

Hacia el desarrollo del primer observatorio volcanológico permanente en Argentina

Sebastian Garcia^{*α}, Gabriela Badi^{α,β}

^αOAVV, Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Av. General Paz 5445 (colectora) Parque Tecnológico Miguelete (Edificio 25), San Martín, Buenos Aires, Argentina.

^βDpto. de Sismología, Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Av. Centenario s/n, Paseo del Bosque, La Plata, Argentina.

RESUMEN

Argentina es un país que presenta una compleja situación con respecto al riesgo volcánico, donde un total de 38 volcanes son considerados activos. Aunque Argentina no tiene ciudades importantes cerca de estos volcanes, el continuo incremento de la actividad económica y la infraestructura cerca de la Cordillera de los Andes, generará en el futuro un aumento en la exposición a estos peligros. Además, la actividad volcánica en la frontera entre Argentina y Chile constituye un desafío único en relación con el monitoreo de volcanes y la gestión de emergencias volcánicas. Adicionalmente, debido a los patrones de circulación atmosférica en la región (desde el oeste hacia el este), Argentina está expuesta a la caída y dispersión de cenizas de las frecuentes erupciones explosivas de volcanes chilenos. Teniendo esto en cuenta, el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) decidió crear e implementar un programa de evaluación de amenazas volcánicas, que incluye, la creación del primer observatorio permanente de volcanes para el país, el Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV). Previamente, el Observatorio Volcanológico de la Isla Decepción fue creado como una colaboración entre el Instituto Antártico Argentino (IAA) y el Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España (CSIC).

This article is available in English at: <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.2148> [PDF EN].

1 INTRODUCCIÓN

La actividad volcánica en la región continental argentina se encuentra principalmente vinculada al arco volcánico Andino a lo largo del margen Pacífico. Aquí, la subducción de las placas de Nazca y Antártica por debajo de la placa Sudamericana, controlan el volcanismo activo, el cual está distribuido en tres zonas volcánicas [Barazangi e Isacks 1976; Jordan et al. 1983; Isacks et al. 1986; Davidson y de Silva 1995; Allmendinger et al. 1997; Ramos et al. 2002; Stern 2004]. Hacia el norte, el extremo sur de la Zona Volcánica Central (ZVC) se extiende desde los 16 a los 28° S e incluye los centros volcánicos activos de la región Altiplano-Puna [Coira et al. 1993; Kay et al. 1994].

La Zona Volcánica Sur (ZVS) incluye los volcanes ubicados entre los 33 y los 46° S y es considerada la zona más activa. En el extremo sur del continente, la Zona Volcánica Austral (ZVA, 49–56° S) se encuentra asociada a la subducción de la placa Antártica. La ZVA se caracteriza por una baja velocidad de subducción y por la presencia de pocos centros volcánicos aislados [Stern y Kilian 1996]. Se observan dos segmentos sin actividad reciente en el arco volcánico activo a lo largo de este segmento de los Andes: uno entre la ZVC y la ZVS (28–33° 15' S), conocido como el segmento de subducción

subhorizontal Pampeano [Jordan et al. 1983; Ramos et al. 2002], y otro entre la ZVS y la ZVA (46–49° S), conocido como el *gap* volcánico Patagónico [Stern 2004]. Hacia el sur, en la Antártida y áreas subantárticas, se reconocen dos zonas volcánicas con frecuentes erupciones volcánicas: las islas Decepción y Pingüino, asociadas a las Islas Shetland del Sur, en el Mar de la Flota o *rift* de Bransfield [Viramonte et al. 1974b; Ortiz Ramis et al. 1992; De Rosa et al. 1995; Aparicio et al. 1997]. Otro arco volcánico con varios volcanes activos se ubica en las Antillas del Sur (Islas Sandwich del Sur) e incluye el volcán Curry en la Isla Zavodovski, el volcán Belinda en la Isla Jorge, el volcán Sourabaya en la Isla Blanca, etc.; asociados a la subducción de la microplaca de Sandwich, localizada entre las placas Sudamericana, Antártica y de Scotia [Baker 1990; LeMasurier et al. 1990; Leat et al. 2000; Canclini 2009].

En el área continental argentina existen aproximadamente 120 volcanes considerados activos (i.e. con actividad histórica documentada, desde la llegada de los españoles hace entre 500 y 200 años, y/o con evidencias geológicas de actividad durante el Holoceno) en este segmento de los Andes. Veinte de estos volcanes están ubicados íntegramente en Argentina, mientras que 18 se encuentran en la frontera entre Chile y Argentina, y por tanto se consideran volcanes binacionales. Los volcanes restantes están ubicados completamente en te-

* Autor de correspondencia: sebastian.garcia@segemar.gov.ar

territorio chileno [Elissondo y Villegas 2011; Elissondo y Farías 2016, Figura 1].

A pesar de que pocos volcanes se ubican dentro de las fronteras argentinas, grandes áreas del territorio argentino y su espacio aéreo se encuentran afectados por la ceniza volcánica de volcanes chilenos, debido a los patrones de circulación atmosférica regionales, con vientos dominantes del oeste [e.g. Scasso et al. 1994; Viramonte et al. 2001; Bonadonna et al. 2015]. Aunque la dispersión y caída de ceniza usualmente no generan pérdida de vidas humanas, estas pueden tener importantes efectos socio-económicos y ambientales [e.g. Elissondo et al. 2016].

La evaluación de los peligros volcánicos en Argentina aún se encuentra incompleta. La ocurrencia y extensión de peligros volcánicos en áreas proximales y medias respecto al centro volcánico, tales como flujos piroclásticos, lahares y flujos de lava, aún no han sido debidamente documentados. Esto podría atribuirse en parte a la densidad de población relativamente baja cerca de los volcanes en Argentina. Sin embargo, el progresivo incremento de la actividad económica y la inversión en infraestructura (turismo, minería, gasoductos y oleoductos, nuevos pasos fronterizos internacionales, represas hidroeléctricas, entre otros) en la región andina durante las últimas décadas está aumentando la exposición a estos peligros.

A su vez, el volcanismo antártico y subantártico es muy importante para la seguridad de la aeronavegación, específicamente debido a los vuelos transpolares. Esta área se encuentra principalmente bajo la vigilancia del Instituto Antártico Argentino, el Centro de Aviso de Cenizas Volcánicas de Buenos Aires (VAAC Buenos Aires) y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

A lo largo de los últimos 88 años, varias erupciones volcánicas han afectado el territorio argentino (Quizapu 1932, Isla Decepción 1967, 1969, 1970; Láscar 1986–1993; Hudson 1991; Chaitén 2008; Planchón-Peteroa 1991, 2011, 2018; Cordón Caulle 2011, Copahue 2012; Calbuco 2015). Estas erupciones no solo afectaron directamente a miles de personas y produjeron pérdidas económicas y materiales por millones de dólares [Viramonte et al. 1974b; Hildreth y Drake 1992; Ortiz Ramís et al. 1992; De Rosa et al. 1995; Aparicio et al. 1997; Barbier 2011; Durant et al. 2012; Ministerio del Interior 2012; Collini et al. 2013; Osoreo et al. 2013; Elissondo et al. 2016; Reckziegel et al. 2016; Romero et al. 2016], sino también pusieron a prueba a las autoridades civiles locales y a las poblaciones afectadas indirectamente en todo el país (Figura 1).

