

Mapa Regional y Ranking de Riesgos Volcánicos de la Zona Volcánica Central de los Andes

María-Paz Reyes-Hardy¹, Luigia Di Maio¹, Lucia Dominguez¹, Corine Frischknecht¹, Sébastien Biass¹, Leticia Freitas Guimarães², Amiel Nieto-Torres³, Manuela Elissondo⁴, Maira Figueroa⁵, Álvaro Amigo⁵, Sebastián García⁴ y Costanza Bonadonna¹

¹ Department of Earth Sciences, University of Geneva, 1205 Geneva, Switzerland – maria-paz.reyeshardy@unige.ch

² Geoscience Institute, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

³ Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, Mexico

⁴ Servicio Geológico Minero Argentino, SEGEMAR, Argentina

⁵ Servicio Nacional de Geología y Minería, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Temuco, Chile

Palabras clave: Zona Volcánica Central, Ranking de Riesgo Volcánico, Peligros Volcánicos, Exposición, Vulnerabilidad, Resiliencia.

INTRODUCCIÓN

La Zona Volcánica Central de los Andes (ZVCA) es una de las zonas volcánicas más activas de América del Sur y es una de las áreas en las que la mayoría de los volcanes se encuentran dentro de los 25 km de una frontera internacional comprendiendo Argentina, Chile, Bolivia y Perú, con importantes desafíos transfronterizos (Donovan & Oppenheimer, 2019). En esta región, los volcanes se ubican en el Altiplano-Puna (sobre los 4000 m de altitud) y, por lo tanto, varios volcanes superan los 6000 m s.n.m., entre ellos el Ojos del Salado que es la cumbre volcánica más alta del mundo.

Durante décadas, la ZVCA ha sido un sitio importante para entender una gran cantidad de procesos geológicos (e.g. evolución geológica, tectónica, espesor de la corteza, erosión y geometría por subducción, segmentación del arco volcánico y génesis del magma), pero debido al difícil acceso, los registros de erupciones eran bastante escasos, hasta hace muy poco. Durante los últimos 20 años, la agitación volcánica en varias partes de la ZVCA ha permitido la implementación de nuevas capacidades de monitoreo e inversiones en investigación (Aguilera et al., 2022) y como consecuencia, se ha puesto a disposición nueva información detallada. La priorización de estrategias de reducción de riesgos es especialmente importante para la ZVCA debido a su gran cantidad de volcanes.

Además, el número de personas expuestas a la actividad volcánica en la ZVCA depende de la dinámica eruptiva y la magnitud de las erupciones potenciales.

