

Evaluación de peligros y monitoreo volcánico multiparamétrico desarrollado por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico en el Perú

Rigoberto Aguilar Contreras*, Edu Taipe Maquerhua, Yanet Antayhua Vera, Mayra Ortega Gonzáles, Fredy Apaza Choquehuayta, Luis Cruz Mamani
Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Arequipa, Peru.

RESUMEN

El desarrollo urbano en zonas aledañas a volcanes activos ha conllevado a la generación de riesgos cada vez mayores en el sur del Perú. Con la finalidad de evaluar el peligro, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) creó un observatorio vulcanológico (OVI) para realizar estudios geológicos detallados que permitan conocer las historias eruptivas y elaborar mapas de peligros volcánicos. La generación de información geológica sobre los volcanes ha permitido la identificación de escenarios y la zonificación de áreas con potencial a ser afectadas. Esta información también ha permitido al OVI implementar sus redes de monitoreo priorizando los volcanes que representan mayor riesgo para la población, la infraestructura y las actividades económicas. Desde el año 2006, el OVI viene implementando redes de vigilancia volcánica con un enfoque multidisciplinario, mejorando la transmisión en tiempo real y realizando pronósticos oportunos. En base a la información geológica y el nivel de riesgo de los volcanes, se han puesto los mayores esfuerzos en monitorear los volcanes Sabancaya, Misti, Ubinas y Ticsani. Siguiendo el orden de prioridades, el OVI ha comenzado, también, el monitoreo de los volcanes Coropuna, Huaynaputina, Tutupaca y Yucamane. Además, el observatorio desarrolla actividades permanentes de educación y difusión de la información que sirven a la gestión del riesgo volcánico en el Perú.

This article is available in English at: <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.7392> [PDF EN].

1 INTRODUCCIÓN

El arco volcánico activo del Perú está ubicado en el sur del país, y forma parte de la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes, la cual resulta de la subducción de la placa oceánica de Nazca por debajo de la placa continental Sudamericana. Los volcanes activos están emplazados siguiendo una dirección NO-SE, paralela a la Fosa Perú-Chile, sobre un substrato Mio-Plioceno, conformado por ignimbritas y depósitos volcano-sedimentarios [Paquereau Lebti et al. 2006; Mamani et al. 2009; Thouret et al. 2016].

El Observatorio Vulcanológico del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (OVI-INGEMMET) es un centro interdisciplinario para el estudio y monitoreo de los volcanes peruanos, cuyo propósito es determinar la naturaleza y la probabilidad de erupciones volcánicas a través de un monitoreo sistemático, permanente y en tiempo real. Además, el personal del OVI realiza trabajos de evaluación de peligros volcánicos basados en estudios geológicos, y provee alertas oportunas a la sociedad respecto de episodios de intranquilidad y/o erupciones volcánicas inminentes. El observatorio cuenta con cuatro áreas principales: a) geología y evaluación de peligros; b) monitoreo volcánico; c) educación y difusión; y d) electrónica, telemetría e informática. El re-

sultado de los estudios y monitoreo volcánico realizado por el OVI ha sido documentado en reportes técnicos, boletines, mapas geológicos, mapas de peligro y en una plataforma virtual en tiempo real (*panel view*); información que es utilizada por autoridades y tomadores de decisiones para la gestión del riesgo de desastres. Específicamente, esta información ha sido útil durante crisis eruptivas de los volcanes Sabancaya (2016–presente) y Ubinas (2006–2009, 2013–2017, y 2019).

La función más importante del OVI es generar información para la gestión del riesgo volcánico en el Perú. Para esto, es necesario establecer un criterio práctico que permita determinar si un volcán es activo o potencialmente activo. Para el OVI, un volcán es considerado “activo” si este ha tenido al menos una erupción durante el Holoceno (e.g. *Smithsonian Global Volcanism Program**), mientras que un volcán “potencialmente activo” es aquel que no ha presentado actividad eruptiva en el Holoceno, pero la probabilidad de episodios de intranquilidad no es cero. Esta clasificación de los volcanes en el Perú ha permitido al OVI proporcionar un medio para la evaluación de peligros volcánicos y priorizar el desarrollo de las redes de monitoreo en volcanes individuales. Con este criterio, se han identificado diez volcanes activos: 1) Coropuna [Bromley et al. 2019; Mariño et al. 2020], 2) Sabancaya [Samaniego et al. 2015],

* Autor de correspondencia: raguilar@ingemmet.gob.pe

* http://volcano.si.edu/search_volcano.cfm

3) Misti [Thouret et al. 2001; Harpel et al. 2011; Cobenñas et al. 2014; Rivera et al. 2017], 4) Ubinas [Thouret et al. 2005; Rivera et al. 2017], 5) Huaynaputina [Thouret et al. 1999; Prival et al. 2019], 6) Ticsani, 7) Tutupaca [Samaniego et al. 2015; Manrique et al. 2019], 8) Yucamane [Rivera et al. 2020], 9) Purupuruni [Bromley et al. 2019], y 10) Casiri [Bromley et al. 2019]. Estos consisten en complejos volcánicos, estratoconos y complejos de domos. Adicionalmente, el campo monogenético de Andagua-Huambo-Orcopampa, el cual está compuesto por pequeños conos de escoria asociados con flujos de lava en bloques [e.g. Delacour et al. 2006], puede ser también considerado como un campo volcánico activo (Figura 1).

