

Programa de Monitoreo Volcánico Nicaragüense del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales

Eveling Espinoza*, Jose Armando Saballos, Martha Navarro, Virginia Tenorio, Teresita Olivares, Martha Ibarra, David Chavarría, Dodanis Matus, Elvis Mendoza
INETER, Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Frente a Hospital Solidaridad, Av. Xolotlán, Managua, Nicaragua.

RESUMEN

El Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) es la institución responsable de la vigilancia volcánica en Nicaragua. Su División de Vulcanología actualmente vigila seis volcanes activos por medio de sismicidad, emisiones de gases, cámaras ópticas, observaciones visuales y teledetección satelital. La red de monitoreo de volcanes que mantiene INETER está en continua expansión y modernización. Del mismo modo, el número de personal técnico y científico ha estado creciendo en los últimos años. El año 2015 fue el año más ocupado que tuvimos en las últimas dos décadas, debido a que el volcán Momotombo entró en erupción por primera vez en los últimos 110 años, se emplazó un lago de lava en el fondo del cráter Santiago (volcán Masaya), y el volcán Telica experimentó una fase freática de mayo a noviembre. A pesar del progreso realizado, todavía tenemos muchos desafíos para el futuro cercano que esperamos lograr con los recursos nacionales y de la comunidad geocientífica internacional.

This article is available in English at: <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.163181> [PDF EN].

1 INTRODUCCIÓN

En Nicaragua aproximadamente 3600000 habitantes viven y/o trabajan en la base de un volcán activo. Según el último censo oficial de Nicaragua [Goffin 2006], esto corresponde a cerca del 70% de la población del país. Como consecuencia, en Nicaragua el riesgo derivado de la actividad volcánica es muy alto. En este contexto desafiante, el estudio y la vigilancia de la actividad volcánica se han convertido en una prioridad para el desarrollo de estrategias efectivas de reducción de riesgos.

1.1 Contexto geológico

La dinámica y evolución de la placa de Cocos, frente a la costa del Pacífico de Centroamérica, es compleja y está relacionada con la inclinación de la placa, y posiblemente con la distribución del acoplamiento mecánico y deformación de la placa colisionada [La Femina et al. 2009; French et al. 2010]. Esto tiene implicaciones importantes tanto para la generación de terremotos en la interfaz de subducción, como para la de aquellos destructivos de intraplaca [Norabuena et al. 2004; La Femina et al. 2009; French et al. 2010].

En la actualidad, a lo largo de la fosa Mesoamericana la placa de Cocos subduce por debajo de la placa del Caribe, a una tasa de 76–91 mm/año al noreste (en relación con la placa del Caribe) [DeMets 2001]. Este proceso de subducción es responsable de la actividad volcánica observada en el actual Arco Volcánico Centroamericano, que se extiende 1100 km desde la fron-

tera México-Guatemala hasta Panamá [Carr 1984; Jordan et al. 2007; Saginor et al. 2011]. Este arco volcánico presenta siete segmentos intercalados, con longitudes variables de entre 100 km a 300 km [Carr 1984]. La separación entre volcanes dentro de cada segmento parece ser aleatoria, con algunos gaps a lo largo del arco. El espaciamiento más extenso es de 80 km de longitud y tiene lugar entre los volcanes Cosigüina y San Cristóbal en el noroeste de Nicaragua [Carr 1984; Saginor et al. 2011, Figura 1].

Las importantes variaciones geoquímicas que se han encontrado a lo largo del Arco Volcánico Centroamericano, lo hacen un lugar ideal para comprobar las hipótesis planteadas sobre el origen de las diferentes características de la geoquímica de arco [Carr et al. 2007b]. El segmento de arco volcánico entre los volcanes Cosigüina y Masaya tiene algunos de los niveles más altos, a nivel global, de fluidos trazadores de la placa en subducción, como $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ y Ba/La. La abundancia de estos fluidos trazadores cae drásticamente al sureste del volcán Masaya y disminuye de manera gradual a través de El Salvador y Guatemala. En Costa Rica, la abundancia de fluidos trazadores de la placa en subducción es muy baja, y son isotópicamente distintos, específicamente entre los volcanes Arenal e Irazú [Carr et al. 2007b].

El frente volcánico activo de Nicaragua se encuentra dentro de la Depresión Nicaragüense, que también alberga dos de los principales lagos de Nicaragua (Managua, también conocido como Xolotlán; y Nicaragua, también conocido como Cocibolca). Tiene aproximadamente 700 km de largo y se extiende desde el volcán Maderas, próximo a la frontera con Costa Rica, hasta el

*Autor de correspondencia: eveling.espinoza@ineter.gob.ni



Figura 1: Estructuras volcánicas activas monitoreadas por la Dirección de Vulcanología, INETER. Sistema de coordenadas WGS84. Los triángulos rojos indican volcanes activos no monitoreados.

Golfo de Fonseca, en El Salvador [McBirney y Williams 1965]. Existe una marcada controversia en torno a la historia reciente del arco volcánico. La hipótesis más reciente, propuesta por Funk et al. [2009], postula que la Depresión de Nicaragua se formó en el Lago de Nicaragua durante el Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano, propagándose al norte, hacia el Golfo de Fonseca, entre el Mioceno y el Plioceno.

