

# Vigilancia volcánica y evaluación de peligros en Chile

Álvaro Amigo\*

*Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.*

## RESUMEN

El volcanismo en Chile ocurre en una amplia variedad de regímenes tectónicos, aunque principalmente en el contexto de la colisión de placas. Alrededor de 92 volcanes son considerados potencialmente activos y más de 30 presentan actividad histórica documentada en los últimos siglos. El Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) es la agencia gubernamental responsable de la evaluación de peligros y monitoreo de la actividad volcánica en el país. Como consecuencia de los impactos derivados de las erupciones volcánicas ocurridas hacia finales del siglo pasado, SERNAGEOMIN creó el Programa de Riesgo Volcánico y el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS). No obstante, a pesar de este esfuerzo la mayoría de los volcanes en Chile se mantenían sin monitoreo. Luego de los impactos derivados de la erupción del volcán Chaitén en 2008, un nuevo programa nacional fue creado con el fin de fortalecer la vigilancia y la evaluación de los peligros volcánicos en el país. En la última década, la respuesta a crisis volcánicas ha sido exitosa, proporcionando apoyo técnico en forma previa y durante erupciones.

This article is available in English: <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.0120> [PDF EN].

## 1 INTRODUCCIÓN

Chile se ubica a lo largo del margen sur-oeste del continente sudamericano. El proceso de subducción de las placas oceánica de Nazca y Antártica a lo largo del territorio chileno se caracteriza por una notable actividad sísmica, que incluye el mayor evento sísmico registrado instrumentalmente (Mw 9.5 en 1960), y estructuras tectónicas de gran escala derivadas de la convergencia de placas, como la cadena montañosa andina en el límite este del país, a lo largo de la frontera con Perú, Bolivia y Argentina. En los Andes, la actividad volcánica se agrupa en tres segmentos, definidos como las Zonas Volcánicas Central (ZVC), Sur (ZVS) y Austral (ZVA) (Figura 1). Estas zonas volcánicas están separadas por segmentos (aproximadamente entre 2–15° S y 27–33° S) con ausencia de volcanismo desde el Mioceno, como consecuencia de una subducción relativamente plana [Stern 2004]. El volcanismo en Chile, por lo tanto, cubre un amplio rango latitudinal a lo largo del cual parámetros corticales y de composición magmática varían sistemáticamente. Además, se han realizado subdivisiones del arco volcánico sobre la base de estructuras corticales y de la distribución, química y composición magmática de sus productos [Stern 2004]. Fuera del contexto andino, el volcanismo está presente en islas intra-oceánicas dentro de la placa de Nazca, en el Pacífico sureste; en la subducción de la Dorsal de Chile bajo la placa continental Sudamericana, lo cual genera ventanas astenosféricas bajo la corteza continental; y en torno a la Península Antártica, relacionado con la tectónica extensiva en los estrechos de Bransfield y Larsen, ambas regiones incluidas

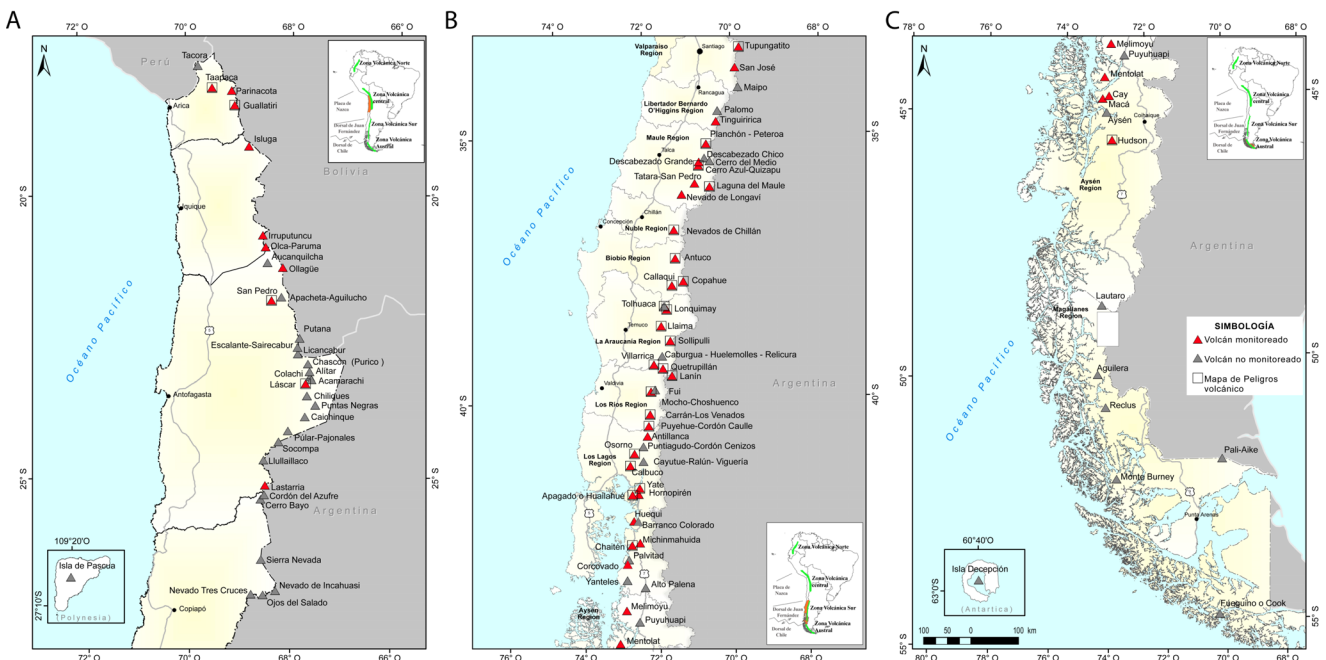
en de la denominada Reclamación Antártica Chilena.