1.1 Población expuesta a la actividad volcánica

El número de personas expuestas a la actividad volcánica en el Perú está condicionado por la dinámica eruptiva y la magnitud de las erupciones potenciales. Hoy en día, la población que vive a menos de 30 km de un volcán activo es de aproximadamente 1,5 millones de habitantes [INEI 2018]. Sin embargo, incluso en erupciones pequeñas a moderadas, como la que ocurrió en el volcán Ubinas en 2019 (VEI 2), se reportó caída de cenizas hasta 200 km del cráter. Durante erupciones más grandes, como la que ocurrió en el volcán Huaynaputina en el año 1600 D.C (VEI 6) [Thouret et al. 1999; Prival et al. 2019], el área afectada fue mucho mayor, con depósitos de cenizas que alcanzaron una distancia de 1000 km del cráter. Por lo tanto, durante erupciones de gran escala podrían haber alrededor de 3 millones de personas [INEI 2018] expuestas a la actividad volcánica, ubicadas principalmente en las regiones de Arequipa, Moquegua, Tacna y Puno.

1.2 Breve historia del Observatorio Vulcanológico de INGEMMET (OVI)

El INGEMMET es el servicio geológico y minero del Perú. Parte de sus funciones es identificar, estudiar y monitorear los peligros asociados con la actividad volcánica. Los estudios vulcanológicos realizados por INGEMMET comenzaron en 1997 con la publicación del inventario de volcanes del Perú [Fidel Smoll et al. 1997]. Desde entonces, el estudio geológico, la evaluación de peligros volcánicos y el monitoreo multidisciplinario han permitido una comprensión integral de la actividad volcánica y la identificación de probables escenarios eruptivos en los volcanes peruanos.

Durante la crisis eruptiva del volcán Sabancaya en 1990–1998 [Gerbe y Thouret 2004], el Instituto Geofísico del Perú (IGP) desplegó estaciones sísmicas temporales entre 1990–1993. Posteriormente, durante 1993 y julio-diciembre de 1995, el IGP registró información sísmica con tres estaciones telemétricas instaladas entre 14–20 km alrededor del volcán, obteniendo una de las

primeras bases de datos de la actividad de Sabancaya [Antayhua et al. 2001]. Para el volcán Ubinas, aunque IGP había desplegado algunas estaciones sísmicas temporales durante cinco semanas en 1996 [Rivera et al. 2010], no existió un monitoreo adecuado hasta 2006. En ese año, cuando el Ubinas entró en una fase de actividad, “las autoridades regionales y nacionales no tenían ningún plan de emergencia” [Rivera et al. 2010]. En consecuencia, en marzo de 2006 se creó un comité científico integrado por INGEMMET, IGP y la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), para instalar equipos de monitoreo en el volcán Ubinas. Este comité colaboró en el procesamiento de datos y emitió boletines e informes volcánicos conjuntos hasta principios de 2019; lamentablemente, a la fecha, este no es el caso.

Para manejar la crisis eruptiva del volcán Ubinas, en 2006 INGEMMET comenzó a desarrollar una red de vigilancia multiparamétrica. Este fue el inicio de los esfuerzos de la institución para implementar el monitoreo instrumental de los volcanes del país, con un enfoque multidisciplinario que incluye técnicas como la geodesia, la teledetección, la química de gases, la hidroquímica, la sismología volcánica y el análisis geológico de productos volcánicos recientes. Durante el mismo período, se iniciaron estudios detallados sobre volcanes con el fin de determinar la cronología eruptiva, identificar los principales fenómenos volcánicos y evaluar los peligros. El primer mapa oficial de peligros volcánicos del Perú desarrollado por INGEMMET, fue el del volcán Misti, publicado en 2007 [Mariño et al. 2007].

Habiendo fortalecido de manera sustancial el programa de vulcanología, el 15 de marzo de 2013 se creó oficialmente el OVI en la ciudad de Arequipa, como parte de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del INGEMMET. A lo largo de este tiempo, el OVI siempre ha buscado mejorar su trabajo, potenciando la investigación, ampliando las redes de monitoreo y buscando la colaboración con otras instituciones, además de participar activamente en las plataformas creadas por los gobiernos de distintos niveles para la gestión del riesgo de desastres volcánicos.

1.3 ¿Qué volcanes son monitoreados?

El OVI prioriza el monitoreo de los volcanes con alto riesgo en el Perú, con base en estudios geológicos, evaluación de peligros, su actividad en curso y proximidad a grandes áreas urbanas como Arequipa. El observatorio se enfoca en el monitoreo de los volcanes Sabancaya, Misti, Ubinas y Ticsani, que cuentan con redes de vigilancia multiparamétrica en tiempo real. Otros volcanes activos como Coropuna, Huaynaputina, Tutupaca y Yucamane son monitoreados mediante adquisición de datos puntuales durante campañas de campo.

Los datos de monitoreo en tiempo real provenientes de las estaciones permanentes se transmiten desde los volcanes hasta el observatorio a través de un sistema telemétrico. En los otros volcanes, los datos se descargan



Figura 1: Mapa del sur del Perú con la ubicación de los volcanes activos y potencialmente activos.

de los sensores y también se realizan mediciones directas durante las campañas de campo (en promedio una vez al mes). Muchos de estos instrumentos (sismómetros, termómetros, GPS) permanecen instalados durante largos períodos de tiempo (meses o años) y, por lo tanto, establecen los parámetros de línea base para estos volcanes. Además, esto permite caracterizar el área para la instalación de futuras estaciones de monitoreo volcánico permanente. La instrumentación para el monitoreo y el análisis de datos se agrupan en cinco disciplinas: sismología, deformación volcánica, química de fluidos-gases, teledetección y geología. Actualmente, en el Perú las redes de monitoreo de volcanes son operadas por el INGEMMET y el IGP, cuyas estaciones están instaladas en diferentes ubicaciones permitiendo un registro más amplio.

