (Figura 13).

a) Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro, es el área proximal y comprende una zona de geometría elíptica, con una distancia de 15 km al este – sureste, y 8 km al oeste del cráter del volcán Ubinas (Figura 13). Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros a centímetros de espesor. Está basado en la dispersión de cenizas de erupciones vulcanianas de los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti.

b) Zona de moderado peligro (naranja)

Los límites de la zona de moderado peligro se hallan aproximadamente entre 15 y 56 km al este y entre 8 y 42 km al oeste del cráter del volcán Ubinas (Figura 13). Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor (Figura 13). Esta hipótesis también está basada en los depósitos de cenizas generadas en las erupciones del volcán Ubinas en los años 2006-2009; 2013-2017; 2019;

2023-actualidad. 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.

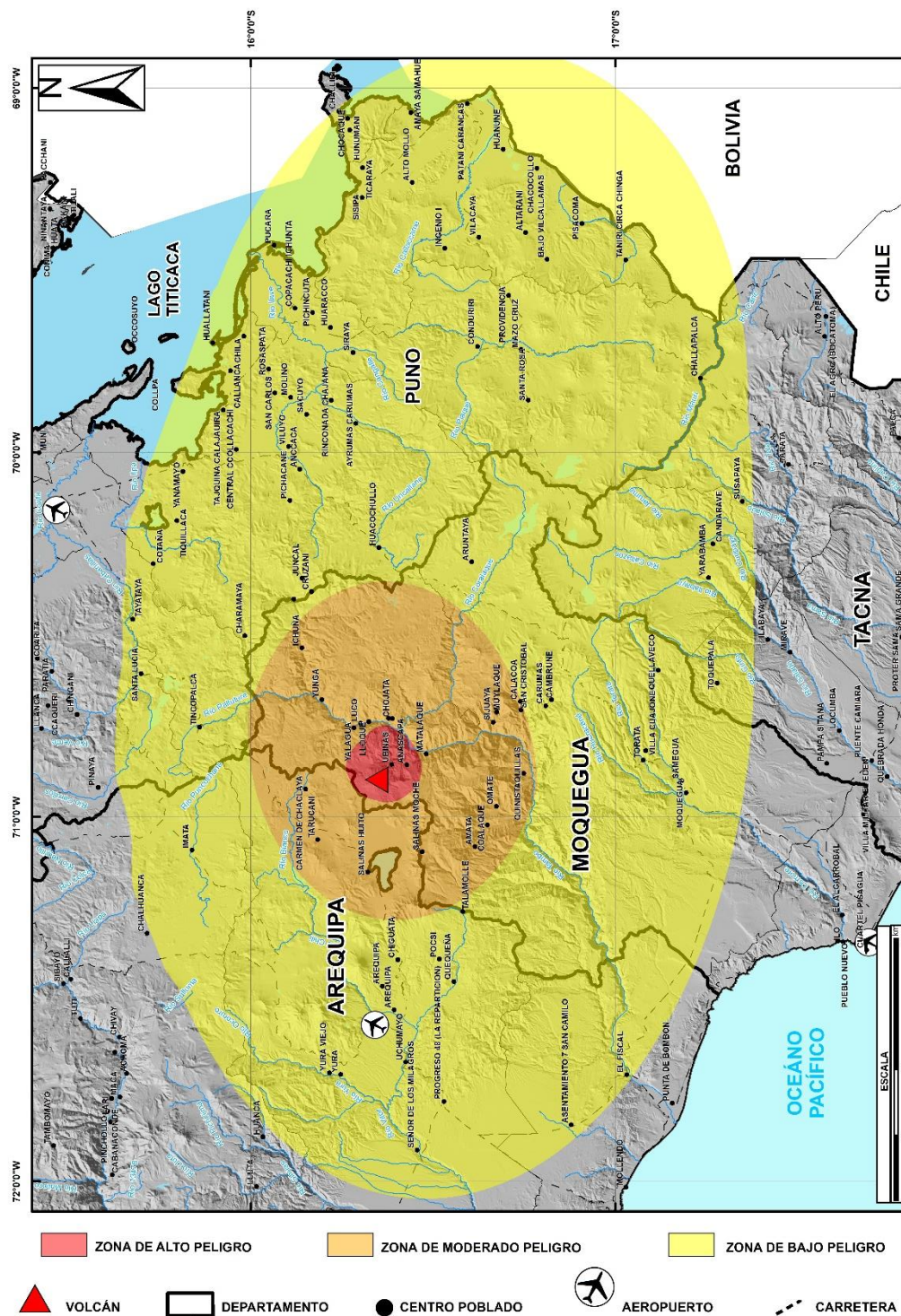


Figura 13. Mapa de escenario de peligro por caída de cenizas del volcán Ubinas para un escenario eruptivo de tipo vulcaniano con VEI 1-2 (simulación USGS, 2023).

a) Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro tiene una configuración elíptica, con una distancia de más de 240 km al este, 125 km al oeste y 100 km al sur del volcán Ubinas (Figura 13). Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de menos de 1.0 mm de espesor (Figura 13). En la erupción de 2019 se registraron depósitos de caídas de ceniza de menos de 1 mm de espesor a 90 km al sureste del volcán Ubinas.

4.2.2. Escenario de erupción subpliniana o pliniana (IEV 4 – 5)

Una erupción sub-pliniana o pliniana producida por el volcán Ubinas generará téfras, principalmente pómez y ceniza. Las pómez caerán en áreas aledañas, mientras que las cenizas en áreas lejanas al volcán (>50 km). Esta hipótesis está basada en fenómenos similares ocurridos en el Holoceno y hace aproximadamente 980 años A.P. (Thouret et al., 2005; Rivera, 2010; Samaniego et al., 2020).

a) Zona de alto peligro (rojo)

Para el escenario de una erupción altamente explosiva (subpliniana o pliniana) la zona de alto peligro muestra una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 600 km al este, 320 km al oeste y 280 km al sur (Figura 14). De manera local, en caso de una erupción altamente explosiva se generarían caída de pómez de más de 0.5 m de espesor que cubriría zonas adyacentes del Ubinas, hasta un radio de 15 km alrededor del volcán. Esta hipótesis está basada en el área cubierta durante las erupciones plinianas ocurridas hace 7 000 y 1 000 años A.P. del volcán Ubinas (Thouret et al., 2005; Rivera, 2010).