### 1.1 Volcanes activos en Chile

De acuerdo con el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN), 92 volcanes son considerados activos dentro del territorio nacional (es decir, presentan actividad eruptiva documentada o probable durante el Holoceno). La mayoría de estos corresponden a estratovolcanes, complejos volcánicos y campos monogenéticos ubicados a lo largo de los Andes, entre 17–56° S y 75–67° O. Volcanes no-andinos incluyen a Rapa Nui (también conocida como Isla de Pascua 27.1° S; 109.1° O), ubicada a unos 350 km de la Dorsal Pacífica Este; el campo volcánico Pali Aike (52.1° S; 69.7° O) correspondiente al plateau basáltico de trasarco en la Patagonia sur; y la Isla Decepción (62.9° S; 60.3° O), una caldera emplazada en el extremo sur-occidental de las Islas Shetland del Sur, Estrecho de Bransfield, Antártica.

Los volcanes del norte de Chile pertenecen a la ZVC, que se extiende en el sur de Perú, oeste de Bolivia y noroeste de Argentina (Figura 1A). En Chile, los volcanes de la ZVC se distribuyen en más de 1000 km desde 17.7° a 27.1° S. El centro más activo es el volcán Lascar (23.36° S; 67.73° O), emplazado al oriente del Salar de Atacama, donde han ocurrido numerosas erupciones explosivas y ciclos eruptivos con formación de domos desde el siglo XX. En esta región, los volcanes están contruidos sobre el plateau Altiplano-Puna y, por lo tanto, muchos volcanes poseen altitudes por sobre los 6000 metros s.n.m., incluido el volcán Ojos del Salado, considerado la cumbre volcánica más alta del mundo

\* Autor de correspondencia: [alvaro.amigo@sernageomin.cl](mailto:alvaro.amigo@sernageomin.cl)



**Figura 1:** Volcanes activos de Chile considerando las zonas volcánicas Central (ZVC), Sur (ZVS) y Austral (ZVA) de los Andes; la Isla de Pascua (Pacífico Sureste) y la Isla Decepción (Antártida). Los triángulos rojos representan a los volcanes monitoreados en la actualidad, mientras que en cuadrados se muestran los volcanes con mapas de peligro publicados. Se indican regiones administrativas de Chile y sus capitales regionales. Rectángulo Blanco indica donde el límite Chile-Argentina aun no está aun definido: “Acuerdo entre la República de Chile y la República Argentina para precisar el recorrido del límite desde el Monte Fitz-Roy hasta el Cerro Daudet” (Buenos Aires, 16 de diciembre de 1998).

(27.1° S; 68.5° O; 6887 m s.n.m.).

Separada por aproximadamente 700 km de la ZVC, la ZVS comienza en el volcán Tupungatito (33.4° S; 69.8° O), en una latitud similar a la de la ciudad de Santiago, y termina donde subduce la Dorsal de Chile, en el punto triple donde convergen las placas Sudamericana, de Nazca y Antártica, al sur del volcán Hudson (45.9° S; 72.9° O). La ZVS conforma un segmento de arco continuo de 1400 km de longitud (Figura 1B–C). La mayoría de los volcanes activos se ubican en el borde occidental de la cadena andina, la cual conforma el límite chileno-argentino. Esto implica que la mayoría de los volcanes de la ZVS se emplazan completa o parcialmente en territorio chileno. En el segmento sur de la ZVS, el volcanismo se presenta asociado con la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui [Cembrano y Lara 2009]. Los volcanes más activos en la ZVS son el Villarrica y Llaima, ubicados en la Región de la Araucanía. Adicionalmente, las mayores erupciones Plinianas ocurridas desde el siglo pasado en Chile han tenido lugar en la ZVS, en los volcanes Quizapu (35.6° S; 70.7° O), en 1932, y Hudson, en 1991, [Hildreth y Drake 1992; Naranjo y Stern 1998]. A estas se suman otras erupciones explosivas de tamaño moderado ocurridas en las últimas décadas, en los volcanes Chaitén (2008–2009), Puyehue-Cordón Caulle (2011–2012), Villarrica (2015) y Calbuco (2015).

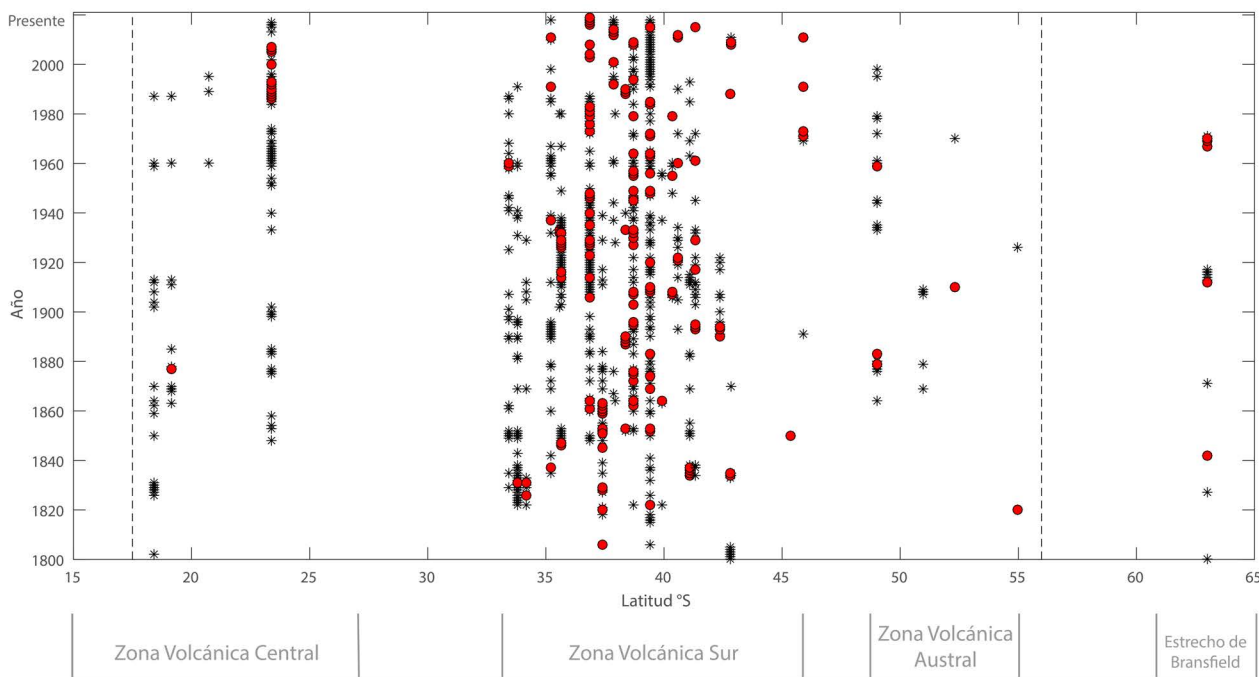
La ZVA conforma el segmento volcánico activo más

