

Volcanismo activo en Colombia y el rol del Servicio Geológico Colombiano

Diego Mauricio Gómez Martínez^{*α}, Cristian Mauricio López Vélez^β,
María Luisa Monsalve Bustamante^β, Adriana Agudelo Restrepo^γ,
Gloria Patricia Cortés Jiménez^β, Marta Lucía Calvache Velasco^δ

^α Servicio Geológico Colombiano – Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto, Colombia.

^β Servicio Geológico Colombiano – Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, Colombia.

^γ Servicio Geológico Colombiano – Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, Colombia.

^δ Servicio Geológico Colombiano – Dirección de Geoamenazas, Bogotá, Colombia.

RESUMEN

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) fue creado en 1916, y se ha dedicado a la investigación y monitoreo de los volcanes activos en el país desde el desastre resultante de la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985, donde más de 25000 personas murieron debido a la ocurrencia de lahares. Hoy en día, el SGC tiene tres Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos en las ciudades de Manizales (SGC-OVSM), Popayán (SGC-OVSPop) y Pasto (SGC-OVSP), desde donde se monitorean 23 volcanes activos. Los tres observatorios manejan una red instrumental de aproximadamente 740 estaciones (permanentes y portátiles), como también repetidoras de señal, y cubren las disciplinas de sismología, geodesia, geoquímica y campos de potencial, entre otras. La evaluación de la amenaza volcánica también es realizada por el SGC, produciendo mapas e informes. Estas tareas se complementan con programas para promover transferencia de conocimientos geocientíficos al público, desarrollados a través de diferentes estrategias. Aunque en este momento los datos derivados del monitoreo volcánico no están disponibles en línea, el SGC está analizando esta necesidad para su implementación en un futuro cercano.

This article is available in English at: <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.113139> [PDF EN].

1 INTRODUCCIÓN

Colombia está localizada en la esquina nor-occidental de América del Sur y está influenciada por la interacción de tres placas tectónicas: la Suramericana, Pacífica y del Caribe). Este contexto posibilita varios procesos geológicos, como la formación de cordilleras, terremotos y vulcanismo. Desde una perspectiva general, Colombia, como el resto de América del Sur, es parte del llamado "Anillo de Fuego del Pacífico" que se ubica alrededor del Océano Pacífico. Corresponde a una zona de interacción entre las placas tectónicas Pacífica, Juan de Fuca, de Nazca y de Cocos, con los límites de las placas Suramericana, del Caribe, Eurasiática, Filipina y Australiana [Monsalve y Mora 2005]. Como es bien sabido, este "cinturón" presenta intensa actividad sísmica y volcánica, reflejando un planeta vivo y dinámico.

1.1 El origen de la vulcanología en Colombia

El desastre asociado con la erupción del volcán Nevado del Ruiz del 13 de noviembre de 1985, que provocó la pérdida de unas 25.000 vidas colombianas en los departamentos de Tolima y Caldas (norte de Colombia), tuvo un gran impacto no solo en el país, sino a nivel

mundial. Indujo cambios importantes que incluyeron la asignación del Servicio Geológico Colombiano (SGC), en ese momento llamado INGEOMINAS, como la máxima autoridad en el "estudio y prevención de todo tipo de riesgos geológicos" (Decreto 3815 de 1985), seguido por la expedición de la resolución número 057 del 5 de febrero de 1986 del INGEOMINAS. Esta resolución creó oficialmente el Observatorio Vulcanológico y Sismológico (OVS) de Colombia, en Manizales. El desastre del Nevado del Ruiz también motivó el diseño y estructuración de un sistema nacional de gestión del riesgo de desastres en el país, el cual ha mejorado con los años. En este contexto, el SGC, creado en 1916, ha dedicado más de 34 años a la investigación y monitoreo de los volcanes activos en Colombia. A lo largo de este tiempo, el SGC, a través de sus Direcciones de Geoamenazas, Geociencias Básicas y Laboratorios, ha establecido y fortalecido un grupo de profesionales especializados en diferentes campos de la vulcanología, que incluyen geología y estratigrafía volcánica, evaluación de peligros volcánicos y monitoreo de volcanes. Para propósitos de monitoreo, el SGC utiliza redes con los equipos más avanzados tecnológicamente y estaciones que permiten observaciones multiparamétricas. Esto significa que desde una sola estación se puede monitorear la sismicidad, la deformación del suelo, los gases y la temperatura, entre otros, utilizando técnicas geofísicas,

*Autor de correspondencia: dgomez@sgc.gov.co

geodésicas y geoquímicas (Tabla 1).

La actividad volcánica en Colombia ocurre en tres regiones principales: sur, centro y norte. Estas regiones albergan 23 volcanes activos (Figura 1), con millones de colombianos viviendo dentro de los primeros 100 km alrededor de al menos un centro volcánico (Tabla 2). Estos volcanes son monitoreados por el SGC a través de sus tres observatorios: el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (SGC-OVSP), Popayán (SGC-OVSPop) y Manizales (SGC-OVSM).

Como se mencionó, en 1986 se creó el OVS de Colombia, con el propósito de monitorear el volcán Nevado del Ruiz y para futuros estudios de otros volcanes en el país. En 1989, la reactivación del volcán Galeras obligó a iniciar trabajos similares en Pasto, culminando con la creación de un observatorio vulcanológico permanente en esta ciudad. En 1993, con base en las experiencias adquiridas durante el monitoreo de los volcanes Nevado del Ruiz y Galeras, se elaboró un plan para monitorear los volcanes colombianos en reposo, que permita la detección de señales de cambios en su actividad. De esta forma se creó el OVS en la ciudad de Popayán, sin que se presentase una crisis volcánica. Sin embargo, el monitoreo de volcanes en esta región se inició realmente a fines de 1986, con la instalación temporal de un sismógrafo cerca del sector conocido como Verdum, en el volcán Nevado del Huila ([Méndez 1989].

1.2 Los volcanes activos del territorio nacional

Si bien todos los volcanes colombianos tienen sus propias características, condiciones, relevancia y desafíos para la gestión de riesgos, debido a su historia y/o potencial de peligrosidad futura [Espinosa 2011], los siguientes aspectos caben ser resaltados. En la parte norte de Colombia, el volcán Nevado del Ruiz es monitoreado activamente para mitigar el impacto de los lahares (con volúmenes estimados entre 50 y 100 millones de m³) y los procesos que pueden desencadenar (variación en las velocidades de transporte, desestabilización de las pendientes, impactos por golpe, enterramiento, áreas de inundación, etc.) [Pierson et al. 1990]. Además, el Nevado del Ruiz entró en una nueva fase de reactivación en el 2010, mostrando sismicidad, deformación, emisiones de gas y cenizas, y crecimiento de un domo de lava en el cráter Arenas, observado por primera vez en agosto de 2015. El Volcán Cerro Machín, que tiene el potencial eruptivo para afectar el área más poblada del país, es considerado uno de los volcanes más explosivos y peligrosos de Colombia, ya que ha producido devastadoras erupciones explosivas en el pasado y probablemente las volverá a repetir en el futuro. Se han encontrado depósitos de flujos piroclásticos y depósitos de flujos de lodo volcánicos (lahares) a distancias de hasta 40 km y 109 km del volcán, a lo largo de los ríos Coello y Magdalena, respectivamente. La erupción más reciente del volcán Cerro Machín se registró hace aproximadamente 800 años [INGEOMINAS 2003; Cortés Jí-

menez et al. 2006; Gómez Tapias et al. 2016; Piedrahita et al. 2018].