Los sedimentos aluviales y lacustres que rellenan la topografía plana de la Depresión de Nicaragua han soterrado los primeros flujos de lavas emitidos por el actual frente volcánico activo, dificultando precisar el momento de su aparición. Sin embargo, las lavas más antiguas muestreadas por Carr et al. [2007a], de los sectores más erosionados de los volcanes activos de Nicaragua, revelaron una edad $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 65 a 330 ka.

1.2 Actividad volcánica en Nicaragua

El registro geológico de la historia eruptiva de los últimos 10,000 años indica que hay 13 estructuras volcánicas activas en Nicaragua (Figura 1). Durante el último siglo, ocho volcanes hicieron erupción en Nicaragua: Cosiguina, San Cristóbal, Telica, Cerro Negro, Mo-

motombo, Apoyeque, Masaya y Concepción.

Adicionalmente, en Nicaragua se han mapeado alrededor de 173 estructuras volcánicas inactivas*. Estas se dividen en dos grandes grupos, según si estuvieron activas en el Terciario o el Cuaternario. Al menos 53 estructuras volcánicas terciarias (cuya última erupción ocurrió hace más de 2.6 millones de años) fueron identificadas en los sectores altos de Nicaragua, en su mayoría localizados en la región norte y centro de del país. Sin embargo, es posible que hayan existido más estructuras volcánicas en esa región, pero que ya no sean identificables, bien porque han sido soterradas por depósitos eruptivos de volcanes cercanos o erosionadas con el tiempo. Cerca de 120 volcanes inactivos del período Cuaternario pueden ser reconocidos a lo largo del arco volcánico activo actual.

En las últimas tres décadas, la actividad volcánica más notable en Nicaragua se ha observado en los volcanes Cerro Negro, Momotombo, Telica y Masaya. El volcán Cerro Negro es un cono cinerítico basáltico (728 m s.n.m.). Hizo erupción tres veces en la década de 1990 para las que se calculó un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) que disminuyó de 3 en 1992, a 2 en

*<https://web-geofisica.ineter.gob.ni/vol/volnic.html>

1995, y finalmente a 1 en 1999 [Hill et al. 1998; INETER 1999; La Femina et al. 2004]. Las erupciones del volcán Cerro Negro suelen ser de tipo estrombolianas y, en algunas ocasiones, forman respiraderos adventicios. El volcán solo mostró disturbios sísmicos de bajo nivel después de la erupción de 1999 [INETER 1999; 2004].

El volcán Momotombo es un estratovolcán basáltico (1297 m s.n.m.), que entró en erupción el 1 de diciembre de 2015, después de 110 años de reposo. Este último evento eruptivo fue de tipo estromboliano, duró tres días y emitió un flujo de lava que alcanzó 3.5 km de longitud. Posteriormente, explosiones energéticas, que variaron desde estrombolianas violentas hasta vulcanianas débiles, ocurrieron casi a diario hasta principios de abril de 2016. Siguiendo este período, la actividad en el volcán Momotombo se ha caracterizado por sismicidad y bajas emisiones de SO₂, por debajo de 600 toneladas/día (t d⁻¹) [INETER 2015a; b].

En diciembre de 2015, un lago de lava de composición basáltica se emplazó en el fondo del cráter Santiago, del volcán Masaya [INETER 2015a; b]. Previo a este emplazamiento, la última vez que se había observado un lago de lava en el cráter Santiago fue en diciembre de 1999, aunque no se informó oficialmente. Aiuppa et al. [2018] encontraron que, antes de la aparición del lago de lava, la composición de la columna de gas volcánico se volvió inusualmente rica en CO₂, y el flujo de CO₂ alcanzó su pico máximo en noviembre de 2015 (promedio: 81.3 ± 40.6 kgs⁻¹; máximo: 247 kgs⁻¹). Estos autores propusieron que el elevado suministro de burbujas de gas desestabilizó la cámara magmática poco profunda del Masaya (<1 km), ocasionando la migración ascendente de magma residente con alta proporción de vesículas (flotante) y, en última instancia, una nueva formación del lago de lava el 11 de diciembre de 2015 (constreñido por observaciones térmicas MODIS basadas en satélites). Actualmente, el lago de lava del Masaya todavía está activo aunque su nivel ha descendido levemente (la disminución aún no se ha cuantificado) desde 2015–2017. En los últimos años, el flujo de SO₂ osciló entre 500 y 200 t d⁻¹ [INETER 2016]*.

El volcán Telica es un estratovolcán basáltico (1036 m s.n.m.), y experimentó una fase eruptiva freática de seis meses de duración, entre mayo y noviembre de 2015, que consistió en 891 explosiones, de las cuales 104 fueron emisiones cargadas de cenizas [INETER 2015a]. Esta fase eruptiva fue de baja energía y las columnas de ceniza alcanzaron menos de 1 km por encima del cráter del volcán. Una de las explosiones más violentas se registró el 22 de noviembre de 2015; se observó incandescencia en el piso del cráter y columnas de ceniza que se elevaron ~8 km, expulsando grandes bloques a una distancia de al menos 1 km [Roman et al. 2019]. Después de esta actividad, Telica típicamente produce emisiones de ceniza aproximadamente dos veces al año, y tiene un flujo variable de SO₂ por debajo

de 800 t d⁻¹, medido por instrumentos mini-DOAS.