Un ejemplo icónico de esto es la erupción explosiva del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulleel 4 de junio de 2011, que desencadenó la evacuación espontánea de ~ 4000 habitantes de Villa La Angostura, ubicada a 50 km de distancia hacia el sudeste [Collini et al. 2013; Córdoba et al. 2015; Elissondo et al. 2016]. La nube de cenizas y la caída de cenizas asociada también

llegaron a las ciudades de Villa Traful, San Carlos de Bariloche e incluso a Buenos Aires, obligando al cierre de aeropuertos locales y a la cancelación de vuelos locales e internacionales por parte de las aerolíneas, generando enormes pérdidas económicas. El tráfico terrestre también se vio afectado en múltiples escalas producto de la caída de tefra, incluso provocando el cierre del paso fronterizo internacional Cardenal Samoré durante casi tres meses. Otros impactos asociados con la acumulación de tefra incluyeron: colapso de decenas de techos precarios, obstrucción de los sistemas de drenaje urbano, contaminación de los suministros de agua e interrupción del suministro eléctrico [Wilson et al. 2013; Craig et al. 2016; Elissondo et al. 2016]. Los impactos en la agricultura, la ganadería y los ecosistemas también fueron severos, e incluyeron la cobertura de tierras agrícolas, provocando escasez de agua y forraje para los animales, y resultando en la pérdida de animales, disminución en las tasas de natalidad y aumento de la depredación. Casi diez años después, las comunidades y ecosistemas afectados por esta erupción aún se encuentran en recuperación [Wilson et al. 2013; Craig et al. 2016; Forte et al. 2018; Dominguez et al. 2020].

Este artículo detalla la evolución de las actividades nacionales de gestión del riesgo volcánico realizadas por el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) desde la década de 1990 en el territorio continental argentino. Esta evolución está marcada por algunas de las erupciones volcánicas históricas descritas anteriormente. En la actualidad, la gestión del riesgo volcánico en SEGEMAR es parte del Programa de Evaluación de las Amenazas Volcánicas, que consta de dos ramas principales: el Grupo de Geología y Peligros Volcánicos y el Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV).

2 EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO EN ARGENTINA

2.1 Historia de la gestión del riesgo volcánico en Argentina

La investigación del volcanismo en Argentina fue realizada históricamente por diferentes grupos formados por universidades y por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICET) de Argentina (Tabla 1).

Las crisis eruptivas de 1991 producidas por la erupción del volcán Hudson y, en menor medida, por el Complejo Volcánico Planchón-Peteroa, mostraron a las autoridades civiles en Argentina el enorme daño que puede ocasionar la caída de ceniza. También demostraron el limitado conocimiento geológico y el bajo grado institucional de preparación de Argentina para lidiar con las amenazas volcánicas. En respuesta a esto, SEGEMAR, con el apoyo del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN), desa-

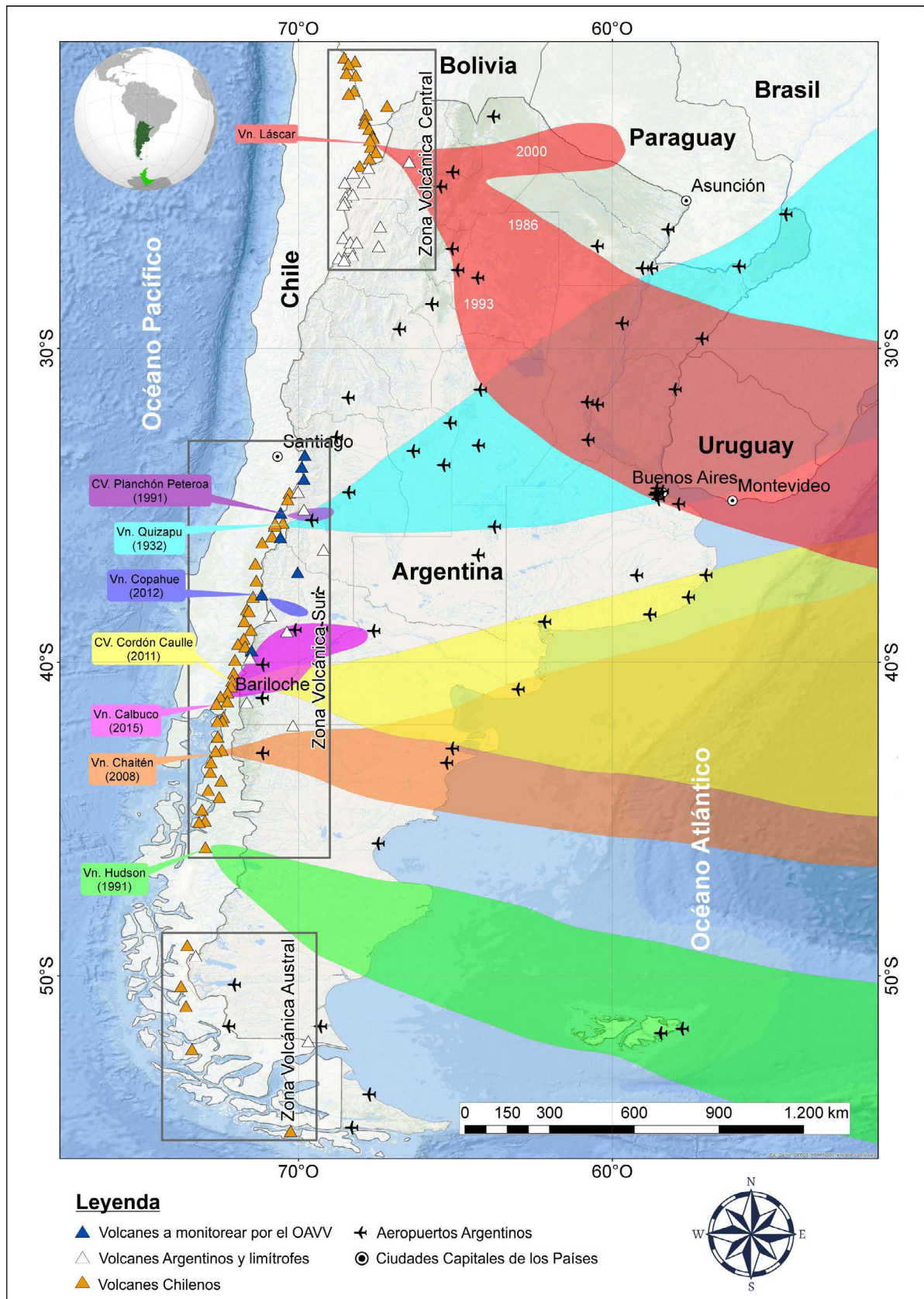


Figura 1: Mapa de las regiones de dispersión de cenizas de las erupciones históricas más importantes que afectaron territorio argentino (modificado de Viramonte et al. [2001]).

Tabla 1: Algunos de los grupos de investigación, centros o institutos de dependencia universitaria o mixta (universidad y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas, CONICET) que históricamente realizaron investigación y monitoreo volcánico en Argentina.

Departamento, Centro o Instituto	Institución o Universidad	
Grupo de Estudio y Seguimiento de Volcanes Activos (GESVA)	Universidad de Buenos Aires (UBA)	CONICET
Centro Nacional Patagónico (CENPAT)	Universidad Nacional del Comahue (UNCOMA)	CONICET
Instituto Andino Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales (IPATEC)	Universidad Nacional del Comahue (UNCOMA)	CONICET
Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA)	Universidad Nacional de Córdoba (UNC)	CONICET
Instituto de Capacitación Especial y Desarrollo de Ingeniería Asistida por Computadora (CEDIAC)	Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo)	CONICET
Instituto de Ecorregiones Andinas (INECOA)	Universidad Nacional de Jujuy (UNJu)	CONICET
Grupo de Sismología Volcánica, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG)	Universidad Nacional de La Plata (UNLP)	
Centro de Investigaciones Geológicas (CIG), Facultad de Ciencias Naturales y Museo (FCNyM)	Universidad Nacional de La Plata (UNLP)	CONICET
Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología (IIPG)	Universidad Nacional de Río Negro (UNRN)	CONICET
Instituto Geonorte – Instituto de Bio y Geociencias del Noroeste Argentino (IBIGEO)	Universidad Nacional de Salta (UNSA)	CONICET
Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo	Universidad Nacional de Tucumán (UNT)	CONICET

rolló su primer programa sinóptico para estudiar las amenazas volcánicas que presentan los volcanes argentinos [Haller et al. 1991; 1994]. El primer resultado de este esfuerzo fue el primer mapa binacional de peligros volcánicos del volcán Planchón-Peteroa [Naranjo et al. 1999]. Durante los años siguientes, se llevaron a cabo proyectos específicos en otros volcanes activos, como Copahue [Sruoga y Consoli 2011], Maipo [Sruoga et al. 2012], Lanín y el Complejo Volcánico Laguna del Maule [Fierstein et al. 2013; Sruoga et al. 2015] con el fin de reconstruir su estratigrafía eruptiva holocena y evaluar sus peligros volcánicos.

