

Mapa de peligros del complejo volcánico Chachani, Arequipa-Perú

David Arteaga¹, Nérida Manrique^{1,3}, Rigoberto Aguilar^{1,2}, Yhon Soncco¹, Benjamin Van Wyk de Vries^{2,3}, Carla Palacios¹, Verónica Tito¹, Elizabeth Pacsi⁴, Rosmery Delgado⁵, Sandra Sanz⁵

¹ Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Observatorio Vulcanológico del INGEMMET.

² Université Clermont Auvergne (Francia).

³ IGCP Project 692 Geoheritage for Geohazard Resilience.

⁴ Universidad Nacional del Altiplano (UNAP).

⁵ Universidad Nacional de San Agustín (UNSA).

Palabras clave: Mapa de peligros, Complejo Volcánico.

INTRODUCCIÓN

El Complejo Volcánico Chachani (CVC) se encuentra al borde oeste de la Cordillera Occidental de los Andes del Sur del Perú. El CVC está ubicado aproximadamente a 22,5 km del centro histórico de la ciudad de Arequipa. Geográficamente el CVC se localiza en el distrito de Cayma, Cerro Colorado y Yura, de la provincia y departamento de Arequipa. Siendo vulnerables diversas infraestructuras viales, energéticas y viviendas cercanas a las quebradas que descienden del CVC, donde habitan cerca de 349,000 personas en los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura y Yanahuara. El CVC ocupa un volumen entre ~248-289 km³, siendo este complejo volcánico uno de los más voluminosos de los Andes Centrales (Aguilar et al., 2022).

Los mapas de peligros del CVC se elaboraron con base en el conocimiento de la historia eruptiva, los tipos de productos emitidos y su alcance, magnitud y frecuencia de los eventos eruptivos; considerando además las características geomorfológicas de la zona. En este trabajo se presenta el mapa de peligros múltiples para la zona proximal, así como los mapas de peligros por fenómenos de caída, corrientes piroclásticas de densidad y por flujos de detritos, mostrando las 3 zonas de peligrosidad: alto, moderado y bajo peligro.

La elaboración de los mapas de peligros es de suma importancia, pues sirven como instrumento para el manejo de crisis volcánicas. Además, permiten la elaboración de planes de emergencia, y son una herramienta para la educación ciudadana.

1. Geología del complejo volcánico Chachani

El CVC cubre un área de ~600 km², se encuentra formado por al menos 12 edificios volcánicos, los cuales estuvieron activos durante el Pleistoceno Medio – Superior (Aguilar et al., 2022). Los edificios antiguos se ubican en el norte y noroeste del complejo volcánico. El Chachani basal presentó un volcanismo efusivo con emplazamiento de flujos de lava de tipo andesítico, sobreponiéndose a 2 ignimbritas denominadas Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (IAA) y Tufo Yura. El estratovolcán Chingana es uno de los edificios más antiguos (1012 ± 53 ka) (Aguilar et al., 2022), con lavas de composición andesítica y andesita basáltica. El estratovolcán Nocarane, datado en 866 ± 71 ka y 754.0 ± 9.5 ka (Aguilar et al., 2022), se compone por al menos 5 unidades, destacando los depósitos de caída de pómez, caída de escoria, corrientes de densidad piroclástica (PDC, por sus siglas en inglés), de pómez y ceniza, flujos de lava andesítica, flujos de lava en bloques y el emplazamiento de domos. Estratovolcán Estribo, datado entre 808.5 ± 62.7 ka y 694.1 ± 74.9 ka (Aguilar et al., 2022), posee 3 unidades, formadas por depósitos volcanoclásticos, flujos de lava andesítica, flujos de escoria y depósitos piroclásticos. Los domos El Colorado, representan uno de los últimos eventos del grupo de los edificios antiguos que consiste en dos domos-colada superpuestos de composición andesítica, datados en 641.8 ± 88.2 ka. En la parte central-oeste, se emplazan los edificios recientes, caracterizados principalmente por una actividad efusiva. El estratovolcán El Ángel, el cual se compone de una sucesión de al menos 4 flujos de lava de composición andesítica, datado en 463 ± 34