Los otros volcanes activos del país producen explosiones de gas y cenizas casi anualmente, excepto el volcán Concepción, que no ha entrado en erupción desde el año 2010. Sin embargo, no es extraño que el volcán Concepción muestre enjambres de sismos volcánotectónicos sin otras manifestaciones de agitación volcánica, incluso si los niveles de emisión de SO₂ son muy bajos [es decir, por debajo de 250 t d⁻¹; Saballos et al. 2013; 2014]

2 INETER Y SU DIRECCIÓN GENERAL DE GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA

El Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) fue fundado el 5 de octubre de 1981 y actualmente cuenta con más de 500 empleados, incluyendo especialistas, técnicos y científicos.

INETER está a cargo de la investigación, inventario y evaluación de los recursos físicos del país; ejecutar los estudios de planificación territorial; realizar estudios para la prevención y mitigación de los efectos causados por fenómenos naturales peligrosos; realizar estudios meteorológicos y geofísicos; regular y realizar trabajos cartográficos y geodésicos; regular, operar, actualizar y ejecutar el catastro físico nacional. INETER opera el sistema de redes básicas geodésicas, meteorológicas, hidrológicas, hidrogeológicas, mareográficas, acelerográficas y sismológicas, así como también las redes de monitoreo de fenómenos naturales y, en consecuencia, organiza bases de datos especializadas para la información generada por estas redes.

INETER comprende seis direcciones generales, entre las cuales se encuentra la Dirección General de Geología y Geofísica (DGGG), que a su vez se subdivide en las divisiones de vulcanología, sismología y geología. La DGGG realiza vigilancia 24/7 sobre los volcanes activos y la sismicidad en toda la región centroamericana, incluido el aviso de alerta de tsunamis. La DGGG de INETER trabaja en conjunto con instituciones en Nicaragua que se enfocan en la reducción del riesgo de desastres naturales y en la gestión en todos los niveles, incluida la interacción directa con las comunidades locales en zonas de alto riesgo, para enseñarles las acciones que deben tomar durante la ocurrencia de un fenómeno natural en particular que pueda amenazar sus vidas. Los estudios en curso de INETER (y en colaboración con otras instituciones nacionales y extranjeras) están enfocados, también, en las estructuras volcánicas inactivas.

La DGGG está compuesta por 35 personas. Hay un director general, un responsable de tareas administrativas, tres asesores científicos y varios técnicos divididos en las áreas de sismología (nueve), geología (seis), vulcanología (ocho), electrónica (seis) y tecnología de la información (dos). INETER mantiene un turno permanente 24/7, compuesto por personal del departamento

*<https://webservice2.ineter.gob.ni/boletin/2016/02/boletin-1602.pdf>

de sismología y del grupo de electrónica. El equipo de electrónica es responsable de la instalación, reparación y mantenimiento de las redes sísmicas volcánicas y tectónicas, así como del procesamiento de datos sísmicos. En total, ocho expertos de la dirección de volcanes del INETER, que cuentan con títulos de técnico, licenciatura, maestría y doctorado, realizan las tareas de monitoreo volcánico, investigación y evaluación de peligros volcánicos.

3 ¿COMO MONITOREAMOS NUESTROS VOLCANES?

La vigilancia de los volcanes activos de Nicaragua se inició en INETER a partir de la erupción del volcán Cerro Negro, en abril de 1992. Desde entonces, ocho volcanes activos, incluidos aquellos con actividad intermitente (que presentan anomalías térmicas y emisiones de gases, como SO₂, provenientes de un cuerpo magmático poco profundo y microsismicidad asociada con la circulación de fluidos debajo del volcán) en los últimos cuarenta años, están siendo monitoreados 24/7: los volcanes Cosigüina, San Cristóbal, Telica, Cerro Negro, Momotombo, Apoyeque, Masaya y Concepción.

Se utilizan diferentes técnicas de monitoreo en estos ocho volcanes (un resumen de la instrumentación instalada en cada volcán se muestra en la [Tabla 1](#)). El monitoreo sísmico se realiza con sismómetros de período corto y banda ancha, y hay entre dos y siete instrumentos en cada volcán ([Figura 2](#); [Tabla 1](#)). Los datos sísmicos son procesados diariamente, y la clasificación de los terremotos, su localización y el cálculo de la magnitud, se realiza mediante SEISCOMP-PRO (localización automática y manual de terremotos) y EARTHWORM (monitoreo de volcanes). Los registros digitales de cada estación sísmica están disponibles en línea*.

En el servidor web se publican y procesan automáticamente todos los terremotos a nivel nacional y regional, así como también aquellos fuera de la región centroamericana. Desde octubre de 2019, la División de Sismología tiene la responsabilidad de la vigilancia regional de tsunamis (a través del *Centro de Asesoramiento de Tsunami para América Central* — CATAC), que se desarrolló en colaboración con la Agencia de Cooperación Internacional de Japón[†]. También hay cámaras web que toman imágenes en diferentes intervalos de tiempo (entre tres y cinco minutos), a las que se puede acceder a través de Internet[‡]. Durante las crisis volcánicas, las imágenes son adquiridas cada minuto. Adicionalmente, existe al menos una estación del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés) por volcán; el volcán Momotombo tiene el mayor número de estaciones GNSS, con cinco en total. Actualmente,

los datos GNSS se procesan posteriormente mediante el software GYPSY-OASIS II, y existen planes para realizar el procesamiento en tiempo real en un futuro próximo.

Para medir las emisiones de gases, el volcán Masaya tiene un DOAS fijo y un instrumento MultiGAS (p. ej., H₂O, CO₂, SO₂, H₂S, etc.) que registran y transmiten datos diariamente. [Figura 2](#) muestra la ubicación de los instrumentos de monitoreo de los volcanes, así como los instrumentos sísmicos que forman parte de la red de monitoreo de Nicaragua.