En la región central de Colombia se destacan dos volcanes: el Puracé, por considerarse muy activo, con un largo historial de erupciones en tiempos históricos [Monsalve et al. 2014], y el Nevado del Huila, porque representa un ejemplo de gestión exitosa de riesgos que involucra a comunidades e instituciones indígenas. El 6 de junio de 1994 ocurrió un terremoto tectónico de magnitud 6.4, a 10 km al SW de la cima del Nevado del Huila, generando unos 3000 deslizamientos de tierra que, posteriormente, provocaron avalanchas en los ríos Páez y Símbola, las cuales dejaron cerca de 1100 muertos. Posteriormente, el volcán se reactivó produciendo dos eventos freáticos entre 2007 y 2008, una erupción freatomagmática en 2008 y el emplazamiento de un domo de lava (con pulsos de extrusión en 2009 y 2010). Esta actividad generó lahares que fluyeron por los ríos Páez y Símbola, cambios superficiales en el edificio volcánico (aparición de grietas y un cráter) y pérdida en el casquete glaciar [INGEOMINAS 2008; Monsalve et al. 2011; Pulgarín et al. 2015]. En 2008, el volcán generó un inmenso lahar, considerado uno de los lahares históricos más grandes del mundo (estimado en 400 millones de m³). Debido a la coordinación rápida y eficiente, y la comunicación e interacción entre instituciones y comunidades, solo se registraron 10 muertes y estas fueron resultado directo del incumplimiento de las órdenes de evacuación. Esta crisis volcánica fue gestionada por el SGC-OVSPop [Monsalve et al. 2011; Pulgarín et al. 2015].

En la región sur de Colombia destacan los volcanes Galeras, Azufral, Chiles y Cerro Negro. Galeras es considerado, al menos en tiempos históricos, como uno de los volcanes más activos de Colombia, con el potencial de afectar a siete municipios con cerca de 500000 habitantes y cabeceras municipales ubicadas a distancias menores de 12 km de su cono activo. Durante su período de actividad más reciente (1989–2010), se registraron al menos 22 erupciones explosivas [Servicio Geológico Colombiano 2015]. El volcán Azufral, ubicado a unos 12 km al oeste de la ciudad de Túquerres, es el único volcán activo en Colombia que tiene un lago cratérico verde. Es considerado, junto con el volcán Cerro Machín, como uno de los volcanes más peligrosos del país, con un registro de procesos eruptivos entre aproximadamente 17800 años y 780 años antes del presente [Calvache et al. 2003]. Chiles y Cerro Negro son dos volcanes activos que se comparten territorialmente con Ecuador. Aunque hay alguna evidencia de actividad fumarólica, no hay registros de erupciones en tiempos históricos (últimos 500 años). Desde finales de 2013, se ha registrado un aumento significativo en la actividad sísmica en el área cercana a estos volcanes, principalmente relacionada con fractura de material de la corteza; a septiembre de 2020 ocurrieron alrededor de 780000 sismos (tipo VT), con varios eventos con magnitudes locales máximas entre 3.5 y 5.6 claramente senti-

Tabla 1: Diferentes técnicas e instrumentos usados por los Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos de Pasto, Popayán y Manizales del Servicio Geológico Colombiano (SGC-OVS) para monitoreo de los volcanes activos colombianos. Para los sismómetros, BB significa Banda Ancha, y SP Corto Período. Para EDM (Medición Electrónica de Distancias), BAS significa Base y PRIS, Prismas.

SGC-OVS estaciones telemétricas de monitoreo									
Observatorio	Volcán	Repetidoras	Sismómetros	Sensor Acústico	GPS	DOAS	CO ₂	Inclinómetros	EDM
SGC-OVSP	Chiles – Cerro Negro	6	7 BB	1	1			3	
	Cumbal	1	2 BB + 2 SP	1				4	
	Azufral	4	4 BB + 1 SP		4			2	4 BAS + 12 PRIS
	Galeras	8	14 BB + 3 SP	6	11	3	1	8	3 BAS + 7 PRIS
SGC-OVSPop	Doña Juana – Las Ánimas	4	4 BB + 1 SP		2			4	
	Nevado del Huila	2	6 BB + 1 SP	1	1			1	
	Puracé	6	9 BB + 3 SP	1	11	2	5	5	2BAS + 11 PRIS
	Sotará	2	7 BB + 2 SP		5			3	2 BAS + 9 PRIS
	Sucubun		1 BB						
	Nevado del Ruiz	8	11 BB + 4 SP	8	10	5	1	11	3 BAS + 18 PRIS
	Machin	5	5 BB + 8 SP		5			5	8 BAS + PRIS
SGC-OVSM	Nevado del Tolima		3 BB		2			2	
	Cerro Bravo	2	1 BB + 4 SP		1			1	2 BAS + 2 PRIS
	Paramillo de Santa Rosa		2 BB + 2 SP		3				
	Santa Isabel		2 BB + 1 SP		2			2	
	Romeral		1 SP						
	Cerro España		1 BB		1				
	Paramillo del Quindío		1 BB		1				
San Diego		1 BB							
Escondido		1 BB							

SGC-OVS estaciones telemétricas de monitoreo								
Observatorio	Volcán	Cámaras	Estación Meteorol.	Campo Eléctrico	Campo Magnético	Flujo Lodos	Termocuplas	Radón
SGC-OVSP	Chiles – Cerro Negro	1			1		1	
	Cumbal	3						
	Azufral	1	1	1	1		1	
	Galeras	3		2	3	2	2	3
SGC-OVSPop	Doña Juana – Las Ánimas							
	Nevado del Huila	4			1	2		
	Puracé	4	3	2	2		1	3
	Sotará	2						
	Sucubun	1						
	Nevado del Ruiz	9	3		2	6		4
SGC-OVSM	Machin	1			1		1	2
	Nevado del Tolima							
	Cerro Bravo				1			
	Paramillo de Santa Rosa							
	Santa Isabel							
	Romeral							
	Cerro España	1						
Paramillo del Quindío								
San Diego								
Escondido								

Tabla 2: Ciudades y poblaciones expuestas a amenazas volcánicas de algunos de los volcanes activos colombianos relevantes. La información de población está basada en el censo del 2018, elaborado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) y disponible a través del enlace <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-2018>.

Observatorio	Volcán	Mapa de Amenazas	Monitoreado	Municipios	Departamentos	Población Urbana*	Población Rural	Población Total
	Chiles	×	×	47	2	517144	497565	1014709‡
	Cerro Negro	×	×	46	2	528093	493761	1021854‡
SGC-OVSP	Complejo Volcánico Cumbal	×	×	9	1	12884	65608	78492§
	Azufral	×	×	56	2	540768	548555	1089323‡
	Galeras	×	×	50	3	450320	408242	858562§
	Doña Juana		×	15	3	19209	56737	75946
	Las Ánimas		×	11	3	11473	33802	45275
	Nevado del Huila	×	×	42	4	310766	531006	841772
SGC-OVSPop	Puracé	×	×	17	2	304885	163902	468787
	Sotará	×	×	16	3	27930	123484	151414
	Sucubún		×	8	2	0	31040	31040
	Nevado del Ruíz	×	×	64	7	1628336	411665	2040001
	Cerro Bravo	×	×	19	2	372292	39400	411692
	Cerro Machín	×	×	33	4	607133	126142	733275
SGC-OVSM	El Escondido		×	7	2	20514	25062	45576
	Nevado del Tolima	×	×	19	5	26843	38059	64902
	Nevado Santa Isabel	×	×	23	5	4168	41726	45894
	Romeral		×	10	2	58760	31595	90355
	Paramillo de Santa Rosa		×	14	4	58892	49576	108468
	Paramillo del Cisne		×	12	4	1370	29956	31326
	Paramillo del Quindío		×	9	4	0	36856	36856
	San Diego		×	8	2	4001	18923	22924
	Complejo Volcánico Cerro España		×	11	4	0	35559	35559
	Todos los volcanes vigilados†		×	228	12	3458588	2021019	5479607

* Población urbana en cabeceras municipales.