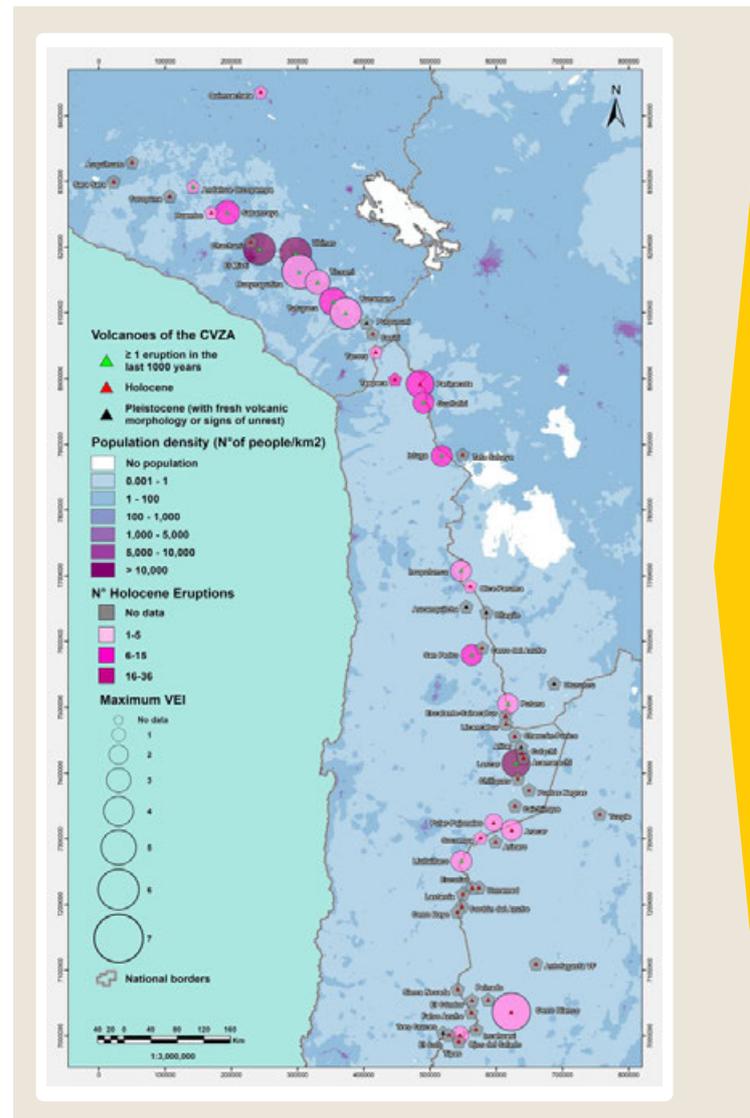
La presencia de áreas urbanas e infraestructura crítica cerca de algunos de estos volcanes representa una amenaza importante para toda la región. Por ejemplo, la población que vive ~ 30 km de cualquiera de los volcanes activos en Perú es ~ 1.5 millones (Aguilera et al., 2022). Sin embargo, el área potencialmente afectada por una gran erupción como la de Huaynaputina (VEI 6) se extendería hasta 1000 km desde el cráter, exponiendo a ~3 millones de personas, principalmente ubicadas en las regiones de Arequipa, Moquegua, Tacna y Puno. En el caso del norte de Chile, la mayoría de los volcanes se encuentran en zonas remotas a excepción del complejo volcánico Taapaca, ubicado muy cerca de Putre, una de las principales localidades pobladas del Altiplano chileno con 1716 habitantes (INE, 2017). No obstante, las grandes erupciones explosivas de los volcanes chilenos de la ZVCA podrían afectar amplias áreas y el espacio aéreo de Argentina y el sur de Bolivia debido a los vientos provenientes del oeste (e.g., Lascar 1986, 1993, 2000; Viramonte et al., 2001; Amigo, 2021). A pesar de que Argentina alberga pocos volcanes dentro de la ZVCA, cualquier erupción podría tener importantes impactos socioeconómicos y ambientales producidos por la dispersión y caída de tefra en Argentina y también en los países vecinos (Dominguez et al., 2021; Elissondo et al., 2016; García y Badi, 2021).

Durante las últimas décadas, se han propuesto diversas estrategias para evaluar la amenaza y el riesgo volcánico a nivel mundial (Alberico et al., 2011; Alcorn et al., 2013; Bernal et al., 2017; Biass et al., 2012; Hayes et al., 2019; Hicks et al., 2014; Kaufman, 2019;

Lirer et al., 2010; Marzocchi et al., 2012; Reyes-Hardy et al., 2021; Sandri et al., 2014; Scaini et al., 2014; Thierry et al., 2008), así como para clasificar los volcanes solo teniendo en cuenta los factores de peligro y los factores de exposición que se combinan para definir la clasificación de amenaza relativa (Auker et al., 2015; Bailey et al., 1983; Ewert et al., 1998, 2005, 2014, 2018; Ewert, 2007; Lowenstein y Talai, 1984; Macedo et al., 2016; Magill y Blong, 2005; Scandone et al., 2016; Yokoyama et al., 1984). Uno de los análisis de clasificación de volcanes más completo es el enfoque desarrollado por el Volcano Disaster Assistance Program de USA, desarrollado inicialmente para volcanes fuera de USA, posteriormente mejorado para los volcanes de Estados Unidos, Alaska, Hawái y las Islas Marianas por Ewert et al. (2005, 2007) y actualizado recientemente (Ewert et al., 2018). Se ha utilizado en varios países de Latinoamérica, entre ellos México (Espinasa-Pereña, 2018), América Central (Palma et al., 2009), Chile (Lara et al., 2006), Ecuador (Santamaría and Bernard, 2018), y Argentina (Elisondo et al., 2016b) Elisondo et al. (2016b) clasificó el riesgo de los volcanes ubicados en Argentina y en la frontera con Chile (total de 38 volcanes del Holoceno) en base al procedimiento sugerido por Ewert et al. (2005, 2007). En consecuencia, los volcanes se evaluaron en función de 15 parámetros de peligro y 10 parámetros de exposición. A partir de los resultados de este análisis se definieron cuatro categorías de riesgo relativo: Muy Alto, Alto, Moderado y Bajo. Sin embargo, no se consideró la evaluación de los factores de vulnerabilidad y resiliencia.

