Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional, el Servicio Sismológico y Volcanológico Ecuatoriano

Patricio Ramón*, Silvia Vallejo*, Patricia Mothes, Daniel Andrade, Francisco J. Vásconez, Hugo Yepes, Silvana Hidalgo, Santiago Santamaría

Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

RESUMEN

Noventa y ocho volcanes cuaternarios han sido identificados en los Andes ecuatorianos y Galápagos de los cuales nueve han experimentado erupciones al menos una vez en los últimos veinte años. Adicionalmente, alrededor del 35 % de la población ecuatoriana vive en zonas que podrían ser afectadas durante futuras erupciones. El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) monitorea y evalúa la amenaza volcánica del país y, como resultado de sus investigaciones, diecinueve mapas de amenaza volcánica y centenares de artículos científicos han sido publicados. Las redes de vigilancia comprenden dieciocho volcanes e incluyen más de 266 estaciones, que son parte también de los sistemas de alerta temprana. La actividad volcánica es comunicada amplia y periódicamente por el IG-EPN a través diferentes medios (página web y redes sociales). Comprendiendo que futuras erupciones ocurrirán en Ecuador, el IG-EPN continúa actualizando sus prácticas de vigilancia y evaluación de la amenaza, y mejorando sus protocolos de comunicación para cumplir exitosamente sus responsabilidades.

This article is available in English at: https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.93112 [PDF EN].

1 Introducción

Ecuador está dividido en cuatro regiones fisiográficas: Costa, Sierra, Amazonía y las Islas Galápagos. Noventa y ocho volcanes están distribuidos en las regiones de la Sierra, Amazonía e Islas Galápagos (Figura 1). El volcanismo en Ecuador está concentrado en la Zona Volcánica Andina del Norte (ZVN), la cual resulta de la subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamérica. Adicionalmente, la presencia del punto caliente, al sur de la Dorsal Galápagos, da lugar al volcanismo intenso del archipiélago de Galápagos (Figura 1). Los volcanes del país son monitoreados desde 1983, y, durante este período de tiempo, se han registrado erupciones volcánicas a partir de las dos fuentes antes mencionadas: en el continente, los volcanes Guagua Pichincha (1999-2001), Tungurahua (1999-2016), Reventador (2002-presente), Cotopaxi (2015), y Sangay (continua); y a lo largo del archipiélago de Galápagos, los volcanes Sierra Negra (2005, 2018), Fernandina (1984, 1988, 1991, 1995, 2005, 2009, 2017, 2018, 2019,2020), Cerro Azul (1998, 2008), y Wolf (2015). Según los datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos del 2010 [INEC 2010], al menos el 35% de la población ecuatoriana vive en estas regiones y podría verse impactada por actividad volcánica.

En este trabajo, presentamos una visión general del volcanismo en Ecuador, así como de las diferentes técnicas que el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN)—institución encargada del monito-

reo y evaluación del peligro volcánico—aplica para la vigilancia diaria en volcanes tanto del continente como de las Islas Galápagos. También mostramos el manejo del peligro que los científicos y técnicos del IG-EPN llevan a cabo conjuntamente con las autoridades y las comunidades.

1.1 Actividad volcánica en Ecuador

Los volcanes en Ecuador se clasifican, en base a su última actividad eruptiva, como:

- 1. Extintos o dormidos: si su última erupción ocurrió durante el Pleistoceno.
- 2. Activos: para volcanes que erupcionaron por última vez durante el Holoceno. Esto incluye volcanes que erupcionaron durante el tiempo histórico (desde 1532, tiempo de la Conquista Española).
- En erupción: para volcanes que se encuentran erupcionando al momento o cuya última erupción ocurrió en los últimos dos años (e.g. 2018–2020).

x En el continente, se han identificado 76 centros volcánicos (Figura 1A), 52 de ellos están extintos, 24 son activos y 2 de ellos están actualmente en erupción (e.g. Reventador y Sangay). Costa afuera, las Islas Galápagos albergan 22 volcanes distribuidos en el archipiélago (Figura 1B): los volcanes más jóvenes están ubicados en las islas occidentales, y los más antiguos, en las orientales [Allan y Simkin 2000]: 12 de estos están extintos, 10 activos y 2 entraron en erupción en los dos

