

Reporte / report

Aportes de la sismología al conocimiento de volcanes activos en Sudamérica y Antártida

Seismological contributions to the understanding of active volcanoes in South America and Antarctica

José Augusto Casas^{1,2}, Gabriela Badi³

Resumen La construcción de un conocimiento integral sobre el comportamiento de un sistema volcánico activo, y la elaboración de alertas tempranas efectivas de eventuales sucesos con impactos negativos en poblaciones ubicadas en su cercanía, constituye el gran desafío de la vulcanología actual. Para cumplir con este objetivo, resulta fundamental desarrollar un conocimiento detallado sobre la ubicación y estado físico de los componentes que constituyen el subsuelo volcánico, en particular, la configuración del subsuelo sobre el cual se ubica el sistema de conductos que transportan los fluidos (agua, magma y gases) hacia la superficie. Asimismo, es igualmente crucial la evaluación de la dinámica resultante de la interacción de estos componentes a lo largo del tiempo. En los últimos años, sismólogos de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (de la Universidad Nacional de La Plata) y del Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (del Servicio Geológico y Minero Argentino), en colaboración con instituciones locales y extrajerar, han implementado variadas metodologías aportando a mejorar el conocimiento sobre la estructura de sistemas volcánicos activos de interés, así como de su evolución temporal. El presente artículo recopila una porción de estas contribuciones al conocimiento de volcanes ubicados en territorio sudamericano y antártico.

Palabras clave Sismología, volcanes activos, caracterización subsuperficial, monitoreo.

Abstract *The development of comprehensive knowledge about the behavior of an active volcanic system, along with the elaboration of effective early warning alerts for potential events with negative impacts on nearby populations, constitutes the major challenge of contemporary volcanology. In order to accomplish this aim, it is essential to develop a detailed understanding of the location and physical state of the components constituting the subsurface, particularly the structural configuration in which the conduit system —responsible for transporting fluids (water, magma, and gases) to the surface— is situated. Equally crucial is the evaluation of the dynamics resulting from the interaction of these components over time. In recent years, seismologists from the Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (Universidad Nacional de La Plata) and the Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (Servicio Geológico y Minero Argentino), in collaboration with local and international institutions, have implemented diverse methodologies contributing to improve the knowledge of the structure of the active volcanic systems of interest, as well as their temporal evolution. This article compiles a selection of these contributions to the understanding of volcanoes located in South American and Antarctic territories.*

Keywords *Seismology, active volcanoes, characterization of the subsurface, monitoring.*

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV-SEGEMAR), Argentina. Email: augusto.casas@segemar.gov.ar

² Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

³ Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEOF), Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Email: gbadi@fcaglp.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la comunidad científica, impulsada por programas gubernamentales y por iniciativas de colaboración internacional, ha desarrollado múltiples estrategias para evaluar el estado de los sistemas volcánicos, integrando disciplinas como, por ejemplo, la geología, la geofísica, la geoquímica y la geodesia. Estas estrategias, apoyadas en el uso de tecnologías avanzadas y en la formación de capital humano especializado, buscan maximizar la disponibilidad de información para comprender la dinámica volcánica y fortalecer la capacidad de anticipación y mitigación frente a los impactos de las erupciones ([Scarpa y otros, 1996](#)).

La adecuada adquisición, manejo y divulgación de la información sobre el estado y los peligros asociados a los sistemas volcánicos activos, así como la formación y organización del recurso humano dedicado a tal fin, motiva el desarrollo de instituciones especializadas con responsabilidades a escala local o regional, en particular, los observatorios volcanológicos. La constitución de estas instituciones responsables del monitoreo de la dinámica volcánica representa un salto de calidad en el proceso de construcción de conocimiento sobre los sistemas volcánicos activos; entre sus virtudes es destacable el despliegue de redes instrumentales permanentes dedicadas exclusivamente a este fin, lo cual ha permitido, por un lado, la adquisición de información acorde a las necesidades particulares de cada región y, por otro lado, la disponibilidad del dato en tiempo (cuasi) real por parte de los profesionales que llevan a cabo las tareas de vigilancia ([McGuire y otros, 2022](#)). En Sudamérica, por ejemplo, los observatorios volcanológicos son parte de organismos gubernamentales de ciencia y técnica, como es el caso del Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) perteneciente al Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile ([Amigo, 2021](#)); o al ámbito académico pero con misión encomendada por el gobierno nacional, como por ejemplo el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) de Quito, Ecuador ([Ramon y otros, 2021](#)). En Argentina, el Servicio Geológico y Minero Argentino, organismo descentralizado científico técnico, cuenta con el Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV) como objetivo dentro de su eje estratégico Plan de Reducción de Riesgos Geológicos. De este modo, el OAVV es el área responsable del estudio y monitoreo de los volcanes con potencial afección sobre su territorio, su población e infraestructura ([García y otros, 2021](#)).

Las zonas volcánicas se caracterizan por una compleja y variada gama de procesos físicos tales como la emisión de productos (fluido o particulado) a la superficie, el ascenso de fluidos subsuperficiales hacia niveles más someros, la ruptura de volúmenes de rocas debida al magma abriéndose paso en su ascenso magmático, la ocurrencia de explosiones provocadas por ejemplo por la interacción entre el magma y los fluidos presentes en los sistemas hidrotermales, cambios del estado de tensiones debido a variaciones de las condiciones de presión y temperatura a distintas profundidades, entre otros ([Sigurdsson y otros, 2015](#)). La energía y evolución espacio-temporal de estos procesos definen la dinámica particular de un sistema volcánico activo, una de cuyas principales manifestaciones es la energía sísmica ([McNutt, 2005](#)). Es por ello que la sismología es una de las áreas del conocimiento fundamentales para el estudio de volcanes ([Wassermann, 2012](#)).

El presente artículo recopila una porción de las contribuciones realizadas por sismólogos vulcanólogos de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (Universidad Nacional de La Plata) y del Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (SEGEMAR) durante los últimos años, en colaboración con instituciones locales y extranjeras (entre ellas, la Universidad Estatal de Boise -Estados Unidos-, la Universidad Tecnológica de Delft -Países Bajos-, la Universidad de Granada -España-, el *International Center for Earth Sciences* -Argentina/Italia-, el *Volcano Disaster Assistance Program* del *United States Geological Service* -Estados Unidos-, la Universidad de Mainz -Alemania-, el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional -Ecuador). Las mismas comprenden implementaciones de variadas metodologías en el campo de la sismología y en vinculación con otras ramas del conocimiento (geología, geoquímica, o deformación) ([Olivera Craig, 2017](#); [Casas y otros, 2018](#); [Casas y otros, 2019](#); [Durán, 2019](#); [Casas y otros, 2020](#); [Martínez y otros, 2021](#); [Ruiz y otros, 2022](#); [Casas y otros, 2022a](#); [Casas y otros, 2022b](#); [Badi y otros, 2022](#); [Casas y otros, 2024](#)). Estas contribuciones



Figura 1. Ubicación de los volcanes objetos de estudio del presente artículo (mapa base realizado con ArcGIS (2025)).

constituyen valiosos aportes al conocimiento de las estructuras y dinámicas internas y superficiales asociadas a sistemas volcánicos en territorio sudamericano y antártico (Figura 1).

OBJETOS DE ESTUDIO Y DATOS DISPONIBLES

Volcán Cuicocha

El volcán Cuicocha ($0^{\circ}22'4.8''N$; $78^{\circ}20'49.2''W$), ubicado en Los Andes ecuatorianos (Figura 1), es el centro eruptivo más joven del Complejo Volcánico Cuicocha-Cotacachi. Este volcán se origina a partir de una serie de procesos rápidos (en términos geológicos) de formación de estructuras con posterior destrucción por colapso por inestabilidad gravitacional; entre estas estructuras se encuentra el actualmente inactivo volcán Cotacachi, ubicado hacia el norte del cráter activo, y una caldera central que define la morfología actual del volcán. En sus registros históricos, el volcán Cuicocha muestra actividad explosiva, caracterizada por flujos piroclásticos y depósitos de caídas de ceniza cuya mayor evidencia de actividad está representada por los flujos piroclásticos presentes en el pueblo de Quiroga (~ 9 km de distancia), manifestando columnas de hasta 18 m de espesor y depósitos de ceniza de más de 150 m de espesor (Almeida Vaca y otros, 2023).

El volcán Cuicocha posee una laguna cratérica de considerable volumen, elemento que agrega un condimento particular al análisis de los riesgos en la zona (Gunkel y otros, 2008). Su presencia, en conjunto con las condiciones de la geomorfología local, podrían implicar el desarrollo de lahares con dirección a los pueblos ubicadas a menos de 10 kilómetros sobre sus flancos (entre los mayormente poblados, Quiroga, Otavalo y Cotacachi). Asimismo, la existencia de agua en el cráter y en las profundidades más someras incrementan la potencial explosividad ante el ascenso de magma por los conductos subsuperficiales o incluso ante un aumento de la temperatura por cambios en las condiciones a las profundidades de los reservorios magmáticos (Melián y otros, 2021).

El volcán Cuicocha es monitoreado por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional

(IGEPN). Desde el año 1988 los alrededores del volcán cuentan con una red de estaciones sísmicas y de deformación (Ruiz y otros, 2013). Actualmente, la red sismológica cuenta con cuatro estaciones de monitoreo, comprendiendo una estación corto periodo de componente vertical, y tres estaciones banda ancha de tres componentes.