Los datos transmitidos en tiempo real a la sede de INETER en Managua llegan a diferentes servidores para su visualización instantánea a través de Internet, localización automática (y post procesamiento) de eventos sísmicos y su almacenamiento. Los datos se muestran en la web de INETER[§]. Además, productos tales como mapas de peligros, mapas de ubicación de los terremotos más recientes, boletines mensuales y anuales, y también están disponibles a través de la página web. Los investigadores locales e internacionales pueden acceder a los datos crudos, propiedad de INETER, a través de acuerdos de colaboración.

4 GESTIÓN DE LOS PELIGROS VOLCÁNICOS

Los datos recopilados durante el trabajo de campo en los volcanes activos de Nicaragua se utilizan para generar mapas geológicos, y también como datos de entrada para los *software* de simulaciones numéricas de peligros volcánicos. Estos datos de campo también son valiosos para la validación de modelos numéricos probabilísticos, que luego se emplean para simular los diferentes escenarios de actividad volcánica. Los productos finales son mapas multipeligros, desde flujos de lava, caída de tefra, impactos balísticos, flujos piroclásticos y lahares hasta fallas activas ([Figura 3](#)). Recientemente, hemos actualizado los mapas de amenaza de cinco de los principales volcanes activos: San Cristóbal, Telica, Momotombo, Masaya y Concepción, utilizando diferentes modelos numéricos probabilísticos, datos geológicos y diferentes parámetros del trabajo de campo para evaluar posibles escenarios de amenaza volcánica. Estos mapas no están disponibles actualmente en el sitio web, y su distribución debe ser previamente autorizada por el director de INETER. Siempre que sea posible, intentamos validar los modelos con datos de campo. Las herramientas de modelado que se utilizan con frecuencia para la evaluación de peligros son las que están disponibles de forma gratuita, sin conexión y en línea, en el sitio web vhub.org (Titan2D, Tephra2, Energy Cone). Otros métodos publicados en la literatura científica, como Scoops3D [[Reid et al. 2015](#)], DOWNFLOW [[Favalli 2005](#)], and LAHARZ_py [[Schilling 2014](#)], se emplean para desarrollar escenarios probabilísticos. Las capas de datos temáticos georreferenciados (SIG) generalmente se combinan para producir mapas temáticos a una escala