2.2 Ranking de riesgo relativo (amenaza) para Argentina

Después de la reactivación de los volcanes Llaima y Chaitén en Chile en 2008, SEGEMAR implementó su Programa de Evaluación de Amenazas Volcánicas con el objetivo de evaluar los posibles impactos ambientales y socioeconómicos asociados con las amenazas/peligros

volcánicos para el país. Una rápida evaluación del riesgo volcánico fue realizada a nivel nacional—para la porción continental—por [Elissondo y Villegas \[2011\]](#) y por [Elissondo y Farías \[2016\]](#), permitiendo identificar los volcanes que poseen mayor riesgo y organizar futuros proyectos de investigación y actividades de monitoreo volcánico. Esta evaluación ha sentado las bases sobre las que se desarrollan los programas estratégicos relacionados con la gestión del riesgo volcánico en Argentina.

La metodología se basó en el Sistema de Evaluación del Riesgo Relativo aplicado para el *National Volcano Early Warning System* (NVEWS), desarrollado por el *United States Geological Survey* (USGS; [Ewert et al. 2005; Ewert 2007]), y también aplicado en otros países, incluyendo Chile [Lara et al. 2006], Nueva Zelanda [Miller 2011], y Perú [Macedo Sánchez et al. 2016], entre otros. En este contexto, el riesgo relativo se refiere al riesgo cualitativo que un volcán representa para las personas y la propiedad. Se obtiene una clasificación numérica mediante el análisis de diferentes factores de exposición y peligro para cada volcán. El valor de riesgo

relativo se define por el producto de estos dos factores [Ewert et al. 2005; Ewert 2007].

La evaluación se realizó para 38 volcanes ubicados en territorio continental argentino y en su frontera internacional (Tabla 2). Siguiendo la metodología del NVEWS, se analizaron varios factores de riesgo y exposición. La evaluación de la peligrosidad incluyó el análisis de 15 factores: el tipo de volcán, la frecuencia y magnitud de las erupciones, los productos eruptivos emitidos en el Holoceno, y el registro histórico de “intranquilidad” (*unrest*). Las fuentes de información fueron la base de datos del *Smithsonian Global Volcanism Program*, las hojas geológicas del SEGEMAR y numerosas publicaciones científicas [Elissondo y Farías 2016]. La exposición se calculó sobre el análisis de 10 factores, incluyendo la población asentada en un radio de 30 km alrededor del volcán, la ocurrencia de fatalidades o evacuaciones durante reactivaciones o erupciones históricas, la exposición local y regional de la aviación, la infraestructura de transporte y energía, y las áreas naturales o sensibles desde el punto de vista de su desarrollo económico. Esta información se obtuvo mediante la recopilación de datos de diferentes instituciones: Instituto Nacional de Estadística y Censos, Instituto Geográfico Nacional (IGN), Ministerio de Energía, Administración de Parques Nacionales, Organismo Regulador del Sistema Nacional de Aeropuertos, Organización de Aviación Civil Internacional (*Air Routes ICAO GIS Traffic Flow 2015*) [Elissondo y Farías 2016]. Los resultados de la evaluación permitieron una subdivisión de los volcanes analizados en cuatro categorías de riesgo relativo, incluyendo 2 volcanes de muy alto riesgo, 6 volcanes de alto riesgo, 9 volcanes de riesgo moderado y 21 volcanes de bajo riesgo. Sin embargo, debe tenerse en consideración que el nivel de conocimiento que se tiene de los volcanes de muy alto y alto riesgo es muy superior al de aquellos de bajo riesgo (Tabla 2).

2.3 OAVV: el observatorio volcanológico más joven de América Latina

Posterior a la erupción del Cordón Caulle de 2011, una idea comenzó a desarrollarse dentro de SEGEMAR para la creación de un área especializada y personal dedicada al monitoreo de los volcanes que podrían afectar a la Argentina. Pero no fue hasta la erupción del volcán Copahue, el 22 de diciembre de 2012, que el desarrollo del OAVV comenzó. El objetivo era crear una institución capaz de estudiar y monitorear la actividad de los volcanes argentinos continentales, a través de la instrumentación de los que representaran el mayor riesgo para el país.

Para acompañar el inicio del proyecto del OAVV, el 27 de enero de 2013, durante la cumbre de la Comunidad de Estados Latinoamericanos y Caribeños en Santiago de Chile, autoridades gubernamentales de Chile y Argentina firmaron un convenio binacional para el control, monitoreo y gestión de las erupciones volcá-

nicas en la región fronteriza entre los dos países. Este acuerdo representa un hito en materia de monitoreo y gestión del riesgo volcánico entre ambos países, y ha sentado bases sólidas para la cooperación entre SEGEMAR y SERNAGEOMIN (ver también Amigo [2021] en este volumen).

El primer paso del proyecto fue decidir qué volcanes debían monitorearse. La decisión se basó en los resultados obtenidos del Ranking de Riesgo Volcánico Relativo. De acuerdo con el ranking, un total de 15 volcanes, entre los 38 volcanes argentinos, poseen riesgo muy alto a moderado (Tabla 2). Sin embargo, debido a la gran extensión geográfica del arco volcánico activo en el país, y por ende del área a monitorear, la inversión requerida para la instalación y mantenimiento de las estaciones obligó a una estrategia de despliegue por etapas. Por lo tanto, la primera etapa incluye los ocho volcanes más peligrosos de la ZVS, que tienen erupciones más frecuentes, y también que están más cerca de grandes poblaciones, infraestructura y actividades económicas (??): los volcanes Lanin, Copahue, Tromen y Laguna del Maule (Provincia del Neuquén) y los volcanes Planchón-Peteroa, Maipo, Tupungatito y San José (Provincia de Mendoza; [García et al. 2017]). La segunda etapa del proyecto contempla la extensión de las redes de monitoreo a los volcanes de riesgo muy alto a moderado ubicados en la ZVC.

El paso siguiente consistió en definir el nivel deseado de instrumentación terrestre para cada volcán, así como en mejorar el desarrollo de capacidades en metodologías satelitales—InSAR (Interferometría radar de apertura sintética), imágenes de anomalías térmicas y anomalías satelitales de SO₂—para la vigilancia remota de aquellos volcanes que no se pretende instrumentar. Las decisiones se tomaron en base a los criterios utilizados por el USGS [Guffanti et al. 2010], junto con otras experiencias de diferentes observatorios en América Latina, y se ajustaron al recurso económico disponible. De esta manera, los ocho volcanes de mayor prioridad seleccionados se dividieron en tres categorías de acuerdo con su índice de riesgo dentro del Ranking de Riesgo Volcánico Relativo. Cada categoría presenta diferentes niveles / cantidad de instrumentación en base a su puntuación en el ranking.

Para los volcanes de Categoría I (Lanín, Copahue, Planchón-Peteroa, Maipo, Laguna del Maule) que presentan la mayor amenaza, se propuso una instrumentación terrestre que permita un muy alto nivel de monitoreo, con la posibilidad de definir patrones precursoros de actividad eruptiva, y además realizar investigaciones científicas que permitan modelar procesos volcánicos complejos, teniendo en cuenta también la necesidad de redundancia. Los volcanes clasificados como Categoría II (Tupungatito, San José) poseerán tipos de instrumentación similares a los de Categoría I, pero con una cobertura menos densa, por lo que también será posible determinar patrones precursoros, pero la investigación se limitará a la documentación general de los procesos

Tabla 2: Ranking de Riesgo Relativo para Argentina continental desarrollado por [Elissondo et al. \[2016\]](#). Arg-Chile indica volcanes ubicados dentro de la región fronteriza cerca de o en la frontera internacional.