austral de los Andes, cuyo origen se deriva de la subducción de la placa Antártica bajo el territorio chileno, entre 49–55° S. Solo cinco volcanes se han reconocido en esta región, aunque centros volcánicos adicionales podrían mantenerse existir bajo los campos de hielo patagónicos (Figura 1C). Aunque no se han documentado erupciones en la ZVA en las últimas décadas, el volcán Lautaro (49.0° S; 73.5° O) corresponde al volcán más activo de esta zona, con registros de actividad explosiva desde el siglo XIX [Martinic 2008]. La presencia de pocos volcanes activos a lo largo de seis grados de latitud, y su relativa baja frecuencia eruptiva, sugieren una baja producción magmática en comparación con la ZVS.

En resumen, en Chile 35 volcanes han presentado actividad eruptiva documentada desde el siglo XVI, asociados a la ocurrencia de más de 400 eventos volcánicos [Petit-Breuilh 2004]. Una compilación de los eventos volcánicos ocurridos en territorio chileno desde el siglo XIX se presenta en la Figura 2.

## 1.2 Población expuesta a la actividad volcánica

Aproximadamente un 5% del territorio continental chileno es susceptible de ser afectado de manera directa por procesos volcánicos, como lahares y corrientes piroclásticas densas, y hasta un 35% podría ser afectado por caída de ceniza [Lara et al. 2011]. Lo anterior impli-



**Figura 2:** Recuento de erupciones volcánicas ocurridas en Chile desde el siglo XIX, ordenadas según latitud. Se incluye la Isla Decepción en Antártida. Los símbolos grises indican todos los eventos reportados desde diferentes fuentes. Sin embargo, para este periodo solo se han confirmado un total de 150 eventos (este estudio), representados por círculos rojos. Nótese que la ZVS de los Andes es mucho más activa que otras regiones en Chile.

ca que alrededor del 10% de la población se encuentra potencialmente expuesta a al menos un tipo de peligro volcánico. Aunque poca población habita dentro de un radio de 10 km de un volcán activo; el 60% lo hace en un radio menor a 100 km, y desde el siglo XIX al menos 15 erupciones han resultado en pérdida de vidas humanas, en los volcanes Lonquimay, Llaima, Villarrica, Mocho-Choshuenco, Carrán-Los Venados y Hudson. No obstante, este número puede ser mayor considerando la actividad volcánica en los últimos siglos y la escasez de registros escritos.

En el norte de Chile, la mayoría de volcanes se ubican en zonas remotas, excepto por el complejo volcánico Taapaca (18.11° S; 69.50° O), cercano a la localidad de Putre, uno de los principales pueblos en el altiplano Chileno [Clavero et al. 2004]. Debido a las condiciones atmosféricas imperantes, la ceniza derivada de actividad explosiva puede afectar el sur de Bolivia y noroeste de Argentina, como ha ocurrido en tiempos históricos (por ejemplo, erupción del volcán Láscar en 1993). Por otra parte, durante los meses de verano austral, la dispersión de ceniza hacia el oeste se ve favorecida y, por lo tanto, podría afectar eventualmente a zonas pobladas en Chile.

La ZVS es el segmento volcánico más activo en Chile, donde la probabilidad de ocurrencia de una erupción con  $IEV \geq 3$  en una década es mayor al 90% [Dzierma y Wehrmann 2012]. Por otra parte, más del 70% de la población de Chile se ubica en el valle central, entre las ciudades de Santiago y Puerto Montt, a distancias

menores a 100 km de los volcanes activos de la ZVS. Los principales peligros volcánicos se derivan de procesos como lahares, corrientes piroclásticas densas, flujos de lava y caída de ceniza, y por lo tanto, en los últimos siglos, alrededor de 500 víctimas fatales han ocurrido, principalmente como consecuencia de lahares.

Al sur del paralelo 42° S, aunque los volcanes están en zonas remotas, la población se ubica viento abajo de los mismos y, por lo tanto, erupciones explosivas pueden producir impactos significativos derivados de la caída de ceniza, tanto en las personas como en infraestructura y ganado, tal como ocurrió en las erupciones de los volcanes Hudson (1991) y Chaitén (2008–2009).

