

Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes: Investigación, vigilancia volcánica y contribuciones a la mitigación del riesgo

Felipe Aguilera^{1,2,3}, Pablo Salazar^{1,2,3}, Daniel Díaz^{1,4}, Rodrigo González^{1,2}, Verónica Oliveros^{1,5}, Mahesh Shrivastava^{1,2,3}, Joseline Tapia^{1,2}, Manuel Inostroza¹, Susana Layana¹, Gabriel Ureta^{1,3}, Pablo Salas¹

¹ Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes, Antofagasta, Chile

² Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.

³ Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Santiago, Chile

⁴ Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Santiago, Chile

⁵ Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

Palabras clave: Redes de vigilancia, vulnerabilidad, procesos volcánicos, formación de investigadores.

INTRODUCCIÓN

Diversas erupciones a lo largo de toda Latinoamérica en los últimos 5 siglos han tenido efectos mayores sobre la población, flora, fauna, infraestructura y medio ambiente, siendo algunas de ellas altamente significativas, tales como los casos de Huaynaputina (Perú, 1600), Santa María (Guatemala, 1902), Quizapu (Chile, 1932), Parícutin (México, 1943-1952), El Chichón (México, 1982), Nevado del Ruiz (Colombia, 1985), Lonquimay (Chile, 1988-1989), Hudson (Chile, 1991), Chaitén (Chile, 2008), Fuego (Guatemala, 2018). En algunos de estos casos, dichas erupciones condujeron a los países involucrados a crear y/o reforzar redes de vigilancia volcánica, a través de observatorios volcanológicos. Actualmente, en Latinoamérica existen 17 observatorios volcánicos distribuidos en 10 países distintos, los cuales son conducidos por instituciones gubernamentales, universidades, o por colaboración entre ellas (Forte et al., 2021).

A nivel de grupos, núcleos o institutos dedicados principalmente a la investigación en volcanología, sin necesariamente tener responsabilidad oficial de monitoreo o respuesta ante crisis volcánicas, en el caso Latinoamericano, la presencia de estos es mucho más limitada. Algunos ejemplos se encuentran en El Salvador (Instituto de Vulcanología - Universidad de El Salvador, IVUES), Colombia (Grupo de investigación en Estratigrafía y Vulcanología - GIEV - CUMANDAY, Universidad de Caldas), Argentina (Instituto de Bio y Geociencias del NOA - IBIGEO, Universidad Nacional

de Salta; Grupo de Estudio y Seguimiento de Volcanes Activos - GESVA, Universidad de Buenos Aires), entre otros. En el caso de Chile, desde el año 2016, el Grupo de Investigación en Volcanismo de la Universidad Católica del Norte (GIV - UCN) comenzó con un trabajo de investigación multidisciplinario principalmente enfocado en el norte de Chile, con el objetivo de mejorar el conocimiento del volcanismo no sólo en las zonas volcánicas activas de Chile, sino que también del resto de Sudamérica (Aguilera, 2017). En esta contribución se presentan los distintos ámbitos de acción del recientemente creado Instituto Milenio de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes (www.ckelar.org), y cómo este aporta actualmente al entendimiento de los distintos procesos volcánicos, vigilancia volcánica, y a la mitigación del riesgo.

VISIÓN, OBJETIVOS, ESTRUCTURA E INVESTIGACIÓN EN CKELAR VOLCANES

La visión del Instituto Milenio de Investigación de Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes es la formación de un equipo científico avanzado de excelencia reconocido mundialmente para brindar y comunicar conocimiento sobre procesos volcánicos y mitigación de riesgo volcánico. El objetivo general es determinar los factores que controlan la tasa de recurrencia y el tamaño de la erupción a lo largo de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVCA). Los objetivos específicos son 1) establecer los procesos fisicoquímicos que controlan la actividad volcánica; 2) precisar el papel de los procesos tectónicos regionales en la actividad magmática y volcánica; 3) restringir los efectos del

volcanismo en el medio ambiente; 4) evaluar los peligros y riesgos volcánicos.