2 ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y MONITOREO VOLCÁNICO

El OVI cuenta con un equipo compuesto por geólogos dedicados al estudio de la actividad volcánica. Este equipo realiza un minucioso trabajo de campo y laboratorio para reconstruir la historia eruptiva de los volcanes. Se utilizan diversas herramientas como cartografía,

estratigrafía, petrografía, geoquímica y geocronología para comprender los procesos que generaron las erupciones y determinar escenarios eruptivos futuros. Esta información permite el desarrollo de mapas geológicos y la evaluación de peligros.

El monitoreo volcánico realizado por el OVI tiene un enfoque multiparamétrico que incluye sismómetros, GPS, inclinómetros, sensores de gas volcánico, cámaras ópticas y térmicas, termómetros, estaciones meteorológicas, sensores geoelectrónicos, imágenes satelitales, cenizómetros y análisis petrológico de productos emitidos (Figura 2).

INGEMMET comenzó el monitoreo volcánico en 2006, utilizando sismología, química, geodesia y geología; labores que han mejorado con el tiempo. Desde 2013, el OVI viene incrementando la red de monitoreo sísmico con sismómetros triaxiales de banda ancha (0.033–100 Hz) GURALP 6TD y 40TD, y sensores SILICON AUDIO (0.005–1500 Hz) con registradores MINIMUS.

El monitoreo de gases comenzó en 2005, primero en los volcanes Sabancaya, Misti y Ubinas a través de la medición directa de SO_2 utilizando un equipo de campo *flyspect*. La primera estación DOAS para medir el flujo de SO_2 volcánico en tiempo real en el volcán Ubinas, se instaló en 2013, en la municipalidad de Ubinas (6 km

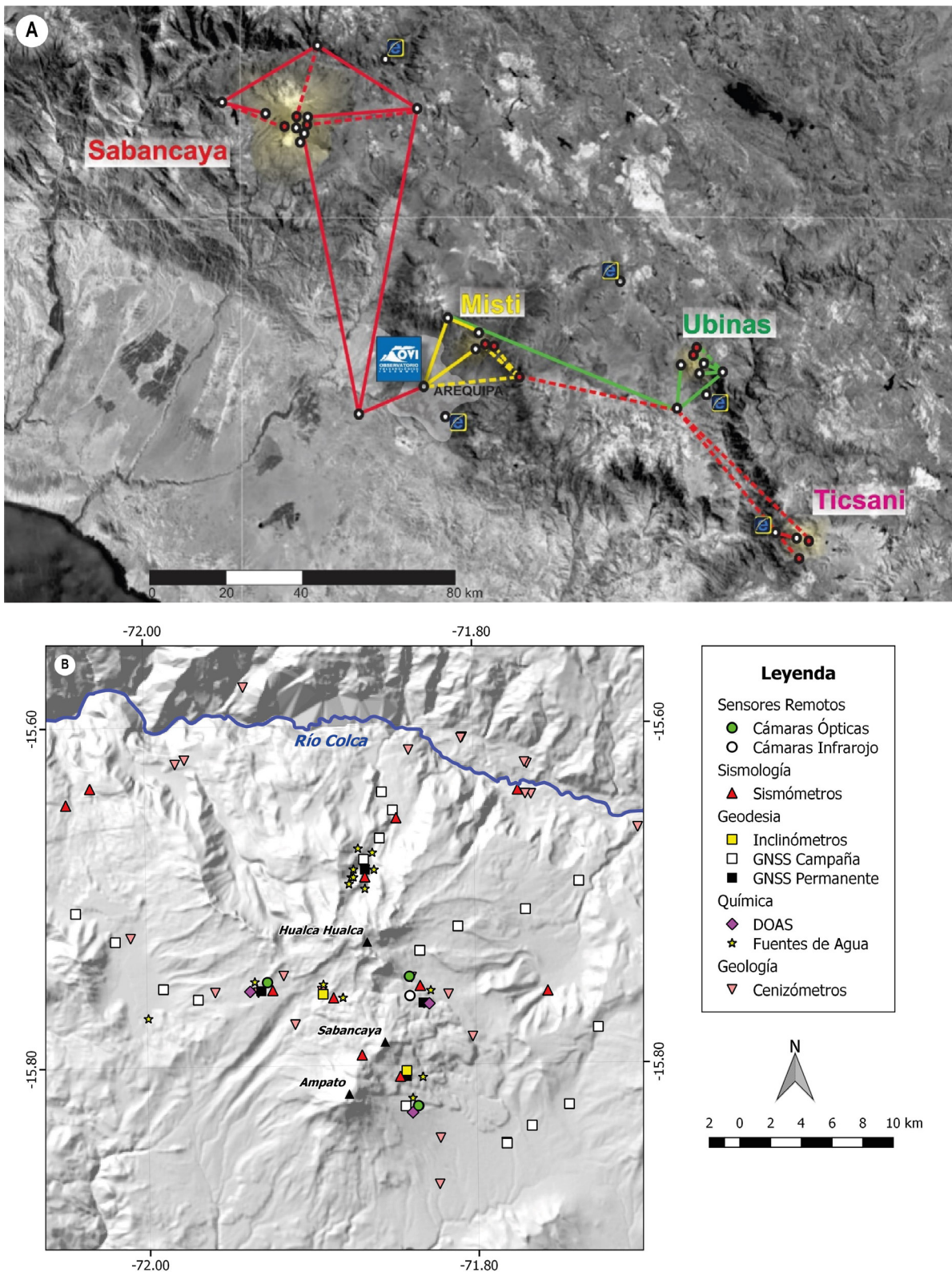


Figura 2: [A] Imagen satelital que muestra las redes de monitoreo en tiempo real operadas por OVI. Estos son volcanes que presentan la mayor actividad y riesgo en el Perú. Las líneas de color permiten diferenciar la red de cada volcán. Los puntos blancos representan estaciones y repetidores multiparamétricos; Los puntos rojos representan las estaciones en proceso de mejora de la infraestructura física (torres de hormigón, valla de protección). Las estaciones con transmisión por Internet están representadas por "e". [B] Red de monitoreo del volcán Sabancaya. Los cinco sismómetros instalados en la zona norte (cerca del río Colca) se utilizan para monitorear deslizamientos y fallas activas; sin embargo, también pueden registrar la sismicidad distal de Sabancaya.