† Los números dados para todos los volcanes monitoreados no son la suma de los datos por volcán, porque hay traslapo de áreas de influencia para varios volcanes.

‡ Cálculos para VEI 4, como escenario máximo esperado.

§ Cálculos para VEI 3, como escenario máximo esperado.

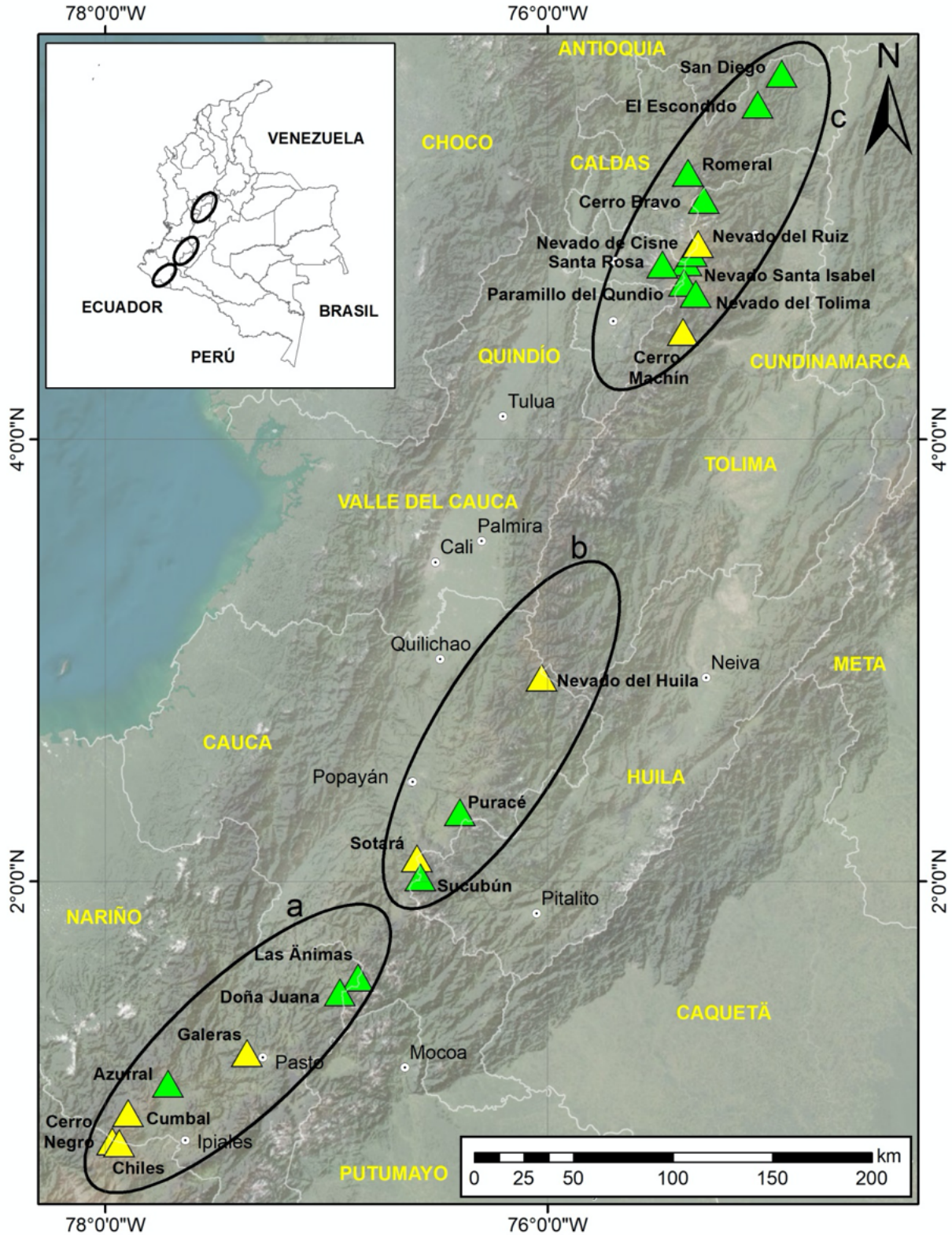


Figura 1: Los volcanes activos del territorio colombiano se dividen en tres segmentos geográficos al Sur (a), Centro (b) y Norte (c) y son monitoreados por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (SGC-OVSP), Popayán (SGC-OVSPop) y Manizales (SGC-OVSM), respectivamente. Los triángulos codificados por colores brindan información sobre los niveles actuales de actividad volcánica: amarillo significa nivel de actividad III, mientras que verde significa nivel de actividad IV. Las provincias principales están señaladas con elipses negras y las ciudades principales también se muestran con un pequeño punto blanco.

dos en la región. Esta situación llevó, en 2014, a la firma de un convenio marco de cooperación por un período de diez años, entre el Director del SGC y el Rector de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), a la que pertenece el Instituto Geofísico (IGEPN). Este convenio cubre diversas actividades de interés común para las dos instituciones, incluyendo la investigación, el seguimiento y la evaluación de la amenaza volcánica. Este acuerdo ha facilitado las actividades de monitoreo conjunto en estos volcanes activos en la frontera.

Existen aproximadamente 5.5 millones de personas expuestas a las amenazas volcánicas de algunos de los principales volcanes activos colombianos (Tabla 2). Para esta aproximación, se compara la información de los mapas de amenaza, en términos del área que puede ser cubierta por los depósitos de caída de ceniza, con los límites territoriales y los datos oficiales censales. La información de salida se puede organizar en función de las áreas rurales, urbanas o totales expuestas a zonas de amenaza alta, media o baja.

2 ¿COMO MONITOREAMOS ESTOS VOLCANES?

Actualmente, los SGC-OVS mantienen una red instrumental multiparamétrica utilizada para monitoreo e investigación, que integra disciplinas como la geofísica, geoquímica, geodesia y vulcanología (Tabla 1). Estas áreas emplean tecnologías de última generación que permiten la adquisición de datos (sísmicos, GNSS, inclinómetros, gases, cámaras, etc.) utilizados para diagnosticar y asignar el nivel de actividad a cada estructura volcánica monitoreada. Los observatorios también participan en el pronóstico de erupciones y proporcionando información basada en el conocimiento de los volcanes activos y sus peligros asociados, que los tomadores de decisiones pueden utilizar para la planificación del uso del suelo. Hoy en día se monitorean 23 volcanes potencialmente activos, y a diciembre de 2019, la red de monitoreo incluye sismología, geodesia, geoquímica, campo potencial (métodos magnéticos y eléctricos) y cámaras web, con un total de 741 estaciones en el país (Tabla 1). De estas, 397 son estaciones permanentes (transmiten datos por telemetría) y 344 son portátiles (los datos se recolectan durante el trabajo de campo). Las estaciones permanentes o telemétricas transmiten datos, a diferentes velocidades de muestreo (que varían de 4 a 100 Hz), en tiempo real a los observatorios, donde se recopilan, procesan y almacenan en servidores de alta capacidad. Los SGC-OVS operan de manera continua, con personal técnico y profesional especializado (Tabla 3) trabajando en turnos las 24 horas del día, los 365 días del año, y con el apoyo de estudiantes de pregrado que provienen de los departamentos de Geología, Ciencias Básicas, Geografía, Química e Ingeniería de las universidades regionales de Manizales, Popayán y Pasto.