Ranking	Nombre del Volcán	Ubicación	Provincia en Argentina	Riesgo	Exposición	Peligrosidad
1	Copahue	Arg-Chile	Neuquén	170.92	13.15	13
2	Planchón-Peteroa	Arg-Chile	Mendoza	154.95	10.33	15
3	Laguna del Maule	Arg-Chile	Mendoza	133.77	9.55	14
4	Tupungatito	Arg-Chile	Mendoza	119.19	9.93	12
5	Lanín	Arg-Chile	Neuquén	118.70	11.87	10
6	Maipo	Arg-Chile	Mendoza	116.00	11.60	10
7	San José	Arg-Chile	Mendoza	85.54	8.55	10
8	CV Cerro Blanco	Argentina	Catamarca	84.21	8.42	10
9	Lastarria	Arg-Chile	Catamarca	65.78	6.58	10
10	Viedma	Argentina	Neuquén	64.26	10.71	6
11	Tuzgle	Argentina	Jujuy	62.96	12.59	5
12	Tromen	Argentina	Neuquén	62.07	12.41	5
13	Socompa	Arg-Chile	Salta	56.38	8.05	7
14	Ojos del Salado	Arg-Chile	Catamarca	51.64	5.74	9
15	Overo	Argentina	Mendoza	48.16	9.63	5
16	Llullaillaco	Arg-Chile	Salta	35.82	5.97	6
17	Aracar	Argentina	Salta	28.35	7.09	4
18	CV Palei-Aike	Arg-Chile	Santa Cruz	15.15	5.05	3
19	G Huanquihue	Argentina	Neuquén	13.77	6.89	2
20	Tipas	Argentina	Catamarca	13.76	6.88	2
21	Cordón del Azufre	Arg-Chile	Catamarca	11.48	5.74	2
22	Cerro Bayo	Arg-Chile	Catamarca	11.46	5.73	2
23	Infiernillo	Argentina	Mendoza	11.39	5.70	2
24	Payún Matrú	Argentina	Mendoza	8.51	4.26	2
25	Cerro Volcánico	Argentina	Rio Negro	8.51	8.51	1
26	Laguna Blanca	Argentina	Neuquén	8.31	8.31	1
27	Nevado de Incahuasi	Arg-Chile	Catamarca	8.22	8.22	1
28	Cerro Escorial	Arg-Chile	Salta	7.55	7.55	1
29	Peinado	Argentina	Catamarca	6.45	6.45	1
30	Cerro El Cóndor	Argentina	Catamarca	5.89	5.89	1
31	Sierra Nevada	Arg-Chile	Catamarca	5.74	5.74	1
32	Falso Azufre	Arg-Chile	Catamarca	5.72	5.72	1
33	El Solo	Argentina	Catamarca	5.68	5.68	1
34	CV Antofagasta	Argentina	Catamarca	4.91	4.91	1
35	Cerro Negro (Crater Basalt)	Argentina	Chubut	4.37	4.37	1
36	Tralihue	Argentina	Neuquén	3.85	3.85	1
37	Salar de Arizaro	Argentina	Salta	2.30	2.30	1
38	Sin Nombre	Argentina	Salta	1.60	1.60	1

que ocurren en el volcán. Finalmente, los volcanes de Categoría III (Tromen) contarán con una instrumentación que pueda garantizar el monitoreo mínimo necesario para determinar el nivel base de actividad y confirmar el inicio de una erupción, pero con escasas posibilidades de detectar cambios precursoros.

La instrumentación propuesta cubre el conjunto, cada vez más estándar, de técnicas geofísicas, geoquímicas y visuales empleadas en los observatorios de todo el mundo: sismómetros de banda ancha, Scanning-DOAS, estaciones GNSS, inclinómetros electrónicos, sensores de infrasonido y cámaras IP visuales. Estas estaciones serán autosuficientes, utilizando energía solar (paneles

solares más bancos de baterías), y funcionarán con conexión en tiempo real mediante comunicación punto a punto / punto-multipunto en las cercanías de cada volcán, y con un sistema de comunicación satelital en la base de cada volcán para la retransmisión de datos desde el volcán hasta la sede de OAVV, donde se ubicará el centro de almacenamiento, procesamiento y análisis de los mismos.



Figura 2: Mapa de los volcanes de los Andes; los triángulos azules indican los volcanes que están monitoreados (o serán monitoreados en el futuro) (modificado de García et al. [2017]).

3 ¿COMO MONITOREAMOS ESTOS VOLCANES?

3.1 Historia del monitoreo volcánico en Argentina

Desde comienzos del siglo 21, previo a la creación del OAVV, el estudio y seguimiento de la actividad volcánica en Argentina mediante la utilización de técnicas modernas fue realizado por departamentos de geología y geofísica de las universidades, y por grupos de investigación (Tabla 1), en colaboración con grupos científicos internacionales, principalmente de Italia y España, entre otros países [e.g. Ibáñez et al. 2008; Augusto et al. 2013; Casas et al. 2014; Tassi et al. 2016].

Algunas de las primeras aplicaciones de técnicas de monitoreo volcánico en Argentina se realizaron en la Isla Decepción, en la Antártida [Viramonte et al. 1974a; b; Ortiz Ramís et al. 1987; Ramos et al. 1990; Ortiz Ramís et al. 1992; Risso y Ortiz Ramís 1994; De Rosa et al. 1995; Aparicio et al. 1997; Caselli y Augusto 2004; Bonatto et al. 2007; Caselli et al. 2007] y posteriormente en el volcán Copahue [Ibáñez et al. 2008; Augusto et al. 2012]. Otros programas menores de monitoreo se llevaron a cabo en volcanes como Cerro Blanco [Lopez et al. 2014] y Planchón-Peteroa [Casas et al. 2014].

Los objetivos principales de estos esfuerzos iniciales se encontraban enfocados en la investigación de los procesos volcánicos, sin un énfasis en el monitoreo continuo en tiempo real con el objeto de generar alertas tempranas.

3.2 Actividades y capacidades actuales de monitoreo

El proyecto del OAVV finalmente se materializó en 2017 con las adquisiciones de los primeros equipos y la contratación de los primeros profesionales que conforman la actual plantilla del observatorio. Sin embargo, aún no se ha definido la ubicación de la futura sede del OAVV y el desarrollo del proyecto de construcción de la misma. Mientras tanto, el personal del OAVV trabaja desde la sede central de SEGEMAR, en Buenos Aires. Actualmente, el OAVV monitorea, en tiempo real, los dos volcanes más activos de Argentina: Copahue y Planchón-Peteroa, en cooperación con el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) de Chile (Figura 3). Esta labor es realizada por un grupo de trabajo interdisciplinario compuesto por cinco profesionales, que incluye geólogos, geoquímicos y geofísicos. Asimismo, el personal del OAVV colabora con tres geólogos del Grupo de Peligros Volcánicos de SEGEMAR y con cuatro profesionales del Área de SIG y Sensores Remotos (procesamiento de imágenes térmicas de interferometría de radar: InSAR).

La red de monitoreo en tiempo real del volcán Planchón-Peteroa consta de dos estaciones sismológicas y dos cámaras IP en el lado argentino del volcán. Esto se complementa con sensores remotos y el análisis de múltiples tipos de imágenes de satelitales. Las imágenes ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and*

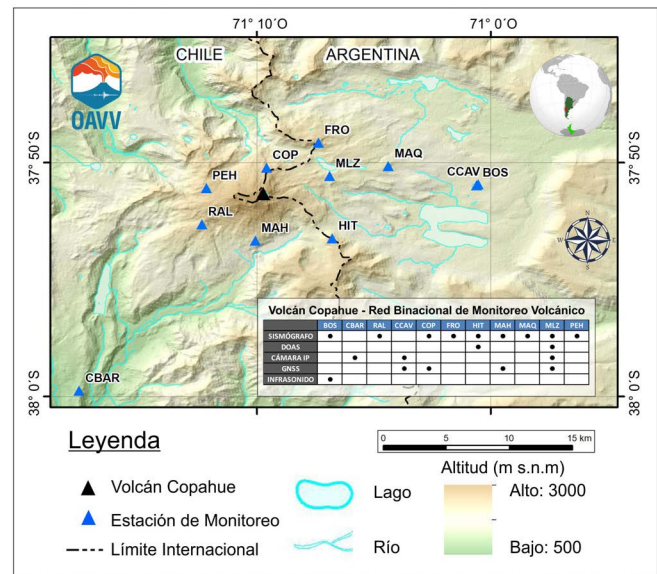


Figura 3: Red binacional de monitoreo del volcán Copahue.