ka (Aguilar et al., 2022), alcanzando un espesor máximo de 200 m, que a su vez fueron cubiertos por depósitos de los edificios más jóvenes. Los domos Potrero consisten de un grupo de domos, domos-colada y flujos de lava de composición andesítica-dacítica y depósitos de PDC de bloques y ceniza, datado en 368.8 ± 61.9 ka (Aguilar et al., 2022). Domo La Horqueta, se compone por flujos de lava en bloque de composición andesítica y andesítica-dacítica datados en 345 ± 26 ka y 332 ± 29 ka (Aguilar et al., 2022). Estratovolcán El Rodado, datado en 239 ± 25 ka (Aguilar, et al., 2022), formado por una secuencia de flujos de lava de composición andesítica-dacítica. Flujos de lava Uyupampa, corresponde a un campo de flujos de lava tipo bloque y AA, donde algunas aún preservan sus estructuras como levées y crestas de avance. El estratovolcán Chachani corresponde al edificio de mayor altitud de todo el complejo con 6057 m s.n.m. y está formado por 3 unidades de flujos de lava de composición andesita basáltica, andesítica y andesita dacítica, este edificio fue datado en un rango de edad de 222 ± 24 ka y 130 ± 38 ka (Aguilar, et al., 2022). Domos-colada Cabrería, está compuesto por domos de lava y PDC de bloques y ceniza producto del colapso del domo, datado por Aguilar et al. (2022) en 56.5 ± 31.6 ka. Domo El Volcancillo, es un domo de lava de composición dacítica que alcanza una altura de 250 m y ~1 km de ancho, por el grado de preservación se presume que el emplazamiento del mismo es el más reciente de todo el CVC (Fig. 1).

2. Escenarios eruptivos del complejo volcánico Chachani

Se definieron 4 escenarios eruptivos futuros con base en:

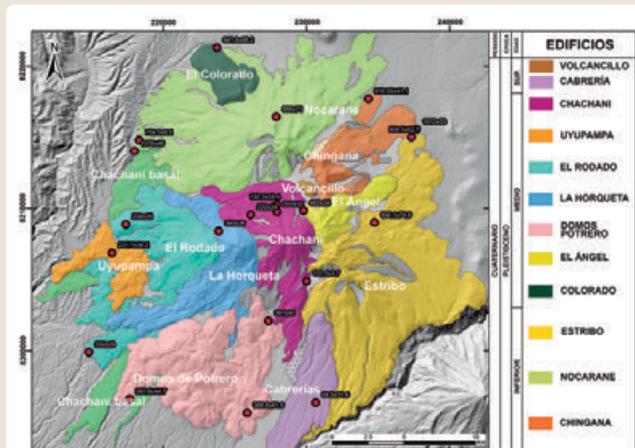
- ▶ Tipos de actividad (explosiva y efusiva) reconocidos en la tefroestratigrafía, los cuales podrían volverse a repetir.
- ▶ El índice de explosividad volcánica de las erupciones del CVC, en función del volumen y área cubierta por los productos emitidos.
- ▶ La actividad de otros volcanes peruanos u otras estructuras de la zona volcánica central de los Andes considerados como análogos al CVC.

2.1. Primer escenario: Erupción efusiva con emisión de lavas

El CVC ha emitido varios flujos de lava durante todo su periodo eruptivo, entre el Pleistoceno Medio – Superior (Aguilar, et al., 2022), por lo cual, este sería uno de los escenarios más probables si el volcán se reactiva. Debido a su alta viscosidad, la velocidad de desplazamiento de estas lavas sería baja y podría alcanzar hasta 13 km de distancia desde el cráter del edificio Chachani. Este escenario causaría daños por incendio e incineración y consecuentemente destruiría todo a su paso; sin embargo, con un adecuado plan de contingencia la población podría ponerse a buen recaudo.