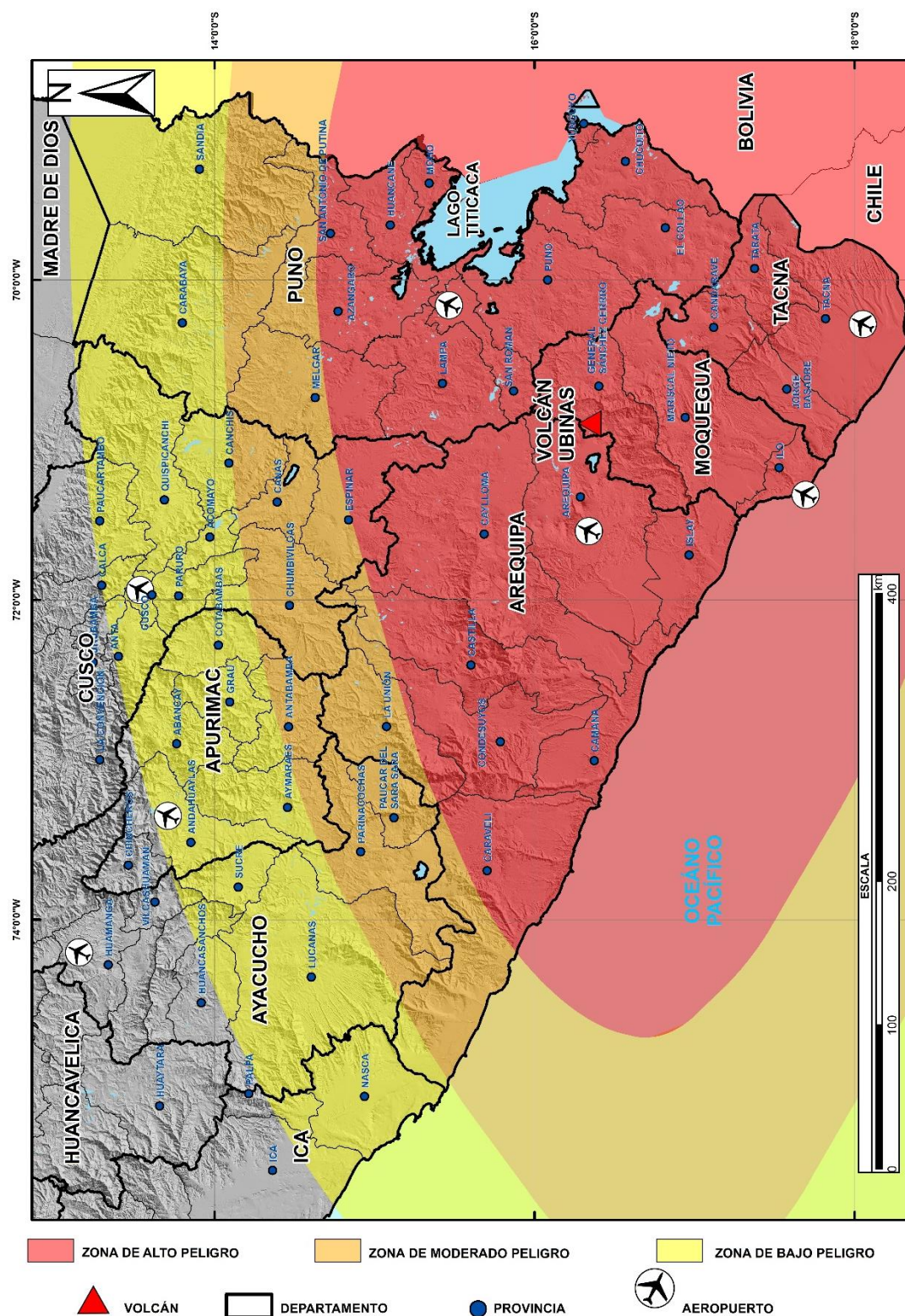


Figura 14. Mapa de escenario de peligro por caída de cenizas del volcán Ubinas para un escenario eruptivo tipo subpliniano-pliniano con VEI 4-5 (simulación USGS, 2023).

b) Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de moderado peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 640 km a 740 km al este, de 320 km a 550 km al oeste y de 280 km a 380 km al sur (Figura 14). Durante erupciones subpliniana o plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de más de 1.0 mm de espesor (Figura 14).

c) Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de moderado peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 740 km al este, de más de 550 km al oeste y de más de 380 km al sur (Figura 14). En esta zona se depositaría cenizas de menos de 0.1 mm de espesor. Los vientos van a influenciar en su distribución de la caída de ceniza.

Considerando los peligros y riesgos, las téfras (lapilli pómez, bloques y cenizas) expelidas por dicha erupción pueden causar daños a la propiedad y víctimas por impacto de los materiales que caen sobre estas. La acumulación de las téfras puede causar que las colapsen, rompan las líneas de transmisión y afecten la agricultura, ganadería y fuentes de agua para consumo humano. Dependiendo de la magnitud de la erupción, las téfras depositadas formarán una capa encima del terreno, de varios centímetros a metros de espesor en áreas aledañas al volcán. La téfra suspendida en el aire puede causar serios problemas respiratorios, dañar las maquinarias, perturbar el tráfico vehicular y el transporte aéreo. La capacidad destructiva de caída de téfras a gran escala, dependerá de su volumen y dispersión (peso por m²) así como de la toxicidad de los gases asociados. Cuanto mayor sea el espesor de la caída de pómez, el tamaño y la temperatura de los materiales, más trágico serán los efectos.