Con la expansión de las redes de monitoreo, también

aumenta la necesidad de mantener su operación. Por ello, es importante contar con un equipo altamente calificado y con recursos económicos para mantener operativos el 100% de los elementos de la red de monitoreo.

Para adquirir y procesar la información de monitoreo volcánico, los SGC-OVS utilizan diferentes herramientas dependiendo del área de monitoreo. La adquisición de datos sísmicos se realiza mediante software específico, dependiendo de los tipos de digitalizadores instalados, como Scream^{*}, Slink2ew[†], y Reftek[‡]. Para concentrar, distribuir y almacenar la información adquirida en formatos estándar, utilizamos el software Earthworm[§] y seiscomp3[¶]. El procesamiento primario de datos sísmicos, incluida la clasificación de sismos, lectura de parámetros básicos, ubicación y cálculo de la magnitud local, se lleva a cabo utilizando las herramientas Provig y Lakiy, que fueron desarrolladas por el personal de nuestros observatorios. La aplicación Provig se usa para realizar el procesamiento manual de datos y Lakiy (en desarrollo) se usa para realizar el procesamiento automático de datos con el fin de obtener información procesada en tiempo casi real. El procesamiento secundario se realiza a través de scripts desarrollados por el personal técnico, utilizando tanto software gratuito como comercial.

Para monitorear la deformación en superficie se utilizan instrumentos de detección de deformación del suelo, incluyendo el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y los inclinómetros electrónicos. La adquisición de datos de GPS se realiza mediante el software Trimble 4D^{||}, mientras que el GAMIT^{**} se utiliza para el procesamiento de los mismos. Los datos de inclinometría electrónica se adquieren mediante el software Advanced TCP IP Data Logger^{††}, y luego se procesan utilizando scripts desarrollados por personal técnico dedicado a los procesos de deformación y se visualizan utilizando la aplicación GEODATA, también desarrollada por nuestro personal.

Para el monitoreo geoquímico, utilizamos instrumentos de telemetría para la medición de SO₂, CO₂, radón y temperatura. La medición de los datos de SO₂ se realiza con los instrumentos NOVAC ScanDOAS y MobileDOAS [Garzón et al. 2008; 2013]. Para la adquisición de datos de CO₂, radón y termocupla, utilizamos el software de registro de datos IP TCP avanzado y otro programa de software diseñado por nuestros ingenieros.

El monitoreo electromagnético (EM) se realiza me-

*<https://www.guralp.com/sw/scream>

†http://www.earthwormcentral.org/documentation4/ovr/slink2ew_ovr.html

‡<https://www.reftek.com/ref-tek-protocol-daemon-rtpd/>

§<http://www.isti.com/products/eq-monitoring-seismic-software/earthworm/>

¶<https://www.seiscomp3.org/doc/jakarta/current/index.html>

||<https://www.trimble.com/Monitoring-Solutions/Trimble-4D-Control.aspx>

**<http://geoweb.mit.edu/gg/>

††<https://www.aggsoft.com/tcpip-data-logger.htm>

Tabla 3: Distribución del personal por áreas temáticas, para los tres Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos (OVS) encargados de la investigación y monitoreo de los volcanes activos colombianos.

Institución	Coordinador	Sismología	Deformación	Geoquímica	Geología	Campos Potenciales	
SGC-OVSP	1	3	2	1	1	2	
SGC-OVSPop	1	8	1	1	3	0	
SGC-OVSM	1	5	2	3	5	1	

Institución	Electrónica	Tecnologías Información	SIG	Modelamiento Amenazas	Soporte campo	Soporte Administrativo	Total
SGC-OVSP	3	2	1	2	3	5	26
SGC-OVSPop	3	3	0	1	4	3	27
SGC-OVSM	2	3		2	8	5	37

diente una red de sensores de campo eléctrico y magnético. El campo eléctrico se mide en las direcciones N–S y E–W. La dirección N–S va aproximadamente perpendicular a las curvas de nivel topográfico y en la dirección de la inclinación de las paredes del cono en el punto de la estación EM, mientras que la dirección E–W se ubica más o menos paralela a las curvas de nivel. Los electrodos utilizados son de sulfato de cobre no polarizables. La separación de electrodos para cada componente es de 100 m. Además del campo eléctrico, se registran los tres componentes del campo magnético (N–S, E–W y vertical), utilizando un magnetómetro Fluxgate FL3-100 (tipo SENSYS), con una sensibilidad de 0.1 nanoT. Los datos de los dos canales eléctricos y los tres canales magnéticos se digitalizan con un digitalizador Guralp de 24 bits con 50 muestras por segundo para cada canal y se transmiten automáticamente al observatorio encargado. Los datos se adquieren a través del software Scream y Reftek, son almacenados y luego procesados mediante scripts escritos por el personal del observatorio.

Contamos, además, con un software desarrollado en el SGC-OVS que facilita a los técnicos encargados de la vigilancia volcánica la consulta, trazado y análisis de toda la información adquirida. Actualmente, estos programas solo están disponibles para los usuarios de los SGC-OVS. El procesamiento de datos sísmicos se realiza en línea, de forma manual y automática. Debido a su naturaleza y tasas de adquisición, los datos de deformación, geoquímicos y electromagnéticos se procesan en lotes a diferentes intervalos, que varían de horas a días.

En cuanto a los sistemas de almacenamiento, en los SGC-OVS, los datos de monitoreo volcánico relacionados con todas las áreas de vigilancia se almacenan de forma continua, mediante el uso de diferentes estructuras tecnológicas. Se accede a la información actual de forma inmediata y regular, usando el mismo equipo asociado con el sistema de adquisición. En la actualidad, existe un promedio diario aproximado de 25 GB de datos, distribuidos en archivos binarios y estructurados en motores de base de datos, los cuales se almacenan en servidores de alta capacidad, con respaldo periódico de manera local y remota en la sede central del

SGC. Al momento, los datos relacionados con el monitoreo volcánico pueden ser utilizados por el personal de OVS y no están completamente disponibles para los usuarios externos, especialmente los datos recopilados y procesados con herramientas internas aún en desarrollo. El tema de la disponibilidad pública de datos se está analizando dentro del SGC y prevemos que, en el futuro, gran parte de la información de monitoreo primaria puede estar disponible en línea.

3 GESTIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA

En Colombia, de acuerdo con la ley nacional 1523 de 2012, la amenaza se define como “el peligro latente de que un evento físico de origen natural [en este caso, volcánico] [...] ocurra con la gravedad suficiente para causar la muerte, lesiones u otros impactos en la salud, así como daños y pérdidas a la propiedad, infraestructura, medios de vida, prestación de servicios y recursos ambientales” [Congreso de la República 2012].