SE). Esto se completó después con otro sensor DOAS (~4 km al sur del cráter). Los sensores DOAS se han implementado a través del proyecto de cooperación internacional NOVAC (*Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change*). En 2017, se instaló el primer sensor MultiGAS en tiempo real, a ~2.5 km del volcán Sabancaya, a través del proyecto DECADE (*Deep Earth Carbon Degassing*). La red de monitoreo de gases de este volcán se ha completado con tres sensores DOAS instalados a 4–8 km alrededor del cráter. También se realizan mediciones *in situ* con DOAS y cámaras UV en los volcanes Misti, Ticsani, Tutupaca y Yucamane.

Para monitorear la deformación volcánica, el OVI utiliza receptores GNSS con estaciones en tiempo real en los volcanes Sabancaya, Misti, Ubinas y Ticsani. También se han instalado redes de cenizómetros alrededor de los volcanes Sabancaya y Ubinas para identificar la composición de los productos eruptivos, medir el espesor de los depósitos y hacer mapas de isópacas e isomasas. El número de estaciones de medición en tiempo real y de campañas de campo se detalla en la [Tabla 1](#).

Las cámaras ópticas permiten un registro adecuado durante el día y en condiciones climáticas óptimas (visibilidad). Cuando las condiciones no son favorables, las cámaras térmicas pueden registrar la actividad en condiciones de poca visibilidad.

Además, los estudios geológicos y la evaluación de peligros desarrollados por el OVI se han fortalecido con el tiempo a través de la colaboración internacional. Numerosas instituciones, como el *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD, Francia), han permitido llevar adelante proyectos de investigación geológica muy importantes y la formación del personal. El *Volcano Disaster Assistance Program* (VDAP-USGS) ha contribuido enormemente en la mejora de las redes de monitoreo, capacitación y asesoría de rutina para el procesamiento e interpretación de datos geológicos y de monitoreo. El OVI siempre está dispuesto a desarrollar proyectos colaborativos con instituciones nacionales e internacionales.

2.1 Personal del OVI y su experiencia multidisciplinaria

El OVI cuenta con 32 profesionales de diferentes disciplinas ([Tabla 2](#)). El equipo de geología y evaluación de peligros, y el equipo de monitoreo volcánico están compuestos por 11 y 14 investigadores, respectivamente. Adicionalmente, hay 3 ingenieros para soporte técnico y 4 asistentes administrativos.

Las actividades de educación y divulgación son realizadas por los equipos de geología y monitoreo de volcanes, quienes llevan a cabo este trabajo en paralelo con la evaluación de peligros y el monitoreo de volcanes. Además, el OVI recibe apoyo de la Dirección de Laboratorios (preparación de muestras, química analítica, petrografía, teledetección), el equipo de Comunicaciones y la Unidad de Logística de la oficina principal del INGEM-

Tabla 1: Sensores de monitoreo permanente en los volcanes peruanos instalados y operados por el OVI. Todas las estaciones tienen transmisión telemétrica excepto aquellas marcadas con un asterisco.

Volcán	Sismómetro	GPS	EDM	Inclinómetro	DOAS	Hidroquímica	Multi-GAS	Cámara	Infrasonido	Termometría	Total
Coropuna		4*				12*				4*	20
Sabancaya	11	4	2*	2	3	9*	1*	6		6*	47
Misti	1	1	4*			8*	1*	1	3*	3*	19
Ubinas	6	4	3*	1	3	8*	1	4		3*	33
Huaynaputina	2*					6*				4*	12
Ticsani	2	2	1*			18*	1*	1		5*	30
Tutupaca	1	6*				12*	1*			4*	24
Yucamane						8*	1*			3*	12

*datos colectados en campo.

Tabla 2: Detalle del personal del OVI.

1. Geología y evaluación de peligros	10 geólogos 1 geofísico
2. Monitoreo volcánico	5 sismólogos 4 geodestas 2 químicos 2 geólogos 1 especialista en sensores remotos
3. Soporte técnico	2 ingenieros electrónicos 1 ingeniero informático
4. Soporte administrativo	2 asistentes administrativos 2 choferes—asistentes de campo

MET en Lima.

2.2 Almacenamiento de datos y acceso a la información generada

La información proveniente de los diferentes sensores instalados en los volcanes es transmitida en tiempo real al centro de datos del OVI de dos formas: telemetría directa mediante radioenlaces UHF e internet. Asimismo, existen datos, como muestras químicas de aguas termales y mediciones directas de campo (sismología, geodesia, geología) que se descargan directamente a discos extraíbles durante las campañas de campo.

Toda la información (transferida por telemetría y recopilada en el campo) se almacena sistemáticamente en servidores NAS. Luego, cada especialista puede acceder a la base de datos a través de puertos en la red local. Además, los puertos están habilitados para acceso externo mediante protocolos FTP y SSH, lo que permite el procesamiento de datos fuera de las oficinas.

La información generada por el OVI es propiedad del Estado peruano, y como tal, está a disposición de quienes la requieran, previa autorización y coordinación con la institución, la cual se obtiene mediante correo electrónico al presidente ejecutivo de INGEMMET. En caso de convenios para trabajos de investigación o actividades de cooperación interinstitucional, el acceso a la información es gratuito para todos los miembros del equipo.

