

ASESORAMIENTO CIENTÍFICO EN LA EMERGENCIA  
Y EN LA RECUPERACIÓN POST-DESASTRE  
DE LA ERUPCIÓN VOLCÁNICA DE 2021  
EN LA PALMA (IGME-CSIC)

SCIENTIFIC ASSESSMENT DURING THE EMERGENCY AND  
POST-DISASTER RECOVERY IN THE 2021 LA PALMA  
VOLCANIC ERUPTION (IGME-CSIC)

NIEVES SÁNCHEZ\*  
JUANA VEGAS\*\*  
JUAN CARLOS GARCÍA\*\*\*  
INÉS GALINDO\*\*\*\*

RESUMEN

El 19 de septiembre de 2021 comenzaba en la isla de La Palma una erupción volcánica que produjo numerosos daños materiales, pérdidas económicas y un enorme impacto en la vida de los habitantes del valle de Aridane y de todos los palmeros. Desde unos días antes, un equipo del Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) estuvo presente en la isla para atender la emergencia y colaborar en el asesoramiento a las autoridades gestoras de la emergencia, con su conocimiento experto en materia de riesgos geológicos, y en este caso de volcanología. Técnicos e investigadores de distintas disciplinas, *in situ* o en remoto, trabajaron de forma conjunta, con personal de otras instituciones para dar la mejor respuesta posible a la sociedad, desde el conocimiento científico. Las actividades realizadas incluyen el seguimiento en tierra y por aire con drones del avance de las coladas, del territorio afectado por caída de piroclastos, seguimiento de canales de lava activos, toma de datos de temperatura, toma de muestras de los productos volcánicos para analizar su composición y evolución, cartografía diaria de coladas, estudio de la posibilidad de ocurrencia de flujos hiperconcentrados (tipo *lahar*) por removilización de cenizas, elaboración de modelos de enfriamiento de coladas, elaboración del inventario de lugares de interés geológico del nuevo espacio, valoración del nuevo patrimonio geológico y propuesta de lugares para su protección y para su uso turístico, diseñando un sendero de acceso al cono en condiciones de seguridad para los visitantes. Varias de estas investigaciones continúan en la actualidad y seguirán durante varios años, lo que nos permitirá estar más preparados para el futuro que se avecina.

*Palabras clave:* erupción volcánica; La Palma; IGME-CSIC; emergencias.

---

\* Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Científica Titular.  
\*\* Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Científica Titular.  
\*\*\* Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Científico Titular.  
\*\*\*\* Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Científica Titular.

## ABSTRACT

On September 19, 2021, a volcanic eruption began on the island of La Palma that caused numerous material damages, economic losses and an enormous impact on the lives of the inhabitants of the Aridane valley and all people from La Palma. A few days before, an IGME-CSIC team travelled to the island to attend the emergency and collaborate in advising the emergency management authorities, with their expert knowledge in the field of geological risks, and specifically in this case, in volcanology. Technicians and researchers from different disciplines, in situ or remotely, worked together with other institutions to give the best possible response to society, based on scientific knowledge. The activities carried out include monitoring, on land and by air with drones, the advance of the lava flows, the territory affected by pyroclastic fallout, monitoring of active lava channels, temperature data measurements, sampling of volcanic products to analyse their composition and evolution, daily cartography of lava flows, study of the possibility of lahars occurrence due to ash remobilization, elaboration of models of cooling of lava flow, inventory of sites of geological interest in the new territory, assessment of the new geological heritage and proposal of places for protection or for touristic use by designing an access path to the cone in safe conditions for visitors, etc. Many of these investigations are ongoing today and will continue for several years, allowing us to be more prepared for the future ahead.

*Key words:* volcanic eruption; La Palma; IGME-CSIC; emergencies.

## 1. INTRODUCCIÓN

El 19 de septiembre de 2021, a las 14:12 horas (UTC) y después de una intensa actividad sísmica y de deformación registrada días anteriores, comenzó un proceso eruptivo en la zona de Cabeza de Vaca, municipio de El Paso (isla de La Palma, España). Esta erupción se prolongó durante más de ochenta y cinco días para finalizar el 13 de diciembre de ese mismo año a las 22:21 UTC.

Fue una erupción fisural estromboliana, con fases efusivas que expulsaron coladas de lava de diferente viscosidad y temperatura, dando lugar a lavas de tipo pahoehoe y aa, y otras fases de elevada explosividad y emisión de gases que produjeron depósitos piroclásticos. Durante todo el proceso eruptivo se produjeron episodios alternantes de incremento y disminución de la actividad estromboliana, acompañada de pulsos concretos de actividad freatomagmática al interactuar el magma con el agua presente en el acuífero, y con varios episodios de colapsos parciales del cono (figura 1).

El impacto de esta erupción sobre el territorio ha sido enorme, con una superficie cubierta por las lavas de 1218,87 ha y un espesor máximo de coladas de 70 m. Pero ha sido mayor el impacto sobre la población y la actividad socioeconómica de la isla, con 2329 personas empadronadas en el área afectada por la colada, 1676 edificaciones destruidas entre las que se encuentran viviendas, edificaciones de uso industrial, agrícola, hostelería y ocio o lugares de uso público, p. ej. Pero no solo eso, la erupción afectó a 73,8 km de carreteras, varios km de calles y travesías, y una superficie de cultivos de



Fig. 1: Colapso de la vertiente suroeste del cono. Imagen tomada el 14/10/2021 desde El Corazoncillo (La Palma)

370 ha, sobre todo plataneras, viña y aguacate (datos del Cabildo de La Palma, <https://volcan.lapalma.es/>). Como puede comprobarse, la erupción supuso un impacto brutal en la vida cotidiana de la isla, impacto que continúa pasados más de dieciocho meses desde que finalizó la erupción. La reconstrucción y la recuperación post-desastre está suponiendo un proceso mucho más largo y complejo de lo que la mayoría de la población podía pensar tras la finalización de la erupción que más daños ha ocasionado en la isla de La Palma desde que se tienen datos históricos.