El SGC ha establecido un procedimiento metodológico (Figura 2) para evaluar la amenaza volcánica en Colombia [Monsalve 2000]. Comienza con una investigación detallada y caracterización geológica del volcán en estudio, que incluye trabajo de campo y laboratorio, y culmina con un mapa geológico del volcán. Estas actividades de campo involucran la identificación, caracterización, mapeo, correlación estratigráfica y muestreo de los depósitos volcánicos. Las muestras se envían al laboratorio para análisis granulométrico, clasificación de componentes, petrografía, geoquímica, geoquímica isotópica y datación. El proceso continúa con el análisis de la actividad eruptiva histórica, si esa información está disponible. Finalmente, toda esta información—combinada con los resultados del modelado y la simulación computacional de posibles fenómenos volcánicos—conduce a un mapa de zonificación de peligro volcánico [Cepeda 2009]. Es importante mencionar que no se ha establecido un estándar internacional para la representación gráfica de mapas de amenaza volcánica [Monsalve 2000; Calder et al. 2015]. En Colombia, los formatos de los mapas de amenazas son el resultado de discusiones técnicas de un grupo de trabajo especializado del SGC. El objetivo es que estos

mapas sean comprensibles para las autoridades y la comunidad en general, basándose en conocimientos geológicos así como en metodologías y herramientas analíticas de uso internacional.

Los mapas de amenaza especifican áreas que pueden verse afectadas por diferentes fenómenos volcánicos, basados en simulaciones computacionales de fenómenos volcánicos que ya han sucedido. Para la simulación numérica de los posibles fenómenos volcánicos se utilizan diferentes tipos de herramientas como: TITAN2D [Patra et al. 2005], FLOW2D [Sheridan y Macías 1992] and FLOW3D [Kover 1995; Sheridan y Kover 1996], LAHARZ [Schilling 1998; 2014], TEPHRA2 [Bonadonna et al. 2005], ASH-3D [Schwaiger et al. 2012], EJECT! [Mastin 2001], LAVA PL y LAVA C [Connor et al. 2012; Richardson y Connor 2014]. Para los análisis, se asume que posibles erupciones futuras pueden ser similares a las de la historia eruptiva del volcán, y que el centro de actividad eruptiva será el cráter o cráteres actuales. Generalmente, los mapas de amenaza volcánica del SGC tienen tres zonas designadas como amenaza alta, media y baja. Los contactos entre las diferentes zonas son transitorios, representados con líneas discontinuas, y de ninguna manera implican límites absolutos. Esta zonificación se basa en el daño potencial causado por los fenómenos volcánicos, considerando la posibilidad de que un área determinada pueda verse afectada simultáneamente por uno o más de estos fenómenos. Los fenómenos que representan un impacto de alta severidad, como las corrientes de densidad piroclástica, los lahares y los flujos de lava, se clasifican como *amenaza volcánica alta*. Las caídas piroclásticas y las ondas de choque pueden clasificarse de *alta a baja amenaza*, según la distancia al cráter, y sus parámetros físicos, como el espesor, el tamaño, la presión y la dirección de dispersión.

Como se mencionó previamente, las crisis sísmicas en los volcanes Chiles–Cerro Negro a finales del 2013, además del proceso de monitoreo conjunto, llevaron al SGC y al IGEPN a trabajar mancomunadamente para producir los mapas de amenaza volcánica para estos volcanes, bajo el convenio marco de cooperación firmado en 2014. Esto se realizó a través de reuniones científicas que tuvieron lugar tanto en Quito (Ecuador) como en Ipiales y Pasto (Colombia). Posteriormente, dichos mapas fueron adaptados por el SGC e IGEPN a los respectivos estándares, simbolismos y términos nacionales, y socializados con sus respectivas autoridades y comunidades en el 2014.

Los mapas oficiales de amenaza volcánica se encuentran publicados en el sitio web institucional*. Como ejemplo, para el volcán Galeras, el mapa en formato pdf y su documento explicativo puede ser descargado en la web†. Los usuarios también pueden solicitar la infor-

mación a través del buscador institucional‡, o pueden realizar solicitudes específicas con más detalles técnicos al siguiente correo electrónico institucional: cliente@sgc.gov.co.

4 DIFUSIÓN Y ALCANCE DE LA INFORMACIÓN

El Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) en Colombia fue actualizado mediante la ley 1523 de 2012 y se basa en tres principios, todos ellos interrelacionados, aunque pueden llevarse a cabo de forma independiente: conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y gestión de desastres. Fundamentalmente, esta ley considera que la gestión del riesgo de desastres “es un proceso social para la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, normativas, instrumentos, medidas y acciones permanentes de conocimiento y reducción de riesgos y para gestión de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida y el desarrollo sostenible de las personas”. La ley también establece que “la gestión del riesgo es responsabilidad de todas las autoridades y habitantes del territorio colombiano”.

En este contexto y en el marco del SNGRD, el SGC es responsable de asesorar y producir investigaciones, estudios, documentos, informes, mapas, etc., enfocados en mejorar el conocimiento de procesos geológicos y amenazas (sísmicas, volcánicas y movimientos de masas, entre otros). El objetivo con estos productos es que se entiendan y utilicen como insumo para la evaluación de riesgos, la toma de decisiones, la planificación del uso del suelo y—principalmente—para contribuir a la reducción y mitigación del riesgo de desastres. Para el caso de la actividad volcánica, el SGC brinda dos herramientas fundamentales a las autoridades, instituciones, tomadores de decisiones y comunidades: los mapas de amenaza volcánica descritos anteriormente, y los niveles de actividad volcánica, que son el resultado de la integración y evaluación de todos los datos multiparamétricos de monitoreo continuo recolectados por los SGC-OVS para los volcanes activos del país. Los niveles de actividad volcánica (Figura 3) fueron propuestos por el SGC en 2004 a las autoridades de gestión del riesgo de desastres del Departamento de Nariño, luego de las erupciones del volcán Galeras, pero ahora han sido adoptados para todos los volcanes activos en Colombia. Los niveles de actividad tienen 4 estados que van desde el nivel IV o verde, que significa volcán activo con comportamiento estable, hasta el nivel I o rojo, que corresponde a una erupción inminente o en curso. Como se mencionó, el nivel de actividad se establece con la evaluación de los diferentes parámetros de monitoreo para un volcán instrumentado dado y la valoración realizada por el grupo de expertos en los Observatorios Volcanológicos. La descripción y los detalles del signifi-

*<https://www.sgc.gov.co/volcanes/index.html>

†<https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/Paginas/Mapa-de-amenaza.aspx>