## 2 CRONOLOGÍA DE MONITOREO VOLCÁNICO Y EVALUACIÓN DE PELIGROS

El SERNAGEOMIN es la institución oficial a cargo del monitoreo y evaluación de los peligros volcánicos en Chile. En el año 1991, dentro de dicha institución, fue creado el Programa de Riesgo Volcánico con el fin de realizar estudios volcanológicos y cartografía geológica y de peligros en los volcanes más peligrosos. Posteriormente, en 1996, se creó el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) con el fin de monitorear los volcanes más peligrosos de la ZVS, en las cercanías de la ciudad de Temuco. A pesar de estos esfuerzos, OVDAS consistía en un grupo reducido de personas encargadas del monitoreo de una pequeña fracción de los volcanes más activos y peligrosos en Chile. El 1

de mayo del 2008 comenzó una erupción explosiva en el volcán Chaitén (42.83° S; 72.65° O) en la zona norte de la Patagonia, para la cual se registraron escasos precursores. En ese entonces, se conocía muy poco sobre la historia eruptiva del volcán y sus peligros asociados. Además, ante la carencia de una red instrumental, la erupción se asoció inicialmente al volcán vecino Michinmahuida. Sin estaciones de monitoreo cercanas, los sismos percibidos por los habitantes del pueblo de Chaitén (ubicado a 10 km del volcán) fueron los primeros indicios de una erupción inminente, la cual comenzó cerca de 24 horas después. La primera fase de la erupción fue altamente explosiva y se prolongó por unos 10 días. Alrededor de 5000 personas en riesgo no pudieron ser evacuadas por vía terrestre debido a la intensa caída de tefra y por limitaciones de conectividad, debiéndose organizar una evacuación marítima, la cual se completó el día 6 de mayo. Posteriormente, lluvias intensas removilizaron grandes cantidades de material volcánico depositado recientemente en los valles, lo que generó alteraciones en los cauces y flujos hiperconcentrados [Pierson et al. 2013]. La inundación y acumulación de cenizas destruyó cerca del 80% del pueblo, por lo que el gobierno de Chile declaró al pueblo de Chaitén no apto para ser habitado a fines de mayo del 2008. Sin embargo, a medida que la actividad volcánica disminuyó durante los meses siguientes, cientos de residentes retornaron y comenzaron la reconstrucción del pueblo. Finalmente, en el año 2012 el gobierno de Chile revirtió el orden de exclusión y declaró habitable el pueblo nuevamente [Major y Lara 2013].

Motivado por los impactos de la erupción de Chaitén, en el año 2009 el gobierno de Chile otorgó financiamiento para la creación de un nuevo programa para el monitoreo volcánico y evaluación de peligros denominado Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV), el cual incluyó a OVDAS (el cual fue reforzado) y un nuevo programa para realizar estudios geológicos y evaluación de peligros volcánicos.

### 2.1 Volcanes monitoreados por SERNAGEOMIN

La definición de los volcanes a monitorear en Chile se basa en la metodología denominada National Volcano Early Warning System (NVEWS) utilizada en EE.UU. [Ewert et al. 2005], la cual ha sido utilizada para evaluar de manera amplia los riesgos derivados de cada volcán, a través de una combinación de factores de peligro y de exposición. Este sistema ha sido modificado y adaptado durante la última década con el fin de ajustarlo al contexto volcánico de Chile, aunque a la fecha no se ha realizado una cuantificación directa de la vulnerabilidad asociada a la variable volcánica. Se llevó adelante una actualización metodológica con el objeto de reducir vacíos de información y mejorar la representación de la actividad volcánica y sus impactos, de acuerdo con la experiencia ganada desde la creación de la RNVV. En particular, para cuantificar la preponderancia de cier-

tos parámetros, se introdujeron técnicas de procesos jerárquicos, además de entrevistas con expertos y grupos de discusión. Se incluyeron, además, los resultados del censo nacional del año 2017, los cuales son la más reciente compilación demográfica en Chile y permiten la identificación de la infraestructura pública y privada en torno a los volcanes.

Tal como lo establece NVEWS, la amenaza volcánica relativa es la suma de los factores de peligro, multiplicada por la suma de los factores de exposición. En consecuencia, los volcanes son ordenados de acuerdo con una clasificación que permite destinar mayores recursos a aquellos volcanes que implican mayor riesgo, dada la dificultad de proveer monitoreo volcánico para todos los volcanes activos ubicados en territorio chileno. En resumen, los volcanes se han agrupado en cinco categorías de acuerdo con el puntaje obtenido: riesgo muy alto (14 volcanes), riesgo alto (16), riesgo moderado (20), riesgo bajo (23) y riesgo muy bajo (19). Todos los volcanes considerados de riesgo muy alto y alto se encuentran actualmente monitoreados, y redes de monitoreo más sencillas se han implementado en algunos volcanes dentro de las otras categorías, con objeto de establecer líneas base de su actividad. Para el año 2020, un total de 45 volcanes son monitoreados en tiempo real, los cuales se distribuyen desde extremo norte de Chile hasta la Región de Aysén, correspondiente a un segmento del arco volcánico andino superior a 3 000 km de extensión (Figura 1).

### 3 ¿CÓMO SE REALIZA EL MONITOREO VOLCÁNICO?

La RNVV aborda principalmente dos tópicos: 1) vigilancia instrumental en tiempo real y 2) evaluación de peligros, lo que incluye levantamiento de información geológica y modelación numérica. Mientras el grupo responsable del monitoreo volcánico se encuentra en el OVDAS, situado en la ciudad de Temuco, en el sur de Chile, el grupo a cargo de la evaluación de peligros se ubica en las oficinas centrales de SERNAGEOMIN en Santiago. En total, alrededor de 60 profesionales trabajan en la RNVV, cuyas áreas de especialización se describen en la (Tabla 1). Además, el personal de OVDAS es responsable de mantener el equipo de monitoreo en múltiples sitios y de asegurar la transmisión de información, desde los volcanes hacia el observatorio, con el fin de proveer alertas tempranas y orientar al organismo a cargo de protección civil en Chile (denominado Oficina Nacional de Emergencias, ONEMI), cuando se requieren acciones gubernamentales antes o durante crisis volcánicas.