^{*}Autores de correspondencia: pramon@igepn.edu.ec; svallejo@igepn.edu.ec

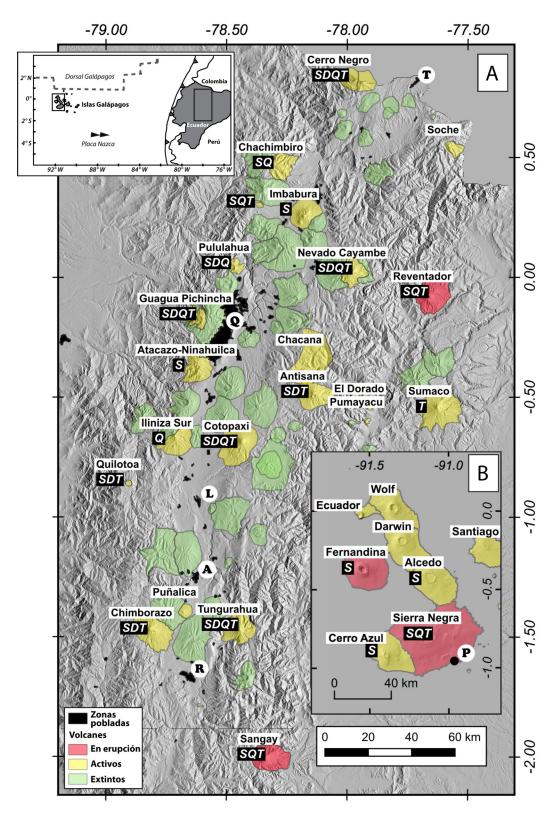


Figura 1: Volcanes ecuatorianos distribuidos en [A] el continente, y [B] en las Islas Galápagos. Los volcanes dormidos o extintos se muestran en verde, los activos en amarillo y los que están en erupción (en la actualidad o durante los últimos dos años, e.g. 2018–2020), en rojo. Los nombres de los volcanes están escritos en negro dentro de un recuadro blanco. Las letras con negrilla en círculos blancos representan las ciudades principales, desde el norte hacia el sur: T: Tulcán, Q: Quito, L: Latacunga, A: Ambato, R: Riobamba, P: Puerto Villamil. Las letras blancas en recuadros negros representan los diferentes tipos de monitoreo que se llevan a cabo en los volcanes: S: Sísmico (sísmica e/o infrasonido), D: Geodesia (GPS e/o inclinómetro), Q: Geoquímica (gas, fluidos), T: Térmica/visual (aérea y/o fija).

últimos años (Fernandina y Sierra Negra) [Santamaria y Bernard 2018; Vásconez et al. 2018].

1.2 Historia del Instituto Geofísico

En 1972, la Escuela Politécnica Nacional (EPN) invitó al Dr. Minard Hall para ser profesor en la Facultad de Geología. Su investigación, junto con el trabajo realizado por sus estudiantes, resultó en la publicación del libro "El Volcanismo en el Ecuador" (1977). Este libro, por primera vez, destacaba la naturaleza activa de muchos volcanes en el país, y la exposición de la población ante potenciales peligros volcánicos. Después de un incremento en la actividad fumarólica en el volcán Cotopaxi en 1975, y de un sismo en Pastocalle en 1976 (Mw=5.7), algunos equipos de monitoreo fueron instalados gracias a la gestión y esfuerzos del Dr. Hall. Sucesivamente, en 1983, la EPN creó el IG-EPN con el objetivo de contar con una institución que monitoree la actividad sísmica y volcánica en el Ecuador.

Dos eventos desastrosos ocurrieron en Latinoamérica en 1985: la erupción del volcán Nevado del Ruiz en Colombia (~25000 muertes), y un sismo en México (Mw=8.0, 9500 muertes). A partir de estas tragedias, personal del IG-EPN resolvió llevar a cabo todas las acciones necesarias para reducir el riesgo asociado a estos tipos de peligros en Ecuador, especialmente en términos de evaluación del peligro sísmico y volcánico, y de su monitoreo. Los resultados de estos esfuerzos están descritos en las siguientes secciones y se refieren principalmente a la creación de numerosos mapas de peligros volcánicos basados en trabajo de campo, la implementación de redes de vigilancia volcánica y sísmica, y las experiencias ganadas en sistemas de alerta temprana. El IG-EPN monitorea un total de 20 volcanes (Figura 1, Tabla 1): 16 localizados en el continente, y 4 en las Islas Galápagos.

2 Vigilancia volcánica

Los volcanes ecuatorianos son monitoreados continuamente desde 1988 a través de la Red de Observatorios Volcanológicos del Instituto Geofísico [ROVIG; Alvarado et al. 2018]. Desde entonces, la red de monitoreo ha sido mejorada con nuevas tecnologías y el incremento del número de estaciones. Hoy en día, estas nuevas tecnologías incluyen estaciones sísmicas (período corto, banda ancha y sensores de lahares [Acoustic Flow Monitor]), geodésicas (inclinómetros, GPS [Global Positioning System]), geoquímicas (aérea y fija) y sensores remotos (visual y térmica). Actualmente (comienzos del 2021), existen 266 estaciones instaladas en los 20 volcanes del continente y de Galápagos, que contribuyen a monitorear su actividad diaria (Tabla 1). Esta tarea se organiza en base al riesgo que cada volcán representa para la población. Consecuentemente, la vigilancia se ha agrupado en:

- Observatorios con nivel de vigilancia 1: 4 volcanes, Tungurahua, Cotopaxi, Guagua Pichincha y Reventador. Los observatorios de nivel 1 utilizan múltiples técnicas de monitoreo: sísmica (4 o más estaciones), geodésica, sensores acústicos y geoquímicos. Adicionalmente, los volcanes Tungurahua, Cotopaxi y Reventador cuentan con sensores de lahares (AFM) y cámaras visuales e infrarrojas; el volcán Guagua Pichincha posee una cámara de vigilancia. Como ejemplo, la (Figura 2) muestra la red de monitoreo del volcán Cotopaxi en 2016.
- Observatorios con nivel de vigilancia 2: 5 volcanes, Antisana, Cayambe, Chiles-Cerro Negro, Cuicocha y Sierra Negra. Estos observatorios poseen al menos dos técnicas de monitoreo, como la sísmica con más de una estación, geodésica y monitoreo periódico de parámetros geoquímicos y térmicos.
- Observatorios con nivel de vigilancia 3: 10 volcanes, Sangay, Pululahua, Chimborazo, Imbabura, Chalupas, Chacana, Quilotoa, Alcedo, Cerro Azul y Fernandina. Este nivel de vigilancia involucra al menos una técnica de monitoreo, principalmente sísmica. En algunos casos, esta incluye estaciones GPS permanentes o monitoreo geoquímico y visual/térmico.

2.1 Personal y organización del Instituto Geofísico

Las responsabilidades que el IG-EPN ha venido cumpliendo desde 1983 son el resultado del trabajo diario de 90 personas agrupadas en cinco grupos diferentes: (1) Sismología, (2) Volcanología, (3) Instrumentación, (4) Sistemas y (5) Administración. El personal posee estudios académicos y experiencia en sismología, volcanología, electrónica, física, informática y administración. La experticia varía desde estudiantes universitarios a profesionales senior; algunos son técnicos calificados, mientras que otros han obtenido grados académicos de ingenieros, MSc. y PhD. Debido a que el IG es parte de la EPN, una universidad de excelencia académica en Ecuador, parte del staff dicta clases en sus diferentes facultades. Las responsabilidades de cada grupo se detallan a continuación:

- El grupo de Sismología analiza e interpreta las señales sísmicas—de origen volcánico o tectónico—registradas a partir de las estaciones de monitoreo.
- El grupo de Volcanología realiza el seguimiento y evalúa continuamente la actividad de los volcanes en base al procesamiento de diferentes métodos de monitoreo de cada volcán. También se mantienen actualizados sobre los incrementos de actividad de los volcanes monitoreados, crean escenarios eruptivos, y producen mapas de peligro basados en trabajo de campo y modelos computacionales.

RED DE MONITOREO DEL VOLCÁN COTOPAXI INSTITUTO GEOFÍSICO - EPN

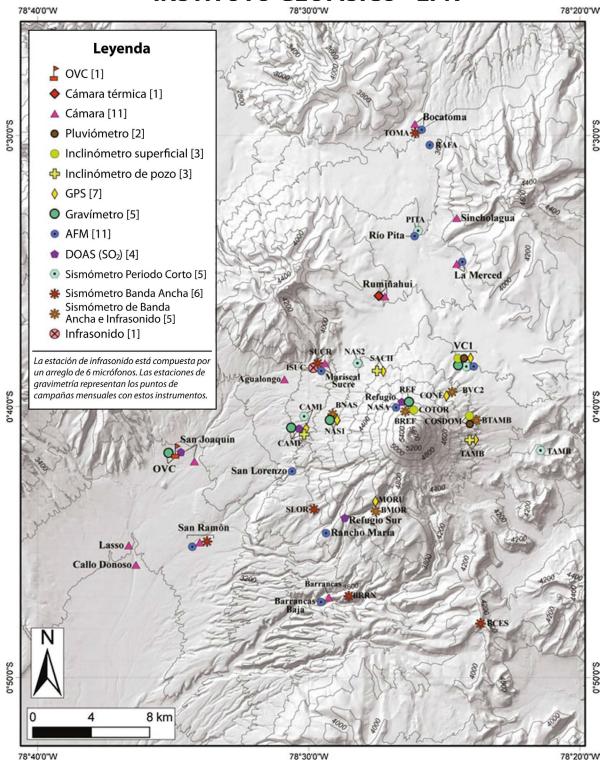


Figura 2: Mapa de la red instrumental de monitoreo alrededor del volcán Cotopaxi, abril 2016 [Mothes et al. 2017]. Los códigos de las estaciones fueron incluidos. Acrónimos: OVC = Observatorio Volcán Cotopaxi, GPS = Sistema de Posicionamiento Geográfico, AFM = Medidor Acústico de Flujo, DOAS = Espectroscopía de Absorción Óptica Diferencial, SO₂ = Dióxido de Azufre, SP = Sismómetro de Periodo Corto, BB = Sismómetro de Banda Ancha.

- El grupo de Instrumentación está encargado de la instalación, mantenimiento y funcionamiento de las estaciones a lo largo del territorio ecuatoriano, así como de la transmisión de sus señales a las oficinas del IG-EPN.
- El grupo de Sistemas maneja la adquisición, el almacenamiento y la organización de los datos provenientes las diferentes estaciones localizadas en el campo. También están encargados del mantenimiento y del manejo de las redes sociales (e.g. página web, Facebook, Twitter).
- El grupo de Administración está encargado de la logística y del manejo administrativo del IG-EPN.