Las actividades de investigación se centran en tres grandes áreas temáticas y diversas líneas de investigación específicas:

A. Ciencias de la Tierra

1. Procesos físicos y químicos en sistemas volcánicos: Esta línea está enfocada en la comprensión de los procesos físicos y químicos, y su relación con el medio ambiente (endógenos y exógenos). Las disciplinas de trabajo incluyen la geofísica, sismología, petrología, volcanología física, geoquímica de fluidos, y la relación entre los productos eruptivos y el medio ambiente. Las principales metodologías utilizadas incluyen: 1) Geofísica, uso de técnicas magneto-telúricas (MT) y electromagnéticas transitorias (TEM) para determinar la ubicación, profundidad y volumen de los reservorios de magma, y la distribución de los sistemas hidrotermales en los volcanes; y el seguimiento de los procesos eruptivos mediante la medición de perturbaciones ionosféricas mediante el uso de perturbaciones ionosféricas co-volcánicas (CVID); 2) Sismicidad, detección de señales sísmicas para conocer procesos internos como movimiento de fluidos, fracturamiento de rocas, entre otros; 3) geoquímica de productos volcánicos, para determinar sus composiciones químicas e isotópicas y edades, y así establecer las firmas asociadas con la formación, ascenso, almacenamiento y erupción del magma, y el tiempo en que ocurrieron; 4) mapeo de productos volcánicos superficiales, para establecer la evolución de sistemas volcánicos individuales; 5) muestreo directo de gases de fumarolas, para determinar la composición química de los fluidos volcánicos emitidos a la superficie, tanto en fase gaseosa como líquida, y con ello establecer los estados de actividad de los sistemas volcánicos; 6) medición de SO₂ de plumas volcánicas a la atmósfera, siendo posible cuantificar las tasas de emisión de SO₂ y así relacionar las tasas de descarga de magma a la superficie; 7) movilidad de los elementos y compuestos contaminantes de los fluidos y productos eruptivos emitidos a la superficie, y de los cuales es posible conocer los mecanismos y alcances del transporte de contaminantes en el ambiente y sus implicaciones

para la salud; 8) uso de imágenes satelitales, para detectar anomalías térmicas y determinar patrones evolutivos en periodos eruptivos, con lo cual es posible cuantificar tasas de descarga de magma a la superficie.

2. Deformación en sistemas volcánicos: La actividad volcánica está directamente relacionada con cómo se produce la deformación en la corteza terrestre y cómo se distribuyen en ella las fuerzas tectónicas. De esta forma estudiamos la determinación de la distribución de estructuras y esfuerzos, la deformación de la corteza y de los edificios volcánicos. Las principales metodologías incluyen: 1) Mapeo de estructuras geológicas (locales y regionales) relacionadas con edificios volcánicos, para establecer la distribución de esfuerzos tectónicos; 2) uso de GPS e InSAR para establecer patrones de deformación local relacionados con eventos tectónicos de gran escala (e.g. terremotos) y/o procesos volcánicos individuales.

3. Peligros volcánicos: Los procesos volcánicos se pueden modelar para establecer las áreas que estos pueden alcanzar. Luego del mapeo geológico y conociendo la historia evolutiva de un volcán individual, identificación de sus productos eruptivos y magnitudes eruptivas pasadas, es posible aplicar modelos numéricos y probabilísticos. Estos permiten modelar futuras erupciones volcánicas bajo varios escenarios eruptivos, que son determinados por magnitudes eruptivas basadas en el registro eruptivo.

B. Ingeniería/Ciencias Sociales

4. Vulnerabilidad y resiliencia humana: La vulnerabilidad de la comunidad a la actividad volcánica dependerá de sus niveles de exposición, directamente relacionados con la ubicación y distancia a los centros volcánicos. La resiliencia de la comunidad ante eventos volcánicos dependerá de factores como el grado de afectación, tipo y distribución de la infraestructura, grado de preparación y organización de la comunidad, nivel de educación y conocimiento de la actividad volcánica, percepción de riesgo, creencias, etnias, cultura, entre otros. En esta área temática aplicamos métodos asociados a: 1) Ingeniería, evaluación de la distribución y respuesta de la infraestructura a eventos volcánicos; 2) Psicología, con la aplicación de encuestas para conocer

los parámetros sociales previamente señalados. Posteriormente, mediante cartografía superficial, es posible conocer la distribución de infraestructura y población en el territorio, y en consecuencia, con la combinación de la información con los mapas de peligrosidad volcánica, se generan los mapas de riesgo volcánico para las variables de infraestructura y comunidad (riesgo físico, territorial, social, entre otros). Finalmente, se establecen planes de emergencia y resiliencia, de acuerdo con los resultados obtenidos por las respuestas de infraestructura y los diferentes factores psicosociales previamente analizados.