También se realiza investigación científica al interior de la RNVV, orientada a una mejor comprensión de los procesos volcánicos [e.g. Bertin et al. 2015; Cardona et al. 2018; Franco et al. 2019]. Los volcanes en Chile representan un laboratorio natural para el estudio del

**Tabla 1:** Personal a cargo del monitoreo y evaluación de peligros volcánicos en Sernageomin.

Área	Personal							Adminis- trativos
	Áreas científicas			Ingeniería y técnicos				
	Geología/ Geografía	Sismo- logía	Geodesia	Geoqu- ímica	Electró- nica	Infor- mática	Asistentes logísticos	
Monitoreo y alertas tempranas	4	9	3	2	12	8		
Cartografía geológica y evaluación de peligros volcánicos	8	-	-	-	-	-	3	10

volcanismo, y por lo tanto, se ha establecido colaboración con diversos grupos científicos, lo que ha mejorado significativamente el entendimiento de procesos magmáticos y volcánicos [e.g. [Singer et al. 2014](#); [Delgado et al. 2016](#); [Aiuppa et al. 2017](#); [Moussallam et al. 2018](#)].

El monitoreo volcánico consiste en el levantamiento sistemático de datos geológicos, geoquímicos y geofísicos en los volcanes monitoreados, a partir de diversos sensores en terreno. En Chile, esto típicamente incluye recolección de ceniza durante explosiones menores, muestreo y análisis de gases y agua emitidos desde los cráteres y flancos de los volcanes; mediciones remotas de flujos de SO<sub>2</sub>; mediciones de razones de CO<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub> con alta resolución temporal; la localización y clasificación del tipo de sismicidad; mediciones de ondas acústicas en la atmósfera; determinación de la deformación de la superficie; y seguimiento de la actividad superficial a través de cámaras de vigilancia y térmicas ([Tabla 2](#)). La mayoría de las mediciones son realizadas en tiempo real, pero el equipo científico también realiza campañas para recolectar datos de manera regular (con frecuencias mensuales o anuales). Para administrar la información derivada desde la red instrumental, el equipo científico es apoyado por un grupo de analistas a cargo de la reducción de los datos y responsable de la vigilancia en régimen continuo. La supervisión del monitoreo se realiza, de manera regular, por profesionales de sismología y geología de mayor experiencia, quienes emiten reportes a protección civil en caso de reactivación volcánica. Aunque la sismología es la herramienta de monitoreo más relevante en Chile, la integración de los datos sísmicos con resultados de las otras técnicas descritas entrega la visión más completa del proceso en curso. En consecuencia, los datos disponibles son reunidos, analizados y discutidos durante reuniones de evaluación dos veces al mes, en las cuales un comité científico define la alerta técnica para cada volcán. Además de las redes instrumentales, también se analiza información proveniente de senso-

res satelitales, con diferentes escalas temporales, espaciales y espectrales. Imágenes visibles de alta resolución son analizadas regularmente (diaria y mensualmente), lo que incluye determinación de cambios de coloración en cráteres volcánicos, alteración de cobertura de hielo en volcanes, mapeo de depósitos volcánicos recientes y cambios morfológicos alrededor de centros de emisión activos. El personal científico también realiza interferometría SAR. Por otra parte, la detección de anomalías térmicas y absorción de radiación ultravioleta debido a la presencia de SO<sub>2</sub> en la atmósfera, son llevadas adelante regularmente desde las plataformas disponibles.

Con objeto de asegurar el capital humano necesario para desarrollar y mantener la experiencia en monitoreo y evaluación de peligros, SERNAGEOMIN ha dispuesto de recursos de manera continua, de manera que ambas tareas puedan mantenerse incluso en periodos de baja actividad volcánica. La transmisión de datos desde los volcanes se realiza en tiempo real a través de diferentes medios, principalmente vía satelital, fibra óptica y por conexión a internet. La adquisición de datos de las diversas disciplinas desplegadas en las estaciones de monitoreo es realizada por la configuración de programas específicos, algunos de ellos desarrollados en OVDAS y otros disponibles a través de la comunidad científica. Una vez que los datos son recibidos en tiempo real desde las estaciones, son almacenados en una base de datos relacional y puestos a disposición para el procesamiento del grupo de monitoreo. A la fecha, algunos datos de los volcanes de mayor riesgo se encuentran disponibles en la página web de SERNAGEOMIN. Sin embargo, periódicamente se publica un resumen de la actividad registrada en cada volcán monitoreado. Convenios entre SERNAGEOMIN e instituciones públicas y académicas pueden ser establecidos para acceder a la información disponible, tanto procesada como en formatos de origen. En estos casos, las solicitudes son evaluadas por un comité científico interno. Finalmente, toda la información pública gene-

**Tabla 2:** Resumen de las técnicas de monitoreo y número de instrumentos por cada volcán monitoreado. Los volcanes se agrupan de acuerdo con las categorías de riesgo (I a IV indican categorías desde muy alto riesgo a bajo respectivamente).

Instrumentos	Volcanes				Total
	I (13)	II (16)	III (10)	IV (6)	
<i>Vibración del terreno</i>					
Sísmica	77	64	19	15	175
Acelerómetros	4	-	-	-	4
<i>Deformación</i>					
GNSS	33	16	-	-	49
Inclinómetros	9	7	-	-	16
Puntos geodésicos	4	1	-	-	5
<i>Análisis y muestreo de fluidos</i>					
SO <sub>2</sub> (DOAS + cámara IR)	7	4	-	1	12
CO <sub>2</sub> /SO <sub>2</sub> (MultiGAS)	1	-	-	-	1
Muestreo in-situ	2	3	-	-	5
<i>Acústica</i>					
Infrasonido	3	3	-	-	6
<i>Cámaras de vigilancia</i>					
Webcams	28	17	7	4	56
Termales	2	1	-	-	3
<i>Muestreo de ceniza</i>					
Cenizómetros	5	3	-	-	8
<i>Cobertura satelital</i>					
Imágenes de alta resolución	14	14	10	14	52
Interferometría radar	9	1	-	-	10

rada por el gobierno de Chile está sujeta a la Ley de Transparencia, donde cualquier persona puede solicitar información específica en línea\*.