Desde sus comienzos, el IG-EPN se estableció en Quito, en el campus de la EPN, y es esta la sede donde desarrollan las diferentes actividades sus trabajadores. A finales de 1999, el volcán Tungurahua entró en una nueva fase eruptiva, así que, para monitorear su actividad diaria, el IG-EPN decidió instalar el Observatorio del Volcán Tungurahua (OVT) en octubre de 1999, ubicado 13 km al norte del volcán. En el OVT, dos volcanólogos y otros miembros del IG-EPN trabajaron en turnos semanales para brindar vigilancia personalizada de la actividad volcánica y para mantener la instrumentación alrededor del volcán, hasta que este fue cerrado después de 20 años de operación continua. La ubicación del OVT permitió establecer una relación cercana con la población y un mejor entendimiento de la actividad superficial del Tungurahua mientras este se encontraba en erupción [e.g. Mothes et al. 2015].

2.2 Procesamiento, almacenamiento y acceso a la información

Toda la información generada por la instrumentación es enviada continuamente vía radio, microonda o internet desde las estaciones hasta la sede en Quito. Almacenada en servidores en el IG-EPN, esta información es procesada diariamente por sus científicos. Dependiendo de la técnica de monitoreo, el procesamiento sigue diferentes protocolos: Datos sísmicos de sismómetros de periodo corto o banda ancha: incluye la clasificación de sismos, localización y cálculo de magnitud; Datos de deformación de terreno por GPS e inclinómetros: incluye el análisis de la tendencia de deformación en un cierto periodo de tiempo; Datos de gases de DOAS (Espectroscopía de Absorción Óptica Diferencial) y multiGAS (Sistema Analizador Multicomponente de Gas) son analizados para determinar la cantidad dse SO₂ emitido hacia la atmósfera; Análisis a largo plazo de anomalías térmicas es llevado a cabo por imágenes infrarrojas colectadas utilizando cámaras fijas; Adicionalmente, observaciones directas regulares nos permiten identificar cambios morfológicos en la superficie, presencia y dispersión de columnas de ceniza.

Los datos procesados de la actividad sísmica y volcánica pueden encontrarse en la página web del IG-EPN*. Cuando el requerimiento es diferente a la información disponible en la página web, el usuario puede completar una solicitud específica.

3 Manejo del peligro volcánico

3.1 Herramientas y técnicas para el manejo del peligro

En el IG-EPN, el manejo del peligro volcánico es considerado en el marco de los últimos criterios establecidos por Naciones Unidas para la reducción de desastres [United Nations 2015]. En este sentido, se han considerado los peligros a largo y corto plazo.

Evaluación del peligro a largo plazo: la información de base del volcán es especialmente importante para entender la actividad volcánica y los parámetros asociados que, eventualmente, pueden desencadenar una erupción. De igual manera, la información geológica y la actividad histórica son esenciales para evaluar el peligro de cada volcán.

Evaluación del peligro a corto plazo: con el fin de identificar los precursores que eventualmente podrían preceder a la actividad volcánica, se lleva a cabo la vigilancia humana directa e instrumental del volcán. El análisis e interpretación de los diferentes sistemas de monitoreo constituyen los elementos básicos en la evaluación del peligro volcánico a corto plazo. Esta información es muy importante en el pronóstico de la evolución de la actividad, en la elaboración de escenarios eruptivos, y especialmente en la construcción de Sistemas de Alerta Temprana (SAT).

3.2 Sistemas de Alerta Temprana (SAT) para volcanes

El SAT que el IG-EPN utiliza, fue definido durante la Tercera Conferencia de Alerta Temprana [ISDR Early Warning Conference III 2006]. Es un sistema que empodera a la gente y comunidades que enfrentan una amenaza para actuar de manera oportuna y adecuada para reducir sus efectos negativos. El SAT comprende tres grupos. El primer grupo (IG-EPN), es responsable de evaluar el peligro volcánico y del monitoreo, y reconoce y declara la inminencia de un peligro. Un segundo grupo, compuesto por las autoridades, tomadores de decisiones y Protección Civil, es responsable de la toma de decisiones y comunicación de la alerta. Un tercer grupo comprende a la comunidad en riesgo la que ha sido entrenada para responder a la alerta.

Este sistema fue implementado en la reciente erupción del volcán Tungurahua (1999–2016) y demostró ser muy efectivo en la reducción drástica del impacto asociado con la actividad eruptiva (Figura 3). Las comunidades fueron evacuadas de manera adecuada y opor-

^{*}https://www.igepn.edu.ec/solicitud-de-datos

Tabla 1: Técnicas de monitoreo utilizadas por el IG-EPN para la vigilancia de 20 volcanes en Ecuador; 16 en el continente y 4 en las Islas Galápagos. Los volcanes están agrupados de acuerdo a su nivel de vigilancia. A: Activo, E: Extinto, IE: En Erupción.