Recientemente, se desarrolló una nueva estrategia de clasificación de riesgos que se basa en la propuesta de Ewert et al. (1998) y Elisondo et al., (2016b) incluyendo factores de riesgo adicionales (i.e., factores de vulnerabilidad y resiliencia). La nueva metodología de clasificación de riesgos se probó en volcanes mexicanos, Centro y Sur América con actividad registrada en los últimos 1000 años (Guimarães et al., 2021; Nieto-Torres et al., 2021).

Un aspecto clave a la hora de aplicar una estrategia de ranking de riesgo en una determinada zona volcánica es la determinación del número de volcanes a evaluar. Esto es especialmente importante en la ZVCA debido a



► Fig. 1 – Mapa regional basado en amenazas. Incluye los 62 volcanes activos y potencialmente activos a evaluar. Mapa escala 1: 3.000.000. Créditos de la capa de servicio: Fuentes: Esri, USGS, NOAA.

la falta de evidencia geocronológica y/o registros históricos preservados (Lara et al., 2021). Por tanto, el primer paso de nuestro estudio ha sido la identificación de los volcanes de la ZVCA a evaluar (Fig. 1).

En este estudio, comparamos diferentes enfoques para identificar los volcanes de la ZVCA con el posible impacto potencial más alto: i) el mapeo regional basado en amenazas que considera peligro volcánico y exposición, ii) la clasificación de riesgo volcánico de 2 factores que considera peligro y exposición (Ewert et al., 2005; Ewert, 2007), iii) el Ranking de Riesgos Volcánicos de 3 factores considerando amenaza,

exposición y vulnerabilidad (Guimarães et al., 2021; Nieto-Torres et al., 2021), y iv) el Ranking de Riesgo Volcánico de 4 factores considerando amenaza, exposición, vulnerabilidad y resiliencia (Guimarães et al., 2021; Nieto-Torres et al., 2021).

Vale la pena enfatizar que para nuestro mapeo regional basado en amenazas evaluamos tanto el total de volcanes activos de la ZVCA como los volcanes de la ZVCA que tuvieron al menos una erupción en los últimos 1000 años, considerando solo los peligros volcánicos y los factores de exposición (62 volcanes) (Fig. 1). Para llevar a cabo la nueva metodología de clasificación de riesgo aplicada a la ZVCA, evaluamos los sistemas volcánicos con al menos una erupción en

los últimos 1000 años siguiendo a Freitas Guimarães et al. (2021) y algunos centros volcánicos del Pleistoceno, que muestran morfologías volcánicas frescas y/o signos de agitación (como desgasificación, sismicidad o deformación del suelo), combinados con nueva información detallada sobre peligro, exposición, vulnerabilidad y resiliencia que se puso a disposición recientemente.

Este trabajo no solo destaca los centros volcánicos con los peligros volcánicos más intensos y frecuentes asociados con la mayor densidad de elementos expuestos, sino que también aquellos con el mayor impacto potencial que requieren las acciones de mitigación de riesgo más urgentes.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio está financiado por el proyecto SNSF #188757 "A new probabilistic framework for regional volcanic risk assessment including hazards interacting at multiple temporal and spatial scales", y se llevó a cabo en el marco de una colaboración entre la Universidad de Ginebra, SERNAGEOMIN y SEGEMAR.