CONCLUSIONES

- El volcán Sabancaya es considerado el segundo volcán más activo del Sur del Perú. Durante las últimas décadas, dicho volcán presentó un proceso eruptivo entre 1988-1998, y actualmente desde el 6 de noviembre de 2016 hasta la actualidad desarrolla su último proceso eruptivo. Estos procesos se caracterizan por ser erupciones leves a moderadas con IEV 2, con columnas de gases y cenizas que alcanzan hasta los 5.5 km de altura sobre la cima.
- Para el volcán Sabancaya se han identificado dos escenarios eruptivos en caso de un incremento de actividad. Los escenarios que tienen mayor probabilidad de ocurrir, corresponden a erupciones vulcanianas (IEV 1-2) y erupciones subplinianas con (IEV 3-4).
- Para el escenario de erupciones vulcanianas (IEV 1-2), la zona de **alto peligro (rojo)** se halla a una distancia de 39 km al Este, y 44 km al oeste del cráter del volcán Sabancaya. Dicha zona puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. La zona de **moderado peligro (naranja)** se halla entre 39 y 240 km al Este y entre 44 y 125 km al Oeste del cráter del volcán Sabancaya. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de pocos milímetros de espesor. La zona de **bajo peligro (amarillo)** tiene una configuración elíptica, con distancias de más de 240 km al Este, 125 km al oeste y 100 km al sur del volcán Sabancaya. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de menos de 1.0 mm de espesor.
- Para el escenario de erupciones subplinianas, la zona de **alto peligro (rojo)** es el área proximal y se halla aproximadamente hasta 380 km al Este, 160 km al oeste y 200 km al sur. Durante erupciones subplinianas, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez de varios centímetros de espesor. La zona de **moderado peligro (naranja)** corresponde inmediatamente a la zona colindante con la zona de alto

peligro. Esta zona tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 380 km a 640 km al Este, de 160 km a 260 km al oeste y de 270 km al sur. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. La zona de **bajo peligro (amarillo)** comprende una distancia de más de 640 km al Este, de más de 260 km al Oeste y de más de 370 km al sur del Sabancaya. En esta zona se depositaría cenizas de menos de 0.1 mm de espesor.

- El Ubinas es el volcán más activo del Sur peruano. En los últimos 500 años ha desarrollado erupciones vulcanianas, así como en las últimas décadas 2006-2009; 2013-2107; 2019 y 2023-2024. Existe una gran posibilidad que la próxima actividad eruptiva del Ubinas sea de tipo moderada, es decir vulcaniana, pero también existe la posibilidad que la actividad pueda incrementar.
- Para el volcán Ubinas se han identificado dos escenarios eruptivos en caso de un incremento de actividad. Los escenarios que tienen mayor probabilidad de ocurrir, corresponden a erupciones vulcanianas (IEV 1-2) y erupciones subplinianas - plinianas con (IEV 4-5).
- Para el escenario de erupciones vulcanianas (IEV 1-2), la zona de **alto peligro (rojo)** se halla a una distancia de 15 km al este-sureste, y 8 km al oeste del cráter del volcán Ubinas. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de varios milímetros a centímetros de espesor. La zona de **moderado peligro (naranja)** se halla aproximadamente entre 15 y 56 km al este y entre 8 y 42 km al oeste del cráter del volcán Ubinas. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor. La zona de **bajo peligro (amarillo)** tiene una configuración elíptica, con una distancia de más de 240 km al este, 125 km al oeste y 100 km al sur del volcán Ubinas. Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de menos de 1.0 mm de espesor.