Reflection Radiometer) se utilizan para rastrear los cambios de temperatura en el cráter del volcán, las imágenes NASA *Firm* VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), 375m en tiempo casi real (NRT), y las imágenes *Suomi* NPP (Suomi National Polar-orbiting Partnership) se utilizan para realizar alertas de anomalías térmicas, y las imágenes radar, para el mapeo de la deformación terrestre (*i.e.* InSAR). A su vez, se realizan campañas de muestreo geoquímico de aguas y gases anualmente en verano. Las muestras de gases y aguas se recolectan en conjunto con el Grupo de Estudio y Seguimiento de Volcanes Activos de la Universidad de Buenos Aires (GESVA-UBA), mientras que el muestreo directo de gases (SO_2 , CO_2 y H_2S) en fumarolas con un instrumento *MultiGAS* se realiza en colaboración con profesionales del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra (ICES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).

El monitoreo del volcán Copahue es posible a través de los convenios binacionales firmados entre SEGEMAR y SERNAGEOMIN, que permiten el intercambio de información en tiempo real entre OAVV y OVDAS. Esto permite al personal del OAVV recibir y procesar información de seis estaciones sismológicas y dos cámaras IP (Figura 3). El monitoreo se complementa con las mismas técnicas de sensores remotos aplicadas en Planchón-Peteroa, y con las campañas de muestreo geoquímico de verano.

4 GESTIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO

A la fecha, existen solamente dos mapas de peligro volcánico completos para los volcanes argentinos— [Bermúdez y Delpino 1995] y Planchón-Peteroa [Naranjo et al. 1999]—y se ha determinado que requieren

una actualización de acuerdo con nueva información y metodologías. Por ello, y en el marco del Programa de Evaluación de Amenazas Volcánicas de SEGEMAR, el Grupo de Peligros Volcánicos de la Dirección de Geología Ambiental y Aplicada de SEGEMAR se encuentra trabajando, desde 2016, en el desarrollo de nuevos mapas para los volcanes de máxima prioridad. Utilizando el Ranking de Riesgo Relativo para Argentina [Elissondo y Farías 2016] como línea de base, SEGEMAR lanzó el Programa de Mapas de Peligros Volcánicos, comenzando con los mapas del Complejo Volcánico Laguna del Maule [Gho et al. 2019], y los volcanes Lanín y Copahue. Los dos primeros fueron realizados en el marco del convenio binacional entre SEGEMAR y SERNAGEOMIN (con la asistencia del *Volcano Disaster Assistance Program* del USGS).

La evaluación de la peligrosidad requiere un estudio geológico-geomorfológico detallado de cada volcán, junto con información sobre la topografía, hidrología, datos meteorológicos e informes históricos de actividad, entre otros datos. Las actividades de mapeo de peligros incluyen estudios de campo, mapeo geológico y muestreo, con el objetivo principal de reconstruir la historia eruptiva postglacial del volcán estudiado e identificar los diferentes productos volcánicos y peligros asociados. Luego, los productos identificados se caracterizan (e.g. volumen, longitud, etc.) para brindar información sobre las características y parámetros de la erupción. Después de reconstruir la historia eruptiva postglacial, se definen los escenarios eruptivos más probables que, según la información disponible, pueden ser probabilísticos o determinísticos. Para los diferentes escenarios, y para cada peligro volcánico, se elaboran mapas de susceptibilidad. Estos mapas representan las áreas que pueden verse afectadas por cada peligro volcánico para los diferentes escenarios eruptivos definidos, y se obtienen usando diferentes técnicas de modelado. La zonificación del peligro se obtiene asignando probabilidades de ocurrencia a las áreas susceptibles, de acuerdo con el análisis probabilístico previamente realizado [Calder et al. 2015]. Los mapas elaborados por SEGEMAR son semicuantitativos y multipeligros. El análisis y los resultados se presentan a diferentes escalas: los peligros proximales se muestran en una escala detallada, en general 1: 50,000 (e.g. corrientes de densidad piroclástica, flujos de lava, lahares, balísticos, caída de tefra proximal), mientras que la caída de tefra con distribución regional es presentada en una escala menor a 1: 2,000,000.

SEGEMAR realiza el estudio y monitoreo de la actividad volcánica en el marco del nuevo Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo (SINAGIR), creado en 2016 mediante la promulgación de la Ley N° 27287. Esta ley tiene por objeto integrar las acciones y articular el funcionamiento de los organismos del Gobierno Nacional, Provincial y Municipal, las Organizaciones No Gubernamentales y la sociedad civil, para fortalecer y optimizar las acciones destinadas a la reducción

de riesgos, el manejo de crisis y la recuperación. En este contexto, SEGEMAR forma parte de la Red de organismos científico-técnicos para la gestión del riesgo de desastres (Red GIRCYT) y coordina la comisión técnica de amenazas volcánicas del Plan Nacional de Reducción de Riesgo de Desastres (PNRRD 2018–2023). El PNRRD busca definir los lineamientos políticos y principios básicos que deben desarrollar las instituciones públicas y privadas, así como las organizaciones sociales, para la ejecución de programas y acciones encaminadas a reducir los riesgos existentes, garantizar mejores condiciones de seguridad para la población y proteger el patrimonio económico, social, ambiental y cultural. Asimismo, SEGEMAR ha sido responsable de la coordinación e implementación del Protocolo Interinstitucional de Gestión de la Información ante la amenaza de actividad volcánica que pueda afectar territorio argentino. Este protocolo tiene como objetivo articular el acceso a la información y datos generados por las agencias técnicas y científicas que forman parte de la Red GIRCYT, con el propósito de generar datos y productos científicos, y ponerlos a disposición de las autoridades de defensa civil y tomadores de decisiones con el fin de gestionar el riesgo volcánico. Dado que Argentina es un país federal, las etapas de preparación y respuesta se manejan desde las defensas civiles locales y provinciales, quienes son responsables de ayudar a las comunidades a prepararse para las erupciones y eventualmente gestionar el proceso de evacuación en caso de un evento. Sin embargo, la percepción del riesgo volcánico en Argentina es muy baja, por lo que la mayoría de las provincias aún no cuentan con planes de respuesta para enfrentar este tipo de eventos, con la excepción de casos particulares, como la provincia de Neuquén, que tuvo que lidiar con importantes erupciones en años recientes (Cordón Caulle 2011, Copahue 2012, Calbuco 2015) y ha desarrollado planes de emergencia para hacer frente a los riesgos volcánicos. SEGEMAR, a través del OAVV, viene tratando desde los últimos años de concientizar sobre el riesgo volcánico en el país, así como proponiendo en colaboración con otros organismos nacionales la implementación de políticas públicas nacionales a través del PNRRD (2018–2023), con el objetivo de mejorar la percepción sobre estos riesgos a nivel nacional.

5 DIFUSIÓN Y DIVULGACIÓN DE INFORMACIÓN

El OAVV es responsable de emitir los Niveles de Alerta Volcánica (o “alertas técnicas”) a las autoridades nacionales, provinciales y municipales, así como a la población civil, a través de la Plataforma Nacional de Alertas y Monitoreo del SINAGIR. El OAVV envía periódicamente Reportes de Actividad Volcánica (RAV) y Reportes Especiales de Actividad Volcánica (REAV) de volcanes argentinos y chilenos utilizando una lista de correo, el sitio web de SEGEMAR y las redes sociales. En este contexto, SEGEMAR ha lanzado recientemente una

nueva sección dentro de su sitio web* para mejorar el acceso público a la información relacionada con los volcanes monitoreados de Argentina. Esta información incluye información básica sobre los peligros volcánicos, información sobre las redes de monitoreo volcánico de SEGEMAR e informes sobre el estado de actividad de los volcanes de Argentina y Chile.