\* [http://www.sernageomin.cl/gobiernotransparente/solicitud\\_informacion.html](http://www.sernageomin.cl/gobiernotransparente/solicitud_informacion.html)

#### 4 GESTIÓN DEL PELIGRO VOLCÁNICO

La responsabilidad de generar mapas de peligros volcánicos en volcanes activos o potencialmente activos en territorio chileno recae en SERNAGEOMIN, aunque estudios desde la comunidad académica orientados a una mejor comprensión de los procesos volcánicos también son utilizados. Los mapas de peligro volcánico comunican información derivada de varios fenómenos volcánicos como caída de tefra/ceniza, piroclastos balísticos, flujos de lava, corrientes piroclásticas densas, lahares, avalanchas de escombros y susceptibilidad de formación de nuevos centros de emisión en campos volcánicos monogenéticos.

Con objeto de establecer escenarios eruptivos a largo plazo, se utiliza información histórica y geológica para obtener recurrencias eruptivas, magnitudes y estilos. En este sentido, se realizan campañas de campo para la recolección de muestras y para cartografiar la extensión de depósitos relacionados a eventos pasados. Los depósitos son analizados y fechados para establecer patrones de magnitud-recurrencia. Dado que el registro geológico puede estar sesgado hacia los eventos mayores, se utiliza modelación numérica como una herramienta complementaria, lo que típicamente se realiza a través de evaluaciones considerando escenarios para cada tipo de proceso volcánico. Finalmente, la información disponible es combinada, resultando en un despliegue simple de la zonificación cualitativa de peligros. Estos mapas han demostrado ser más efectivos para la comunicación con autoridades competentes, y son contruidos a partir de la combinación de fuentes geológicas y de modelación. La evaluación del peligro asociado a caída de tefra o ceniza se realiza a través de simulaciones numéricas estocásticas, que consideran diversos parámetros de entrada definidos por el usuario, como altura de columna, masa emitida y distribución granulométrica del material emitido. Los campos de vientos representativos para la región son tomados de bases de datos globales [e.g. Amigo 2013]. El resultado se muestra como la probabilidad de superar un cierto umbral (e.g. espesor en cm) para un escenario eruptivo dado. Una limitación de esta aproximación es que los resultados suelen ser complejos de interpretar y comunicar.

Los mapas de peligros volcánicos publicados por SERNAGEOMIN se someten a un proceso editorial que incluye revisión por pares y que asegura el cumplimiento de estándares de los contenidos gráficos y geospaciales. Los mapas son confeccionados con distintos niveles de detalle, incluyendo escala nacional (1:2000000), regional (1:125000) y a una escala del volcán (1:75000–1:50000). Desde el año 2009, se han publicado 28 mapas, centrándose en los volcanes más activos del país (Figura 1) y actualmente se prevé que dos mapas sean publicados cada año, hasta llegar a completar, en el año 2023, un total de 34 mapas para volcanes específicos. Todos los mapas de peligros volcánicos se encuentran disponibles en la página web institucional\*.

Actualmente, se encuentra en desarrollo un nuevo enfoque para evaluar las zonas de mayor riesgo en torno a los volcanes activos, considerando una escala de mayor detalle (por ejemplo 1:25000). Para esto, se requiere realizar un levantamiento de información geológica más detallado a la vez que contar con modelos de elevación digital de alta resolución para constreñir de mejor manera la geomorfología y las simulaciones numéricas de procesos volcánicos. Esta nueva generación de mapas está diseñada para cubrir, de manera más apropiada, necesidades de ordenamiento territorial, apoyar planes de emergencias y determinar los puntos de encuentro dentro de zonas de peligros. Estos últimos, son utilizados durante ejercicios de simulacros de erupciones volcánicas y constantemente sociabilizados en comunidades expuestas (Figura 3), lo que incrementa la efectividad de los planes de mitigación ante crisis volcánicas.

## 5 DIFUSIÓN Y DIVULGACIÓN DE INFORMACIÓN

En Chile, la posibilidad de ocurrencia de una erupción en el corto plazo se establece a través de un sistema de alertas, el cual provee información del estado de actividad volcánica, basado en el registro de precursores instrumentales para cada volcán monitoreado. Las alertas se definen como verde (nivel base), amarillo (actividad menor o moderada), naranja (aumento de la actividad interna o erupción menor) y roja (erupción mayor inminente o en proceso). Las alertas volcánicas son definidas por SERNAGEOMIN sobre la base del nivel de actividad volcánica, y el impacto potencial del evento esperado en caso de erupción. El objetivo de lo anterior es orientar de manera apropiada la preparación y respuesta de las autoridades y la ONEMI.

Actualmente, el estado de la actividad volcánica es disseminado al público a través de resúmenes de la actividad registrada (Reportes de Actividad Volcánica, RAV), los cuales se publican mensualmente para todos los volcanes en alerta verde, bi-semanalmente para los volcanes en alerta amarilla y en forma diaria para volcanes en alertas naranja y roja. Los reportes diarios también incluyen un mapa de peligro, donde se indican las zonas que podrían ser afectadas en el estado actual de actividad. Por otra parte, ante la ocurrencia de eventos inusuales, tales como sismos volcanotectónicos de magnitud relevante o eventos sísmicos de largo periodo, enjambres sísmicos, anomalías térmicas, explosiones, cambios significativos en la superficie de centros de emisión, entre otros, un reporte es emitido a la brevedad (Reporte Especial de Actividad Volcánica, REAV), independientemente del nivel de alerta. Finalmente, si se detecta o reporta actividad en volcanes no monitoreados por redes instrumentales, se realiza una declaración particular para cada caso (Minuta Ex-

cepcional Volcánica, MEV), que incluye la información disponible junto con recomendaciones para la colecta de nuevos datos para una mejor caracterización del fenómeno.

Los resúmenes emitidos en el año 2019 incluyeron 132 reportes mensuales para todos los volcanes en alerta verde. En este caso, los volcanes son agrupados en las 11 regiones administrativas y, por lo tanto, un único reporte incluye información de varios centros activos. Derivado de tres volcanes en alerta amarilla, se emitieron 25 reportes bi-semanales. Además, se emitieron 379 reportes diarios asociados a tres volcanes que estuvieron en alerta naranja, específicamente durante las crisis de los volcanes Nevados de Chillán, Copahue y Villarrica. Finalmente, 194 reportes especiales fueron emitidos y solo uno para un volcán no monitoreado.