Nombre del volcán	Nivel de vigilancia	Nivel de actividad	Técnicas de monitoreo					
			Sísmica				Geodésica	
			Período corto	Banda ancha	Detectores de lahares	Acústica	Inclinó- metro	GPS
Cotopaxi (5898 m)	1	A	6	9	11	2	6	9
Guagua Pichincha (4742 m)		A	4	3	-	1	2	1
Reventador (3539 m)		IE	2	2	1	2	-	-
Tungurahua (5016 m)		A	3	7	9	4	5	5
Antisana (5720 m)	2	A	1	3	-	-	-	2
Chiles (4707 m) - Cerro Negro (4429 m)		A	-	2	-	1	-	2
Cotacachi (4887 m) - Cuicocha (3318m)		A	-	3	-	-	-	2
Nevado Cayambe (5759 m)		A	1	2	-	-	2	2
Sierra Negra (1124 m)**		IE	-	2	-	-	-	-
Alcedo (5720 m)**	3	A	-	1	-	-	-	_
Cerro Azul (1689 m)**		A	-	2	-	-	-	-
Chacana (4000 m)		A	-	1	-	-	-	1
Chimborazo (6268 m)		A	-	3	-	-	-	1
Fernandina (1476m)**		IE	-	2	-	-	-	-
Imbabura (4545 m)		A	-	1	-	-	-	-
Pululahua (3316 m)		A	-	-	-	-	-	1
Quilotoa (3872 m)		A	-	-	-	-	-	1
Sangay (5302 m)		IE	-	1	-	-	-	-

Volcano	Técnicas de monitoreo (continuado)									
	Geoquímico			S	Cenizó-	Pluvió-				
	Gas DOAS	s (SO ₂) multiGAS*	Fluidos	Cámaras IR fijas	Cámaras visuales fijas	Aéreo IR+visible	metros	metros		
Cotopaxi (5898 m)	3	×	×	2	11	×	30	2		
Guagua Pichincha (4742 m)	-	-	×	-	1	×	2	1		
Reventador (3539 m)	1	×	-	1	3	×	60	-		
Tungurahua (5016 m)	2	×	×	-	4	×	-	2		
Antisana (5720 m)	-	-	-	-	-	×	-	_		
Chiles (4707 m) - Cerro Negro (4429 m)	-	-	×	-	-	×	7	-		
Cotacachi (4887 m) - Cuicocha (3318m)	-	-	×	-	-	×	-	-		
Nevado Cayambe (5759 m)	1	×	×	-	-	×	-	-		
Sierra Negra (1124 m)**	1	-	-	-	1	-	4	-		
Alcedo (5720 m)**	-	-	-	-	-	-	_	-		
Cerro Azul (1689 m)**	-	-	-	-	-	-	-	-		
Chacana (4000 m)	-	-	-	-	-	-	-	-		
Chimborazo (6268 m)	-	-	-	-	-	×	-	-		
Fernandina (1476m)**	-	-	-	-	-	-	-	-		
Imbabura (4545 m)	-	-	-	-	-	×	-	-		
Pululahua (3316 m)	-	-	-	-	-	×	-	-		
Quilotoa (3872 m)	-	-	-	-	-	×	-	-		
Sangay (5302 m)	1	×	-	-	1	×	-	-		

^{*} monitoreo aéreo ** Volcanes de Galápagos



Figura 3: Sistema de Alerta Temprana para la erupción del volcán Tungurahua (1999–2016) [Modificado de Ramón 2010].

tuna al recibir las alertas, y prácticamente no existieron víctimas relacionadas al impacto de lahares, flujos de lava y corrientes de densidad piroclásticas (PDCs). Sin embargo, durante la erupción de agosto de 2006 cinco personas que ya habían evacuado siguiendo las previsiones del SAT, decidieron regresar a sus hogares, donde fueron alcanzados por corrientes de densidad piroclástica, ocasionándoles la muerte. La caída de ceniza fue abundante durante el mismo periodo eruptivo y, aunque no causó muertes, sí generó pérdidas económicas sustanciales [Tobin y Whiteford 2002].

En este sentido, es importante mencionar una experiencia sin precedentes que tuvimos durante estos 17 años de erupción del Tungurahua: la organización de una red de observadores voluntarios, conocidos como vigías [Stone et al. 2014]. Inicialmente, los vigías eran voluntarios de comunidades alrededor del volcán, que asumían la responsabilidad de hacer observaciones para apoyar al monitoreo del OVT, y de mantener las estaciones de monitoreo en el campo [Armijos et al. 2017]. Ellos fueron los intermediarios entre los científicos del OVT y las comunidades, que así disponían del conocimiento sobre la actividad del volcán. De esta manera, los vigías se convirtieron en líderes de sus comunidades, y las movilizaban a lugares seguros cuando las alertas

tempranas eran emitidas, y en algunos casos incluso antes de su emisión. Los *vigías* demostraron ser una gran ayuda en el manejo y reducción del riesgo.