*<http://geofisica-ew1.ineter.gob.ni/sismogramas/welcome.html>

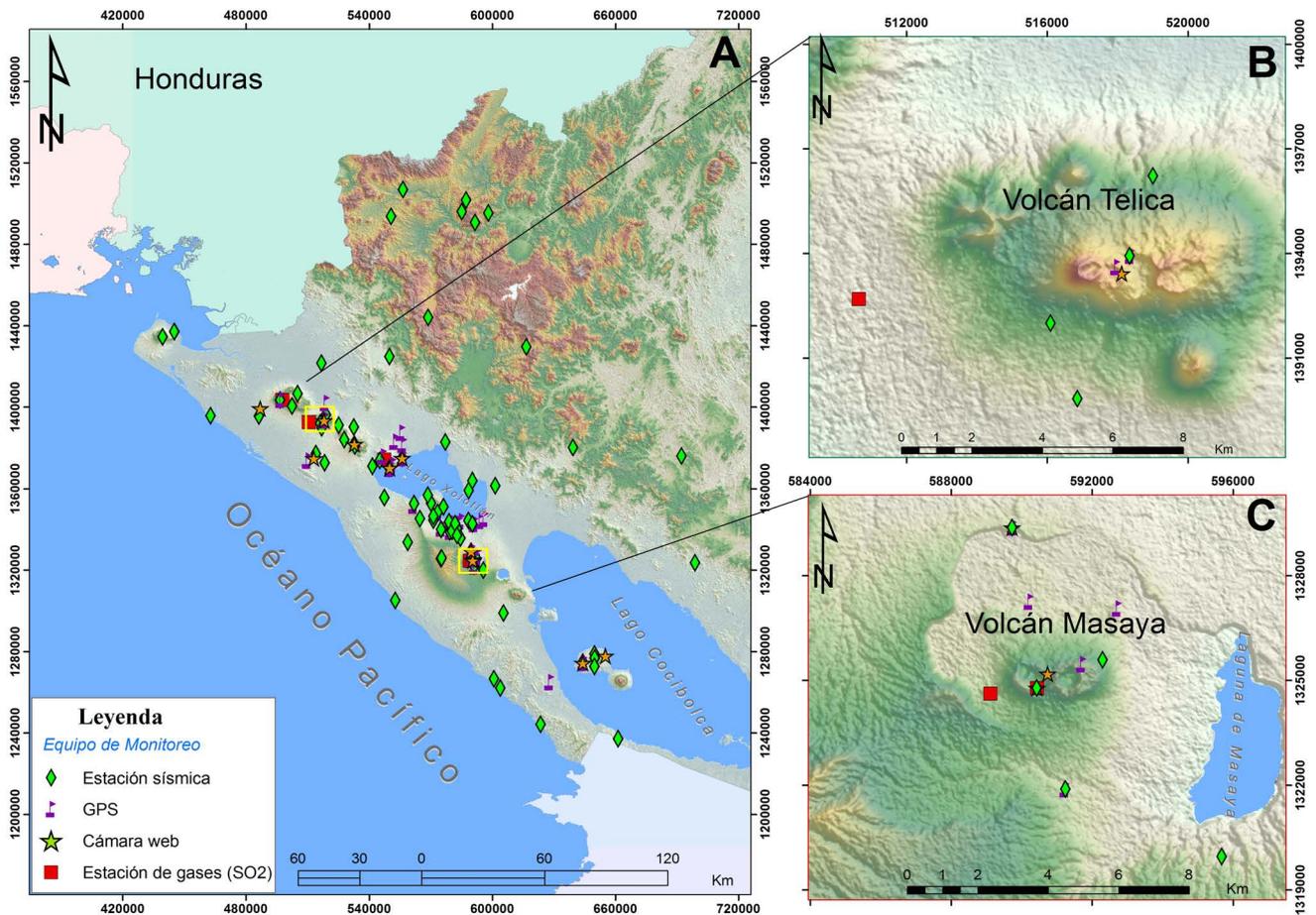
†<http://catac.ineter.gob.ni/>

‡<https://webserver2.ineter.gob.ni/webcam/index.html>

§<https://webserver2.ineter.gob.ni>

Tabla 1: Instrumentos de monitoreo por volcán, operados por INETER, Nicaragua

Volcán	Instrumentos de monitoreo					Total
	Cámaras web	MultiGAS	DOAS fijo	GNSS	Estaciones sísmicas	
San Cristóbal	2	-	1	2	3	8
Telica	2	-	1	4	7	14
Cerro Negro	1	-	-	-	6	7
Momotombo	3	-	1	7	5	16
Masaya	3	1	1	3	5	13
Concepción	2	-	-	2	4	8

**Figura 2:** Red nacional de monitoreo de INETER. Redes de monitoreo en los volcanes [B] Telica y [C] Masaya. Sistema de coordenadas WGS84.

determinada para una región geográfica específica.

Durante la principal crisis volcánica experimentada al momento, cuando los volcanes Telica, Momotombo y Masaya entraron en erupción coincidentemente, de septiembre de 2015 a marzo de 2016, el equipo científico de INETER tomó la siguiente línea de acciones: continuar las observaciones en tiempo real relacionadas con la sismicidad, desgasificación, deformación (GNSS) y la vigilancia por cámaras web. De manera diaria, se construyeron árboles probabilísticos de eventos volcánicos para cada volcán. Por último, durante la crisis, se mantuvo una comunicación adecuada y continua

con las autoridades correspondientes mencionadas anteriormente.

Los diferentes grados o niveles de peligro volcánico (bajo, medio y alto) se definen para cada volcán activo en función de su comportamiento histórico y los diferentes peligros geológicos asociados, así como teniendo en cuenta la población expuesta a diferentes radios de afectación.