Uno de los principales pilares fundacionales del OAVV, como nuevo centro especializado a nivel nacional, es la consolidación de redes de colaboración nacionales e internacionales de científicos que se encuentran involucrados en el estudio de los volcanes y la respuesta a emergencias. Actualmente, el OAVV colabora a nivel nacional con otros organismos científico-técnicos del gobierno nacional como: el Servicio Meteorológico Nacional Argentino, donde la VAAC opera; el IGN, quien está a cargo de la cartografía nacional del país así como de la gestión de la red geodésica nacional; la CONAE que garantiza el acceso a imágenes satelitales para el monitoreo de volcanes aplicando técnicas de sensores remotos; ICES-CNEA y el Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF). El OAVV también colabora con varios grupos de investigación de universidades nacionales como: GESVA-UBA; el Grupo de Sismología Volcánica de la FCAG-UNLP; el área de Imágenes Satelitales del Instituto CEDIAC de la UNCuyo; el IIPG de la UNRN; el Instituto Geonorte e IBIGEO de la UNSA y la UNCOMA (Ver el significado de los acrónimos en la [Tabla 1](#)).

En el ámbito internacional, SEGEMAR tiene una política institucional formal de desarrollar fuertes vínculos con otros servicios geológicos con amplia experiencia en volcanología y monitoreo volcánico. Es por ello que, inicialmente, se firmaron múltiples acuerdos binacionales con Chile. De igual manera, SEGEMAR también ha firmado convenios con el USGS y el Servicio Geológico Colombiano para la transferencia de conocimiento y tecnología, y el entrenamiento de profesionales del OAVV, con el fin de replicar las mejores prácticas implementadas en ambos países. Esto sentará las bases para operaciones efectivas, crecimiento sostenido y estratégico, generación y contratación de recursos humanos especializados y el desarrollo de proyectos de investigación científica que puedan complementar las actividades de monitoreo volcánico.

6 NECESIDADES, DESAFIOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

El OAVV es el primer observatorio volcánico permanente de Argentina y el más joven de América Latina. Su éxito producirá una base estable para la vigilancia volcánica moderna, los sistemas de alerta temprana y la investigación de la volcanología en Argentina.

El objetivo principal para el futuro es mantener un sistema de monitoreo volcánico eficaz que pueda me-

jorar la gestión del riesgo volcánico en Argentina. Como parte de esto, el OAVV se esforzará por generar información veraz y actualizada sobre la actividad de los volcanes que puedan afectar el territorio argentino, y poner esta información a disposición de las autoridades de aplicación y autoridades de los diferentes niveles políticos, así como de la población civil. El principal desafío es obtener los recursos necesarios para alcanzar esta meta antes de que ocurra una erupción volcánica que impacte severamente las vidas, infraestructura y economías regionales. Asimismo, la generación de redes de monitoreo instrumental y la aplicación de metodologías de monitoreo avanzadas utilizadas a nivel mundial permitirá la formación de nuevos profesionales en el país, en conjunto con diferentes centros de investigación en volcanología de las universidades y el CONICET, contribuyendo a construir una nueva generación de volcanólogos argentinos.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a las autoridades de SEGEMAR por permitir el desarrollo de este trabajo y a los revisores por los comentarios y sugerencias, que han mejorado la claridad y la integridad del manuscrito. Además, nos gustaría agradecer especialmente a M. Elisondo por proporcionar la mayor parte de la información sobre la Evaluación de Peligros Volcánicos y el Ranking de Riesgo Relativo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

S. Garcia fue el responsable del desarrollo y ejecución de este manuscrito. G. Badi fue la responsable de la revisión y corrección interna del documento.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Datos disponibles a petición. Los informes emitidos por el OAVV están disponibles públicamente en el sitio web (<https://oavv.segemar.gob.ar/>). La información relacionada con la evaluación de peligros y el los futuros mapas de peligros volcánicos que se publicarán están disponibles de forma abierta en el repositorio público de SEGEMAR (<https://repositorio.segemar.gov.ar/>)

DERECHOS DE AUTOR

© Autor(es) 2021. Este artículo se distribuye bajo los términos de la [Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional](#), 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

*<https://oavv.segemar.gob.ar>

realizaron cambios.

REFERENCIAS

- Agusto, M., F. Tassi, A. Caselli, O. Vaselli, D. Rouwet, B. Capaccioni, S. Caliro, G. Chiodini y T. Darrah (2013). “Gas geochemistry of the magmatic-hydrothermal fluid reservoir in the Copahue–Caviahue Volcanic Complex (Argentina)”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 257, págs. 44-56. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2013.03.003.
- Agusto, M., A. Caselli, F. Tassi, M. Dos Santos Afonso y O. Vaselli (2012). “Seguimiento geoquímico de las aguas ácidas del sistema volcán Copahue–Río Agrio: posible aplicación para la identificación de precursores eruptivos”. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69 (4), págs. 481-495.
- Allmendinger, R. W., T. E. Jordan, S. M. Kay y B. L. Isacks (1997). “The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the Central Andes”. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 25 (1), págs. 139-174. DOI: 10.1146/annurev.earth.25.1.139.
- Amigo, Á. (2021). “Volcano monitoring and hazard assessments in Chile”. *Volcanica* 4 (S1), págs. 1-20. DOI: 10.30909/vol.04.S1.0120.
- Aparicio, A., C. Risso, J. G. Viramonte, M. Menegatti e I. A. Petrinovic (1997). “El volcanismo de Isla Decepción (Península Antártica)”. *Boletín geológico y minero* 108 (3), págs. 235-258.
- Baker, P. E. (1990). “South Sandwich Islands”. *Volcanoes of the Antarctic Plate and Southern Oceans*. Ed. por W. LeMasurier, J. Thomson, P. Baker, P. Kyle, P. Rowley, J. Smellie y W. Verwoerd. Vol. 48. American Geophysical Union, págs. 361-395. DOI: 10.1029/ar048.
- Barazangi, M. y B. L. Isacks (1976). “Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America”. *Geology* 4 (11), pág. 686. DOI: 10.1130/0091-7613(1976)4<686:sdoeas>2.0.co;2.
- Barbier, J. L. (2011). “Erupción del Volcán Puyehue-Cordón Caulle en la República de Chile, 4 de junio del 2011”. *Seminario Regional “Alianzas entre el sector público y privado para la gestión del riesgo de desastres: Continuidad de gobierno y continuidad de operaciones ante situaciones de desastres”*. Lima, SP/SRCGCRD/Di.
- Bermúdez, A. y D. Delpino (1995). *Mapa de los peligros potenciales en el área del Volcán Copahue–sector Argentino*.
- Bonadonna, C., R. Cioni, M. Pistolesi, M. Elissondo y V. Baumann (2015). “Sedimentation of long-lasting wind-affected volcanic plumes: the example of the 2011 rhyolitic Cordón Caulle eruption, Chile”. *Bulletin of Volcanology* 77 (2). DOI: 10.1007/s00445-015-0900-8.
- Bonato, A. L., G. A. Badi, A. Bidone, A. Caselli, C. L. Bengoa y J. M. Ibañez (2007). “Isla Decepción: actividad sismovolcánica y localización de fuentes para los veranos 2003–2004 y 2004–2005”. *Actas del VI° Simposio Argentino y III° Latinoamericano sobre Investigaciones Antárticas*. Buenos Aires, págs. 1-4.
- Calder, E., K. Wagner y S. Ogburn (2015). “Volcanic hazard maps”. *Global Volcanic Hazards and Risk*. Ed. por S. C. Loughlin, S. Sparks, S. K. Brown, S. F. Jenkins y C. Vye-Brown. Cambridge University Press, págs. 335-342. DOI: 10.1017/cbo9781316276273.022.
- Canclini, A. (2009). *Islas Sandwich del Sur: la Argentina en el Atlántico Sur*. Buenos Aires, Argentina: Zagier & Urruty Publications. ISBN: 978-987-1468-10-2.
- Casas, J. A., G. A. Badi, M. C. Manassero, E. Ruigrook, M. Gomez, D. Draganov y J. Ruzzante (2014). “Characterization of Seismo-volcanic Activity in Peteroa Volcano, Central Chile-Argentina”. *Proceedings. First Assembly of the Latin-America and Caribbean Seismological Commission - LACSC*. Vol. 18, págs. 335-336.
- Caselli, A. T. y M. R. Agusto (2004). “Depósitos hidrovolcánicos recientes con indicios de inmiscibilidad magmática en la isla Decepción (Antártida)”. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59 (3), págs. 495-500.
- Caselli, A. T., G. Badi, A. Bonatto, C. Bengoa, M. Agusto, A. Bidone y J. Ibañez (2007). “Actividad sísmica y composición química fumarólica anómala debido a posible efecto sello en el sistema volcánico, Isla Decepción (Antártida)”. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62 (4), págs. 545-552.
- Coira, B., S. M. Kay y J. Viramonte (1993). “Upper Cenozoic magmatic evolution of the Argentine Puna—A model for changing subduction geometry”. *International Geology Review* 35 (8), págs. 677-720. DOI: 10.1080/00206819309465552.
- Collini, E., M. S. Osorio, A. Folch, J. G. Viramonte, G. Villarosa y G. Salmuni (2013). “Volcanic ash forecast during the June 2011 Cordón Caulle eruption”. *Natural Hazards* 66 (2), págs. 389-412. ISSN: 1573-0840. DOI: 10.1007/s11069-012-0492-y.
- Córdoba, G., G. Villarosa, M. F. Sheridan, J. G. Viramonte, D. Beigt y G. Salmuni (2015). “Secondary lahar hazard assessment for Villa la Angostura, Argentina, using Two-Phase-Titan modelling code during 2011 Cordón Caulle eruption”. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15 (4), págs. 757-766. DOI: 10.5194/nhess-15-757-2015.
- Craig, H., T. Wilson, C. Stewart, V. Outes, G. Villarosa y P. Baxter (2016). “Impacts to agriculture and critical infrastructure in Argentina after ashfall from the 2011 eruption of the Cordón Caulle volcanic complex: an assessment of published damage and function thresholds”. *Journal of Applied Volcanology* 5 (1). ISSN: 2191-5040. DOI: 10.1186/s13617-016-0046-1.
- Davidson, J. P. y S. L. de Silva (1995). “Late Cenozoic magmatism of the Bolivian Altiplano”. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 119 (4), págs. 387-408. DOI: 10.1007/bf00286937.