C. Ciencias de la Comunicación

La transferencia de conocimiento a las instituciones públicas/privadas, medios de comunicación y público en general, es clave para enfrentar crisis, ordenamiento territorial, crear y ejecutar planes de emergencia, mitigación, educación y transmisión de información en un lenguaje sencillo y comprensible. Esta área temática desarrolla tareas de divulgación y difusión a través de diversas vías como medios digitales, escritos y audiovisuales. Esta área asesora a las demás áreas temáticas para simplificar el lenguaje de la información y el conocimiento producido en el Instituto.

REDES Y SISTEMAS DE VIGILANCIA VOLCÁNICA

Actualmente el Instituto cuenta diversas redes y sistemas de vigilancia de volcanes. A nivel de redes de vigilancia, estas se encuentran desplegadas de forma permanente en los siguientes volcanes localizados en el norte de Chile: 1) Ollagüe, constituido por 4 sismómetros, 1 cámara de vigilancia óptica (VO); 2) Lascar, constituido por 5 estaciones sísmicas, 1 cámara ultravioleta (UV), y 4 cámaras VO; 3) Lastarria, formada por 4 sismómetros, 1 cámara UV, y 1 cámara VO. Los volcanes Olca, San Pedro y Putana cuentan cada uno con 1 cámara VO de forma permanente.

Adicionalmente, el Instituto cuenta con el llamado "Observatorio Volcánico Móvil" constituido por 15 sismómetros, 2 cámaras UV, 2 espectrómetros de absorción óptica diferencial (DOAS), 1 cámara infrarroja (IR), y 1 drone equipado con 2 cámaras (1 VO y 1 IR), lo que permite estudiar sistemas volcánicos individuales en periodos de tiempo acotados.

El principal sistema activo de vigilancia volcánica corresponde al Volcanic Anomalies Monitoring System (VOLCANOMS; Layana et al., 2020), el cual corresponde a un sistema basado en el uso de imágenes satelitales Landsat para la detección de anomalías termales en volcanes activos. Actualmente se monitorean de forma permanente los volcanes Lascar, Planchón-Peteroa, Nevados de Chillán y Villarrica en Chile (e.g. Layana et al., 2020; Aguilera et al., 2021; Caro et al., in prep), y los volcanes Sabancaya y Ubinas en Perú.

CONTRIBUCIONES A LA MITIGACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO

El caso del volcán Guallatiri y el primer mapa de riesgos volcánicos en Chile

El volcán Guallatiri (18,4225 °S; 69,0920 °W; 6.071 m s.n.m.), localizado en la Región de Arica y Parinacota, norte de Chile, ha sido ubicado en el puesto 30 del ranking específico de peligrosidad volcánica (SERNAGEOMIN, 2020), siendo el tercero de mayor peligrosidad del norte de Chile. Este volcán presenta dos campos fumarólicos activos, localizados en el flanco sur y en la cima, los cuales generan dos plumas de gas permanentes. Adicionalmente, este volcán presenta un glaciar en su cima. El volcán Guallatiri comenzó su construcción hace 28040 ka, siendo la erupción de mayor magnitud la registrada hace 2,60,003 ka, la cual generó extensos depósitos de flujos piroclásticos, lahares, y depósitos de caída piroclástica, los cuales alcanzaron al menos 12 km de distancia desde la cima (Sepúlveda et al., 2021). Los poblados de Guallatiri y Ancuta se encuentran actualmente emplazados sobre estos depósitos de flujos piroclásticos. La actividad fumarólica actual (temperaturas de emisión entre 80 y 265 °C) se caracteriza por la emisión de gases de origen magmáticos e hidrotermales, dominados por la presencia de H₂O, CO₂, SO₂ y H₂S (Inostroza et al., 2020; 2021). Diversas emisiones termales se encuentran alrededor del edificio volcánico, donde son emitidas aguas del tipo bicarbonatadas sódicas y sulfatadas cálcicas (Inostroza et al., 2020).