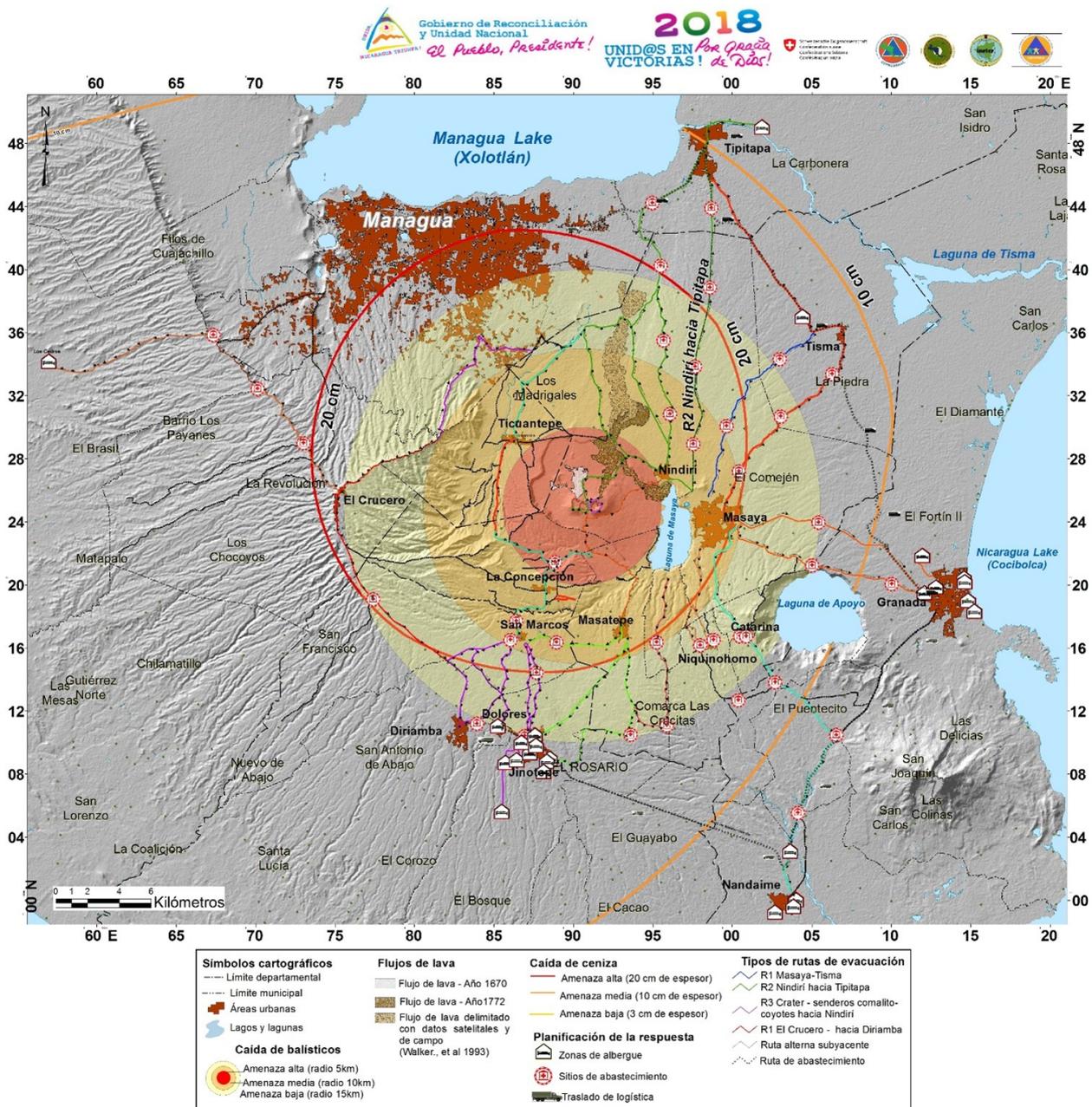


Figura 3: Mapa multiamenaza del volcán Masaya: impactos balísticos, caída de tefra, flujos de lava y rutas de evacuación (líneas azul, verde y violeta).

5 DIFUSIÓN Y DIVULGACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Durante una crisis volcánica, implementamos un protocolo ya establecido, el cual especifica que la División de Vulcanología del INETER es la entidad encargada de interpretar el nivel de severidad de los eventos en curso que caracterizan la crisis. Con base en ello, el responsable de la División de Vulcanología informa al director de la DGGG, que a su vez informa a las máximas autoridades del INETER, sugiriendo las medidas a tomar. INETER luego pasa la información a la presiden-

cia de la República de Nicaragua y al Sistema Nacional de Prevención de Desastres (SINAPRED), a cargo de la prevención y mitigación de desastres a nivel nacional, y quienes informan al público acerca de la crisis volcánica y dirigen las medidas a tomar.

Como parte de SINAPRED, INETER interactúa con una serie de instituciones gubernamentales, educativas y privadas, incluyendo defensa civil, autoridades locales, personas que viven en comunidades en zonas de riesgo volcánico, escuelas, empresas de turismo, etc. En INETER, realizamos diferentes actividades de divulgación dentro las comunidades amenazadas por peligros

volcánicos junto con el gobierno local y los sectores privados involucrados. Regularmente, llevamos adelante simulacros para que la población sepa qué hacer durante un escenario dado relacionado con la actividad volcánica. Por ejemplo, actualmente estamos trabajando con las comunidades alrededor de los volcanes Telica, San Cristóbal, Concepción y Maderas para desarrollar planes de respuesta ante erupciones. Estos planes de respuesta se presentan a las comunidades utilizando diversos métodos, como presentaciones públicas sobre los peligros relacionados con el volcán en cuestión, utilizando nuestros tres niveles de peligro volcánico (bajo, medio y alto) y la producción de un mapa de rutas de evacuación, que muestra claramente las vías que cada comunidad debe tomar hacia un albergue existente en un lugar “seguro”, donde habrá logística ya establecida entre el sector gubernamental y el privado.

Parte de los resultados se incluyen en los boletines mensuales y anuales que se encuentran disponibles en nuestra página web*, mientras que otros se comparten con otras instituciones, como el SINAPRED, y están accesibles a través de su página web†. Los resultados restantes están disponibles en nuestro servidor de datos‡. Toda la comunicación de la información generada se publica a través del sitio web§ y mediante programas de televisión a través de la oficina del presidente.

INETER también trabaja en colaboración con la comunidad científica internacional, principalmente universidades y centros de investigación en los Estados Unidos de América (*United States Geological Survey* (USGS), *Volcano Disaster Assistance Program* (VDAP), *University of South Florida*, *Pennsylvania State University*, *University of Arlington* en Texas, *University of New Mexico*, *University of Columbia*, *University NAVSTAR Consortium* (UNAVCO), *Carnegie Institute of Washington*, entre otros), en Europa (*University of Bristol*, *King's College London*, *University of Edinburgh*, *University of Manchester*, *Universidad de Kiel*, *GEOMAR Helmholtz Center for Ocean Research Kiel*, *Universidad de Cádiz*), y en América Latina (*Universidad Nacional Autónoma de México* (UNAM), *Centro Nacional de Prevención de Desastres* (CENAPRED) en México, *Servicio Nacional de Geología y Minería* (SERNAGEOMIN) en Chile, *Universidad de Puerto Rico* en Mayagüez, *Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales* de El Salvador, *Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología* (INSIVUMEH), *Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres* (CONRED) en Guatemala, *Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica* (OVSICORI) en Costa Rica). Esta colaboración internacional beneficia a INETER y Nicaragua de diferentes formas, ya que brinda capacitación al personal de INETER, financiamiento para trabajos de campo y mantenimiento de equipos, transferencia de tecnolo-

gía, etc.