3.3 Mapas de peligro volcánico

En 1978, el primer mapa de peligros volcánicos del Ecuador y de toda Sud América fue publicado para el volcán Cotopaxi [Miller et al. 1978]. Este mapa fue actualizado en 2004, después de una pequeña erupción hidromagmática, en agosto del 2015-el nuevo mapa cubre ahora la zona oriental del volcán [Vásconez et al. 2016]. Entre 1988 y 1992, 11 mapas de peligros volcánicos fueron publicados para los volcanes Antisana, Chimborazo, Cotopaxi (Norte y Sur), Cuicocha, Guagua Pichincha, Atacazo-Ninahuilca, Pululahua, Quilotoa y Tungurahua, como parte del Proyecto de las Naciones Unidas. Posteriormente, mapas de peligros fueron publicados para Cayambe [Samaniego et al. 2002] e Imbabura [Ruiz et al. 2005]. Después de una intensa erupción en 2006, el mapa de peligros del Tungurahua fue actualizado [Samaniego et al. 2008]. El volcán Reventador inició un nuevo periodo eruptivo en 2002, con la erupción más importante (IEV=4) en los últimos 150 años en el país [Hall et al. 2004]. El mapa de peligros para este volcán fue publicado en 2011 [Bourquin et al. 2011], el cual incluye la extensión y distribución de los productos eruptivos modelados. El mapa de peligros del volcán Sangay fue publicado en 2013 [Ordóñez et al. 2013]. En 2014, un mapa de peligros volcánicos para el complejo volcánico Chiles-Cerro Negro (ubicado en la frontera de Ecuador y Colombia) fue conjuntamente preparado por el IG-EPN y el Servicio Geológico de Colombia*. Muy recientemente, el equipo del IG-EPN actualizó el mapa de peligros del volcán Guagua Pichincha [Telenchana et al. 2019].

Los mapas de peligros volcánicos actualizados pueden ser descargados desde la página de internet del IG- EPN^{\dagger} .

4 Divulgación y alcance de la información

4.1 Reportes de actividad volcánica

El IG-EPN mantiene a la comunidad ecuatoriana permanentemente informada sobre el estatus de la actividad volcánica en el país a través de diferentes medios. La frecuencia y destino de la información depende del tipo de actividad que un determinado volcán presenta para una determinada región. En todo caso, esta información intenta estar direccionada a la mayor cantidad de destinatarios posibles. Bajo estas consideraciones, el IG-EPN brinda los siguientes cuatro tipos de reportes al público en general:

- 'Informes diarios' son generados para volcanes que atraviesan una fase eruptiva. Los reportes incluyen la información detectada por la red de monitoreo y por los sensores satelitales, así como las condiciones climáticas y la información reportada por los observadores en el sitio.
- 2. 'Informes IG al Instante' son publicados inmediatamente después de que varias redes de monitoreo alertan sobre la ocurrencia de manifestaciones volcánicas superficiales, las cuales incluyen la emisión de columnas eruptivas, gas y emisión de gases, o la presencia de incandescencia.
- 3. 'Avisos para la Aviación' (a través del Volcano Observatory Notice for Aviation, VONA) son reportes que notifican cuando la actividad volcánica ha generado columnas de ceniza volcánica que pondría en peligro la navegación aérea. Actualmente, estos reportes son producidos para los volcanes Reventador y Sangay. Los principales receptores de los mismos son la Dirección General de Aviación Civil (DAC) y el Volcanic Ash Advisory Centre (VAAC,

*https://www.igepn.edu.ec/ccn-mapa-de-peligros

Washington). Estos reportes son también difundidos a través de los medios del IG-EPN previamente mencionados.

4. 'Informes Especiales' son generados cuando tiene lugar actividad volcánica extraordinaria, como por ejemplo, el inicio de una erupción, un drástico incremento en la actividad superficial, o la disminución o el cese de esta actividad.

En casos donde la actividad de uno de estos volcanes lo requiera, el IG-EPN convoca a conferencias de prensa, en las cuales la comunidad es informada de la situación. En estas ocasiones, la prensa frecuentemente accede a la sede del IG-EPN, en donde su portavoz ofrece entrevistas y explicaciones sobre el evento volcánico.

Estos reportes son publicados en la página web del IG-EPN[‡], y enviados a múltiples destinatarios (e.g. autoridades locales y regionales, Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, instituciones, comunidades y tomadores de decisiones), a la vez que son publicados en las redes sociales del IG-EPN (e.g. Facebook[§], Twitter[¶], YouTube^{||}).

5 Interacción con otras instituciones públicas

El IG-EPN es la entidad oficialmente designada para el monitoreo y la divulgación de la información sísmica y volcánica en el Ecuador. Interactúa directamente con diversas instituciones públicas como el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE), y el Servicio Integrado de Seguridad ECU 911. Adicionalmente, el IG-EPN brinda información a los gobiernos locales sobre las poblaciones que potencialmente podrían ser afectadas por actividad eruptiva.

Se ha desarrollado importante infraestructura en diversas áreas del país susceptibles al impacto de la actividad sísmica y volcánica. Por este motivo, el IG-EPN, a través de sus actividades, mantiene acuerdos de cooperación con varias instituciones públicas y privadas, las cuales son responsables de estas obras, para que se encuentren informadas y alertadas en detalle sobre los tipos de peligros que ellos podrían enfrentar. Un ejemplo de esta cooperación está representado por el acuerdo con el Parque Nacional Galápagos, a través del cual el Parque es provisto continuamente de la información sísmica y volcánica, así como también de una evaluación del peligro correspondiente, especialmente en caso de erupciones frecuentes, donde la información es ofrecida durante las crisis. De manera similar, se mantienen acuerdos con instituciones de los sectores eléctricos y petroleros.