Volcanes de las Islas Galápagos

El archipiélago de Galápagos (ubicado entre las latitudes 01°40' N y 01°36' S, y longitudes 89°16' y 92°01' W - aproximadamente a 1000 km al oeste de Ecuador continental) está conformado por 13 islas volcánicas. Estas fueron originadas por el ascenso de material magmático desde las profundidades, el cual se ha emplazado por debajo y encima de la corteza oceánica (Sallarès y otros, 2003). El sector occidental del archipiélago comprende los volcanes con mayor frecuencia eruptiva, entre los cuales destacan el volcán Sierra Negra, Alcedo y Cerro Azul. Estudios petrológicos indican que Sierra Negra y Alcedo son volcanes maduros, es decir con magmas fraccionados emplazados en zonas relativamente cercanas a la superficie; en cambio, Cerro Azul es un volcán en su fase de desarrollo, con magmas heterogéneos y zonas de acumulación más profundas (Harpp y otros, 2018).

El volcán Sierra Negra ocupa una extensión de ~40x60 km con un cráter en su sector central con un área de ~7x9 km. Sus erupciones están caracterizadas por la emisión de material a través de las fisuras ubicadas dentro de la caldera, predominantemente hacia su sector norte. Durante los últimos 75 años, el volcán Sierra Negra ha generado ocho erupciones de baja a moderada explosividad (índice de explosividad volcánica - VEI \leq 3) (Vasconez y otros, 2018). El hecho de que el volcán Sierra Negra se encuentre rodeado de poblados que alcanzan las ~10 mil personas en un radio de 100 km del cráter, la periodicidad de sus erupciones y los característicos volúmenes de material emitidos en superficie justifican la necesidad de un sistema de vigilancia permanente (Hidalgo y otros, 2023).

La institución encargada de la vigilancia de los volcanes Sierra Negra, Alcedo y Cerro azul es el IGEPN. La red de vigilancia instrumental cuenta con cinco estaciones sismológicas permanentes en ese sector del archipiélago, a las que se suman estaciones temporales que se despliegan en caso de identificar un eventual aumento de actividad (Alvarado y otros, 2018).

Volcán Peteroa

El volcán Peteroa (35°14'27.6"S, 70°34'22.8"W) está ubicado en la Cordillera de los Andes, en el límite internacional entre Chile y Argentina (Figura 1). Este volcán es el actual centro activo del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa, originado por una migración de los conductos principales de transporte de material hacia el sector norte del Complejo, área en la cual se ha concentrado la actividad eruptiva durante los últimos 10 mil años (Tormey, 1989). En este periodo, explosiones de variada intensidad dieron lugar a una serie de cráteres que constituyen la morfología del volcán Peteroa. A través de ellos, los productos emitidos han sido oleadas y caídas piroclásticas, la formación de un cono de escoria y coladas de lava (Naranjo y otros, 1999). Desde el año 1500 a la fecha, se han documentado alrededor de 15 erupciones caracterizadas por un grado de explosividad mayoritariamente moderado a bajo (índice de explosividad volcánica - VEI \leq 4). Las últimas erupciones, ocurridas en los años 1991, 1998, 2010-2011 y 2018-2019, han sido consideradas de baja explosividad (VEI \leq 2) (Naranjo y otros, 2002; Haller y otros, 2011; Romero y otros, 2020).

De acuerdo con su actividad histórica, sus productos y la proximidad de las poblaciones en Argentina y Chile, el volcán Peteroa se encuentra primero en el ranking de peligrosidad volcánica para el territorio argentino y segundo en el ranking de riesgo relativo para el país (Elissondo y otros, 2024).

El volcán Peteroa posee una red binacional de monitoreo sustentada por el Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV-SEGEMAR) y el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS, SERNAGEOMIN), cuyo instrumental sismológico cuenta actualmente con nueve sismógrafos

banda ancha ([García y otros, 2023](#)).

Volcán Copahue

El volcán Copahue ($37^{\circ}51'43.2''\text{S}$, $71^{\circ}10'58.8''\text{W}$), ubicado en el límite internacional entre Chile y Argentina ([Figura 1](#)), pertenece al Complejo Volcánico Caviahue-Copahue, cuyos procesos de construcción derivaron en la creación de una serie de cráteres alineados en sentido NE-SO. El volcán Copahue ocupa el extremo oriental de estos cráteres, conformando una estructura caracterizada por la presencia de una laguna cratérica ácida en su cima, con emisión cuasi-permanente de gases a la atmósfera ([Melnick y otros, 2006](#)). Los productos documentados del volcán Copahue comprenden coladas de lava, oleadas piroclásticas, lahares y depósitos de caída asociados con explosiones freatomagmáticas. Para los últimos 250 años, la actividad se resume principalmente en explosiones de tipo freáticas, destacándose la erupción del 2012, con emisiones de ceniza de hasta 1500 m sobre el nivel del cráter y con caída de material particulado sobre suelo argentino producto de su dispersión hacia el E-SE ([Naranjo y otros, 2004](#)). Durante los últimos años, el volcán Copahue ha presentado emisión esporádica de ceniza, ocurrencia de explosiones freático-freatomagmáticas en el interior del cráter y actividad sísmica de magnitud variable ([Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica, 2025](#)).

La presencia de dos centros poblados a escasa distancia del cráter activo (Copahue a ~ 6 km y Caviahue a ~ 9 km) en conjunto con los peligros documentados para este volcán motivaron su ubicación en el primer lugar del ranking de riesgo relativo para Argentina ([Elissondo y otros, 2024](#)).

El volcán Copahue es monitoreado por las instituciones responsables de la vigilancia volcánica en Argentina y Chile, es decir el Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV-SEGEMAR) y el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS, SERNAGEOMIN) que mantienen una red de vigilancia binacional que incluye 12 estaciones sismológicas desplegadas en el área ([García y otros, 2023](#)).

Volcán de la Isla Decepción

El volcán Isla Decepción ($63^{\circ}00'03.6''\text{S}$, $60^{\circ}39'07.2''\text{W}$) está ubicado en el archipiélago de las islas Shetland del Sur, en el sector más septentrional del continente antártico ([Figura 1](#)). Los orígenes de este volcán comprenden procesos tectónicos complejos, incluyendo procesos extensionales, subducción y zonas de fallas transformes, los que motivaron el ascenso de material a la superficie. La estructura volcánica actual posee una forma de herradura, cuya morfología podría haber sido originada por un evento eruptivo mayor o bien por procesos puramente tectónicos ([Smellie, 2001](#)).

Los registros de erupciones del volcán Isla Decepción se encuentran limitados por la ausencia de población permanente. Los productos volcánicos observados en su superficie son coladas de lava, lahares, flujos piroclásticos, y emisión de material piroclástico por explosiones freáticas ([Bartolini y otros, 2014](#)). Es destacable la erupción ocurrida en 1967, durante la cual la columna de ceniza alcanzó una altura de 6 km. Asimismo, los productos emitidos durante la erupción de 1969 generaron la destrucción de una base de nacionalidad chilena ubicada en el área cercana al punto de emisión y graves daños en la base británica localizada a unos pocos kilómetros.

El monitoreo volcánico de Isla Decepción se ha realizado mediante registración estival, a través de la colaboración entre proyectos de investigación argentinos y españoles. En 2008 se instala la primera estación permanente y en 2021 el Instituto Geográfico Nacional de España, con colaboración de la Universidad de Granada, comienza la ampliación de la red de vigilancia volcánica en Isla Decepción. En el año 2023, a partir de la solicitud de la Dirección Nacional del Antártico, el OAVV-SEGEMAR propone la instalación, operación y mantenimiento de una red de vigilancia volcánica en Isla Decepción. De esta manera, con la colaboración de la Oficina Provincial de Tecnologías de la Información y la Comunicación (OPTIC, provincia de Neuquén), se instalaron estaciones sismológicas

en el área, estaciones GNSS, una cámara para monitoreo visual y un nodo para la comunicación de la información recopilada con la base de datos del OAVV en Buenos Aires ([García y otros, 2024](#)). Desde entonces, el monitoreo del volcán Isla Decepción se realiza en forma conjunta entre las instituciones responsables del monitoreo volcánico en Argentina (OAVV-SEGEMAR) y España (Instituto Geográfico Nacional), mediante una red de vigilancia que incluye con diez estaciones de monitoreo sísmológico ([Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica, 2025](#); [Instituto Geográfico Nacional, 2025](#)).

RESULTADOS

Instrumental

Para una adecuada evaluación del estado de un sistema volcánico activo, resulta fundamental contar con una red instrumental diseñada en función de los procesos físicos de interés, los requerimientos de las metodologías a implementar y, a su vez, robusta considerando las condiciones topográficas y climáticas de la zona, así como potenciales vandalismos. El hecho de que la actividad sísmovolcánica abarca un amplio rango de frecuencias (en general, entre 20-30 s y 40 Hz) y su energía suele ser menor que la de la sismicidad tectónica, implica que el instrumental ha de ser de banda ancha y alta sensibilidad. Sin embargo, este instrumental también debe ser apto para su instalación y funcionamiento de forma eficiente, así como poseer autonomía por largos períodos de tiempo y en las condiciones más extremas.