- Para el escenario de erupciones vulcanianas (IEV 1-2), la zona de **alto peligro (rojo)** muestra una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 600 km al este, 320 km al oeste y 280 km al sur. De manera local, en caso de una erupción altamente explosiva se generarían caída de pómez de más de 0.5 m de espesor que cubriría zonas adyacentes del Ubinas, hasta un radio de 15 km alrededor del Ubinas. La zona de **moderado peligro (naranja)** tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 640 km a 740 km al este, de 320 km a 550 km al oeste y de 280 km a 380 km al sur. Durante erupciones subpliniana o plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de más de 1.0 mm de espesor. La zona de **bajo peligro (amarillo)** tiene una configuración elíptica alrededor del cráter, con una distancia de más de 740 km al este, de más de 550 km al oeste y de más de 380 km al sur. En esta zona se depositaría cenizas de menos de 0.1 mm de espesor.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, N.K., de Silva, S.L. Self, S., Salas, G., Schubring, S., Permenter, J.L., Arbesman, K., (2001). The physical volcanology of the 1600 eruption of Huaynaputina, southern Peru. *Bulletin of Volcanology* 62, 8, 493-518.
- Arana-Salinas, L., Siebe, C., Macías, J.L. (2010). Dynamics of the ca. 4,965 yr. B.P. "Ochre Pumice" Plinian eruption of Popocatepetl Volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 192, 212-231.
- Bromley, G., Thouret, J.-C., Schimmelpfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker, K., del Pilar Vivanco Lopez, ASTER Team, Aumaitre, G., Bourles, D., Keddadouche, K., 2019. In situ cosmogenic ^3He and ^{36}Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW. Peru. *Bulletin of Volcanology* 81:64.
- Bulmer, M.; Johnston, A., Engle, F. (1998). Analysis of Sabancaya volcano, southern Peru using RADARSAT and Landsat TM data, informe inédito. Center for Earth Planetary Studies. National Air and Space Museum, Smithsonian Institution. 10 p.
- Bustillos J., Samaniego P. (2011). Volcán Tungurahua: tamaño de las erupciones explosivas. En: Andrade D. (ed.). *Memorias de las séptimas jornadas en ciencias de la Tierra*. Quito : EPN, p. 131-134. Jornadas en Ciencias de la Tierra; Encuentro sobre Riesgos y Desastres, 7; 1. Quito.
- Carey S. (1996). "Modeling of tephra fallout from atmospheric eruptions", in Scarpa, L.A. and Tilling, R.I. (eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards*, Berlin, Springer Verlag, pp. 429-463.
- Cas, R., Wright, J. (1987). *Volcanic successions, modern and ancient*, Allen &

Unwin, London, 528 pp.

Castruccio, A., Clavero, J., Rivera, A., 2010. Comparative study of lahars generated by the 1961 and 1971 eruptions of Calbuco and Villarrica volcanoes, Southern Andes of Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 190, 297–311.

Costantini, L., Pioli, L., Bonadonna, C., Clavero, J., Longchamp, C. (2011). A late Holocene explosive mafic eruption of Villarrica volcano, Southern Andes: the Chaimilla deposit. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 200(3-4), 143-158.

Crosweller, H.S., Arora, B., Brown, S.K., Cottrell, E., Deligne, N.I., Guerrero, N., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S.C., Lowndes, J., Nayembil, M., Siebert, L., Sparks, R.S.J., Takarada, S., Venzke, E. (2012). Global database on large magnitude explosive volcanic eruptions (LaMEVE). *J Appl Volcanol* 1:4.

Del Carpio J.; Rivera, M. (2019). Aportes del monitoreo geofísico en el manejo de crisis del volcán Ubinas, actividad eruptiva 2019. Informe Técnico IGP.

De Silva S.L., Francis P.W. (1991). *Volcanoes of the Central Andes*. Berlin: Springer - Verlag, 216 p.

Eychenne, J.; Le Pennec, J-L.; Troncoso, L.; Gouhier, M. & Nedelec, J-M. (2012) - Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 74(1): 187-205.