- De Rosa, R., R. Mazzuoli, R. H. Omarini, G. Ventura y J. G. Viramonte (1995). "A volcanological model for the historical eruptions at Deception Island (Bransfield Strait, Antarctica)". *Terra Antartica* 2 (2), págs. 95-101.
- Dominguez, L., C. Bonadonna, P. Forte, P. A. Jarvis, R. Cioni, L. Mingari, D. Bran y J. E. Panebianco (2020). "Aeolian Remobilisation of the 2011-Cordón Caulle Tephra-Fallout Deposit: Example of an Important Process in the Life Cycle of Volcanic Ash". *Frontiers in Earth Science* 7. ISSN: 2296-6463. doi: [10.3389/feart.2019.00343](https://doi.org/10.3389/feart.2019.00343).
- Durant, A. J., G. Villarosa, W. I. Rose, P. Delmelle, A. J. Prata y J. G. Viramonte (2012). "Long-range volcanic ash transport and fallout during the 2008 eruption of Chaitén volcano, Chile". *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 45-46, págs. 50-64. doi: [10.1016/j.pce.2011.09.004](https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.09.004).
- Elissondo, M., V. Baumann, C. Bonadonna, M. Pistolesi, R. Cioni, A. Bertagnini, S. Biass, J.-C. Herrero y R. Gonzalez (2016). "Chronology and impact of the 2011 Cordón Caulle eruption, Chile". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16 (3), págs. 675-704. doi: [10.5194/nhess-16-675-2016](https://doi.org/10.5194/nhess-16-675-2016).
- Elissondo, M. y C. Fariás (2016). "Volcanic risk assessment in Argentina". *Cities on Volcanoes 9: Understanding Volcanoes and Society - The Key for Risk Mitigation*. Puerto Varas.
- Elissondo, M. y D. Villegas (2011). "Evaluación de peligrosidad volcánica en Argentina". *Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén: Relatorio XVIII Congreso Geológico Argentino*. Ed. por H. Leanza, C. Arregui, O. Carbone, D. J. y J. Vallés. Vol. 2, págs. 609-616.
- Ewert, J. W. (2007). "System for Ranking Relative Threats of U.S. Volcanoes". *Natural Hazards Review* 8 (4), págs. 112-124. doi: [10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2007\)8:4\(112\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2007)8:4(112)).
- Ewert, J. W., M. Guffanti y T. L. Murray (2005). *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](https://doi.org/10.3133/ofr20051164).
- Fierstein, J., P. Sruoga, A. Amigo, M. Elissondo y M. Rosas (2013). "Tephra in Argentina establishes post-glacial eruptive history of Laguna del Maule volcanic field in Chile". *IAVCEI Scientific Assembly - 2013: Forecasting Volcanic Activity: reading and translating the messages of nature for society*. Kagoshima, págs. 23-17.
- Forte, P., L. Domínguez, C. Bonadonna, M. Lamberti, C. E. Gregg, D. Bran y J. M. Castro (2018). "Tormentas de ceniza volcánica en Patagonia: un peligro latente y subestimado". *Libro de resúmenes: VIII Foro Internacional los Volcanes y su impacto, Arequipa, 26 y 27 de abril del 2018*. Ed. por R. Aguilar. Arequipa, págs. 137-141.
- García, S., G. Badi y A. Tejedo (2017). "Proyecto Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV) del Servicio Geológico Minero Argentino". *XX Congreso Geológico Argentino, Actas*. Tucumán.
- Gho, R., P. Sruoga, Á. Amigo, J. Fierstein, M. Elissondo, J. Kaufman, V. Toloza y R. Calderón (2019). *Peligros del Complejo Volcánico Laguna del Maule, región del Maule, Chile – Provincias de Mendoza y Neuquén, Argentina*. Inf. téc. [Mapa escala 1: 75,000].
- Guffanti, M., A. K. Diefenbach, J. W. Ewert, D. W. Ramsey, P. F. Cervelli y S. P. Schilling (2010). *Volcano-monitoring instrumentation in the United States, 2008*. Inf. téc. US Geological Survey.
- Haller, M. J., J. E. Mendía y H. A. Ostera (1991). "Mapa preliminar de riesgo en la vertiente Argentina del volcán Peteroa". *6º Congreso Geológico Chileno*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería Chile, págs. 355-358.
- Haller, M. J., H. A. Ostera, A. H. Pesce, M. Gardini y A. Folgueras (1994). "Vulcanoestratigrafía reciente y eruptividad del volcán Peteroa". *7º Congreso Geológico Chileno*. Vol. 1. Universidad de Concepcion, págs. 319-323.
- 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).
- Ibáñez, J., E. Del Pezzo, C. Bengoa, A. Caselli, G. Badi y J. Almendros (2008). "Volcanic tremor and local earthquakes at Copahue volcanic complex, Southern Andes, Argentina". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 174 (4), págs. 284-294. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2008.02.005](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.02.005).
- Isacks, B. L., S. M. Kay, E. J. Fielding y T. Jordan (1986). "Andean volcanism: icing on the cake". *Eos* 67, pág. 1073.
- Jordan, T. E., B. L. Isacks, R. W. Allmendinger, J. A. Brewer, V. A. Ramos y C. J. Ando (1983). "Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate". *Geological Society of America Bulletin* 94 (3), pág. 341. doi: [10.1130/0016-7606\(1983\)94<341:atrtgo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<341:atrtgo>2.0.co;2).
- Kay, S. M., B. Coira y J. Viramonte (1994). "Young mafic back arc volcanic rocks as indicators of continental lithospheric delamination beneath the Argentine Puna Plateau, central Andes". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 99 (B12), págs. 24323-24339. doi: [10.1029/94jb00896](https://doi.org/10.1029/94jb00896).
- Lara, L. E., J. Clavero, M. Hinojosa, S. Huerta, R. Wall y H. Moreno (2006). "NVEWS-CHILE: Sistema de Clasificación semicuantitativa de la vulnerabilidad volcánica". *Congreso Geológico Chileno*. Vol. 11. Antofagasta, págs. 487-490.
- Leat, P. T., R. A. Livermore, I. L. Millar y J. A. Pearce (2000). "Magma Supply in Back-arc Spreading Centre Segment E2, East Scotia Ridge". *Journal of Petrology* 41 (6), págs. 845-866. doi: [10.1093/petrology/41.6.845](https://doi.org/10.1093/petrology/41.6.845).
- LeMasurier, W., J. Thomson, P. Baker, P. Kyle, P. Rowley, J. Smellie y W. Verwoerd, eds. (1990). Vol. 48. American Geophysical Union. doi: [10.1029/ar048](https://doi.org/10.1029/ar048).