[†]https://www.igepn.edu.ec/publicaciones-vulcanologia/
mapas-de-peligros

[‡]www.igepn.edu.ec

^{\$}https://www.facebook.com/IGEPNecuador

 $[\]P_{ ext{https://twitter.com/IGecuador}}$

https://www.youtube.com/user/institutogeofisico

6 Necesidades, desafíos y perspectivas futuras

En Ecuador, la evaluación del peligro a corto plazo, la cuál incluye actividades de monitoreo y mantenimiento periódico de los instrumentos, ocupa la mayor cantidad de recursos humanos y financieros del IG-EPN. Asegurar un funcionamiento correcto de la red de monitoreo—más de 500 sensores sísmicos y volcánicos distribuidos a lo largo y ancho de la nación—se ha vuelo la mayor prioridad, y el mayor desafío a lo largo de los años. Los datos de monitoreo son necesarios para garantizar información precisa y en tiempo real para las poblaciones que viven en zonas de riesgo. Sin embargo, los recursos son limitados, y esto se evidencia con mayor claridad durante las crisis, limitando la respuesta institucional.

Actualmente, se ha establecido una variedad de nuevas técnicas de monitoreo, basadas principalmente en sensores remotos. Estas nuevas técnicas requieren infraestructura y experticia, por lo que el entrenamiento técnico y la transferencia del conocimiento son necesarias. Estos desafíos podrían ser abordados a través de cooperación internacional, principalmente por proyectos asociativos que se enfoquen en resolver las necesidades locales y tomen en cuenta las diferentes realidades culturales. Finalmente, mejorando las vías de comunicación, simplificando la terminología, y fortaleciendo la presencia en las comunidades (como en el caso del OVT), podremos mejorar la relación y confianza entre los científicos y tomadores de decisiones con el fin de facilitar la toma de decisiones, especialmente durante las crisis.

AGRADECIMIENTOS

Estamos agradecidos por el mejoramiento instrumental que se ha logrado en colaboración con JICA, UNDRO, USAID-OFDA, VDAP/USGS, UNAVCO, NOVAC, BID, IRD-GEOAZUR; e instituciones gubernamentales ecuatorianas SENESCYT, SENPLADES, SNGR. Agradecemos a Eveling Espinoza, Rafael Orozco y Pablo Forte, de la ALVO, por sus interesantes revisiones y sugerencias en las etapas iniciales del manuscrito. A Oryaëlle Chevrel y a dos revisores anónimos se agradece por sus importantes comentarios.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Patricio Ramón, Silvia Vallejo, y Francisco Vásconez lideraron la escritura del manuscrito. Patricia Mothes, Daniel Andrade, Santiago Santamaria, Hugo Yepes y Silvana Hidalgo contribuyeron con información de los sistemas de monitoreo. Todos los autores revisaron e hicieron sugerencias para mejorar el manuscrito.

Presses universitaires de Strasbourg

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Todos los mapas de peligros volcánicos en Ecuador y los reportes de la actividad volcánica pueden descargarse desde la página web del Instituto Geofísico https://www.igepn.edu.ec/. Adicionalmente, las anomalías térmicas son regularmente consultadas en las páginas http://modis.higp.hawaii.edu/ y en http://www.mirovaweb.it/ y los datos de degasificación en https://so2.gsfc.nasa.gov/.

Derechos de Autor

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

REFERENCIAS

Allan, J. F. y T. Simkin (2000). "Fernandina Volcano's evolved, well-mixed basalts: Mineralogical and petrological constraints on the nature of the Galapagos plume". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105 (B3), págs. 6017-6041. DOI: 10.1029/1999jb900417.

Alvarado, A., M. Ruiz, P. Mothes, H. Yepes, M. Segovia, M. Vaca, C. Ramos, W. Enriquez, G. Ponce, P. Jarrin, J. Aguilar, W. Acero, S. Vaca, J. C. Singaucho, D. Pacheco y A. Córdova (2018). "Seismic, Volcanic, and Geodetic Networks in Ecuador: Building Capacity for Monitoring and Research". Seismological Research Letters 89 (2A), págs. 432-439. DOI: 10.1785/0220170229.

Armijos, M. T., J. Phillips, E. Wilkinson, J. Barclay, A. Hicks, P. Palacios, P. Mothes y J. Stone (2017). "Adapting to changes in volcanic behaviour: Formal and informal interactions for enhanced risk management at Tungurahua Volcano, Ecuador". Global Environmental Change 45, págs. 217-226. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2017.06.002.

Bourquin, J., P. Samaniego, P. Ramón, C. Bonadonna, K. Kelfoun, S. Vallejo, P. Hall, P. Mothes, J. Le Pennec y H. Yepes (2011). "Mapa de los Peligros Potenciales del Volcán Reventador (1: 50.000). firstédition". *Instituto Geofisico, Escuela Politécnica Nacional, Quito et IRD*.