A raíz de las condiciones meteorológicas extremas presentes en el continente antártico, el proyecto de instalación de instrumental (geofísico, geodésico, de monitoreo visual, y de telecomunicación) en la Isla Decepción constituye el mejor ejemplo de la robustez de los sistemas desplegados en el terreno con el objetivo de monitoreo. A la fecha, esta instalación posibilita el monitoreo en tiempo real de la actividad en Isla Decepción ([Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica, 2025](#)) proveyendo información útil a autoridades y personal potencialmente afectado por una eventual reactivación del volcán. La [Figura 2](#) muestra la evolución de tres índices sísmológicos seleccionados en el ejercicio del monitoreo (en este caso, la media cuadrática de la amplitud ([Endo y otros, 1991](#)), el espectrograma ([Stephens y otros, 1994](#)), y el índice de frecuencia ([Buurman y otros, 2006](#))), los cuales describen la evolución de la señal sísmica continua registrada en una de las estaciones de monitoreo del volcán Isla Decepción. A partir de gráficos como el del ejemplo representado en la figura, es posible interpretar si en el período analizado la energía de las señales muestra variaciones que puedan ser clasificadas como anómalas, indicando cambios en el comportamiento del volcán y, por ende, ameritando otros tipos de análisis subsecuentes para una interpretación más detallada.

Caracterización

La sismicidad originada en un área volcánicamente activa es un parámetro útil para la descripción de los procesos físicos actuantes en el sistema y la identificación de las regiones con mayor dinamismo ([Titos y otros, 2018](#)). El tipo de sismicidad, la cantidad de energía liberada, el número de eventos sucedidos, su distribución espacio-temporal y el contenido espectral de la energía son índices fundamentales para la adecuada construcción de conocimiento de un sistema magmático ([McGuire y otros, 2022](#)).

Entre enero de 2012 y enero de 2013, en el marco del proyecto MalARRgue ([Ruigrok y otros, 2012](#)) se desplegó una red temporal de seis estaciones en el flanco oriental del volcán Peteroa, sobre territorio argentino. De forma contemporánea, OVDAS contaba con una red de tres estaciones de monitoreo ubicadas sobre el territorio chileno del volcán.

[Olivera Craig \(2017\)](#) detectó y localizó más de mil eventos de fractura implementando un método de localización basado en las dobles diferencias que, a partir de los tiempos de arribo de ondas P y S, asume la proximidad espacial entre pares de hipocentros haciendo una localización relativa y minimizando los efectos de la propagación hasta la estación ([Waldhauser y otros, 2000](#)). Esta

Volcán: Isla Decepcion, Estación: BFU

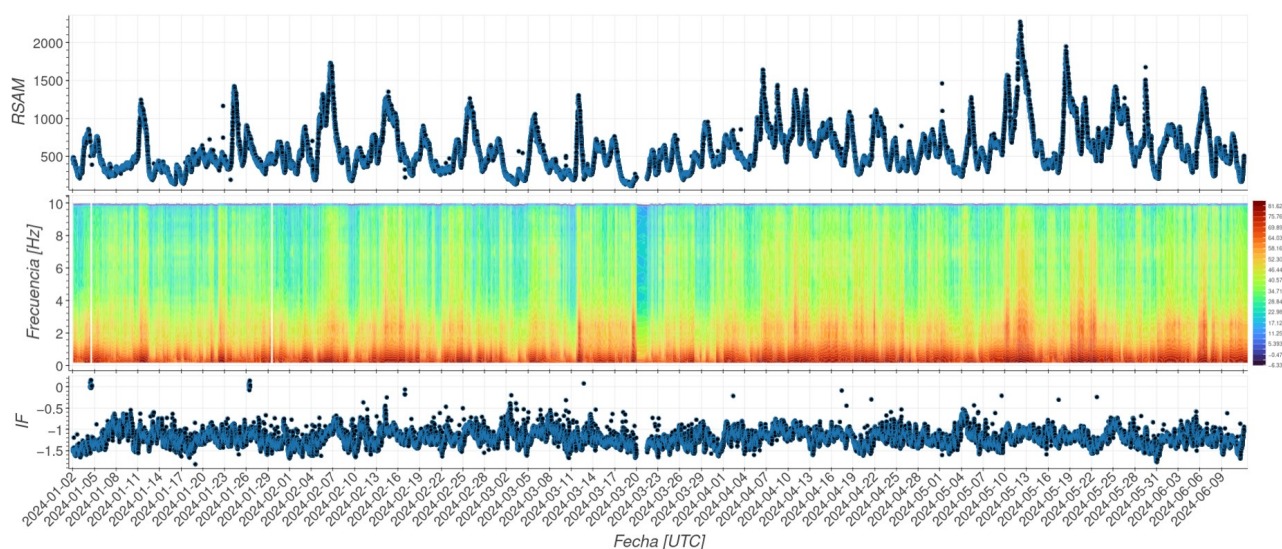


Figura 2. Evolución de parámetros sísmicos seleccionados -media cuadrática de la amplitud (RSAM), espectrograma, e índice de frecuencia (IF)- para la estación BFU ubicada en Isla Decepción en el intervalo 2024-enero-01 al 2024-junio-12.

metodología sumó además un control objetivo de las lecturas de tiempos de arribo y un análisis estadístico de los errores de cómputo a fin de robustecer los resultados, logrando así una más precisa definición de las zonas sismogénicas y su asociación a estructuras geológicas previamente reconocidas en la región (Figura 3). Mientras que el origen de aquellos eventos ubicados en el sector norte tienen su origen en la presión ejercida por los fluidos en el sistema hidrotermal (Pearce y otros, 2022), otro grupo de eventos, localizados a profundidades no mayores a 10 km, se originan sobre un plano de falla con despegue a esas profundidades. El análisis de la sismicidad ha permitido, entonces, vislumbrar las condiciones sismogénicas de estructuras previamente reconocidas en el área del volcán Peteroa.

La interferometría sísmica es una técnica que evalúa los patrones de interferencia (constructiva o destructiva) en la propagación de la energía sísmica registrada por una o varias estaciones. Mediante un reordenamiento del campo de ondas registrado, esta técnica permite caracterizar las propiedades del subsuelo entre las ubicaciones de las estaciones de registro (Wapenaar y otros, 2008). En este artículo recopilamos, por un lado, aplicaciones de interferometría mediante el procesamiento de los registros de estaciones individuales, cuyo producto son estimaciones de la profundidad de discontinuidades presentes en el subsuelo por debajo del punto de registro y, por otro lado, aplicaciones de interferometría mediante el procesamiento de los registros de pares de estaciones, cuyo producto final es la realización de tomografías sísmicas. En base a estas metodologías, describimos el subsuelo del volcán Peteroa y de volcanes en Islas Galápagos a distintas profundidades.

Una fuente en profundidad libera energía hacia la superficie sobre la cual esta energía es reflejada, dirigiéndose nuevamente hacia el subsuelo. En el caso de que la trayectoria de esta energía esté direccionada verticalmente, los registros de cada estación en superficie estarán constituidos, entonces, por el arribo de la energía inicial seguido de las múltiples reflexiones entre la superficie y las diversas discontinuidades del subsuelo. La interferometría sísmica permite separar estos arribos, eliminando la información de las ondas directas y atenuando gran parte del ruido incoherente. De esta manera, permite estimar la profundidad de las discontinuidades reflectoras de la energía propagada (Wapenaar y otros, 2010).

Casas y otros (2019); Casas y otros (2020) analizaron la interferencia de la energía sísmica generada por eventos a diversas distancias respecto a las estaciones desplegadas en los alrededores del