2.2. Segundo escenario: Crecimiento de domos acompañado por actividad explosiva de tipo vulcaniano (IEV 1-2)

La formación de los domos en los volcanes andinos es un evento recurrente debido a la alta viscosidad que presentan las lavas emitidas y durante su crecimiento suelen generar erupciones vulcanianas con emisiones de caída piroclástica. Al respecto, el CVC, también ha presentado este comportamiento a lo largo del crecimiento de sus edificios, es así que en los sectores noreste, sur y suroeste se han formado los domos El Volcancillo, Cabrerías y Potrero; sin embargo, no se han identificado depósitos de caída piroclástica asociadas a la formación de estos domos, probablemente porque al ser erupciones bajas a moderadas, los depósitos de caída piroclástica han sido erosionados.



▶ Fig. 1 – Mapa generalizado en DEM que muestra dos grupos de edificios antiguos y jóvenes que suman doce edificios que forma el CVC. Los puntos rojos indican la ubicación de las muestras con edades 40Ar/39Ar.

En erupciones recientes, (e.g. actual erupción del volcán Sabancaya), se ha observado la formación de domos acompañados por emisión de material piroclástico que se han dispersado en todas las direcciones, incluso han alcanzado la ciudad de Arequipa a más de 70 km. La formación de nuevos domos en el Chachani, generaría inevitablemente caídas piroclásticas que podrían dispersarse a más de 20 km y afectar toda la ciudad de Arequipa.

Por otro lado, la formación de lahares durante la ocurrencia de erupciones vulcanianas es frecuente, y se ha visto que, en los periodos de lluvia entre los meses de diciembre y marzo, las quebradas que descienden del Chachani son afectadas por los lahares secundarios, por lo cual, ante cualquier proceso eruptivo del Chachani, se podría generar lahares primarios y secundarios según la época del año.

2.3. Tercer escenario: Crecimiento y colapso de domos con generación de corrientes de densidad piroclástica (PDCs)

El crecimiento y posterior colapso de domos en el CVC es probable, ya que los últimos procesos eruptivos en el Chachani han dejado registro estratigráfico de este proceso, tal como lo muestran los depósitos del PDCs Cabrerías y Potreros, que han alcanzado hasta 10 km de distancia desde su fuente. Ante una posible reactivación del Chachani, los PDCs podrían emplazarse preferentemente por las quebradas del sector sur y sureste del complejo, donde se encuentran zonas urbanas de los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura, estos depósitos podrían superar los 10 km de distancia.

La presencia de material disponible (PDC) también sería un detonante para la generación de lahares durante los periodos de lluvia entre los meses de diciembre y marzo.

2.4. Cuarto escenario: Erupción subpliniana a pliniana, con generación de PDC (IEV 4-5)

Los edificios antiguos de CVC como el Chingana, Estribo y Nocarane, han tenido eventos explosivos importantes que han dejado depósitos de caída de pómez y ceniza, así como PDCs producto del colapso de columnas eruptivas, que han alcanzado 8 km de distancia desde la fuente. Sin embargo, en el caso de

los edificios recientes, no se han identificado depósitos asociados a estos tipos de erupciones.

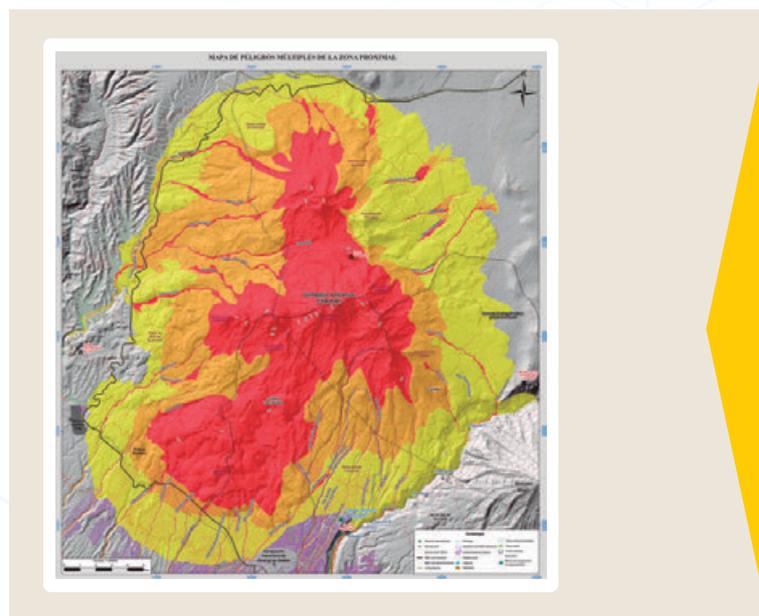
La probabilidad de ocurrencia de erupciones plinianas y subplinianas con IEV 4-5 en el edificio Chachani es baja, ya que no ha presentado erupciones en el pasado; sin embargo, no puede ser descartada. Durante una erupción con IEV 4-5, las PDCs podrían descender por el sector sur y sureste, afectando principalmente los distritos de Cayma, Yanahuara, Cerro Colorado y Yura. Así mismo, podrían generarse lahares durante los periodos de lluvia.