- Lopez, F., J. G. Viramonte, M. Berrocoso, I. Barbero, P. Euillades y M. Blanco (2014). "Validación de la Subsidencia del Complejo Volcánico Cerro Blanco con el uso de GPS Diferencial Geodésico". *XX Congreso Geológico Argentino, Actas*. Córdoba: Asociación Geológica Argentina.
- Macedo Sánchez, O. E. et al. (2016). *Evaluación del riesgo volcánico en el sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro*. Inf. téc. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Universidad Nacional de San Agustín (UNSA).
- Miller, C. A. (2011). *Threat assessment of New Zealand's volcanoes and their current and future monitoring requirements Lower Hutt, N.Z.* Inf. téc. GNS Science.
- Ministerio del Interior (2012). *Consideraciones para una estrategia para la gestión integral del riesgo de desastres en Argentina*. Nota Conceptual, Informe Inédito.
- Naranjo, J. A., M. J. F. Haller, H. A. Osters, A. H. Pesce y P. Sruoga (1999). "Geología y Peligros del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa, Andes del Sur (35°15' S), Región del Maule, Chile-Provincia de Mendoza, Argentina". *Servicio Nacional de Geología y Minería Chile* (52), págs. 1-56.
- Ortiz Ramís, R., J. L. Díez Gil y J. G. Viramonte (1987). "Modelo numérico para la simulación del transporte y deposición del piroclastos: aplicación al estudio de las erupciones de 1967, 1969 y 1970 ocurridas en Decepción (Antártida)". *XXI Reunión bienal de la Real Sociedad española de Física*. Real Sociedad Española de Física. Salamanca, págs. 347-348.
- Ortiz Ramís, R., J. Vila, A. García, A. Camacho, J. L. Díez Gil, A. Aparicio, R. Soto, J. G. Viramonte, C. Risso, N. Menegatt e I. Petrinovic (1992). "Geophysical features of Deception Island". *Recent progress in Antarctic earth science*. Ed. por Y. Yoshida, K. Kaminuma y K. Shiraishi. Tokyo: Terra Scientific Publishing, págs. 443-448.
- Osores, M. S., A. Folch, E. Collini, G. Villarosa, A. Durant, G. Pujol y J. G. Viramonte (2013). "Validation of the FALL3D model for the 2008 Chaitén eruption using field and satellite data". *Andean Geology* 40 (2). DOI: 10.5027/andgeov40n2-a05.
- Ramos, M., R. Ortiz Ramís, J. L. Díez Gil y J. G. Viramonte (1990). "Anomalías térmicas y balance de flujo energético sobre el suelo del volcán Decepción, Isla Decepción (Shetland del Sur)". *II Simposio Español de Investigaciones Antárticas*. Gredos, págs. 203-219.
- Ramos, V. A., E. Cristallini y D. J. Pérez (2002). "The Pampean flat-slab of the Central Andes". *Journal of South American Earth Sciences* 15 (1), págs. 59-78. DOI: 10.1016/S0895-9811(02)00006-8.
- Reckziegel, F., E. Bustos, L. Mingari, W. Báez, G. Villarosa, A. Folch, E. Collini, J. Viramonte, J. Romero y S. Osores (2016). "Forecasting volcanic ash dispersal and coeval resuspension during the April–May 2015 Calbuco eruption". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 321, págs. 44-57. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.04.033.
- Risso, C. y R. Ortiz Ramís (1994). *Directory of volcano observatories (1993–1994)*. Paris: World Organization of Volcano Observatories; UNESCO.
- Romero, J., D. Morgavi, F. Arzilli, R. Daga, A. Caselli, F. Reckziegel, J. Viramonte, J. Díaz-Alvarado, M. Polacci, M. Burton y D. Perugini (2016). "Eruption dynamics of the 22–23 April 2015 Calbuco Volcano (Southern Chile): Analyses of tephra fall deposits". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 317, págs. 15-29. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.02.027.
- Scasso, R. A., H. Corbella y P. Tiberi (1994). "Sedimentological analysis of the tephra from the 12–15 August 1991 eruption of Hudson volcano". *Bulletin of Volcanology* 56 (2), págs. 121-132. DOI: 10.1007/bf00304107.
- Sruoga, P. y V. Consoli (2011). "Volcán Copahue". *Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén: Relatorio XVIII Congreso Geológico Argentino*. Ed. por H. Leanza, C. Arregui, O. Carbone, D. J. y J. Vallés. Vol. 2, págs. 609-616.
- Sruoga, P., M. Elisondo, J. Fierstein, S. García, R. González y M. Rosas (2015). "Actividad explosiva postglacial del centro Barrancas, Complejo Volcánico Laguna del Maule.(36° 05'S, 70° 30'O). Peligrosidad en Argentina". *XIV congreso geológico chileno*. Sociedad Geológica de Chile La Serena, Chile, págs. 49-52.
- Sruoga, P., M. P. Etcheverría, M. Feineman, M. Rosas, C. Bukert y O. D. Ibañez (2012). "Complejo Caldera Diamante-Volcán Maipo (34° 10' S, 69° 50' O): evolución volcanológica y geoquímica e implicancias en su peligrosidad". *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69 (4), págs. 508-530.
- Stern, C. R. (2004). "Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting". *Revista geológica de Chile* 31 (2), págs. 161-206.
- Stern, C. R. y R. Kilian (1996). "Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone". *Contributions to Mineralogy and Petrology* 123 (3), págs. 263-281. DOI: 10.1007/s004100050155.
- Tassi, F., F. Aguilera, O. Benavente, A. Paonita, G. Chiodini, S. Caliro, M. Agosto, F. Gutierrez, B. Capaccioni, O. Vaselli, A. Caselli y O. Saltori (2016). "Geochemistry of fluid discharges from Peteroa volcano (Argentina-Chile) in 2010–2015: Insights into compositional changes related to the fluid source region(s)". *Chemical Geology* 432, págs. 41-53. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.04.007.
- Viramonte, J. G., G. E. Bossi, R. J. Sureda, N. H. Fourcade y R. H. Omarini (1974a). "Geochemical and mineralogical study of the high temperature fumaroles from Deception Island, South Shetland, Antarctica". *Proceedings of the Symposium on Andean and Antarctic Volcanology Problems, Santiago, Chile*. Santiago, Chile: Instituto geografico militar, págs. 543-561.

- Viramonte, J. G., C. M. Peralta, D. Garrido y A. Felpeto (2001). *Uso De Sensores Remotos Para La Mitigacion De Efectos Causados Por Erupciones Volcanicas: Elaboración de mapas de Riesgo volcánico y alertas para la aeronavegación: Un caso de estudio*. URL: http://www.conae.gov.ar/WEB_Emergencias/Links_del_Cuerpo_Principal/Volcanes/Informe%5C%20Riesgo%5C%20Volcanico.htm (visitado 21-11-2020).
- Viramonte, J. G., R. J. Sureda y F. N. R. (1974b). *Estado Volcánico de la Isla Decepción, Islas Shetland del Sur, Antártida Argentina*. Contribución del Instituto Antártico Argentino. Buenos Aires, Argentina.
- Wilson, T., C. Stewart, H. Bickerton, P. Baxter, A. V. Outes, G. Villarosa y E. Rovere (2013). *Impacts of the June 2011 Puyehue-Cordón Caulle volcanic complex eruption on urban infrastructure, agriculture and public health*. Institute of Geology y Nuclear Sciences, págs. 1-88.