3 GESTIÓN DEL PELIGRO VOLCÁNICO

Las recientes erupciones de los volcanes Ubinas (2006–2009, 2013–2017, 2019) y Sabancaya (2016–presente) han recordado a las autoridades políticas, Defensa Civil y científicos sobre las debilidades y limitaciones en la respuesta a emergencias y la protección de los ciudadanos. La gestión del riesgo de desastres y la capacidad de respuesta a las emergencias dependen, en gran medida, de la preparación, y de las herramientas y tecno-

logía disponibles. El uso de herramientas de gestión como los mapas de peligros es importante antes, durante y después de una crisis eruptiva porque permiten identificar escenarios y posibles áreas afectadas. El OVI elabora oficialmente los mapas de peligros volcánicos en el Perú, y ha publicado los correspondientes a los volcanes Sara Sara [Rivera et al. 2020], Ampato-Sabancaya [Mariño et al. 2012], Misti [Mariño et al. 2007], Ubinas [Rivera et al. 2011], Ticsani [Mariño y Soncco 2018], Tutupaca [Mariño et al. 2019] y Yucamane [Rivera et al. 2018]. Actualmente, se está trabajando para completar los mapas de peligros de los complejos volcánicos Coropuna y Chachani. Además, se encuentra en curso un proyecto iniciado en 2020 para elaborar la segunda versión del mapa de peligros del volcán Misti, utilizando Modelos de Elevación Digital (DEMs, por sus siglas en inglés) de resolución espacial de 10 y 2 m. Para un volcán individual, el OVI lleva a cabo un proyecto de investigación de ~3 años en promedio, que incluye mapeo geológico, estratigrafía, análisis de muestras, reconstrucción de la historia eruptiva, evaluación de peligros, identificación de escenarios y modelamiento. Como resultado de los proyectos, se publica un boletín de geología y evaluación de peligros, un mapa geológico y mapas de peligros (peligros proximales, caída de tefra y lahares). Estos mapas y boletines se publican en el sitio web de INGEMMET y son de libre acceso. Además, se han generado mapas en 3D, lo que permite una interacción dinámica para los usuarios*. El primer mapa publicado en este formato fue el del volcán Misti en 2018 (Figura 3).

La información incluida en los boletines y mapas constituye la base para la planificación de emergencias, como sucedió con las recientes erupciones de los volcanes Ubinas y Sabancaya. También ha servido como insumo esencial en la elaboración de planes de contingencia y simulacros de evacuación realizados en la ciudad de Arequipa.

Dependiendo de la historia de la actividad de un volcán, el OVI utiliza datos geológicos y de monitoreo para construir árboles de eventos probabilísticos con el fin de examinar los posibles escenarios de comportamiento volcánico. Los resultados de los árboles de eventos han contribuido a estructurar la información de monitoreo y los datos geológicos, para priorizar esfuerzos, tomar decisiones para establecer los niveles de alerta y dar recomendaciones a las autoridades. Considerando que la gestión del riesgo de desastres es un proceso complejo, es fundamental el uso de diferentes herramientas y la participación coordinada de todos los actores de las plataformas de Defensa Civil.