De acuerdo con un protocolo formal de comunicación, todos los reportes son enviados de manera expedita a ONEMI, como ente coordinador de emergencia. ONEMI utiliza a su vez un sistema propio de alertas de protección civil. Cuando la ocasión lo requiere, por ejemplo, en un cambio de alerta, ONEMI reúne al comité operativo de emergencia, compuesto por autoridades político-administrativas y otros organismos involucrados en la respuesta ante una crisis. Durante estas reuniones, se pueden establecer áreas de restricción e incluso la eventual evacuación de la población. Además, se anuncian detalles de la respuesta gubernamental ante la crisis, así como las medidas a ser establecidas. Por otra parte, ante la ocurrencia de emisión significativa de ceniza a la atmósfera (usualmente por columnas eruptivas de alturas mayores a 2 km sobre un cráter activo), se confecciona una notificación para la aviación desde el observatorio volcanológico (VONA), para su envío a la autoridad de aviación civil.

Todos los reportes RAV y REAV son publicados en el sitio institucional de SERNAGEOMIN, donde son almacenados y puestos a disposición del público. Además de su publicación en el sitio\*, las redes sociales, como Twitter (@Sernageomin), se han transformado en una fuente primordial para la disseminación rápida de información relacionada con la emisión de reportes y zonas de peligro durante crisis volcánicas.

La RNVV está a menudo involucrada en actividades de divulgación a lo largo del país, no solo durante incremento de actividad o crisis volcánicas, sino también en periodos de relativa calma volcánica. Los programas de divulgación permiten, tanto a autoridades como a comunidades, comprender de mejor manera el riesgo potencial derivado de la actividad volcánica. Simulacros de re-activación volcánica son coordinados por ONEMI, los cuales involucran a las comunidades expuestas, con el fin de poner a prueba la planificación y respuesta ante futuras erupciones. Durante los últimos años, dos ferias de divulgación volcánica se han realizado cada año y, hasta el 2019, un total de ocho eventos se han lle-

\*<http://portalgeominbeta.sernageomin.cl/>

\*<http://www.sernageomin.cl/red-nacional-de-vigilancia-volcanica/>



**Figura 3:** Ejemplo de un mapa que indica la ubicación de puntos de encuentro dentro de una zona de alto peligro, utilizado en la actual crisis eruptiva del complejo volcánico Nevados de Chillán. Mapa realizado y difundido de manera coordinada por los organismos técnico (SERNAGEOMIN) y de protección civil.

vado a cabo en diferentes localidades del país, reuniendo más de 5000 personas, la mayoría niños. El objetivo de estos eventos es crear conciencia de los peligros volcánicos en las comunidades expuestas. Estas ferias se componen de diferentes módulos donde se muestran rocas y minerales, mapas y zonas de peligro en tres dimensiones, así como información sobre la historia eruptiva de los volcanes de la zona. En muchos casos, se organizan visitas de campo y talleres orientados a la reducción de riesgo de desastres. Adicionalmente a la entrega de información, se recolecta conocimiento local basado en experiencias derivadas de procesos volcánicos anteriores. Las ferias responden a esfuerzos

multi-disciplinarios que involucran el trabajo colaborativo con universidades, organizaciones de protección civil y gobiernos regionales, lo que ha mostrado ser una estrategia de comunicación muy efectiva.

## 6 NECESIDADES, DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Luego de una década desde la creación de la RNVV en Chile, existe diversos desafíos a considerar para los próximos años, los cuales se resume a continuación:

- Crecimiento continuo y sustentable de la red de

monitoreo volcánico, mejorando aquellas redes que se encuentren menos desarrolladas.

- Distribución de instrumentación en campo basado en el ranking actualizado de riesgo volcánico, evaluando los volcanes monitoreados actualmente, así como la inclusión de otros no monitoreados, como los centros activos ubicados en el extremo sur de Chile (Región de Magallanes) y en la Isla de Pascua (Rapa Nui).
- Fortalecer la relación con instituciones académicas, focalizándose en el análisis multiparamétrico de la actividad volcánica.
- Desarrollo de nuevas capacidades de operación utilizando técnicas de análisis de grandes volúmenes de datos, como aprendizaje automático semi-supervisado.
- Aplicación de métodos efectivos para la evaluación de riesgo y peligro involucrando a las comunidades expuestas.
- Uso de las redes sociales como una vía de diálogo bidireccional para comunicar y recibir información desde la población y desde otras fuentes.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado en su totalidad por el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNA-GEOMIN). Se agradecen especialmente las discusiones y reflexiones constructivas con muchos colegas de la RNVV y de OVDAS, al igual que el aporte de mucha de la información clave incluida en este trabajo. El autor agradece sinceramente a la ALVO por la invitación para preparar esta contribución y, de manera especial, el trabajo editorial de Oryaëlle Chevrel. Dos revisores externos anónimos ayudaron notablemente a mejorar y clarificar este manuscrito.

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos utilizados en este artículo están disponibles a través de requerimientos al autor de correspondencia.

## DERECHOS DE AUTOR

© Autor(es) 2021. Este artículo se distribuye bajo los términos de la [Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando se dé el crédito apropiado al/los autor(es) original(es) y la fuente, proporcionando un enlace a la Creative Commons License, e indicando si se realizaron cambios.