Fries A., Dominguez, L., Jarvis, P. Pistolesi, M., Manrique, N., Aguilar, R., Valdivia, D., Rossi, E., Pollastri, S., Horwell, C., Bonadonna, C., (2023). The post-2016 long-lasting Vulcanian activity of Sabancaya volcano (Peru) and

associated aeolian remobilisation of volcanic ash. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 441, 107876

Gerbe, M.C., Thouret, J.C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted through the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya in south Peru. *Bulletin of Volcanology* 66, 541–561.

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, 72 pp.

Harpel, C., Cuno, J., Takach, M., Rivera, P., Aguilar, C., Tepley F., García, F. (2023). The late Pleistocene Sacarosa tephra-fall deposit, Misti Volcano, Arequipa, Peru: its magma, eruption, and implications for past and future activity. *Bulletin of Volcanology* 85, 46.

Hoblitt R., Walder J., Driedger C., Scott K., Pringle P., Vallance J. (1995). *Volcano Hazards from Mount Rainier, Washington, Open - File Report 95 - 273*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 10 p.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018). Resultados definitivos de los Censos Nacionales 2007: XII de Población, VII de vivienda y III de Comunidades Indígenas. Ayacucho, Arequipa.
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1568/libro.pdf

Juvigné, E., Thouret, J.-C., Gilot, E.; Leclercq, L., Gourgaud, A. (1998). L'activité du volcan Nevado Sabancaya (Pérou) au cours de l'Holocène. *Quaternaire*, 9(1): 45-51.

Juvigné, E., Thouret, J.-C., Loutsch, I., Lamadon, S., Frechen, M., Fontugne, M., Rivera, M., Marino, J. (2008). Téphrostratigraphie et chronologie dans la

region des Nevados Ampato et Sabancaya, sud du Pérou. Quaternaire 19, 161–178.

Machacca R., Lesage, P., Larose, E., Lacroix, P., Ancasí, R. (2019). Detection of pre-eruptive seismic velocity variations at an andesitic volcano using ambient noise correlation on 3-component stations: Ubinas volcano, Peru, 2014. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 381:83–100

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.

Prival J.M., Thouret, J.C., Japura, S., Gurioli L., Bonadonna, C., Mariño, J., Cueva, K., 2020. New New insights into eruption source parameters of the 1600 CE Huaynaputina Plinian eruption, Peru. *Bulletin of Volcanology* 82:7

Ramos, D., Ortega, M., Antayhua, Y., Ancasí, R., Ccallata, B., Miranda, R., Maquerhua, E., Cruz, L., Apaza, F., et al. (2019) Informe Técnico Anual “Vigilancia del volcán Ubinas, periodo 2019” (distrito de Ubinas, provincia General Sánchez Cerro– región Moquegua).

Rivera, M.; Thouret, J.-C., Gourgaud, A. (1998). Ubinas, el volcán más activo del sur del Perú desde 1550: geología y evaluación de las amenazas volcánicas. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (88): 53-71.

Rivera, M., Mariño, J., Samaniego, P., Delgado, R., Manrique, N., 2016. Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa), INGEMMET. *Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 61, 122 p., 2 maps.

Rivera, M. (2010) Genèse et évolution des magmas andésitiques à

rhyodacitiques récents des volcans Misti et Ubinas (Sud du Pérou). Unpublished PhD thesis, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France, 407 pp

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

Rivera, M., Thouret, J.C., Samaniego, P., Le Pennec, J.L. (2014). The 2006–2009 activity of Ubinas volcano (Peru): petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 270:122–141.

Rivera, M., Samaniego, P., Nauret, F., Mariño, J., Liorzou, C. (2023). Petrological and geochemical constraints on the magmatic evolution at the Ampato-Sabancaya compound volcano (Peru). *LITHOS* 458-459; 107364

Romero, J., Bustillos, J., Viramonte, J. (2015). Los depósitos de caída de tefras: Una breve revisión sobre su cuantificación y análisis para la clasificación de erupciones volcánicas explosivas, con ejemplos Latinoamericanos. *Pyroclastic Flow, Journal of Geology* 5(1): 1-33.