* <https://data-ingemmet-peru.opendata.arcgis.com/pages/volcanes>

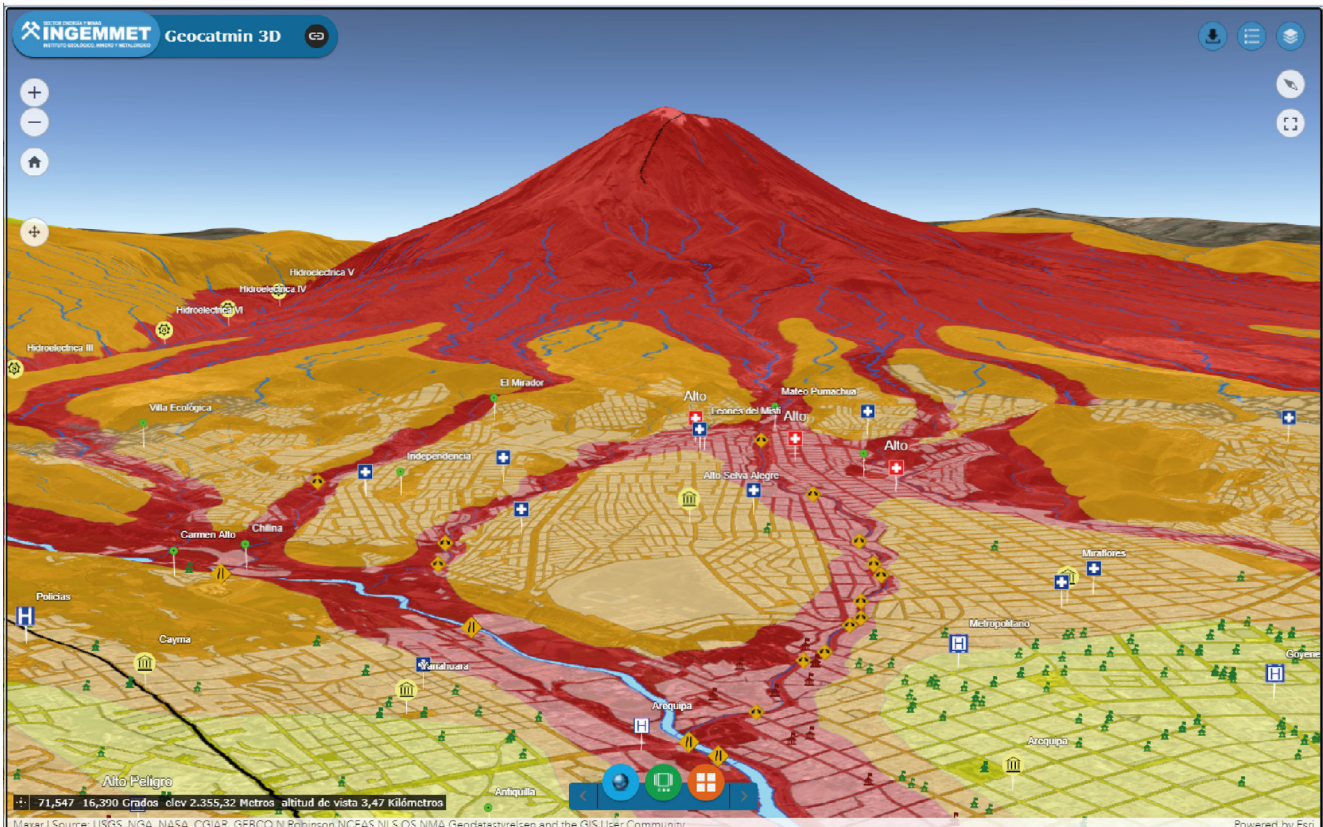


Figura 3: Captura de pantalla del mapa de peligros en 3D del volcán Misti combinado con el área urbana y la infraestructura crítica de Arequipa [Thouret et al. 1995, modificado].

4 DIFUSIÓN Y DISEMINACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La comunicación y difusión de la información del monitoreo volcánico se realiza a través de informes resumidos de actividad volcánica e informes técnicos. Las características de estos productos dependerán del público objetivo y de la frecuencia con la que se emitan. Los informes de actividad volcánica son breves y comprensibles. Están dirigidos a las autoridades locales y a quienes forman parte del sistema de gestión del riesgo de desastres, y también a la población local. La frecuencia con la que se publican depende del nivel de actividad volcánica, y puede ser diaria, semanal, mensual o anual. Los informes técnicos son documentos con información técnico-científica que buscan informar objetivamente a las autoridades e instituciones técnicas que forman parte del sistema nacional de gestión de desastres sobre los peligros volcánicos. Asimismo, existe un espacio en el sitio web institucional que contiene información en tiempo real sobre la actividad volcánica, donde el público puede visualizar imágenes de las cámaras, señales sísmicas, histogramas de flujo de gas, acceder a informes diarios, etc*.

* <http://ovi.ingemmet.gob.pe/panelview/index.html>

4.1 Diseminación de la información

Las autoridades civiles incorporaron el mapa de peligros del volcán Misti en el ordenamiento territorial y planificación urbana de la ciudad de Arequipa. Debido a la proximidad de las viviendas (dentro de los 9 km) a la cima del volcán Misti, el INGEMMET ha diseñado e implementado un programa de difusión amplio del mapa de peligros con el fin de concientizar a la población sobre las implicancias de la actividad volcánica.

Desde el 2006, se han impreso mapas de peligros para su distribución masiva en coordinación con las autoridades locales, instituciones estatales, empresas privadas y ONGs. Además, se ha ampliado un programa de formación dirigido a profesores de instituciones educativas [Macedo et al. 2008]. Un ejemplo de los importantes esfuerzos realizados por INGEMMET con otras instituciones es el “Centro de Sensibilización para la Gestión de Riesgos” creado en Arequipa en conjunto con el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) y la ONG *Volcan-Explor-Action* (Francia), inaugurado en febrero del 2011. Este centro cuenta con materiales para explicar de manera sencilla el origen de los volcanes, los tipos de peligros volcánicos y métodos de monitoreo, así como el mapa de peligros del volcán Misti.

Además de los informes de monitoreo, el OVI publica boletines e informes técnicos sobre geología y evaluación de peligros volcánicos que tienen como público

objetivo a científicos, académicos y secretarios técnicos de defensa civil, así como a la comunidad en general. Esta información se utiliza para planificar respuestas de emergencia, así como para identificar la ubicación de los refugios y el reasentamiento de las poblaciones afectadas.

El OVI también genera información educativa en forma de folletos, trípticos y volantes dirigidos a las autoridades y al público en general. En estas publicaciones, los datos técnicos se traducen en información simple para la educación y la sensibilización. Durante el año, se ofrece un programa de visitas guiadas al observatorio con el objetivo de recibir a autoridades y estudiantes de nivel primario, secundario y universitario. Durante los recorridos, los visitantes pueden manipular muestras volcánicas, ver videos, interactuar con el personal y conocer cómo se monitorean los volcanes en el Perú.

Se brindan talleres, ferias de exposición pública educativa y charlas de rutina a periodistas, profesionales de la salud, personal del ejército, guías turísticos y otras organizaciones con el fin de educar y difundir la información a la comunidad. Adicionalmente, para crear un espacio de reflexión, discusión e intercambio de experiencias en la gestión del riesgo volcánico, el INGEMMET organiza eventos académicos como los ocho foros internacionales sobre riesgo volcánico y dos encuentros de observatorios vulcanológicos de Latinoamérica.

4.2 Interacción con instituciones públicas

Debido a las recientes erupciones de los volcanes Ubinas (región de Moquegua) y Sabancaya (región de Arequipa), se crearon comités científicos para apoyar durante las emergencias volcánicas. Las instituciones involucradas en los comités incluyen al INGEMMET-OVI, IGP, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y la UNSA. Estos comités participan en las plataformas de Defensa Civil brindando información y asesorando en la gestión del riesgo volcánico. Sin embargo, la colaboración entre las distintas instituciones ha sido difícil en los últimos dos años (2019–2020). Actualmente, existen esfuerzos para lograr un mejor entendimiento y colaboración institucional a un nivel superior, que esperamos se concreten con prontitud.