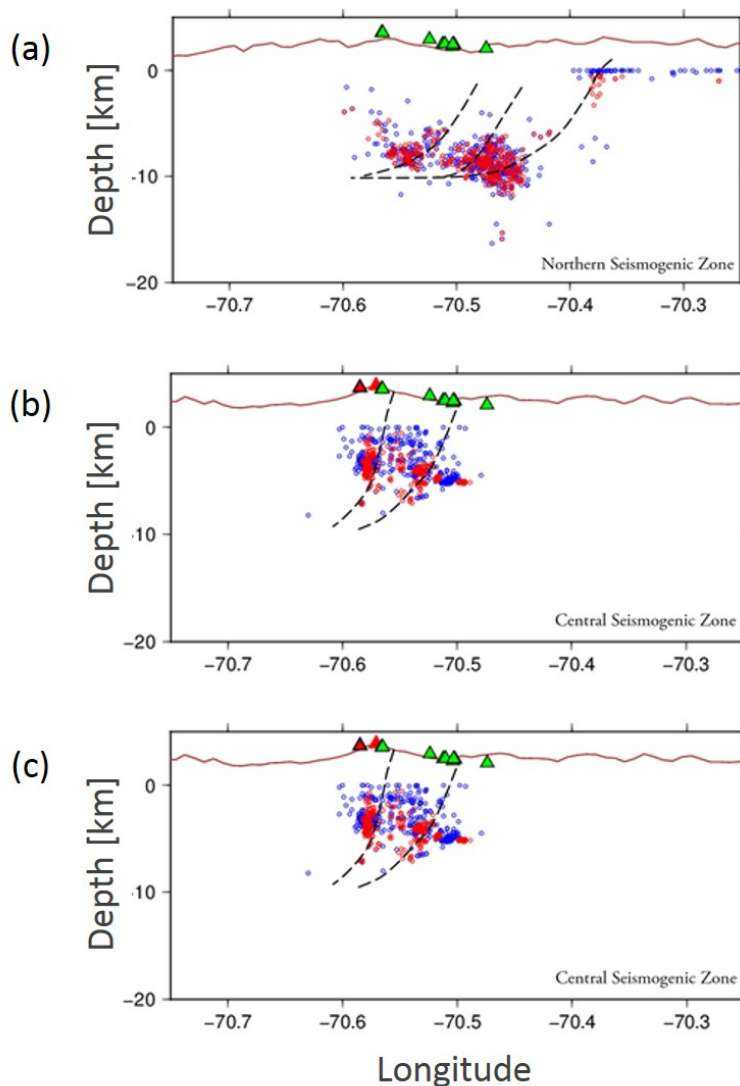


Figura 3. Sismicidad localizada en el área del volcán Peteroa y su relación con las estructuras reconocidas para la zona, para tres sectores ubicados (a) al norte del volcán, (b) en el sector central, y (c) al sur del volcán Peteroa (Olivera Craig, 2017). Sobre la superficie topográfica, los triángulos rojos indican la longitud de las estructuras del complejo volcánico Planchón-Peteroa, los puntos azules corresponden a los resultados por aplicación de un algoritmo basado en inversión de tiempos de arribo para cada evento (Casas y otros, 2014) mientras que los puntos rojos corresponden a los resultados por aplicación de un algoritmo basado en dobles diferencias (Olivera Craig, 2017); las líneas punteadas indican la estimación de las estructuras de origen a partir de estos resultados e información de otros trabajos.

volcán Peteroa. Ello condujo a la evaluación de los reflectores de energía a profundidades someras (primeros 4 km) y profundas (hasta 650 km). En Casas y otros (2019) se utilizaron los registros de onda P de incidencia vertical provenientes de sismos locales y se utilizó un modelo de velocidades de onda P desarrollado para este sector de la zona cordillerana para la inversión de las estimaciones temporales en profundidad. De esta manera, ha sido posible la estimación de las profundidades de las discontinuidades entre formaciones geológicas presentes en el área. Asimismo, los resultados muestran la complejidad que sugiere la presencia de fluidos hidrotermales en la interpretación de los mismos, y respalda la idea de la presencia de material magmático a profundidades de 4 km, aunque con esperable alto porcentaje de solidificación (Figura 4a).

Esta metodología también fue aplicada a los registros de energía de onda P y S de sismos regionales y telesismos (con distancias epicentrales hasta 120°) (Casas y otros, 2020). Los resultados fueron analizados en dos bandas de frecuencias complementarias, de modo tal de arribar a mejores interpre-

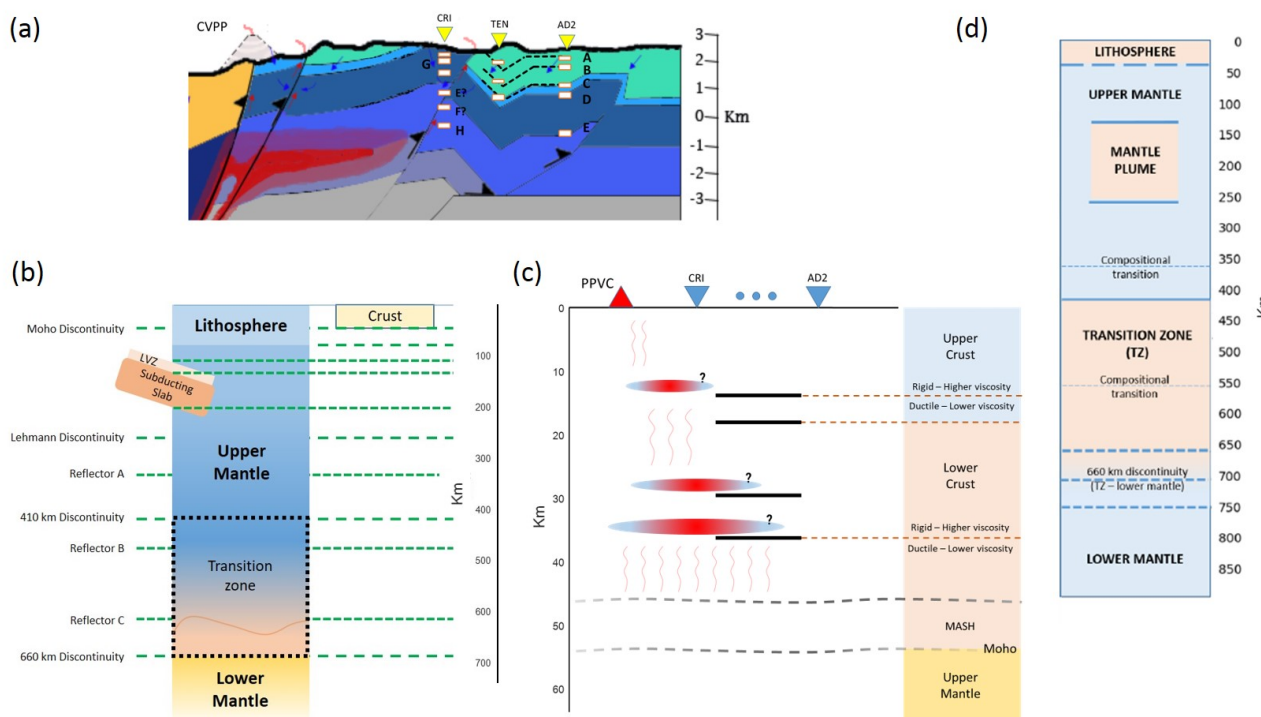


Figura 4. Interpretación de los resultados obtenidos por aplicación de interferometría mediante autocorrelaciones a información registrada en los alrededores del volcán Peteroa utilizando (a) eventos locales (Casas y otros, 2019), (b) eventos regionales y telesismos en el rango de frecuencias $[0.8-3]$ Hz (Casas y otros, 2020), (c) eventos regionales y telesismos en el rango de frecuencias $[0.3-0.8]$ Hz (Casas y otros, 2020); y (d) en Islas Galápagos a registros de telesismos (Boero, 2023). En (a), las letras indican los distintos reflectores interpretados; en (c), los signos de interrogación indican las zonas con probable presencia de material magmático.

taciones para las distintas profundidades. De esta manera, el rango de menores frecuencias ($[0.3-0.8]$ Hz) permitió la interpretación de las discontinuidades del subsuelo para profundidades entre 50 km y 650 km, mostrando la presencia de la discontinuidad de Mohorovicic a 50 km de profundidad, el límite litósfera-asténósfera a 75 km, una zona de baja velocidad entre los 100 km y el techo de la placa subductante a 120 km cuya base se encuentra a los 200 km, la discontinuidad de Lehmann a 270 km, las discontinuidades de los 410 km y 660 km, y por encima de esta última, entre los 600 km y los 660 km, un reflector que podría relacionarse a porciones de placas subductadas en tiempos históricos que, por su densidad, es acumulada a estas profundidades (Figura 4b). Por otro lado, el análisis de los resultados para el rango de mayores frecuencias ($[0.8-3]$ Hz) permitió proveer la profundidad de la discontinuidad entre corteza superior e inferior a los 18 km y sus discontinuidades internas (entre su parte rígida ubicada en la zona superior y su parte dúctil ubicada en la parte inferior) a los 13 km y 37 km para la corteza superior e inferior, respectivamente (Figura 4c).

En otro ambiente tectónico, en las Islas Galápagos, la aplicación de interferometría a datos registrados en el área permitió interpretar la presencia del techo y base de la pluma mantélica que se horizontaliza para la ubicación de las estaciones, a los 130 km y 270 km, respectivamente. Asimismo, Los resultados muestran la existencia de una discontinuidades relacionadas a una transiciones composicionales a los 350 km y los 550 km, así como la discontinuidad a los 410 km y tres discontinuidades entre los 650 km y los 750 km de profundidad que reflejan la complejidad de la discontinuidad de los 660 km (Boero, 2023) (Figura 4d).

La tomografía sísmica ha demostrado ser una herramienta útil para el conocimiento de la distribución espacial de las estructuras del subsuelo volcánico (Koulakov y otros, 2014). En las últimas décadas, en particular, su utilización con ruido sísmico ambiental ha sido extensamente empleada para la realización de inversiones tomográficas que permitan un conocimiento de la distribución de velocidad de ondas S en profundidad (Brenguier y otros, 2011). En los últimos años, Casas y otros (2018)