Hall, M., P. Ramón, P. Mothes, J. L. LePennec, A. Garcia, P. Samaniego y H. Yepes (2004). "Volcanic eruptions with little warning: the case of Volcán Reventador's Surprise November 3, 2002 Eruption, Ecuador". Revista geológica de Chile 31 (2). DOI: 10.4067/s0716-02082004000200010.

- Instituto Nacional de Estadística y Censos (2010). Censo de Población y Vivienda. Statistical Database of the Instituto Nacional de Estadística y Censos. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/.
- ISDR Early Warning Conference III (2006). "Early Warning From concept to action. The Conclusions of the Third International Conference on Early Warning". 27-29 March 2006. Bonn, Germany. Cities on Volcanoes 10.
- Miller, C. D., D. R. Mullineaux y M. L. Hall (1978). Reconnaissance Map of Potential Volcanic Hazards from Cotopaxi Volcano, Ecuador: Mapa de Reconocimiento de Riesgos Volganicos Potenciales Del Volcan Cotopaxi, Ecuador. US Geological Survey.
- Mothes, P. A., M. C. Ruiz, E. G. Viracucha, P. A. Ramón, S. Hernández, S. Hidalgo, B. Bernard, E. H. Gaunt, P. Jarrin, M. A. Yépez y P. A. Espin (2017). "Geophysical Footprints of Cotopaxi's Unrest and Minor Eruptions in 2015: An Opportunity to Test Scientific and Community Preparedness". *Advances in Volcanology*. Springer International Publishing, págs. 241-270. DOI: 10.1007/11157_2017_10.
- Mothes, P. A., H. A. Yepes, M. L. Hall, P. A. Ramón, A. L. Steele y M. C. Ruiz (2015). "The scientific-community interface over the fifteen-year eruptive episode of Tungurahua Volcano, Ecuador". *Journal of Applied Volcanology* 4 (1). DOI: 10.1186/s13617-015-0025-y.
- Ordóñez, J., V. S, J. Bustillos, M. Hall, D. Andrade, S. Hidalgo y P. Samaniego (2013). "Volcán Sangay. Peligros Volcánicos Potenciales". *IG-EPN-IRD*, *Quito*.
- Ramón, P. (2010). "Análisis Retrospectivo de la Evaluación de la Amenaza, el Monitoreo Volcánico y la Comunicación durante las Erupciones del año 2006 del Volcán Tungurahua". Tesis de mtría. Université Nice, Sophia Antipolis.
- Ruiz, G., J. Le Pennec, M. Hall y P. Samaniego (2005). "Mapa de los Peligros Potenciales del Complejo volcánico Imbabura". *IG-EPN-IRD*, *Quito*.
- Samaniego, P., J. Le Pennec, D. Barba, M. Hall, C. Robin, P. Mothes, Y. H., L. Troncoso y D. Jaya (2008). "Ma-

- pa de los Peligros Potenciales del Complejo volcánico Imbabura". *IG-EPN-IRD*, *Quito*.
- Samaniego, P., M. Monzier, C. Robin, J.-P. Eissen, M. L. Hall, P. A. Mothes y H. Yepes (2002). "Mapa de los peligros potenciales del volcán Cayambe". *Instituto Geofisico*, *Quito*.
- Santamaria, S. y B. Bernard (2018). "Hierarchization of the volcanoes of continental and insular Ecuador based on their threat potential". Cities on Volcanoes 10.
- Stone, J., J. Barclay, P. Simmons, P. D. Cole, S. C. Loughlin, P. Ramón y P. Mothes (2014). "Risk reduction through community-based monitoring: the vigias of Tungurahua, Ecuador". *Journal of Applied Volcanology* 3 (1). DOI: 10.1186/s13617-014-0011-9.
- Telenchana, E., M. Cordova, P. Mothes, P. Espín, P. Samaniego, B. Bernard, V. Vallejo y A. Proano (2019).
 "The new potential volcanic hazard map of Guagua Pichincha Volcano, 2019". 8th International Symposium on Andean Geodynamics, Quito, 24-26 Septembre 2019.
- Tobin, G. A. y L. M. Whiteford (2002). "Economic ramifications of disaster: experiences of displaced persons on the slopes of Mount Tungurahua, Ecuador". *Papers and Proceedings of Applied Geography Conferences*. Vol. 25, págs. 316-324.
- United Nations (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. https://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf.
- Vásconez, F., P. Ramón, S. Hernandez, S. Hidalgo, B. Bernard, M. Ruiz, A. Alvarado, P. La Femina y G. Ruiz (2018). "The different characteristics of the recent eruptions of Fernandina and Sierra Negra volcanoes (Galápagos, Ecuador)". Volcanica 1 (2), págs. 127-133. doi: 10.30909/vol.01.02.127133.
- Vásconez, F., D. Sierra, M. Almeida, D. Andrade, J. Marrero, P. Mothes, B. Bernard y M. Encalada (2016). "Mapa Preliminar de Amenazas Potenciales del Volcán Cotopaxi – Zona Oriental". *IG-EPN-SNGR*, *Quito*.