Romero, J.E., Morgavi, D., Arzilli, F., Daga, R., Caselli, A., Reckziegel, F., Viramonte, J., DíazAlvarado, J., Polacci, M., Burton, M., Perugini, D., 2016. Eruption dynamics of the 22–23 April 2015 Calbuco Volcano (Southern Chile): analyses of tephra fall deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 317, 15–29.

Rose, W. I., Murrow, P., Bonadonna, C., Durant, A. J., Ernest, G. J. (2008). Nature and significance of small volume fall deposits at composite volcanoes: Insights from the October 14, 1974 Fuego eruption, Guatemala.

Bulletin of Volcanology. 70(9): 1043-1067.

Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., Delgado, R., Valderrama, P. (2016). The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 323:110–128.

Samaniego, P., Rivera, M., Manrique, N., Schiavi, F., Nauret, F., Liorzou, C., Ancellin, M.-A. (2020). Linking magmatic processes and magma chemistry during the post-glacial to recent explosive eruptions of Ubinas volcano (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407, 107095.

Schwaiger, H., Denlinger, R., Mastin, L. (2012). Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition: *Journal of Geophysical Research*, 117. 20 pp. doi:10.1029/2011JB008968.

Scott, W., Pierson T., Schilling, Costa, J., Gardner, C., Vallance, J., Mayor J., (1997). *Volcano Hazards in the Mount Hood region, Oregon*, Open - File report 97-89, U.S. Department of the interior, U.S. Geological Survey, 14 p.

Siebert, L., Simkim, T., Kimberley, P. (2010). *Volcanoes of the World*. Third Edition. Smithsonian Institution, Washington, University of California, pp. 537.

Sigurðsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer H. & Stix, J. eds (2000) - *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, 1442 p.

Soto, G.J., Alvarado, G. (2006). Eruptive history of Arenal Volcano, Costa Rica, 7 ka to present. En: Gill, J., Reagan, M., Tepley, F. & Malavassi, E. (eds): *Arenal Volcano Special Volume*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 157(1-3): 254-269.

- Suzuki, T. (1983). "A theoretical model for dispersion of tephra", in: D. Shimozuru, I. Yokoyama (eds.), *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, pp. 93-113
- Thouret, J.-C., Guillaude, R., Huamán, D., Gourgaud, A., Salas, G., Chorowicz, J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1(165): 49-63.
- Thouret, J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Suni, J., Legeley-Padovani, A., Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano nearby the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin* 113 (12), 1593-1610.
- Thouret, J.-C., Juvigné, E., Mariño, J., Moscol, M., Legeley-Padovani, A., Loutsch, I., Dávila, J., Lamadon, S., Rivera, M. (2002). Late Pleistocene and Holocene tephro-stratigraphy and chronology in southern Peru. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 93:45-61.
- Thouret, J.C., Rivera, M., Worner, G., Gerbe, M.C., Finizola, A., Fornari, M., Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology* 67:557-589.
- Tilling, R.I., ed. (1989). *Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos*, Santa Fé, Nuevo México, 2-3 julio 1989. [s.l.]: Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 125 p.
- Todde, A., Cioni, R., Pistolesi, M., Geshi, N., Bonadonna, C. (2017). The 1914 taisho eruption of Sakurajima volcano: Stratigraphy and dynamics of the largest explosive event in Japan during the twentieth century. *Bulletin of Volcanology* 79 (10), 72-22.

Travada y Córdova, V. (1958) - El suelo de Arequipa convertido en cielo: Historia general de Arequipa. Arequipa: Primer Festival del Libro Arequipeño, 121 p. Facsimil de la edición de 1758.

Varekamp, J.C., Luhr, J.F., Prestegard, K. (1984). The 1982 eruptions of El Chichon volcano Chiapas, Mexico: character of the eruptions, ash-fall deposits, and gas phase. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 23, 39–68.

Zamácola, J. (1888). Apuntes para la historia de Arequipa. Año de 1804. Arequipa: Imp. de La Bolsa, 98 p.