‡<https://miig.sgc.gov.co/Paginas/advanced.aspx>

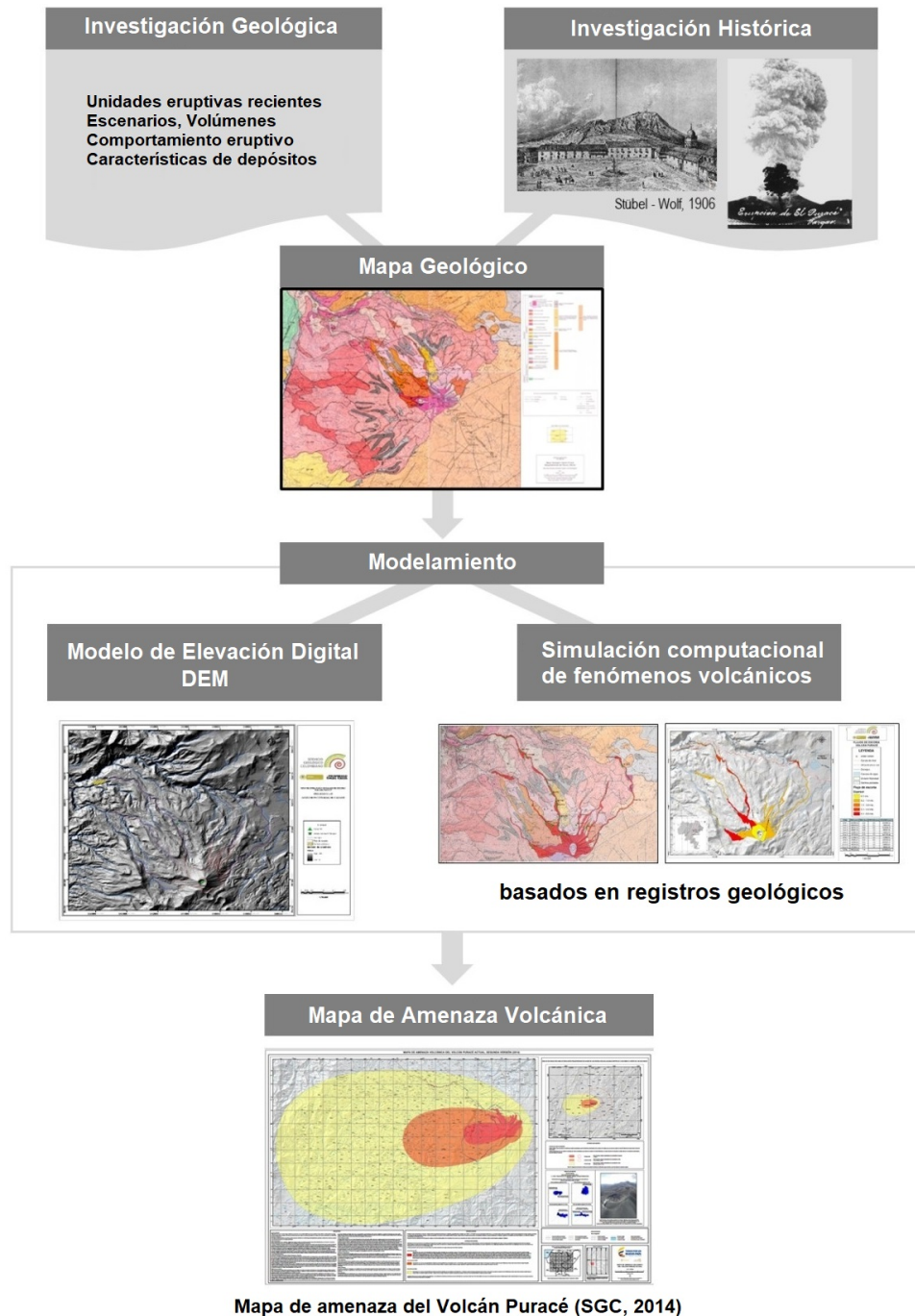


Figura 2: Descripción gráfica de la metodología utilizada por el SGC para la evaluación de la amenaza volcánica en Colombia [Modificado de Servicio Geológico Colombiano 2015].

do de estos Niveles de Actividad Volcánica se explican en línea*. Con base en los mapas de amenaza volcánica y los niveles de actividad, las autoridades locales de gestión de riesgos que residen cerca de los volcanes activos en Colombia, consultan con sus comunidades, y luego diseñan y coordinan planes de contingencia y estrategias de respuesta. Estos incluyen niveles de alerta, y dentro de ellos, las acciones que deben seguir las co-

munidades durante las reactivaciones volcánicas, como son los órdenes de evacuación para quienes habitan en áreas donde pueden ocurrir fenómenos como corrientes de densidad piroclástica.

Durante más de 34 años de investigación y vigilancia volcánica ininterrumpida, se han enfrentado un número significativo de crisis que, basadas en una institucionalidad fortalecida y la dependencia de redes instrumentales de vanguardia, han permitido respuestas exitosas. Los beneficios para el país incluyen no solo salvar

*<https://www2.sgc.gov.co/Paginas/niveles-actividad-volcanes.aspx>



Figura 3: Los niveles de actividad volcánica establecidos por el SGC para los volcanes activos colombianos que cuentan con sistemas de monitoreo instrumental.

vidas humanas, sino también proteger los recursos culturales y económicos. Entre estas crisis se encuentran las de los volcanes Galeras, Chiles, Cerro Negro, Cerro Machín, Puracé, Sotará, Nevado del Huila y Nevado del Ruiz, algunas de las cuales se encuentran en curso.

4.1 Estrategias para Apropiación Social del Conocimiento Geocientífico en el tema volcánico

El personal del SGC está convencido de que todo el trabajo institucional debe divulgarse y transmitirse de la mejor manera a nuestros usuarios. El conocimiento proporcionado debe entenderse y utilizarse de manera adecuada. También se reconoce la importancia de los conocimientos y creencias tradicionales de las comunidades y su incorporación en los análisis de riesgos. Todas estas actividades se utilizan en el marco de las estrategias de Apropiación Social del Conocimiento Geocientífico (ASCG) [Narváez Zuñiga et al. 2015; Cortés Jiménez 2016]. En el marco de la gestión del riesgo volcánico, el SGC y sus observatorios vienen implementando una serie de actividades o estrategias que, por su complejidad y detalle, se presentan brevemente en este documento, destacando las siguientes:

- Redes sociales, que se utilizan para comunicaciones masivas, incluyendo el sitio web de SGC (www.sgc.gov.co), Facebook (@sgcolombiano), Twitter (@sgcol) y YouTube (ServicioGeologicoC).
- Bienales Nacionales de Niños, Niñas y Jóvenes que viven en zonas de riesgo volcánico (2011, 2013,

2015, 2018 y 2020), que es una importante actividad inspirada en educación y comunicación. En febrero de 2020 se realizó la quinta bienal en el área de influencia del volcán Nevado del Ruiz y en el parque memorial Omaira Sánchez [Gómez 2015; Cortés Jiménez y Castaño 2016; López et al. 2018].

- Observatorios abiertos, itinerantes o móviles, visitas guiadas, convenios con instituciones nacionales o internacionales, que son actividades estratégicas encaminadas a fortalecer el posicionamiento institucional en los territorios.
- Numerosos programas de cooperación con comunidades, incluyendo talleres, caminatas pedagógicas a los volcanes, guías, proyectos específicos con instituciones educativas, entre otros [Agudelo et al. 2012; Driedger et al. 2020].

Desastres recientes como el de Guatemala, después de la erupción del volcán de Fuego del 3 de junio de 2018, alientan a todos los involucrados en la gestión del riesgo de desastres, incluidas las autoridades y comunidades, a repensar la importancia de comprender las amenazas volcánicas y las incertidumbres relacionadas. Los desastres también nos desafían a fortalecer el conocimiento y la reducción de riesgos, con el fin de tener comunidades e instituciones mucho mejor preparadas para enfrentar este tipo de fenómenos naturales. Esto está de acuerdo con una premisa fundamental: “comprender el riesgo es reducirlo”, declarada como parte de un proyecto desarrollado en Galeras por el Programa de Preparación para Desastres del Departamento

de Ayuda Humanitaria de la Comisión Europea [DIPECHO 2007]. La idea detrás de esta frase es aprender de semejante tragedia la importancia de saber tomar mejores decisiones y entender que, aunque los volcanes siempre generarán erupciones pequeñas o grandes, estas no deberían causar en todos los casos desastres. El potencial de desastre depende de nuestro conocimiento de los fenómenos y de nuestras acciones encaminadas a mitigar su impacto. Si todos, comunidades e instituciones, trabajamos continuamente en la gestión de riesgos, ayudaría a no volver a tener desastres tan desafortunados como los que ha experimentado Guatemala recientemente o aquellos que experimentó Colombia en 1985, luego de la erupción del Volcán Nevado del Ruíz.