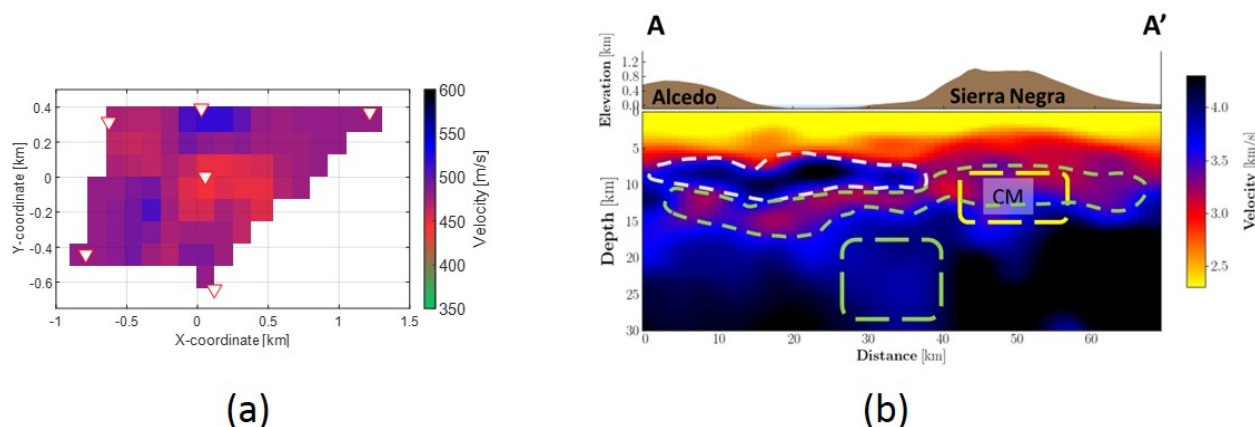


Figura 5. Distribución de velocidades de onda S (a) a una profundidad de 140 m en un sector del flanco oriental del volcán Peteroa (extraído de Casas y otros, 2018); (b) a lo largo de un perfil que cruza los volcanes Sierra Negra y Alcedo, hasta una profundidad de 30 km (Casas y otros, 2022b). En (b), las zonas enmarcadas por líneas punteadas indican, de menor a mayor profundidad, una anomalía positiva y dos anomalías negativas de velocidad. CM indica una región de baja velocidad previamente identificada (Tepp y otros, 2014).

y Casas y otros (2022b) han aplicado esta metodología a datos registrados en el área del volcán Peteroa y un sector de Galápagos occidental, área en la cual se han emplazado los volcanes Sierra Negra, Cerro Azul y Alcedo.

Para el caso del volcán Peteroa, los resultados obtenidos en (Casas y otros, 2018) permiten diferenciar dos capas hasta los 350 m de profundidad, cuya discontinuidad se ubica a los 70 m y separa dos medios de velocidades 350 m/s y 510 m/s, respectivamente. Esta división por su comportamiento sísmico también es observada en los perfiles geológicos para la zona de acuerdo a perfiles estratigráficos. Asimismo, la distribución de velocidades a profundidades constantes indica que las menores velocidades se ubican a lo largo de una alineación NO-SE (ver ejemplo en Figura 5a), características que se mantiene en profundidad. Esta alineación posee estrecha relación espacial con puntos de manifestaciones termales en el área, indicando la importancia de la saturación de fluidos en los valores de velocidad obtenidos, sin embargo no se descarta diferencias de velocidad originadas por cambios composicionales, rasgos estructurales, cambios de porosidad o de porcentaje de saturación del subsuelo. La información obtenida permite incrementar el conocimiento sobre el comportamiento del subsuelo ante la propagación de la energía sísmica en las capas más superficiales, permitiendo mejorar los modelos de velocidad para las profundidades evaluadas, reafirmando la importancia del sistema hidrotermal en los valores de velocidad y en la propagación de la energía sísmica, confirmando que la metodología es sensible a estas propiedades de las rocas, y convalidando la utilidad de la aplicación de la metodología a una escala relativamente acotada, la que puede emplearse para el estudio de zonas de particular interés en este u otros volcanes.

A una escala mayor, Casas y otros (2022b) aplicaron metodologías tomográficas a la información sísmica registrada por dos redes temporales de estaciones desplegadas en los alrededores de los volcanes Sierra Negra, Cerro Azul y Alcedo. Los resultados concuerdan con ideas previamente formuladas sobre la interconexión de los sistemas magmáticos en la zona occidental de Galápagos (Reddin y otros, 2023), indicando la presencia de volúmenes de acumulación magmática compartidos en profundidad (Figura 5b).

El sector occidental de Galápagos presenta dos anomalías de baja velocidad y una anomalía de alta velocidad. Estas anomalías están ubicadas en el mar, entre los volcanes Alcedo y Sierra Negra. La anomalía positiva de velocidad, ubicada por encima de las zonas de acumulación de magma, es causada por solidificación de magma emplazado en esta zona a partir del descenso del flujo de material.

Un análisis conjunto de los resultados tomográficos con la sismicidad y los patrones de deformación alrededor de las anomalías indican migración de magma hacia las estructuras de los volcanes Alcedo y Sierra Negra. El magma migra desde el reservorio en profundidad hacia las zonas de acumulación ubicados inmediatamente debajo del volcán Sierra Negra. Los resultados indican una conexión entre los reservorios que alimentan los volcanes Alcedo y Sierra Negra, sin embargo no muestran evidencia de conexión con el volcán Cerro Azul.

Monitoreo

Históricamente, el monitoreo de los sistemas volcánicos activos ha sido llevado a cabo a través de la localización de fuentes sísmicas con energía suficientemente grande como para ser registrada por las estaciones desplegadas en sus cercanías (Sparks y otros, 2012). Mediante este abordaje, la evolución de los sistemas activos es evaluada de acuerdo a la cantidad, magnitud, distribución espacio-temporal y modelos de mecanismos de generación en base a los diversos tipos de eventos que ocurren. En tal sentido, las características de los registros en el dominio temporal y frecuencial permiten reconocer mecanismos tales como fracturamiento de rocas, movimiento de fluidos, o fenómenos de resonancia en grietas (McNutt, 2005).

A partir del análisis de los parámetros que definen las señales registradas en el volcán Peteroa, Martínez y otros (2021) aplicaron técnicas de aprendizaje automático (*machine learning*) con el objeto de evaluar las capacidades de redes neuronales profundas. En base a ello, a partir de una adecuada selección de los parámetros independientes involucrados, contribuyeron al desarrollo de un clasificador de eventos eficiente, incluso ante la presencia de un base de datos limitada. Este clasificador puede, entonces, ser utilizado para la construcción de catálogos sísmicos más completos; lo que se traduce en un incremento de la confiabilidad de las interpretaciones acerca de la evolución de este volcán activo en el tiempo.

Sin embargo, no todos los procesos subsuperficiales se manifiestan mediante eventos sísmicos individuales. Por ello, la utilización de solo una porción limitada de los registros puede conducir a una interpretación incompleta de la dinámica volcánica. Como respuesta a esto, se han desarrollado metodologías que permiten la utilización de los registros completos para la descripción de la evolución de un sistema magmático (Endo y otros, 1991; Kumagai y otros, 2010; Bueno y otros, 2021; Rey-Devesa y otros, 2023; Casas y otros, 2024).

El último evento eruptivo del volcán Peteroa ocurrió en el periodo octubre de 2018 a marzo de 2019. Un análisis multiparámetro de las cantidades de energía liberada, de cocientes de energía a distintos rangos espectrales, y de la distribución de energía en el espectro de frecuencias, aplicado a registros de una estación ubicada en cercanías al volcán Peteroa ha permitido describir la evolución del sistema, caracterizando los procesos físicos ocurridos en momentos previos, durante y posterior a las emisiones de ceniza; los resultados revelan la importancia de la energía a bajas frecuencias en el entendimiento de la evolución de este volcán activo (Badi y otros, 2022) (Figura 6a). Asimismo, cálculos de las variaciones temporales de la velocidad sísmica indican cambios significativos ocurridos entre junio y septiembre de 2018, es decir, entre uno y cuatro meses previo a la ocurrencia de las emisiones de ceniza de diciembre de ese año (Casas y otros, 2022a); estos resultados, en conjunto con las características de las señales a bajas frecuencias, constituyen un precursor sísmico de la fase eruptiva analizada (Figura 6).

Los análisis de variaciones temporales de la velocidad sísmica también fueron aplicados al entendimiento de la dinámica del volcán Cuicocha (Ecuador) durante momentos de quietud de ese sistema volcánico (Durán, 2019). Este análisis permitió establecer un nivel de referencia útil para la mejor comprensión de los potenciales eventos de mayor energía. Las variaciones de velocidad sísmica poseen gran correlación con la deformación en la dirección vertical en el área y las variaciones estacionales de temperatura y precipitaciones (Figura 7a). A su vez, la correlación de las variaciones de velocidad en el espacio con la sismicidad indica un patrón de cambio del estado de tensiones en