En el marco del sistema nacional de gestión del riesgo de desastres, el OVI coordina rutinariamente con autoridades locales y regionales, instituciones nacionales como el Centro de Operaciones de Emergencias Nacional (COEN), el Centro de Operaciones de Emergencia Regional (COER), INDECI, el Centro Nacional para la Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) y municipios locales. Además, para promover el estudio y el monitoreo de volcanes, el OVI desarrolla proyectos de investigación relacionados con geología, peligros volcánicos, investigaciones aplicadas en cooperación con ins-

tuciones científicas nacionales e internacionales, así como con investigadores de servicios geológicos, observatorios vulcanológicos y universidades.

5 NECESIDADES, DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

El OVI ha venido desarrollando un programa integral para implementar progresivamente el monitoreo multiparamétrico en tiempo real de todos los volcanes activos y potencialmente activos en el Perú. La instrumentación requerida y la prioridad de monitoreo para cada volcán se planificó de acuerdo con el estudio: “Evaluación de amenazas volcánicas y capacidades de monitoreo en Perú” desarrollado por IGP, INGEMMET y UNSA [Macedo et al. 2008]. Este proyecto se ha desarrollado con inversión del gobierno peruano a través de la compra de equipos y capacitación de personal. Los avances realizados por OVI hasta el momento han sido posibles en gran parte gracias al equipo “joven” que ha puesto todo su empeño en mejorar el trabajo. Sin embargo, el apoyo de instituciones extranjeras como USGS-VDAP, IRD, *Laboratoire Magmas et Volcans* de la *Université Clermont-Auvergne* (Francia), y muchas otras instituciones, a través de asesorías técnicas y donaciones de equipos, han permitido mejorar nuestras capacidades; por tanto, esperamos continuar y fortalecer la cooperación.

Con la perspectiva de continuar esa mejora, es necesario capacitar continuamente a los jóvenes vulcanólogos a través de la cooperación nacional e internacional.

Finalmente, es fundamental fortalecer la colaboración entre las instituciones participantes de los comités técnico-científicos a fin de generar información unificada, necesaria para una adecuada gestión del riesgo volcánico en el Perú.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los editores, especialmente a O. Chevrel por todas las coordinaciones necesarias para la publicación de este artículo; C. Chacaltana, C. Benavente y L. Fidel por el apoyo administrativo, y a nuestros colegas del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET en Arequipa por el soporte y las discusiones continuas. También, agradecemos a M. C. Lamberti y P. Forte por revisar la redacción del documento. Las revisiones reflexivas de dos revisores anónimos permitieron mejorar el manuscrito.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

R. A. redactó el manuscrito, E. T., Y. A., M. O., F. A. y L. C. escribieron las secciones sobre monitoreo volcánico y necesidades, desafíos y perspectivas futuras. Todos los autores revisaron el manuscrito final.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos descritos en este artículo son de libre disponibilidad en el repositorio institucional del INGEMMET. Boletines (<https://repositorio.ingemmet.gob.pe>), mapas (<https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin>), reportes y monitoreo en tiempo real (<http://ovi.ingemmet.gob.pe>).

DERECHOS DE AUTOR

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

REFERENCIAS

- Antayhua, Y., H. Tavera e I. I. Bernal (2001). “Análisis de la actividad sísmica en la región del volcán Sabancaya (Arequipa)”. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* 92, págs. 79-88.
- Bromley, G. R. M., J.-C. Thouret, I. Schimmelpfennig, J. Mariño, D. Valdivia, K. Rademaker, S. del Pilar Vivanco Lopez, ASTER Team, G. Aumaitre, D. Bourlès y K. Keddadouche (2019). “In situ cosmogenic ^3He and ^{36}Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru”. *Bulletin of Volcanology* 81 (11). doi: 10.1007/s00445-019-1325-6.
- Cobeñas, G., J.-C. Thouret, C. Bonadonna y P. Boivin (2014). “Reply to comment on: “Cobeñas, G., Thouret, J.-C., Bonadonna, C., Boivin, P., 2012. The c. 2030 yr BP Plinian eruption of El Misti volcano, Peru: Eruption dynamics and hazard implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 241–242, 105–120.” by Harpel et al., *JVGR* 2013”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 275, págs. 103-113. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.02.014.
- Delacour, A., M.-C. Gerbe, J.-C. Thouret, G. Wörner y P. Paquereau-Lebti (2006). “Magma evolution of Quaternary minor volcanic centres in southern Peru, Central Andes”. *Bulletin of Volcanology* 69 (6), págs. 581-608. doi: 10.1007/s00445-006-0096-z.
- Fidel Smoll, L., W. Morche y S. Núñez Juárez (1997). *Inventario de volcanes del Perú. Proyecto: Album de mapas de riesgos volcánicos de las principales ciudades del Suroeste del Perú*. Boletín Ingemmet. Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico—INGEMMET.
- Gerbe, M.-C. y J.-C. Thouret (2004). “Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990–98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru”. *Bulletin of Volcanology* 66 (6), págs. 541-561. doi: 10.1007/s00445-004-0340-3.
- Harpel, C. J., S. de Silva y G. Salas (2011). “The 2 ka Eruption of Misti Volcano, Southern Peru—The Most Recent Plinian Eruption of Arequipa’s Iconic Volcano”. Geological Society of America. doi: 10.1130/2011.2484.
- INEI (2018). *Censos Nacionales XII de Población y VII de Vivienda, 22 de octubre del 2017, Perú: Resultados Definitivos*. Lima, Peru.
- Macedo, L., L. Fidel, F. Muñoz, R. Amache, H. Pareja y J. Vásquez (2008). “Mitigación de riesgos volcánicos en la ciudad de Arequipa.” XIII Congreso Latinoamericano de Geología—XIV Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú, pág. 5.
- Mamani, M., G. Worner y T. Sempere (2009). “Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13 S to 18 S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space”. *Geological Society of America Bulletin* 122 (1–2), págs. 162-182. doi: 10.1130/b26538.1.
- Manrique, N., P. Samaniego, E. Médard, F. Schiavi, J. Mariño y C. Liorzou (2019). “Pre-eruptive magmatic processes associated with the historical (218 ± 14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (southern Peru)”. *Bulletin of Volcanology* 82 (1). doi: 10.1007/s00445-019-1335-4.
- Mariño, J., M. Rivera, L. Cacya, J.-C. Thouret, L. Macedo, G. Salas, R. I. Tilling, M. Sheridan, C. Siebe y S. Zuñiga (2007). *Mapa de Peligros del Volcán Misti*. Lima, Peru: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Mariño, J., P. Samaniego, N. Manrique, P. Valderrama y M. L. (2019). *Geología y mapa de peligros del complejo volcánico Tutupaca*. INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico—INGEMMET.
- Mariño, J. e Y. Soncco (2018). *Mapa de Peligros del Volcán Ticsani*. Lima, Peru: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Mariño, J., J.-C. Thouret, M. Cabrera, R. Aguilar, N. Manrique, B. Edwards y W. Kochtitzky (2020). *Boletín Geológico*. Lima, Peru: INGEMMET.
- Mariño, J., P. Samaniego, M. Rivera, N. Bellot, N. Manrique y R. Delgado (2012). “Mapa de peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya”. Congreso Peruano de Geología XVI (Lima, Peru). Sociedad Geológica del Perú.
- Paquereau Lebti, P., J.-C. Thouret, G. Wörner y M. Fornari (2006). “Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 154 (3-4), págs. 251-275. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2006.02.014.
- Prival, J.-M., J.-C. Thouret, S. Japura, L. Gurioli, C. Bonadonna, J. Mariño y K. Cueva (2019). “New insights into eruption source parameters of the 1600 CE Huaynaputina Plinian eruption, Peru”. *Bulletin of Volcanology* 82 (1). doi: 10.1007/s00445-019-1340-7.