Agradecemos la fructífera discusión con Rigoberto Aguilar que nos permitió enriquecer esta investigación y también a Cintia Bengoa, Gabriela Pedreros, María Angélica Contreras Vargas y Johanna Kaufman por su apoyo. Este trabajo se basa en la cooperación entre los países de la ZVCA también gracias al apoyo de la Asociación Vulcanológica Latinoamericana (ALVO).

REFERENCIAS

- ▶ Aguilar, R., Taípe Maquerhua, E., Antayhua Vera, Y., Ortega Gonzales, M., Apaza Choquehuayta, F., & Cruz Mamani, L. (2021). Hazard assessment studies and multiparametric volcano monitoring developed by the Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico in Peru. *Volcanica*, 4(S1), 73-92.
- ▶ Aguilera, F., Apaza, F., Del Carpio, J., Grosse, P., Jiménez, N., Ureta, G., Inostroza, M., Báez, W., Layana, S., Gonzalez, C., Rivera, M., Ortega, M., Gonzalez, R., & Iriarte, R. (2022). Advances in scientific understanding of the Central Volcanic Zone of the Andes: a review of contributing factors. *Bulletin of Volcanology*, 84(3), 1-8.
- ▶ Alberico, I., Petrosino, P., & Lirer, L. (2011). Volcanic hazard and risk assessment in a multi-source volcanic area: the example of Napoli city (Southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(4), 1057-1070.
- ▶ Alcorn, R., Panter, K. S., & Gorsevski, P. V. (2013). A GIS-based volcanic hazard and risk assessment of eruptions sourced within Valles Caldera, New Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 267, 1-14.
- ▶ Amigo, A. (2021). Volcano monitoring and hazard assessments in Chile. *Volcanica*, 4(S1), 1-20.

- ▶ Auken, M. R., Sparks, R. S. J., Jenkins, S. F., Aspinall, W., Brown, S. K., Deligne, N. I., Jolly, G., Loughlin, S. C., Marzocchi, W., Newhall, C. G., & Palma, J. L. (2015). Development of a new global Volcanic Hazard Index (VHI). In *Global Volcanic Hazards and Risk* (Issue 2015, pp. 349–358). Cambridge University Press.
- ▶ Bailey, R. A., Beauchemin, P. R., Kapinos, F. P., & Klick, D. W. (1983). *The Volcano Hazards Program: objectives and long-range plans*. Open-File Report 83-400. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 33 p.
- ▶ Bernal, G. A., Salgado-Gálvez, M. A., Zuloaga, D., Trisancho, J., González, D., & Cardona, O.-D. (2017). Integration of Probabilistic and Multi-Hazard Risk Assessment Within Urban Development Planning and Emergency Preparedness and Response: Application to Manizales, Colombia. *International Journal of Disaster Risk Science*, 8(3), 270–283.
- ▶ Biass, S., Frischknecht, C., & Bonadonna, C. (2012). A fast GIS-based risk assessment for tephra fallout: the example of Cotopaxi volcano, Ecuador. *Natural Hazards*, 65(1), 497–521.
- ▶ Dominguez, L., Bonadonna, C., Frischknecht, C., Menoni, S., & Garcia, A. (2021). Integrative Post-event Impact Assessment Framework for Volcanic Eruptions: A Disaster Forensic Investigation of the 2011–2012 Eruption of the Cordón Caulle Volcano (Chile). *Frontiers in Earth Science*, 9(June), 2012–2019.
- ▶ Donovan, A., & Oppenheimer, C. (2019). Volcanoes on borders: a scientific and (geo)political challenge. *Bulletin of Volcanology*, 81(5), 31.
- ▶ Elissondo, M., Farías, C., & Collini, E. (2016). Evaluación del riesgo volcánico relativo en Argentina. *Cities on Volcanoes 9*, Puerto Varas, Chile., 2, Poster.
- ▶ Elissondo, Manuela, Baumann, V., Bonadonna, C., Pistolesi, M., Cioni, R., Bertagnini, A., Biass, S., Herrero, J. C., & Gonzalez, R. (2016). Chronology and impact of the 2011 Cordón Caulle eruption, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3), 675–704.
- ▶ Espinasa-Pereña, R. (2018). Evaluación Del Riesgo Relativo De Los Volcanes De México. *Foro Internacional: Los Volcanes y Su Impacto*. Arequipa, Perú, 12.
https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2109/FRACCION_XLI/RV/14_Evaluacion_Riesgo_Relativo_2018.pdf
- ▶ Ewert, J.W., Guffanti, M., & Murray, T. L. (2005). An assessment of volcanic threat and monitoring capabilities in the United States: Framework for a National Volcano Early Warning System (NVEWS). USGS Open-File Report 2005-1164, 62. [papers://a2ff6e5a-f401-4dac-bc3a-c83939ad6272/Paper/p738](https://pubs.usgs.gov/ofr/2005/1164/p738/)
- ▶ Ewert, J.W., Hazards, N., Uhira, K., Baba, T., Mori, H., Katayama, H., & Bulletin, N. H. (2014). Revised definitions and classification of active volcanoes in Japan, based on their past activities. April, 2014.
- ▶ Ewert, J. W., Miller, C. D., Tilling, R. I., & Neal, C. A. (1998). Revised Criteria for Identifying High-Risk Volcanoes Around the World. *EOS Trans. Am. Geophys. Union.*, 79(45), 993.
- ▶ Ewert, John W. (2007). System for Ranking Relative Threats of U.S. Volcanoes. *Natural Hazards Review*, 8(4), 112–124.
- ▶ Ewert, John W., Diefenbach, A. K., & Ramsey, D. W. (2018). 2018 Update to the U.S. Geological Survey National Volcanic Threat Assessment. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018-5140, 40.