3. Mapas de peligros volcánicos

Para la elaboración de los mapas de peligros del CVC se consideraron los 4 escenarios eruptivos descritos anteriormente. Estos escenarios están basados según el tipo de actividad volcánica (explosiva y efusiva), la magnitud y frecuencia de las erupciones pasadas, así como el comportamiento de otros volcanes peruanos como el Tutupaca, Misti y Sabancaya, considerados análogos al Chachani.

3.1. Mapa de peligros múltiples de la zona proximal

Este mapa es el resultado de la combinación de las áreas que serían afectadas por PDCs, flujos de lava y lahares del CVC (Fig. 2).



► Fig. 2 – Mapa de peligros múltiples de la zona proximal del CVC. Las zonas de alto y moderado peligro, rojo y naranja respectivamente, estarían afectando gran parte de la zona urbana de la ciudad de Arequipa.

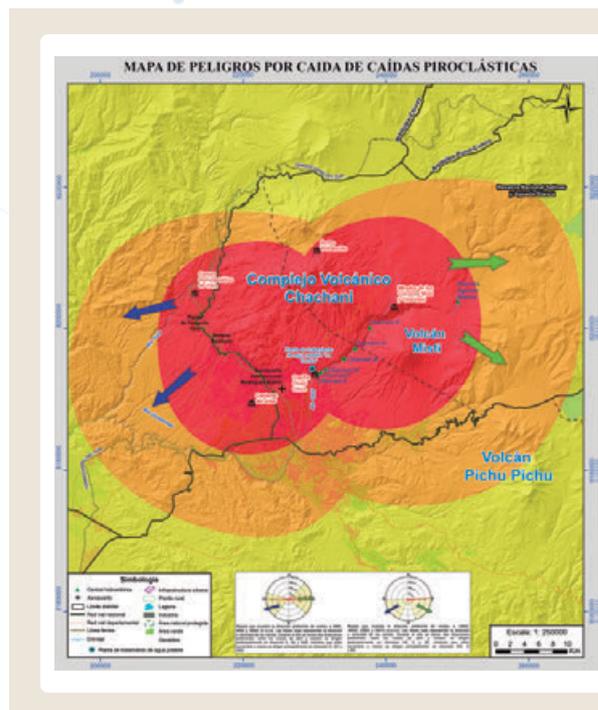
Los cálculos de alcance de los productos emitidos por el CVC se realizaron con la metodología denominada "Cono de energía" (Malin & Sheridan, 1982), utilizada para definir las zonas de peligro proximales alrededor de un volcán. Este método postula que el alcance horizontal (L) de un depósito volcánico, es función de la diferencia de alturas (H) entre el punto de generación del flujo y el punto de depósito. Para ello se utilizó el programa LAHARZ (Schilling, 1998).