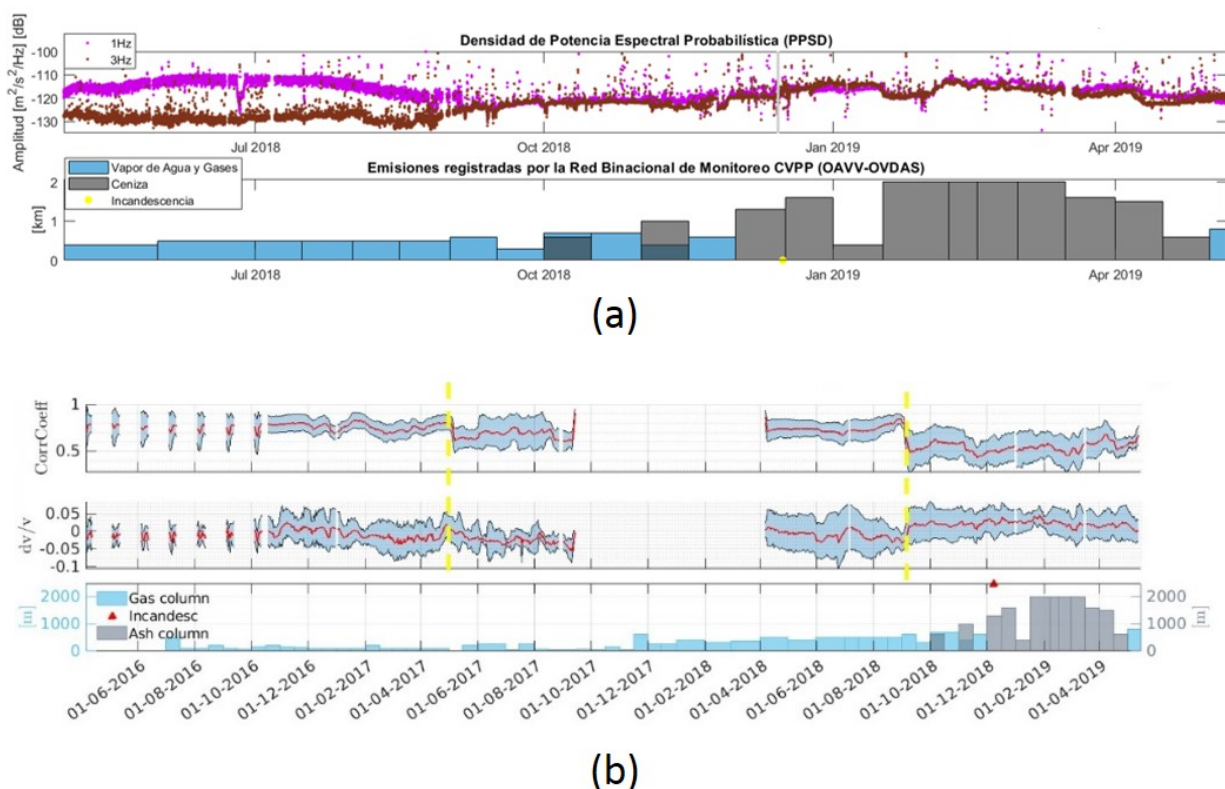


Figura 6. Evolución de índices sísmicos utilizados en el estudio del comportamiento del volcán Peteroa en un intervalo que incluye los eventos superficiales más recientes. (a) Variaciones de densidad de potencia espectral para frecuencias seleccionadas en el periodo comprendido entre mayo 2018 y mayo 2019 (Badi y otros, 2022). (b) Variación del coeficiente de correlación entre registros y variación relativa de velocidad sísmica entre abril de 2016 y junio de 2019; las líneas verticales amarillas indican mayores variaciones de las curvas analizadas (Casas y otros, 2022a).

la zona.

Los registros sísmicos adquiridos por una red de estaciones ubicada en el cráter del volcán Sierra Negra (Galápagos) antes, durante, y posterior a su última erupción iniciada el 26 de junio de 2018, fueron utilizados para la evaluación de las variaciones de velocidad sísmica (Figura 7b) (Ruiz y otros, 2022). Los resultados indican un notable decrecimiento de velocidad 17 días antes de la erupción en la zona central de la caldera del volcán a profundidades de 2 km, en la ubicación de un filón capa (sill) inferido para esta zona (Yun y otros, 2006).

Durante el periodo 2018-2023, el volcán Copahue (Argentina-Chile) ha generado una serie recurrente de erupciones con columnas de hasta ~ 1740 m de altura. Mediante el uso de información sísmica registrada por una estación ubicada en el área cercana al cráter, se ha descrito la evolución de las condiciones estructurales y de rigidez en un intervalo que incluye tiempos anteriores y posteriores a los eventos eruptivos ocurridos. La evaluación de las variaciones temporales de los parámetros sísmicos analizados permite, en conjunto con modelos previamente propuestos para el área (Farias y otros, 2023; Carbajal y otros, 2025), sugerir un modelo físico de ocurrencia de las erupciones en Copahue (Casas y otros, 2024). El comportamiento del volcán Copahue para el periodo 2018-2023 puede interpretarse por la superposición de dos procesos, uno cíclico y uno no-cíclico. El primero de ellos corresponde a procesos ocurridos en la zona más somera del subsuelo, a las profundidades del sistema hidrotermal. El comienzo de la ciclicidad remite a una obstrucción de los conductos superficiales producto de la cristalización de minerales en un entorno de reducción de la cantidad de fluidos aportados al sistema. El aumento de la presión local deriva en la apertura de grietas y posteriormente en una despresurización del sistema en su zona más superficial, en forma de

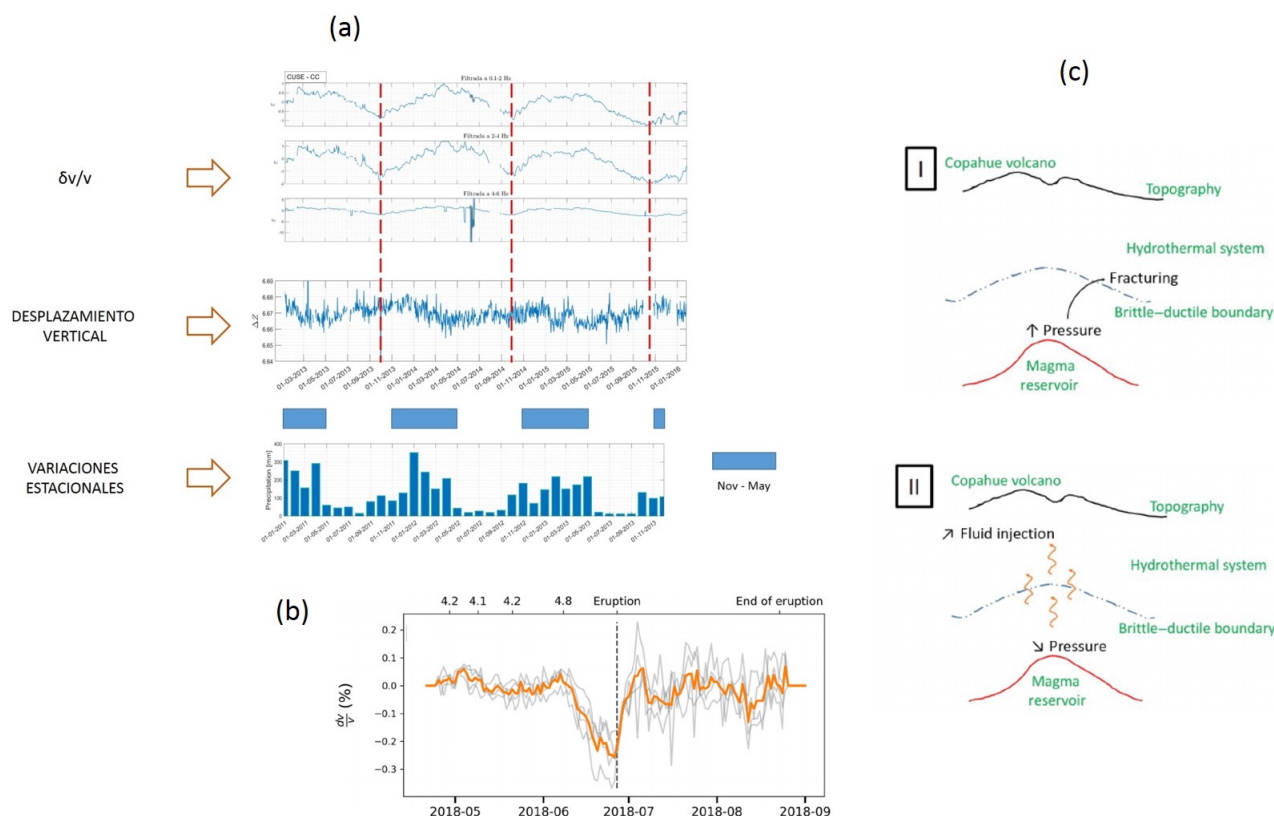


Figura 7. (a) Variaciones de velocidad sísmica para tres estaciones ubicadas en el área del volcán Cuicocha simultáneas a los registros de deformación -desplazamiento vertical- y precipitaciones (Durán, 2019), (b) Variaciones de velocidad sísmica obtenidas para el cráter del volcán Sierra Negra (Galápagos) durante la erupción de junio de 2018 (extraído de Ruiz y otros, 2022), (c) Fases I y II relevantes a procesos no-cíclicos en el comportamiento del volcán Copahue para el periodo 2018-2023 (Casas y otros, 2024).

pequeñas explosiones con emisión de material a la superficie. Luego de ello, el sistema magmático retoma su balance del estado de tensiones, traducido en su transitorio equilibrio. Por otro lado, los procesos no-cíclicos suceden en el contexto de una deformación positiva (inflación) del sistema y comprenden perturbaciones de presión a las profundidades de los reservorios de material magmático, lo que motiva el fracturamiento de rocas y el flujo de fluidos (Figura 7c).

CONCLUSIONES

Un óptimo conocimiento sobre un sistema volcánico activo comprende la caracterización de los elementos que conforman el subsuelo (su ubicación espacial y propiedades físico-químicas) y de la interacción de los mismos en el tiempo, lo cual es logrado a partir de información obtenida desde las distintas disciplinas del conocimiento científico. En base a la información sísmica registrada en áreas volcánicas activas, profesionales de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG, UNLP) y del Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV, SEGEMAR) aportan a la adquisición de conocimiento sobre volcanes activos.