- ▶ Forte, P., Rodríguez, L., Jácome Paz, M. P., Caballero García, L., Alpizar Segura, Y., Bustos, E., Perales Moya, C., Espinoza, E., Vallejo, S., & Agosto, M. (2021). Volcano monitoring in Latin America: taking a step forward. *Volcanica*, 4(S1), vii-xxxiii.
- ▶ Garcia, S., & Badi, G. (2021). Towards the development of the first permanent volcano observatory in Argentina. *Volcanica*, 4(S1), 21-48.
- ▶ Guimarães, L., Nieto-Torres, A., Bonadonna, C., & Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 2: Application to Latin America. *Frontiers in Earth Science*, 9(October), 1-24.
- ▶ Hayes, J. L., Wilson, T. M., Stewart, C., Villarosa, G., Salgado, P., Beigt, D., Outes, V., Deligne, N. I., & Leonard, G. S. (2019). Tephra clean-up after the 2015 eruption of Calbuco volcano, Chile: A quantitative geospatial assessment in four communities. *Journal of Applied Volcanology*, 8(1).
- ▶ Hicks, A., Barclay, J., Simmons, P., & Loughlin, S. (2014). An interdisciplinary approach to volcanic risk reduction under conditions of uncertainty: a case study of Tristan da Cunha. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(7), 1871-1887.
- ▶ INE. (2017). Instituto Nacional de Estadísticas, Chile. Censo de población y vivienda.
- ▶ Kaufman, J. (2019). Exposure Based Multi-Hazard Risk Assessment of Copahue Volcano, Neuquén, Argentina. Specialization Certificate in the Assessment and Management of Geological and Climate Related Risk, 57.
- ▶ Lara, L. E., Clavero, J., Hinojosa, M., Huerta, S., Wall, R., & Moreno, H. (2006). NVEWS-CHILE: Sistema de Clasificación semicuantitativa de la vulnerabilidad volcánica. *Congreso Geológico Chileno.*, 11(Actas 2), 487-490.
- ▶ Lirer, L., Petrosino, P., & Alberico, I. (2010). Hazard and risk assessment in a complex multi-source volcanic area: the example of the Campania Region, Italy. *Bulletin of Volcanology*, 72(4), 411-429.
- ▶ Lowenstein, P. L., & Talai, B. (1984). Volcanoes and Volcanic Hazards in Papua New Guinea. Tokyo: Geological Survey of Japan, 263, 315-331.
- ▶ Macedo, O., Taipe, E., Del Carpio, J., Ticona, J., Ramos, D., Puma, N., Aguilar, V., Machacca, R., Torres, J., Cueva, K., Cruz, J., Lazarte, I., Centeno, R., Miranda, R., Álvarez, Y., Masias, P., Vilca, J., Apaza, F., Chijcheapaza, R., ... Vela, J. (2016). Evaluación del Riesgo Volcánico en el Sur del Perú, situación actual de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro.
- ▶ Machacca, R., Del Carpio Calienes, J. A., Rivera Porras, M. A., Tavera Huarache, H. J., Macedo Franco, L. D., Concha Calle, J. A., Lazarte Zerpa, I. A., Centeno Quico, R. G., Puma Sacsí, N. C., Torres Aguilar, J. L., Vargas Alva, K. A., Cruz Igme, J. E., Velarde Quispe, L., Vilca Nina, J., & Malpartida Garay, A. R. (2021). Monitoring of active volcanoes in Peru by the Instituto Geofísico del Perú. *Volcanica*, 4(S1), 49-71.
- ▶ Magill, C., & Blong, R. (2005). Volcanic risk ranking for Auckland, New Zealand. II: Hazard consequences and risk calculation. *Bulletin of Volcanology*, 67(4), 340-349.
- ▶ Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal, A., Gasparini, P., Mastellone, M. L., & Di Ruocco, A. (2012). Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy. *Natural Hazards*, 62(2), 551-573.
- ▶ Nieto-Torres, A., Guimarães, L. F., Bonadonna, C., & Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 1: Methodology. *Frontiers in Earth Science*, 9(August), 1-22.