5 NECESIDADES, RETOS, Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Aunque Colombia—desde sus inicios formales en el estudio, investigación y seguimiento de la actividad volcánica—ha sido utilizada como modelo regional a seguir, hay un número significativo de necesidades relacionadas con el crecimiento logrado en 34 años de estudio ininterrumpido, en el aumento del número de volcanes activos monitoreados (de 1 en 1985 a 23 en 2020), y las correspondientes redes de monitoreo, sistemas de adquisición, etc. Algunas de estas necesidades son: mantener el funcionamiento continuo de la extensa red de investigación y monitoreo volcánico; fortalecer y complementar las redes de monitoreo actuales; implementar instrumentación en nuevas estructuras volcánicas activas, principalmente donde existe una comunidad bajo algún grado de riesgo; mantener el personal científico capacitado para trabajar continuamente en la comprensión de los procesos que impulsan la actividad volcánica, con miras a ser reconocidos no solo a nivel regional, sino internacional. Además, la continuidad y colaboración permanente con las comunidades locales, incluidas las comunidades indígenas, sigue siendo una prioridad importante. Estos esfuerzos son tanto un desafío como un recuerdo para las miles de personas que han muerto debido a la actividad volcánica, no solo en Colombia, sino en todo el mundo, con el objetivo final de reducir los desastres relacionados con la actividad volcánica y contribuir a generar comunidades más resilientes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores aprecian la relevante contribución de Eveling Espinoza y Pablo Forte, así como de dos revisores anónimos, para mejorar este artículo. Muchas gracias a todos los miembros de los SGC-OVS por su trabajo permanente en la investigación y monitoreo de los volcanes activos colombianos y los aportes realizados a este artículo. Un agradecimiento especial a Carlos Muñoz (SGC-OVSP) por su apoyo en los análisis con Arc-

GIS, y a Rafael Cárdenas (SGC-OVSP) y Andrés Narváez (SGC-OVSPop) por su ayuda en la mejora de las figuras.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Para el cumplimiento de su actividad misional, el SGC cuenta en su estructura con siete Áreas Técnicas, una de las cuales es Geoamenazas, desde donde se realizan investigaciones y monitoreo de las amenazas geológicas en el país (sismos, volcanes y movimientos en masa). La Dra. Marta Calvache es la Directora de Geoamenazas, encargada de los lineamientos y gestión de los recursos necesarios para que la misión se pueda llevar a cabo, tanto técnica como administrativamente. López C. M. es el responsable de la dirección del proyecto de investigación y monitoreo de los volcanes activos en el país, administrando los recursos humanos y económicos que se asignan anualmente. Monsalve, Agudelo y Gómez, son los científicos encargados de la Coordinación de los tres OVS del país, respectivamente el SGC-OVSM, SGC-OVSPop y SGC-OVSP, desde donde el seguimiento de los diferentes volcanes activos ubicados en los segmentos norte, centro y sur de Colombia, ocurre. Cortés, GP, estuvo a cargo de la dirección del proyecto de investigación y monitoreo de los volcanes activos del país entre 2004 y 2011, y fue la científica a cargo del SGC-OVSM desde 2010 a 2018. En este contexto, este artículo muestra el resultado de todo un equipo que lleva más de 34 años trabajando en la investigación y monitoreo de volcanes activos colombianos.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Actualmente, los datos relacionados con el monitoreo volcánico no están completamente disponibles para el público, especialmente aquellos recopilados y procesados con herramientas en desarrollo. Acceso a datos sísmicos puede ser requerido por medio de correo electrónico o petición escrita. El acceso está sujeto al uso de los datos en un proyecto de investigación. Este tema está siendo analizado dentro del SGC y se cree que en el futuro, gran parte de la información primaria de monitoreo podrá estar disponible en línea.

Otro tipo de documentos, tales como mapas de amenazas, mapas geológicos, informes, boletines, fotos, y videos, pueden ser obtenidos en línea a través de nuestro sitio web: (<https://www.sgc.gov.co/volcanes>, o <https://www.sgc.gov.co/Publicaciones/Paginas/informes-tecnicos.aspx>, o <https://www.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Boletines-extraordinarios.aspx>, o <https://www.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Boletines-mensuales.aspx>), o mediante la consulta en el motor de búsqueda institucional (“Geoportal”), navegando en el siguiente enlace y siguiendo las instrucciones allí establecidas: <https://www.sgc.gov.co/sgc/mapas/Paginas/geoportal.aspx>.

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

- Agudelo, A., A. Narváez e Y. Ramírez (2012). “Experiencias en la construcción de la gestión del riesgo en el cañón del río Páez. Red de Desastres Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim).” *Memorias II Congreso Regional SRA-LA. Capítulo Latinoamérica, Bogotá, Colombia, 9–12 April*. Ed. por F. Muñoz. Bogotá, Colombia: Sociedad para el Análisis de Riesgos, págs. 210-215.
- Bonadonna, C., C. B. Connor, B. F. Houghton, L. Connor, M. Byrne, A. Laing y T. K. Hincks (2005). “Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand”. *Journal of Geophysical Research* 110 (B3). doi: [10.1029/2003jb002896](#).
- Calder, E., K. Wagner y S. Ogburn (2015). “Volcanic hazard maps”. *Global Volcanic Hazards and Risk*. Ed. por S. C. Loughlin, S. Sparks, S. K. Brown, S. F. Jenkins y C. Vye-Brown. Cambridge University Press, págs. 335-342. doi: [10.1017/cbo9781316276273.022](#).
- Calvache, M. L., M. P. Torres, G. P. Cortés Jiménez y M. L. Monsalve (2003). “Geología y estratigrafía del volcán Azufral, Colombia”. Ed. por INGEOMINAS. Bogotá, Colombia: INGEOMINAS, pág. 52.
- Cepeda, H. (2009). *Escenarios eruptivos posibles y la gestión de riesgo volcánico*. Inf. téc. Manizales, Colombia: Instituto Colombiano de Geología y Minería, pág. 9.
- Congreso de la República, Departamento Administrativo de la Función Pública (2012). *Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*. Bogotá. Ley 1523 de 2012.
- Connor, L. J., C. B. Connor, K. Meliksetian e I. Savov (2012). “Probabilistic approach to modeling lava flow inundation: a lava flow hazard assessment for a nuclear facility in Armenia”. *Journal of Applied Volcanology* 1 (1). doi: [10.1186/2191-5040-1-3](#).
- Cortés Jiménez, G. P. (2016). “Apropiación social del conocimiento científico: treinta años de la vulcanología en Colombia, la gestión exitosa del riesgo volcánico el gran reto”. *Simposio Servicio Geológico Colombiano, 100 años de producción científica al servicio de los colombianos*. Ed. por J. Gómez Tapias. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Cortés Jiménez, G. P., H. F. Murcia, B. O. Hurtado, H. Cepeda y A. Núñez (2006). “Comparison of the lahar deposits of the eruption of Nevado del Ruiz volcano on 13th of November 1985 and the pre-historic eruptions of Cerro Machín volcano in the central zone of Colombia”. *Fourth Conference Cities on Volcanoes-IAVCEI, Quito, Ecuador, January 22–27*. Quito, Ecuador.
- Cortés Jiménez, G. P. y L. J. Castaño (2016). *Informe tercera Biental Nacional de niños, niñas y jóvenes que viven en zonas de riesgo volcánico*. Inf. téc. Servicio Geológico Colombiano.
- Disaster Preparedness ECHO (2007). *Reducción de la Vulnerabilidad de Comunidades Ubicadas en la Zona de Amenaza Alta frente al Volcán Galeras*. Inf. téc. Cruz Roja Colombiana & Cruz Roja Francesa.
- Driedger, C., M. Calvache, G. P. Cortés Jiménez, J. Ewert, J. Montoya, A. Lockhart, R. Allen, D. Banks, S. Beason, H. T. Bocanegra, F. Burkhart, K. Bustad, J. A. Gallego, Z. Gibson, F. R. Giraldo, C. Gutierrez, J. I. Quintero, E. Rodríguez, J. Schelling y M. Scott (2020). “Leveraging lessons learned to prevent future disasters—insights from the 2013 Colombia-US binational exchange”. *Journal of Applied Volcanology* 9 (1). doi: [10.1186/s13617-019-0090-8](#).
- Espinosa, A. (2011). *Enciclopedia de desastres naturales históricos de Colombia: erupciones históricas de los volcanes colombianos, 1550–2000*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y Universidad del Quindío.
- Garzón, G., C. Santacoloma, B. Galle y E. Solarte (2008). “Estrategias de medición de gases volcánicos en Colombia, utilizando sensores ópticos remotos”. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas* 6 (2), págs. 32-40. ISSN: 0120-4211.
- Garzón, G., B. Silva, A. Narvaez, Z. Chacon y B. Galle (2013). “Assessment of SO₂ emissions from three Colombian active volcanoes”. *Science Without Borders: Transactions of the International Academy of Science H&E*. Ed. por W. Kofler y E. Khalilov. International Academy of Science H&E, págs. 316-325. ISBN: 978-9952-451-04-7.
- Gómez Tapias, J., M. L. Monsalve, N. E. Montes y L. S. Ortiz (2016). “Excursión de campo Historia geológica de los Andes colombianos en los alrededores de Ibagué”. *Simposio Servicio Geológico Colombiano, 100 años de producción científica al servicio de los colombianos*. Ed. por J. Gómez Tapias. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Gómez, D. (2015). *Informe sobre la I y II Bienales Nacionales de Niños, Niñas y Jóvenes que Viven en Zonas de Riesgo Volcánico, desarrolladas en San Juan de Pasto en los años 2011 y 2013*. Inf. téc. Servicio Geológico Colombiano.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (2003). *Memoria explicativa del mapa de amenaza Volcánica del Cerro Machín. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán*. Inf. téc. Instituto Colombiano de Geología y Minería.