## REFERENCIAS

- Aiuppa, A., M. Bitetto, V. Francofonte, G. Velasquez, C. B. Parra, G. Giudice, M. Liuzzo, R. Moretti, Y. Moussallam, N. Peters et al. (2017). “A CO<sub>2</sub>-gas precursor to the March 2015 Villarrica volcano eruption”. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 18 (6), págs. 2120-2132. DOI: 10.1002/2017GC006892.
- Amigo, A. (2013). “Estimation of tephra-fall and lahar hazards at Hudson Volcano, southern Chile: Insights from numerical models”. *Geological Society of America Special Papers* 498, págs. 177-199. DOI: 10.1130/2013.2498(11).
- Bertin, D., L. Lara, D. Basualto, Á. Amigo, C. Cardona, L. Franco, F. Gil y J. Lazo (2015). “High effusion rates of the Cordón Caulle 2011–2012 eruption (Southern Andes) and their relation with the quasi-harmonic tremor”. *Geophysical Research Letters* 42 (17), págs. 7054-7063. DOI: 10.1002/2015GL064624.
- Cardona, C., A. Tassara, F. Gil-Cruz, L. Lara, S. Morales, P. Kohler y L. Franco (2018). “Crustal seismicity associated to rapid surface uplift at Laguna del Maule Volcanic Complex, Southern Volcanic Zone of the Andes”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 353, págs. 83-94. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2018.01.009.
- Cembrano, J. y L. Lara (2009). “The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: a review”. *Tectonophysics* 471 (1-2), págs. 96-113. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.02.038.
- Clavero, J., R. Sparks, M. Pringle, E. Polanco y M. Gardeweg (2004). “Evolution and volcanic hazards of Taapaca volcanic complex, central Andes of northern Chile”. *Journal of the Geological Society* 161 (4), págs. 603-618. DOI: 10.1144/0016-764902-065.
- Delgado, F., M. E. Pritchard, D. Basualto, J. Lazo, L. Córdova y L. E. Lara (2016). “Rapid reinflation following the 2011–2012 rhyodacite eruption at Cordón Caulle volcano (Southern Andes) imaged by InSAR: Evidence for magma reservoir refill”. *Geophysical Research Letters* 43 (18), págs. 9552-9562. DOI: 10.1002/2016GL070066.
- Dzierma, Y. y H. Wehrmann (2012). “On the likelihood of future eruptions in the Chilean Southern Volcanic Zone: interpreting the past century’s eruption record based on statistical analyses”. *Andean geology* 39 (3), págs. 380-393. DOI: 10.5027/andgeoV39n3-a02.
- Ewert, J. W., M. Guffanti y T. L. Murray (2005). *NVEWS: An assessment of volcanic threat and monitoring capabilities in the United States: framework for a National Volcano Early Warning System*. Inf. téc. US Geological Survey. DOI: 10.3133/ofr20051164.
- Franco, L., J. L. Palma, Lara, L. E., F. Gil-Cruz, C. Cardona, D. Basualto y J. San Martín (2019). “Eruptive sequence and seismic activity of Llaima volcano (Chile) during the 2007–2009 eruptive period: Inferences of the magmatic feeding system”. *Journal of Volcano-*

- logy and Geothermal Research* 379, págs. 90-105. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2019.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.04.014).
- Hildreth, W. y R. E. Drake (1992). “Volcán Quizapu, Chilean Andes”. *Bulletin of Volcanology* 54 (2), págs. 93-125. doi: [10.1007/bf00278002](https://doi.org/10.1007/bf00278002).
- Lara, L., G. Orozco, A. Amigo y C. Silva (2011). “Peligras Volcánicas de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, No. 13: 34 p., 1 mapa escala 1: 2.000.000”. *Santiago*.
- Major, J. J. y L. E. Lara (2013). “Revisión del volcán Chaitén y su erupción 2008-2009. Chile”. *Andean geology* 40 (2), págs. 196-215. doi: [10.5027/andgeoV40n2-a01](https://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a01).
- Martinic, M. (2008). “Registro histiográfico de antecedentes volcánicos y sísmicos en la Patagonia Austral y la Tierra del Fuego”. *Magallania* 36, págs. 5-18. doi: [10.4067/S0718-22442008000200001](https://doi.org/10.4067/S0718-22442008000200001).
- Moussallam, Y., P. Bani, C. I. Schipper, C. Cardona, L. Franco, T. Barnie, Á. Amigo, A. Curtis, N. Peters, A. Aiuppa et al. (2018). “Unrest at the Nevados de Chillán volcanic complex: a failed or yet to unfold magmatic eruption?” *Volcanica*. doi: [10.30909/vol.01.01.1932](https://doi.org/10.30909/vol.01.01.1932).
- Naranjo, J. A. y C. R. Stern (1998). “Holocene explosive activity of Hudson Volcano, southern Andes”. *Bulletin of Volcanology* 59 (4), págs. 291-306. doi: [10.1007/s004450050193](https://doi.org/10.1007/s004450050193).
- Petit-Breuilh, M. E. (2004). “La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (siglos XVI al XX)”. *Servicio de Publicaciones del Exmo. Cabildo Insular de Lanzarote-Casa de los volcanes*.
- Pierson, T. C., J. J. Major, Á. Amigo y H. Moreno (2013). “Acute sedimentation response to rainfall following the explosive phase of the 2008–2009 eruption of Chaitén volcano, Chile”. *Bulletin of Volcanology* 75 (5), págs. 1-17. doi: [10.1007/s00445-013-0723-4](https://doi.org/10.1007/s00445-013-0723-4).
- Singer, B. S., N. L. Andersen, H. Le Mével, K. L. Feigl, C. DeMets, B. Tikoff, C. H. Thurber, B. R. Jicha, C. Cardona, L. Córdova et al. (2014). “Dynamics of a large, restless, rhyolitic magma system at Laguna del Maule, southern Andes, Chile”. *GSA today* 24 (12), págs. 4-10. doi: [10.1130/GSATG216A.1](https://doi.org/10.1130/GSATG216A.1).
- Stern, C. R. (2004). “Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting”. *Revista geológica de Chile* 31 (2), págs. 161-206. doi: [10.4067/S0716-02082004000200001](https://doi.org/10.4067/S0716-02082004000200001).