- Rivera, M., J. Mariño, J.-C. Thouret y P. Samaniego (2011). *Mapa de Peligros del Volcán Ubinas*. Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Rivera, M., P. Samaniego, J. Vela y J.-L. Le Pennec (2018). *Geología y evaluación de peligros del Complejo Volcánico Yucamane - Calientes (Candarave - Tacna)*. INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico—INGEMMET.
- Rivera, M., H. Martin, J.-L. Le Pennec, J.-C. Thouret, A. Gourgaud y M.-C. Gerbe (2017). “Petrogeochemical constraints on the source and evolution of magmas at El Misti volcano (Peru)”. *Lithos* 268-271, págs. 240-259. doi: [10.1016/j.lithos.2016.11.009](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.11.009).
- Rivera, M., P. Samaniego, J. Vela, J.-L. Le Pennec, H. Guillou, J.-L. Paquette y C. Liorzou (2020). “The eruptive chronology of the Yucamane-Calientes compound volcano: A potentially active edifice of the Central Andes (southern Peru)”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 393, pág. 106787. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2020.106787](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106787).
- Rivera, M., J.-C. Thouret, J. Mariño, R. Berolatti y J. Fuentes (2010). “Characteristics and management of the 2006–2008 volcanic crisis at the Ubinas volcano (Peru)”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 198 (1-2), págs. 19-34. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2010.07.020](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.07.020).
- Samaniego, P., P. Valderrama, J. Mariño, B. van Wyk de Vries, O. Roche, N. Manrique, C. Chédeville, C. Liorzou, L. Fidel y J. Malnati (2015). “The historical (218 ± 14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru)”. *Bulletin of Volcanology* 77 (6). doi: [10.1007/s00445-015-0937-8](https://doi.org/10.1007/s00445-015-0937-8).
- Thouret, J.-C., F. Legros, A. Gourgaud, G. Salas, E. Juvigne, E. Gilot y A. Rodriguez (1995). “Recent Eruptive Activity At El-Misti Volcano (south Peru)—Implications for Hazard Assessment in Arequipa Area”. *Comptes rendus de l'Académie des sciences—Séries IIB—Mécanique, Physique, chimie, astronomie* 320 (10), págs. 923-929.
- Thouret, J.-C., J. Davila y J.-P. Eissen (1999). “Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, A.D. 1600, southern Peru”. *Geology* 27 (5), pág. 435. doi: [10.1130/0091-7613\(1999\)027<0435:leeiht>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0435:leeiht>2.3.co;2).
- Thouret, J.-C., A. Finizola, M. Fornari, A. Legeley-Padovani, J. Suni y M. Frechen (2001). “Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru”. *Geological Society of America Bulletin* 113 (12), págs. 1593-1610. doi: [10.1130/0016-7606\(2001\)113<1593:goemvn>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113<1593:goemvn>2.0.co;2).
- Thouret, J.-C., B. R. Jicha, J.-L. Paquette y E. H. Cubukcu (2016). “A 25 myr chronostratigraphy of ignimbrites in south Peru: implications for the volcanic history of the Central Andes”. *Journal of the Geological Society* 173 (5), págs. 734-756. doi: [10.1144/jgs2015-162](https://doi.org/10.1144/jgs2015-162).
- Thouret, J.-C., M. Rivera, G. Wörner, M.-C. Gerbe, A. Finizola, M. Fornari y K. Gonzales (2005). “Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru”. *Bulletin of Volcanology* 67 (6), págs. 557-589. doi: [10.1007/s00445-004-0396-0](https://doi.org/10.1007/s00445-004-0396-0).