- (2008). *Informe de actividad del volcán Nevado del Huila en noviembre de 2008*. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán. Inf. téc. Instituto Colombiano de Geología y Minería.
- Kover, T. P. (1995). “Application of a digital terrain model for the modeling of volcanic flows: a tool for volcanic hazard determination”. Tesis de maestría. State University of New York at Buffalo, USA.
- López, C. M., M. L. Calvache y G. P. Cortés Jiménez (2018). “The Omaira Sanchez commemorative park: a new approach in the social appropriation of geoscientific knowledge of volcanic areas in Colombia.” *Millenia of stratification between human life and volcanoes: strategies for coexistence (Cities on Volcanoes 10, Abstracts Volume)*. Ed. por R. A. Corsaro, M. G. Di Giuseppe, R. Isaia, A. Mormone y R. Nave. Vol. 1. Cities on Volcanoes. Napoli, Italy: Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia, pág. 1200.
- Mastin, L. G. (2001). “A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions” (US Geological Survey Open-File Report 2001-45). doi: 10.3133/ofr0145.
- Méndez, R. (1989). “Catálogo de los volcanes activos de Colombia”. *Boletín geológico* 30 (3).
- Monsalve, H. y H. Mora (2005). “Esquema Geodinámico regional para el Noroccidente de Suramerica (modelo de subducción y desplazamientos relativos)”. *Boletín de Geología* 27 (1), págs. 25-53.
- Monsalve, M. L. (2000). *Guía para la evaluación de la amenaza volcánica y elaboración de mapas de amenaza volcánica potencial en Colombia*. doi: 10.13140/RG.2.1.3641.3848.
- Monsalve, M. L., J. J. Galarza, I. Zuluaga y C. A. Laverde (2014). *Mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé actual (Cauca-Colombia) segunda versión*. Inf. téc. Servicio Geológico Colombiano.
- Monsalve, M. L., B. A. Pulgarín, J. Mojica, C. C. Santacoloma y C. E. Cardona (2011). “Interpretación de la actividad eruptiva del volcán Nevado del Huila (Colombia), 2007–2009: análisis de componentes de materiales emitidos”. *Boletín de Geología* 33 (2), págs. 73-93.
- Narváez Zuñiga, A., A. Agudelo, Y. Ramírez, J. Quijano y I. Montoya (2015). “Estrategia de divulgación y comunicación para la Gestión del Riesgo con comunidades educativas de la Cuenca del Río Páez, área de influencia volcán Nevado del Huila”. *XV Congreso Colombiano de Geología Innovar en Sinergia con el Medio Ambiente*. Ed. por E. S. C. de Geología. Vol. 1. Bucaramanga, Colombia: Sociedad Colombiana de Geología, págs. 618-622. doi: 10.13140/RG.2.1.4731.3126.
- Patra, A., A. Bauer, C. Nichita, E. Pitman, M. Sheridan, M. Bursik, B. Rupp, A. Webber, A. Stinton, L. Nami-kawa y C. Renschler (2005). “Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 139 (1-2), págs. 1-21. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2004.06.014.
- Piedrahita, D. A., C. Aguilar-Casallas, E. Arango-Palacio, H. Murcia y J. Gómez-Arango (2018). “Estratigrafía del cráter y morfología del volcán Cerro Machín, Colombia”. *Boletín de Geología* 40 (3), págs. 29-48. ISSN: 2145-8553. doi: 10.18273/revbol.v40n3-2018002.
- Pierson, T. C., R. J. Janda, J.-C. Thouret y C. A. Borrero (1990). “Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 41 (1-4), págs. 17-66. doi: 10.1016/0377-0273(90)90082-q.
- Pulgarín, B., C. Cardona, A. Agudelo, C. Santacoloma, M. L. Monsalve, M. Calvache, C. Murcia, M. Cuéllar, E. Medina, R. Balanta, Y. Calderón, Ó. Leiva, M. Ordóñez y D. Ibáñez (2015). “Erupciones recientes del Volcán Nevado del Huila: Lahares asociados y cambios morfológicos del glaciar”. *Boletín Geológico* (43), págs. 75-87. doi: 10.32685/0120-1425/boletingeo.43.2015.21.
- Richardson, J. y L. J. Connor (2014). *Lava C Version 0.1*. URL: <https://vhub.org/resources/3597> (visitado 31-10-2020).
- Schilling, S. P. (1998). “Laharz: GIS tools for automated mapping of lahar-inundation hazard zones” (US Geological Survey Open-File Report 98-638).
- (2014). “Laharz_py: GIS tools for automated mapping of lahar inundation hazard zones” (US Geological Survey Open-File Report 2014-1073). doi: 10.3133/ofr20141073.
- Schwaiger, H. F., R. P. Denlinger y L. G. Mastin (2012). “Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition”. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117 (B4). doi: 10.1029/2011jb008968.
- Servicio Geológico Colombiano (2015). *Actualización del mapa de amenaza volcánica del Volcán Galeras*. Inf. téc. Servicio Geológico Colombiano.
- Sheridan, M. F. y T. Kover (1996). “FLOW3D: A computer code for simulating rapid, open channel volcanic flows”. *Proc. UJST workshop on the Technology of Disaster Prevention against Local Severe Storms*, págs. 155-163.
- Sheridan, M. F. y J. L. Macías (1992). “PC software for 2-dimensional gravity-driven flows: Application to Colima and El Chichón Volcanoes, México”. *Proceedings of the Second International Meeting on Volcanology*, pág. 5.