Las metodologías implementadas en los últimos años comprenden la identificación y descripción de la sismicidad registrada en las cercanías a los centros eruptivos, el análisis de la coherencia de las señales en los registros, la estimación de la distribución de las velocidades de propagación de la energía sísmica en el subsuelo, y la caracterización de la evolución de los sistemas volcánicos mediante el análisis de parámetros sísmicos sensibles a distintas causas físicas. Sus resultados conducen a la identificación de las estructuras sismogénicas, la visualización de reflectores en el subsuelo volcánico, la iluminación 3D de los sistemas volcánicos y su relación con su entorno tectónico,

la identificación de precursores de eventos eruptivos y la interpretación de la dinámica interna mediante análisis multiparamétricos sobre la señal sísmica continua. La implementación de estas metodologías, entonces, ha permitido incrementar el conocimiento general de volcanes activos en Sudamérica, como los volcanes Peteroa (Argentina), Cuicocha (Ecuador), Copahue (Argentina) y Sierra Negra (Galápagos).

La FCAG y el OAVV continúan desarrollando trabajos a través de proyectos conjuntos y con colaboración internacional en el campo de la vulcanología, y particularmente en sismología volcánica. La información obtenida es fundamental para el entendimiento de la dinámica de los sistemas volcánicos estudiados, la evaluación de potenciales escenarios eruptivos y, fundamentalmente, un aporte significativo a la mitigación del riesgo por erupciones volcánicas.

Agradecimientos Los autores agradecen especialmente a los profesionales del OAVV (Argentina), IGN (España), OVDAS (Chile), IAG (España), VDAP (Estados Unidos) por los aportes instrumentales, científicos, técnicos, logísticos, político-económicos y vinculares.

REFERENCIAS

- Almeida Vaca, M., Bablon, M., Andrade, S. D., Hidalgo, S., Quidelleur, X., Vasconez, F. J., Müller, A. V., Lahitte, P. y Samaniego, P. (2023). New geological and geochronological constraints on the evolution of the Cotacachi-Cuicocha volcanic complex (Ecuador). *Journal of South American Earth Sciences*, 128, 104489. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104489>
- Alvarado, A., Ruiz, M., Mothes, P., Yepes, H., Segovia, M., Vaca, M., Ramos, C., Enríquez, W., Ponce, G., Jarrín, P., Aguilar, J., Acero, W., Vaca, S., Singaicho, J. C., Pacheco, D. y Córdova, A. (2018). Seismic, volcanic, and geodetic networks in Ecuador: Building capacity for monitoring and research. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 432-439. <https://doi.org/10.1785/0220170229>
- Amigo, A. (2021). Volcano monitoring and hazard assessments in Chile. *Volcanica*, 4(S1), 1-20. <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.0120>
- Badi, G., Hipatia, V. H., Olivera Craig, Casas, J. A., Martínez, V. y García, S. (2022). Evolución de la señales de largo período durante el proceso eruptivo del complejo volcánico Planchón-Peteroa en 2018. *XXI Congreso Geológico Argentino*. Puerto Madryn, Argentina, 1145-1146. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29409.48488>
- Bartolini, S., Geyer, A., Martí, J., Pedrazzi, D. y Aguirre-Díaz, G. (2014). Volcanic hazard on Deception Island (south Shetland Islands, Antarctica). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 285, 150-168. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.009>
- Boero, E. (2023). *Iluminando la estructura interna de Galápagos mediante interferometría sísmica* [Tesis de grado, Universidad Nacional de La Plata]. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/154746>
- Brenguier, F., Clarke, D., Aoki, Y., Shapiro, N. M., Campillo, M. y Ferrazzini, V. (2011). Monitoring volcanoes using seismic noise correlations. *Comptes Rendus Géoscience*, 343(8), 633-638. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.12.010>
- Bueno, A., Balestrieri, R., De Angelis, S., Benítez, M. C., Zuccarello, L., Baraniuk, R., Ibáñez, J. M. y de Hoop, M. V. (2021). Recurrent scattering network detects metastable behavior in polyphonic seismo-volcanic signals for volcano eruption forecasting. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-23. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3134198>
- Buurman, H. y West, M. E. (2006). Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 eruption of Augustine volcano. En J. A. Power, M. L. Coombs y J. T. Freymueller (Eds.), *The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska* (pp. 41-57). U. S. Geological Survey paper 1769.
- Carbajal, F. J., Vigide, N., Badi, G., Agosto, M., Carballo, F. y García, S. (2025). Seasonal control on phreatic activity of the crater lake of Copahue volcano during the 2018–2022 eruptive cycle. *Bulletin of Volcanology*, 87(6), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s00445-025-01826-z>
- Casas, J. A., Badi, G. A., Manassero, M. C., Gómez, M., Draganov, D. y Ruzzante, J. (2014). Caracterización de la actividad sismovolcánica en el volcán Peteroa, Mendoza. *XIX Congreso Geológico Argentino*. Córdoba, Argentina.
- Casas, J. A., Draganov, D., Badi, G. A., Manassero, M. C., Olivera Craig, V. H., Franco Marín, L., Gómez, M. y Ruigrok, E. (2019). Seismic interferometry applied to local fracture seismicity recorded at Planchón-Peteroa volcanic complex, Argentina-Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 92, 134-144. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.03.012>
- Casas, J. A., Badi, G. A., Olivera Craig, V. H., García, S. y Draganov, D. (2022a). Identificación de rasgos pre-eruptivos en variaciones de velocidad sísmica en el complejo volcánico Planchón-Peteroa (Argentina-Chile). *XXI Congreso Geológico Argentino*. Chubut, Argentina.

- Casas, J. A., Magrini, F., Kaus, B., Badi, G., Ruiz, M. Z., Ebinger, C., Draganov, D. y De Siena, L. (2022b). S-wave velocity structure at the Galápagos archipiélago (Ecuador) using ambient seismic noise. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-2846>
- Casas, J. A., Mikesell, T. D., Draganov, D., Lepore, S., Badi, G. A., Franco, L. y Gómez, M. (2018). Shallow S-wave velocity structure from ambient seismic noise at Planchón-Peteroa volcanic complex, Argentina-Chile. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(4), 2183-2198. <https://doi.org/10.1785/0120170281>
- Casas, J. A., Badi, G. A., Franco, L. y Draganov, D. (2020). Seismic interferometry applied to regional and teleseismic events recorded at Planchón-Peteroa volcanic complex, Argentina-Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 393, 106805. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106805>
- Casas, J. A., Badi, G. A., Mikesell, T. D., García, S. E. y Draganov, D. (2024). Single-station multiparametric seismic monitoring of Copahue volcano, Argentina–Chile (2018–2023). *Seismological Research Letters*, 95(5), 2637-2650. <https://doi.org/10.1785/0220240074>
- Durán, A. C. (2019). *Monitoreo del complejo volcánico Cotacachi-Cuicocha mediante interferometría sísmica de ruido sísmico ambiental* [Tesis de grado, Universidad Nacional de La Plata]. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/168145>
- Elissondo, M. y Farías, C. (2024). *Riesgo volcánico relativo en territorio argentino*. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Instituto de Geología y Recursos Minerales. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/4417>
- Endo, E. T. y Murray, T. (1991). Real-time seismic amplitude measurement (RSAM): A volcano monitoring and prediction tool. *Bulletin of Volcanology*, 53(7), 533-545. <https://doi.org/10.1007/BF00298154>
- Esri. (2025). *ArcGIS Pro: Geographic Information System Software* (Versión 3.x) [Programa de software]. Esri Inc., Redlands, CA, EE.UU. Recuperado el 11 de junio de 2025 de <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/>
- Fariás, C., Lazo, J., Basualto, D., Saavedra, M., Muñoz-Quiroz, F., Zuñiga-Urrea, L., Martínez-Bravo, R., Huentenao-Inostroza, I. y Saéz-Opazo, R. (2023). One decade of b-value variations from volcano-tectonic seismicity as an early indicator of episodes of crisis in a volcano: The case of Copahue, southern Andes. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1181177. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1181177>
- García, S., Badi, G. A., Preatoni, V., Casas, J. A. y Acosta, G. (2024). Instalación de la primera red argentina de monitoreo volcánico permanente en la Isla Decepción. *Proceedings of the XII Cities on volcanoes*. Guatemala.
- García, S. y Badi, G. (2021). Towards the development of the first permanent volcano observatory in Argentina. *Volcanica*, 4(S1), 21-48. <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.2148>
- García, S., Badi, G., Preatoni, V., Olivera Craig, V. H., Carbajal, F., Acosta, G., Casas, A. y Vigide, N. (2023). *Avances en el monitoreo volcánico instrumental en la República Argentina*, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET.
- Gunkel, G., Beulker, C., Grupe, B. y Viteri, F. (2008). Hazards of volcanic lakes: Analysis of lakes Quiltoa and Cuicocha, Ecuador. *Advances in Geosciences*, 14, 29-33. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-29-2008>
- Haller, M. J. y Risso, C. (2011). The eruption of the Peteroa volcano (35°15'S, 70°18'O) on 4th September, 2010. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 68(2), 295-305. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/paper/document/paper_00044822_v68_n2_p295_Haller
- Harpp, K. S. y Geist, D. J. (2018). The evolution of Galápagos volcanoes: An alternative perspective. *Frontiers in Earth Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00050>
- Hidalgo, S., Bernard, B., Mothes, P., Ramos, C., Aguilar, J., Andrade, D., Samaniego, P., Yepes, H., Hall, M., Alvarado, A., Segovia, M., Ruiz, M., Ramón, P., Mayra, V. y IG-EPN staff. (2023). Hazard assessment and monitoring of ecuadorian volcanoes: Challenges and progresses during four decades since IG-EPN foundation. *Bulletin of Volcanology*, 86(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01685-6>
- Instituto Geográfico Nacional. (2025). *Isla Decepción – Antártida* (Instituto Geográfico Nacional – IGN). Recuperado el 1 de mayo de 2025 de <https://www.ign.es/web/isla-decepcion-antartida>
- Koulakov, I. y Shapiro, N. (2014). Seismic Tomography of Volcanoes. En M. Beer, I. A. Kogioumtzoglou, E. Patelli y I. S.-K. Au (Eds.), *Encyclopedia of Earthquake Engineering* (pp. 1-18). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_51-1
- Kumagai, H., Nakano, M., Maeda, T., Yepes, H., Palacios, P., Ruiz, M., Arrais, S., Vaca, M., Molina, I. y Yamashima, T. (2010). Broadband seismic monitoring of active volcanoes using deterministic and stochastic approaches. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B8). <https://doi.org/10.1029/2009JB006889>
- Martínez, V. L., Titos, M., Benítez, C., Badi, G., Casas, J. A., Olivera Craig, V. H. y Ibáñez, J. M. (2021). Advanced signal recognition methods applied to seismo-volcanic events from Planchon Peteroa volcanic complex: Deep neural network classifier. *Journal of South American Earth Sciences*, 107, 103115. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103115>
- McGuire, B., Kilburn, C. R. J. y Murray, J. (2022). *Monitoring active volcanoes: Strategies, procedures and techniques*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9781003327080>