- ▶ Palma, J. L., Rose, W. I., & Escobar-Wolf, R. (2009). Volcanic threat in Central America: Assessment and comparison of volcanic hazards and associate vulnerability in Guatemala, El Salvador, Nicaragua, and Costa Rica. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 41(4), 55.
- ▶ Reyes-Hardy, M.-P., Aguilera Barraza, F., Sepúlveda Birke, J. P., Esquivel Cáceres, A., & Inostroza Pizarro, M. (2021). GIS-based volcanic hazards, vulnerability and risks assessment of the Guallatiri Volcano, Arica y Parinacota Region, Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 109(February), 103262.
- ▶ Sandri, L., Thouret, J.-C., Constantinescu, R., Biass, S., & Tonini, R. (2014). Long-term multi-hazard assessment for El Misti volcano (Peru). *Bulletin of Volcanology*, 76(2), 771.
- ▶ Santamaría, S., & Bernard, B. (2018). Hierarchization of the volcanoes of continental and insular Ecuador based on their threat potential. Abstract ID: 170 for Cities on Volcanoes 10. Session: S02.03 - From Volcanic Hazard to Risk Assessment: The Key Role of Exposure and Vulnerability.
- ▶ Scaini, C., Biass, S., Galderisi, A., Bonadonna, C., Folch, A., Smith, K., & Höskuldsson, A. (2014). A multi-scale risk assessment for tephra fallout and airborne concentration from multiple Icelandic volcanoes - Part 2: Vulnerability and impact. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(8), 2289-2312.
- ▶ Scandone, R., Bartolini, S., & Martí, J. (2016). A scale for ranking volcanoes by risk. *Bulletin of Volcanology*, 78(1), 2.
- ▶ Thierry, P., Stieltjes, L., Kouokam, E., Nguéya, P., & Salley, P. M. (2008). Multi-hazard risk mapping and assessment on an active volcano: the GRINP project at Mount Cameroon. *Natural Hazards*, 45(3), 429-456.
- ▶ Yokoyama, I., Tilling, R. I., & Scarpa, R. (1984). International Mobile Early-Warning System(s) for Volcanic Eruptions and Related Seismic Activities. Report of an Unesco/UNEP Sponsored Preparatory Study in 1982-84. Paris: UNESCO., 01(2286), 105.