El primer mapa de riesgos volcánicos publicado en Chile corresponde al desarrollado en el volcán Guallatiri (Reyes-Hardy et al., 2021). En esta

investigación, basado inicialmente en la evolución geológica de este volcán (Sepúlveda et al., 2021), se desarrolló un detallado mapa de peligros volcánicos, para luego, construir la base cartográfica para establecer la vulnerabilidad física, territorial y social de la zona de estudio, y con esto, construir los mapas de riesgo volcánico asociados a las vulnerabilidades previamente mencionadas. La base de trabajo de vulnerabilidad se basó en los datos del censo del año 2017, los elementos evaluados en dichos mapas temáticos incluyeron: 1) densidad de población, nivel educacional, e índice de dependencia (vulnerabilidad social); 2) número de casas (vulnerabilidad física); 3) catastro de infraestructura crítica (vulnerabilidad territorial).

El caso del volcán Lascar, el trabajo con la comunidad de Talabre y las experiencias de la explosión de enero de 2022

El volcán Lascar (23,3666 °S; 67,7463 °W; 5.592 m s.n.m.), localizado en la Región de Antofagasta, norte de Chile, es el 14° volcán del ranking específico de peligrosidad volcánica (SERNAGEOMIN, 2020), siendo el volcán de mayor peligrosidad en todo el norte de Chile. Esto se debe a la alta frecuencia eruptiva y la magnitud de algunas de sus erupciones, siendo la mayor registrada en tiempos históricos aquella ocurrida el 19-20 de abril de 1993; cuando una erupción sub-Pliniana de Índice de Explosividad (IEV) 4, alcanzó los 23 km de altura, y generó flujos piroclásticos que alcanzaron los 8 km de distancia desde el cráter central (Gardeweg y Medina, 1994). Actualmente, el volcán Lascar desgasifica de forma permanente, generando una pluma constante, la cual es emitida desde el cráter central activo. Desde el año 2013, este volcán presenta una actividad cíclica, caracterizada por la ocurrencia de explosiones menores (columnas eruptivas < 2 km de altura) y de corta duración (< 30 min), acompañadas por el incremento máximo de radiancia termal y tasas máximas de desgasificación de SO₂ (> 400 t/d; Layana, 2022). Posteriormente, la radiancia termal decrece hasta valores iguales a cero, mientras que las tasas de desgasificación no superan las 100 t/d. Finalmente, un nuevo ciclo inicia con la ocurrencia de nueva explosión, e incremento de la radiancia termal y las tasas de desgasificación (Layana, 2022).

Durante el día sábado 22 de enero de 2022, la comunidad de Talabre informó al instituto, la ocurrencia de incandescencia durante ese y los días previos en el cráter del volcán Lascar. Esta comunicación, basada en la directa relación entre la comunidad de dicho poblado y el instituto durante los últimos 4 años, permitió verificar mediante el procesamiento de imágenes Landsat, a través de la plataforma VOLCANOMS, el incremento en la radiancia termal y desgasificación, desde al menos el día 15 de enero de 2022. De acuerdo al comportamiento de los tres ciclos previos, se estableció como un posible escenario, la ocurrencia de explosiones menores en los siguientes días. Durante la mañana del domingo 23 de enero de 2022, una explosión menor, de unos 10 minutos de duración, generó una columna eruptiva de 1,5 km de altura sobre el cráter activo. Durante la siguiente semana, la desgasificación del volcán se mantuvo en niveles altos, con tasas de emisión de SO₂ de aproximadamente 450 t/d. La rápida comunicación entre la comunidad y el instituto permitió establecer un escenario probable, basado en los ciclos previos ocurridos desde el año 2013, y con ello, una reacción inmediata de las autoridades a cargo de la vigilancia volcánica (SERNAGEOMIN) y de la protección civil (ONEMI), quienes validaron la información emitida por el instituto, y establecer las acciones correspondientes ante este tipo de eventos. En particular, debido a la corta duración del evento, a la baja magnitud, y sobre todo basado en los parámetros de vigilancia volcánica realizado por SERNAGEOMIN, no fue necesario un cambio de alerta del volcán, y fue mantenido en nivel de alerta verde.