6 NECESIDADES, DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Luego de la erupción del volcán Cerro Negro, en abril de 1992, INETER comenzó la instrumentación volcánica, la vigilancia permanente y el monitoreo en seis de los principales volcanes activos. Eso incluye: monitoreo sísmico volcánico, mediciones de CO₂ y SO₂, mediciones de temperatura, vigilancia por cámaras web, GNSS y mapas de respuesta para cada peligros de los volcanes, con diferentes escenarios eruptivos, incluidos lahares provocados por eventos eruptivos o geodinámicos en los volcanes.

Desde entonces, hemos manejado por lo menos 19 crisis volcánicas. Las más sobresalientes fueron las ocurridas durante los seis meses transcurridos entre mediados del 2015 y principios del 2016, cuando los volcanes Telica, Momotombo y Masaya entraron en erupción. Actualmente, las principales necesidades para fortalecer la División de Vulcanología de la DGGG en INETER, son:

- Incrementar el número de expertos y técnicos. El personal de la División de Vulcanología, junto con un asesor, se ocupa continuamente de diferentes proyectos al mismo tiempo, y también tienen que dar respuesta a las crisis y situaciones de emergencia que se presenten.
- Se necesita financiamiento para el entrenamiento sistemático y el desarrollo profesional continuo, para mantenerse actualizados con los avances de la vulcanología.
- Se requieren recursos económicos para el trabajo de campo y el mantenimiento de equipos.

La División de Vulcanología de INETER tiene varios desafíos para el futuro cercano, en particular:

- Organización de la transmisión de datos en tiempo real para todos los equipos de monitoreo instalados en campo.
- Automatización del procesamiento preliminar de datos en tiempo casi real para todos los datos entrantes.
- Incrementar la capacidad científica de todo el personal. Esto incluye la necesidad de que todo el personal hable inglés con fluidez.

Estamos trabajando en proyectos con la comunidad nacional e internacional para modernizar nuestras redes de monitoreo. Nuestro objetivo es mejorar nuestra capacidad para responder de manera oportuna a las crisis volcánicas y anticiparnos, en la medida de lo posible, ante la ocurrencia de un fenómeno volcánico peligroso para salvar la mayor cantidad de vidas.

*<https://webserver2.ineter.gob.ni/sis/bolsis/bolsis.html>

†<http://www.sinapred.gob.ni/>

‡<https://webserver2.ineter.gob.ni>

§<https://www.ineter.gob.ni/>

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dirección Ejecutiva del INETER que gestionó el enlace con el gobierno de Nicaragua para brindar recursos sin precedentes para impulsar nuestro programa nacional de monitoreo de volcanes. También estamos muy agradecidos con la comunidad científica internacional que ha establecido convenios de cooperación con INETER, a través de los cuales hemos podido adquirir instrumentación complementaria, financiamiento para el mantenimiento de los instrumentos de monitoreo y capacitación de nuestro personal involucrado en el programa de monitoreo de volcanes. Queremos agradecer a J. W. Quedo por ayudarnos a preparar las figuras de este manuscrito.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Cada autor contribuyó al desarrollo del documento de acuerdo con su campo de experiencia.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Datos adicionales o resultados de los mapas de peligros volcánicos y el equipo de monitoreo están disponibles en <https://web-geofisica.ineter.gob.ni/vol/dep-vol.html>.

DERECHOS DE AUTOR

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

REFERENCIAS

- Aiuppa, A., J. M. de Moor, S. Arellano, D. Coppola, V. Francofonte, B. Galle, G. Giudice, M. Liuzzo, E. Mendoza, A. Saballos, G. Tamburello, A. Battaglia, M. Bitetto, S. Gurrieri, M. Laiolo, A. Mastrolia y R. Moretti (2018). «Tracking Formation of a Lava Lake From Ground and Space: Masaya Volcano (Nicaragua), 2014-2017». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 19 (2), págs. 496-515. DOI: [10.1002/2017gc007227](https://doi.org/10.1002/2017gc007227).
- Carr, M. J. (1984). «Symmetrical and segmented variation of physical and geochemical characteristics of the central american volcanic front». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 20 (3-4), págs. 231-252. DOI: [10.1016/0377-0273\(84\)90041-6](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90041-6).
- Carr, M. J., L. C. Patino y M. D. Feigenson (2007a). «Petrology and geochemistry of lavas». *Central America: Geology, Resources and Hazards*. Ed. por J. Bundschuh y G. E. Alvarado. Vol. 2. CRC Press. DOI: [10.1201/9780203947043](https://doi.org/10.1201/9780203947043).
- Carr, M. J., I. Saginor, G. E. Alvarado, L. L. Bolge, F. N. Lindsay, K. Milidakis, B. D. Turrin, M. D. Feigenson y C. C. Swisher (2007b). «Element fluxes from the volcanic front of Nicaragua and Costa Rica». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 8 (6). DOI: [10.1029/2006gc001396](https://doi.org/10.1029/2006gc001396).
- DeMets, C. (2001). «A new estimate for present-day Cocos-Caribbean Plate motion: Implications for slip along the Central American Volcanic Arc». *Geophysical Research Letters* 28 (21), págs. 4043-4046. DOI: [10.1029/2001gl013518](https://doi.org/10.1029/2001gl013518).
- Favalli, M. (2005). «Forecasting lava flow paths by a stochastic approach». *Geophysical Research Letters* 32 (3). DOI: [10.1029/2004gl021718](https://doi.org/10.1029/2004gl021718).
- French, S. W., L. M. Warren, K. M. Fischer, G. A. Abers, W. Strauch, J. M. Protti y V. Gonzalez (2010). «Constraints on upper plate deformation in the Nicaraguan subduction zone from earthquake relocation and directivity analysis». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11 (3). DOI: [10.1029/2009gc002841](https://doi.org/10.1029/2009gc002841).
- Funk, J., P. Mann, K. McIntosh y J. Stephens (2009). «Cenozoic tectonics of the Nicaraguan depression, Nicaragua, and Median Trough, El Salvador, based on seismic-reflection profiling and remote-sensing data». *Geological Society of America Bulletin* 121 (11-12), págs. 1491-1521. DOI: [10.1130/b26428.1](https://doi.org/10.1130/b26428.1).
- Goffin, C. (2006). *VIII Censo de Población y IV de Vivienda*. Inf. téc. Managua, Nicaragua: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- Hill, B. E., C. B. Connor, M. S. Jarzempa, P. C. L. Femina, M. Navarro y W. Strauch (1998). «1995 eruptions of Cerro Negro volcano, Nicaragua, and risk assessment for future eruptions». *Geological Society of America Bulletin* 110 (10), págs. 1231-1241. DOI: [10.1130/0016-7606\(1998\)110<1231:eocnvn>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110<1231:eocnvn>2.3.co;2).
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (1999). *Boletín Vulcanológico Mensual, Agosto, 1999*. URL: <https://webserver2.ineter.gob.ni/vol/bolvol/1999/08/index9908.htm>.
- (2004). *Boletín Vulcanológico Mensual, Febrero, 2004*. URL: <https://webserver2.ineter.gob.ni/boletin/2004/02/eventos-especiales0402.htm>.
- (2015a). *Boletín Vulcanológico Anual, 2015*. URL: https://webserver2.ineter.gob.ni/boletin/2015/Anual_2015/Boletin_anual_vulcanologia_2015.pdf.
- (2015b). *Boletín Vulcanológico Mensual, Diciembre, 2015*. URL: <https://webserver2.ineter.gob.ni/boletin/2015/12/index1512.htm>.
- (2016). *Boletín Vulcanológico Mensual, Febrero, 2016*. URL: <https://webserver2.ineter.gob.ni/boletin/2016/02/boletin-1602.pdf>.