Para delimitar las zonas de peligros, se consideraron 5 puntos de emisión: Horqueta 3, Rodado 2, Potrero 2, Potrero 1 y Volcancillo. Para definir la zona de peligro alto (rojo), se consideraron los valores de: 0.28, 0.25, 0.14, 0.16 y 0.18 para la proporción H/L, de los 5 edificios descritos anteriormente. El límite máximo de recorrido desde el domo El Volcancillo es 18,4 km. Para delimitar la zona de moderado peligro (naranja) en el mapa, se consideraron los valores de: 0.3, 0.34, 0.18, 0.19 y 0.23 para la proporción H/L de los 5 centros de emisión. El límite máximo de recorrido para estas proporciones, desde El Volcancillo es 19,8 km. Para delimitar la zona de bajo peligro (amarillo) en el mapa, se consideraron los valores de: 0.46, 0.39, 0.2, 0.24, 0.3 para la proporción H/L de los 5 edificios del Chachani. El límite máximo de recorrido desde El Volcancillo con estos valores es 22,8 km.

3.2. Mapa de peligros por caídas piroclásticas

Para la elaboración del mapa de caídas piroclásticas se consideraron 3 escenarios posibles, tomando como referencia eventos explosivos ocurridos en los volcanes Ubinas, Misti y Huaynaputina. Las direcciones y velocidades predominantes de vientos a 5865, 9690, 10960, 12445, 16645, 20662 y 26415 m s.n.m. que fueron obtenidas por el Instituto Geofísico del Perú, basado en el análisis de datos NCEP/NCAR, periodo 1979-1998 (Fig. 3).

Para el nivel de peligrosidad alto (rojo), se utilizó la forma y distribución de las isopacas correspondiente a la erupción del volcán Ubinas ocurrida en el 2019 (Aguilar et al., 2019), la máxima distancia alcanzada por la isopaca de 1 mm es de 28 km. Para el nivel de peligrosidad moderado (naranja), se utilizó como referencia el mapa de isopacas del depósito Sacarosa datada entre 38.6 ka y 33.7 ka del volcán Misti (Harpel et al, 2021). Del mapa en mención la máxima distancia

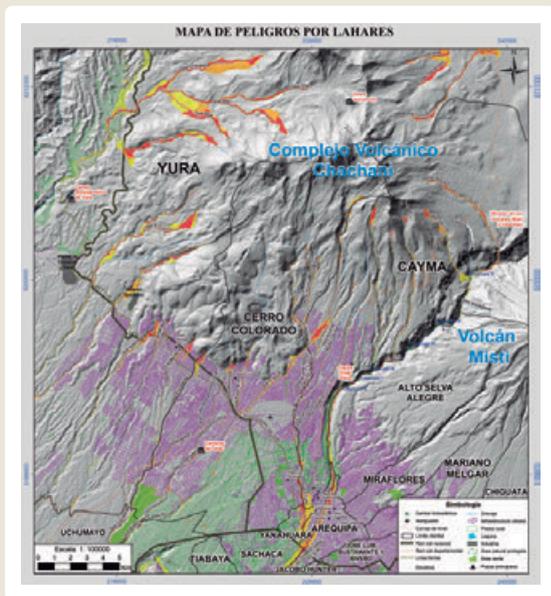


► Fig. 3 – Mapa de peligros por caídas piroclásticas. Las flechas señalan direcciones de vientos.

alcanzada por la isopaca de 240 mm es de 39 km de distancia. Para el nivel de peligrosidad bajo (amarillo) se utilizó como referencia el mapa de isopacas de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C. (Prival et al., 2020), En el mapa en mención, la máxima distancia alcanzada por la isopaca de 10 cm fue de 90 km, aproximadamente. Las 3 distancias máximas (peligrosidad alta, moderada y baja), se proyectaron en las distintas direcciones de vientos obtenidos, tomando como punto de emisión el edificio Chachani (uno de los edificios más recientes).

3.3. Mapa de peligros por flujos de detritos (lahares)

Para delimitar las zonas de peligros por flujos de detritos (lahares), se utilizó el software VolcFlow (Kelfoun & Druit, 2005). Este programa correlaciona el área para la generación de lahar en cada quebrada y la media de la precipitación pluvial (baja, moderada y alta) para obtener el cálculo de los volúmenes que serán empleados en la simulación de flujos de detritos (lahares), obteniendo los 3 niveles de peligrosidad: alto, moderado y bajo (Fig. 4), simulando un total de 45 quebradas para los distritos de Yura, Cayma, Cerro Colorado y Yanahuara.