- McNutt, S. R. (2005). Volcanic seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 461-491. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122459>
- Melián, G. V., Toulkeridis, T., Pérez, N. M., Hernández, P. A., Somoza, L., Padrón, E., Amonte, C., Alonso, M., Asensio-Ramos, M. y Cordero, M. (2021). Geochemistry of water and gas emissions from Cuicocha and Quiltoa volcanic lakes, Ecuador. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.741528>
- Melnick, D., Folguera, A. y Ramos, V. A. (2006). Structural control on arc volcanism: The Caviabue–Copahue complex, central to patagonian Andes transition (38°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 22(1), 66-88. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.08.008>
- Naranjo, J. A. y Haller, M. J. (2002). Erupciones holocenas principalmente explosivas del volcán Planchón, Andes del Sur (35°15'S). *Revista Geológica de Chile*, 29(1), 93-113. <https://doi.org/10.4067/S0716-02082002000100006>
- Naranjo, J. A., Haller, M. J. F., Ostera, H. A., Pesce, A. H. y Sruoga, P. (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).
- Naranjo, J. A. y Polanco, E. (2004). The 2000 AD eruption of Copahue volcano, southern Andes. *Revista Geológica de Chile*, 31(2), 279-292. <https://doi.org/10.4067/S0716-02082004000200007>
- Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica. (2025). *Reportes de actividad volcánica (Servicio Geológico Minero Argentino – SEGEMAR)*. Recuperado el 1 de mayo de 2025 de <https://oavv.segemar.gob.ar/monitoreo-volcanico/>
- Olivera Craig, V. H. (2017). *Relocalización de eventos volcanotectónicos en el CVPP mediante optimización de la identificación de arribos y localización conjunta* [Tesis de grado, Universidad Nacional de La Plata]. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/136968>
- Pearce, R., de la Muela, A. S., Moorkamp, M., Hammond, J., Mitchell, T. M., Cembrano, J., Vargas, J. A., Meredith, P. G., Iturrieta, P., Pérez-Estay, N., Marshall, N., Yañez, G., Griffith, A., Marquardt, C., Smith, J., Stanton-Yonge, A. y Núñez, R. (2022). Interaction between hydrothermal fluids and fault systems in the in the southern Andes revealed by magnetotelluric and seismic data. *ESS Open Archive*. <https://doi.org/10.1002/essoar.10501143.1>
- Ramon, P., Vallejo, S., Mothes, P., Andrade, D., Váscónez, F., Yepes, H., Hidalgo, S. y Santamaría, S. (2021). Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional, the ecuadorian seismology and volcanology service. *Volcanica*, 4(S1), 93-112. <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.93112>
- Reddin, E., Ebmeier, S. K., Rivalta, E., Bagnardi, M., Baker, S., Bell, A. F., Mothes, P. y Aguaiza, S. (2023). Magmatic connectivity among six Galápagos volcanoes revealed by satellite geodesy. *Nature Communications*, 14(1), 6614. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42157-x>
- Rey-Devesa, P., Benítez, C., Prudencio, J., Gutiérrez, L., Cortés-Moreno, G., Titos, M., Koulakov, I., Zuccarello, L. y Ibáñez, J. M. (2023). Volcanic early warning using Shannon entropy: Multiple cases of study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(6), e2023JB026684. <https://doi.org/10.1029/2023JB026684>
- Romero, J. E., Aguilera, F., Delgado, F., Guzmán, D., Van Eaton, A. R., Luengo, N., Caro, J., Bustillos, J., Guevara, A., Holbik, S., Tormey, D. y Zagarra, I. (2020). Combining ash analyses with remote sensing to identify juvenile magma involvement and fragmentation mechanisms during the 2018/19 small eruption of Peteroa volcano (southern Andes). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 402, 106984. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106984>
- Ruigrok, E., Draganov, D., Gómez, M., Ruzzante, J., Torres, D., Lopes Pumarega, I., Barbero, N., Ramires, A., Castano Ganan, A., van Wijk, K. y Wapenaar, K. (2012). Malargüe seismic array: Design and deployment of the temporary array. *The European Physical Journal Plus*, 127, 1-9. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2012-12126-7>
- Ruiz, A. G., Samaniego, P., von Hillebrandt-Andrade, C., Hall, M. L., Ruiz, M. C., Mothes, P. A. y Macías, C. A. (2013). Multiparameter monitoring techniques for reducing volcanic risk from Cuicocha crater lake, Ecuador. *AGU Spring Meeting Abstracts*, V44A-08. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013AGUSM.V44A..08R/abstract>
- Ruiz, M. Z., Civilini, F., Ebinger, C. J., Oliva, S. J., Ruiz, M. C., Badi, G., La Femina, P. C. y Casas, J. A. (2022). Precursory signal detected for the 2018 Sierra Negra volcanic eruption, Galápagos, using seismic ambient noise. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(3). <https://doi.org/10.1029/2021JB022990>
- Sallarès, V. y Charvis, P. (2003). Crustal thickness constraints on the geodynamic evolution of the Galápagos volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters*, 214(3), 545-559. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00373-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00373-X)
- Scarpa, R. y Gasparini, P. (1996). A review of volcano geophysics and volcano-monitoring methods. *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards* (pp. 3-22). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-80087-0_1
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H. y Stix, J. (2015). *The encyclopedia of volcanoes*. Elsevier.
- Smellie, J. (2001). Lithostratigraphy and volcanic evolution of Deception Island, south Shetland Islands. *Antarctic Science*, 13(2), 188-209. <https://doi.org/10.1017/S0954102001000281>
- Sparks, R., Biggs, J. y Neuberg, J. (2012). Monitoring volcanoes. *Science*, 335(6074), 1310-1311. <https://doi.org/10.1126/science.1219485>

- Stephens, C. D., Chouet, B. A., Page, R. A., Lahr, J. C. y Power, J. A. (1994). Seismological aspects of the 1989–1990 eruptions at Redoubt volcano, Alaska: The SSAM perspective. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62(1), 153-182. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90032-9)
- Tepp, G., Ebinger, C. J., Ruiz, M. y Belachew, M. (2014). Imaging rapidly deforming ocean island volcanoes in the western Galápagos archipiélago, Ecuador. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(1), 442-463. <https://doi.org/10.1002/2013JB010227>
- Titos, M., Bueno, A., García, L. y Benítez, C. (2018). A deep neural network approach to automatic recognition systems for volcano-seismic events. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(5), 1533-1544. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2803198>
- Tormey, D. (1989). Geologic history of the active azufre - Planchon-Peteroa volcanic center (35° 15'S, southern Andes) with implications for the development of compositional gaps. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 0(1), 420-430. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572824499329157888>
- Vasconez, F. J., Ramón, P., Hernandez, S., Hidalgo, S., Bernard, B., Ruiz, M., Alvarado, A., La Femina, P. y Ruiz, G. (2018). The different characteristics of the recent eruptions of Fernandina and Sierra Negra volcanoes (Galápagos, Ecuador). *Volcanica*, 1(2), 127-133. <https://doi.org/10.30909/vol.01.02.127133>
- Waldhauser, F. y Ellsworth, W. L. (2000). A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6), 1353-1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>
- Wapenaar, K., Draganov, D., Robertsson, J. O. A. y Pelissier, M. A. (2008). *Seismic interferometry: History and present status*. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801924>
- Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X. y Verdel, A. (2010). Tutorial on seismic interferometry: Part 1 — basic principles and applications. *Geophysics*, 75(5), 75A195-75A209. <https://doi.org/10.1190/1.3457445>
- Wassermann, J. (2012). Volcano seismology. *En: New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP-2)* (pp. 1-77). Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.
- Yun, S., Segall, P. y Zebker, H. (2006). Constraints on magma chamber geometry at Sierra Negra volcano, Galápagos Islands, based on InSAR observations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 150(1), 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.07.009>