- Jordan, B. R., H. Sigurdsson, S. N. Carey, R. Rogers y J. Ehrenborg (2007). «Geochemical variation along and across the Central American Miocene paleoarc in Honduras and Nicaragua». *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71 (14), págs. 3581-3591. doi: 10.1016/j.gca.2007.05.013.
- La Femina, P. C., C. B. Connor, B. E. Hill, W. Strauch y J. A. Saballos (2004). «Magma–tectonic interactions in Nicaragua: the 1999 seismic swarm and eruption of Cerro Negro volcano». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 137 (1-3), págs. 187-199. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2004.05.006.
- La Femina, P. C., T. H. Dixon, R. Govers, E. Norabuena, H. Turner, A. Saballos, G. Mattioli, M. Protti y W. Strauch (2009). «Fore-arc motion and Cocos Ridge collision in Central America». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10 (5). doi: 10.1029/2008gc002181.
- McBirney, A. R. y H. Williams (1965). *Volcanic History of Nicaragua*. Vol. 55. University of California publications in geological sciences. University of California Press.
- Norabuena, E., T. H. Dixon, S. Schwartz, H. DeShon, A. Newman, M. Protti, V. Gonzalez, L. Dorman, E. R. Flueh, P. Lundgren, F. Pollitz y D. Sampson (2004). «Geodetic and seismic constraints on some seismogenic zone processes in Costa Rica». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 109 (B11). doi: 10.1029/2003jb002931.
- Reid, M. E., S. B. Christian, D. L. Brien y S. T. Henderson (2015). *Scoops3D: software to analyze 3D slope stability throughout a digital landscape*. doi: 10.3133/tm14a1.
- Roman, D. C., P. C. LaFemina, R. Bussard, K. Stephens, C. Wauthier, M. Higgins, M. Feineman, S. Arellano, J. M. Moor, G. Avarad, M. M. Cruz, M. Burton, M. Varnam, A. Saballos, M. Ibarra, W. Strauch y V. Tenorio (2019). «Mechanisms of Unrest and Eruption at Persistently Restless Volcanoes: Insights From the 2015 Eruption of Telica Volcano, Nicaragua». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 20 (8), págs. 4162-4183. doi: 10.1029/2019gc008450.
- Saballos, J. A., V. Conde, R. Malservisi, C. B. Connor, J. Álvarez y A. Muñoz (2014). «Relatively short-term correlation among deformation, degassing, and seismicity: a case study from Concepción volcano, Nicaragua». *Bulletin of Volcanology* 76 (8). doi: 10.1007/s00445-014-0843-5.
- Saballos, J. A., R. Malservisi, C. B. Connor, P. C. L. Femina y P. Wetmore (2013). «Gravity and geodesy of Concepción Volcano, Nicaragua». *Understanding Open-Vent Volcanism and Related Hazards*. Geological Society of America, págs. 77-88. doi: 10.1130/2013.2498(05).
- Saginer, I., E. Gazel, M. J. Carr, C. C. Swisher y B. Turrin (2011). «New Pliocene–Pleistocene $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages fill in temporal gaps in the Nicaraguan volcanic record». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 202 (1-2), págs. 143-152. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.02.002.
- Schilling, S. P. (2014). *Laharz_py: GIS tools for automated mapping of lahar inundation hazard zones*. doi: 10.3133/ofr20141073.