Finalmente, para los distritos Cayma, Cerro Colorado, Yura y Yanahuara, asociados al CVC, afectados por flujos de detritos (lahares), se realizó la evaluación de puntos críticos (infraestructuras), que podrían verse afectadas encontrándose alrededor de 160 puntos críticos entre instituciones educativas (inicial, primaria y secundaria), campos deportivos, áreas recreativas, estaciones de servicio de combustible (grifos), rellenos sanitarios, cruces de carreteras y puentes, considerando los 3 niveles de peligrosidad.

► Fig. 4 - Mapa de peligros por emplazamiento de flujos de detritos (lahares) del CVC. Los lahares afectarían instituciones educativas, campos deportivos, áreas recreativas, estaciones de grifos, rellenos sanitarios, cruces de carreteras y puentes ubicados en los distritos de Cayma, Yura, Cerro Colorado y Yanahuara.

CONCLUSIONES

- Con base en los datos geológicos, se han propuesto cuatro escenarios eruptivos en caso de una eventual reactivación del CVC: el primer escenario considera una erupción efusiva con emisión de lavas; el segundo escenario considera un crecimiento de domos acompañado de erupciones vulcanianas (IEV 1-2); un tercer escenario considera el crecimiento y colapso de domos con generación de PDC y un cuarto escenario considera una erupción subpliniana a pliniana, con generación de PDC.
- En el mapa principal de peligros múltiples (Fig. 2), la zona de alto peligro (rojo) puede ser severamente afectada por flujos de lava, corrientes de densidad piroclástica poco voluminosas y caída de tefra, alcanzando 18.4 km de longitud máxima desde el edificio Chachani. La zona de moderado peligro (naranja), puede ser afectada por flujos de lava, PDCs y caída piroclástica, afectando un área comprendida entre los 18.4 y 19.8 km de distancia radial desde el CVC. La zona de bajo peligro (amarillo) abarca una distancia entre los 19.8 a 22.8 km afectando a algunos distritos de Arequipa. En las quebradas aledañas al complejo volcánico, las zonas de color rojo, naranja y amarillo, pueden ser afectadas por lahares.
- En el mapa de peligro por fenómenos de caída piroclástica, la zona de alto peligro (rojo) abarca 28 km de distancia desde el CVC; la zona de moderado peligro (naranja) está entre 28 y 39 km de distancia, y la zona de bajo peligro (amarillo) abarca hasta 90 km de distancia.
- En caso de una erupción del CVC, varios distritos de la ciudad de Arequipa, se verían afectadas, donde habitan más de 322,524 habitantes, por eso es necesario que las autoridades, dirigentes y población en general conozca los mapas de peligros para el ordenamiento territorial, expansión urbana y planificación del desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece de manera especial al área de monitoreo volcánico del Observatorio Volcanológico del INGEMMET y al proyecto NOVAC.

REFERENCIAS

- ▶ Aguilar, R., Thouret, J.-C., Samaniego, P., Worner, G., Jincha, B., Paquette, J.-L. S., Anthony, F. (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*, 26 p.
- ▶ Kelfoun, K., Druit, t. T. (2005). Numerical modelling of the emplacement of the 7500 BP Socompa rock avalanche, Chile. *J. Geophys. Res.*, B12202, doi : 10.1029/2005JB003758, 13p.
- ▶ Larry G, M., Michael, R., Hans, S., Roger, P. (2013). The Ash3d Volcanic Ash Dispersion Model (USGS). U.S. Geological Survey(USGS).
- ▶ Malin, M., Sheridan, M. (1982). Computed-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 4 p.
- ▶ Sanz, S. (2020). Evaluación del Peligro por Flujos Piroclásticos de Bloques y Cenizas en el Flanco Sur del Complejo Volcánico Chachani. Tesis UNSA, 212 p.
- ▶ Schilling, S. (1998). AHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. U.S. Geological Survey, Open File-Report 98-638, 79 p.