La experiencia previamente descrita, sumado a las actividades que se llevan a cabo en conjunto con la comunidad de Talabre, los cuales involucran el apoyo a las actividades turísticas, educación de la comunidad, pero sobre todo, a la evaluación de la vulnerabilidad del poblado ante eventos volcánicos (Esquivel et al., 2022), permiten demostrar que el trabajo colaborativo entre comunidades locales e instituciones científicas, logran incrementar el conocimiento de los procesos volcánicos, mejorar las capacidades de reacción ante posibles erupciones, y por sobre todo, aportar tanto a la vigilancia volcánica como al manejo de crisis llevado a cabo por la protección civil.

REFERENCIAS

- ▶ Aguilera, F. (2017). Grupo de Investigación en Volcanismo (GIV-UCN) de la Universidad Católica del Norte, Chile: En búsqueda de la integración multidisciplinaria. 12° Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra E-ICES 12, Mendoza, Argentina.
- ▶ Aguilera, F., Caro, J., Layana, S. (2021). The evolution of Peteroa volcano (Chile-Argentina) crater lakes between 1984 and 2020 based on Landsat and Planet Labs imagery analysis. *Frontiers in Earth Sciences* 9: 722056
- ▶ Caro, J., Aguilera, F., Layana, S., in prep. Controls of the explosive-effusive transitions in the eruptive cycles between 1972 and 2021 of Nevados de Chillán volcano (Chile).
- ▶ Esquivel, A., Aguilera, F., Ortiz, P., Rivera, M., Oemick, J., González, T., Bascuñan, I., Díaz, B. (2022). Evaluación de la exposición y vulnerabilidad asociada al volcán Lascar, Chile. IX Foro Internacional de Peligros Volcánicos "Volcanes y Sociedad: Riesgos y Prevención".
- ▶ Forte, P., Rodríguez, L., Jácome Paz, M., Caballero García, L., Alpízar 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: VII-XXXIII
- ▶ Gardeweg, M. & Medina, E., 1994. Erupción subpliniana del 19-20 abril de 1993. VI Congreso Geológico Chileno, Actas, Vol. 1, 299-304.
- ▶ Inostroza, M., Tassi, F., Aguilera, F., Sepúlveda, J., Capecciacci, F., Venturi, S., Capasso, G. (2020). Geochemistry of gas and water discharge from the magmatic-hydrothermal system of Guallatiri volcano, northern Chile. *Bulletin of Volcanology*, 82, 57.
- ▶ Inostroza, M., Rodríguez-Díaz, A., Aguilera, F., Pérez-Zárate, D. (2021). Evidence of boron-rich aqueous and crystalline phases associated with fumarolic emission at Guallatiri volcano, northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 416: 107270.
- ▶ Layana, S., Aguilera, F., Rojo, G., Vergara, A., Sapazar, P., Quispe, J., Urra, P., Urrutia, D. (2020). Volcanic Anomalies Monitoring System (VOLCANOMS), a low-cost volcanic monitoring system based on Landsat images. *Remote Sensing* 12: 1589.
- ▶ Layana, S. 2022. Procesos que controlan el balance térmico-magmático en sistemas volcánicos activos de la Zona Volcánica Central (ZVC). Tesis para optar al grado de doctor, Programa de doctorado en ciencias mención geología, Universidad Católica del Norte, 244 p.
- ▶ Reyes-Hardy, M.-P., Aguilera, F., Sepúlveda, J.P., Esquivel, A., Inostroza, 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: 103262.
- ▶ Sepúlveda, J., Aguilera, F., Inostroza, M., Reyes-Hardy, M.-P. 2021. Geological evolution of the Guallatiri volcano, Arica y Parinacota Region, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 107: 103117
- ▶ SERNAGEOMIN. (2020). Ranking de riesgo específico de volcanes activos en Chile.