En este contexto, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) se desplazó a la isla de La Palma unos días antes del inicio de la erupción, para realizar un estudio de las zonas más susceptibles de sufrir desprendimientos, ante el aumento de sismicidad tanto en número como en magnitud, y ante la somerización de las localizaciones de los hipocentros de los terremotos. Desde entonces, permaneció presente en la isla con un grupo de entre cuatro y diez personas hasta finales de enero de 2022, momento en que la presencia se mantiene en las diversas campañas de campo para continuar estudiando los efectos y consecuencias de la erupción, además de proseguir con las investi-

gaciones sobre los procesos volcanotectónicos que condicionaron la evolución de la erupción, entre otros trabajos.

## 2. EQUIPO IGME-CSIC

El IGME-CSIC<sup>1</sup>, como miembro del Comité Científico de Evaluación y Seguimiento de Fenómenos Volcánicos, asesora a los Órganos de Dirección del Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por Riesgo Volcánico (PEVOLCA). Su papel durante la emergencia consistió en el asesoramiento científico a las autoridades gestoras de la emergencia, que permitiera realizar un pronóstico de la evaluación de la situación y de los posibles escenarios, además de colaborar en el seguimiento y alerta de la actividad volcánica. Para ello, fue fundamental la colaboración con el resto de instituciones científicas que participaron en la emergencia y medios de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado.

Tras el comienzo de la erupción llegó a la isla más personal técnico e investigador, para reforzar y apoyar al personal desplazado que llevaba casi siete días trabajando sin descanso para hacer el mejor seguimiento posible del proceso eruptivo. A partir de ese momento, se fueron produciendo relevos de forma que siempre hubiese en la isla un grupo de entre siete y ocho personas atendiendo a la emergencia. Este patrón se mantuvo hasta primeros de enero de 2022, cuando el número de efectivos disminuyó a tres o cuatro personas en cada turno.

Desde mediados de febrero, personal técnico e investigador del IGME ha seguido viajando periódicamente a La Palma para realizar campañas de campo y continuar así con la atención a la emergencia, ya en nivel 1, y llevar a cabo diferentes investigaciones geológicas sobre el proceso eruptivo que no habían podido desarrollarse con anterioridad, al ser nuestra prioridad absoluta la atención a la emergencia, y actividades y toma de datos para la recuperación del territorio.

Una gran parte del personal participante en la emergencia durante la erupción pertenece a la URGE, la Unidad de Respuesta Geológica de Emergencias del IGME-CSIC. A estos especialistas con formación en intervención en emergencias, se unían un extenso grupo de personal técnico e investigador que trabajan en diferentes departamentos de investigación, laboratorios, áreas de Sistemas de Información Geográfica, Laboratorio Insar, Servicio de Trabajos Aéreos, etc. que colaboraron tanto sobre el terreno como en remoto desde

---

<sup>1</sup> Véase la relación del equipo en el apartado de agradecimientos.

gabinete o el laboratorio en las instalaciones del IGME en Madrid y en sus oficinas territoriales ubicadas en otras comunidades autónomas. Desde allí, se analizaban los datos y se hacía la difusión siempre en base a la información que se encontraba disponible.

### 3. ACTIVIDADES DEL IGME-CSIC DURANTE LA ERUPCIÓN

Desde el inicio de la erupción, las actividades desarrolladas por el personal del IGME consistieron fundamentalmente en el seguimiento de la actividad eruptiva tanto con los drones del servicio trabajos aéreos, como con personal a pie de campo, para establecer la evolución diaria de las coladas, hacer una evaluación de la probabilidad de desprendimientos debido a la sismicidad, la recogida y análisis de muestras de lava y piroclastos, la cartografía de productos volcánicos (lavas y cenizas), estudios de temperatura, así como la evolución de los centros de emisión y fisuras eruptivas.

Además, se atendían diferentes alertas y avisos comunicados por la población al CECOPIN y al Puesto de Mando Avanzado.

A continuación, se incluye un listado más detallado, aunque no exhaustivo, de las actividades desarrolladas durante la emergencia declarada por la erupción:

- *Participación en reuniones de coordinación.* El IGME ha estado presente tanto en las reuniones de coordinación de medios que tenían lugar cada mañana, como en el Comité Científico del PEVOLCA. Durante estas reuniones, compartían y visualizaban los vídeos de vuelos con drones que registraban la actividad eruptiva diaria, junto con otros datos y observaciones relevantes, proporcionando información para la toma de decisiones.
- *Activación de Copernicus.* El IGME solicitó la activación de Copernicus desde el inicio de la erupción el 19 de septiembre de 2021 y mantuvo reuniones para ajustar los productos proporcionados durante toda la emergencia. Esta activación se llevó a cabo a través del área de Protección Civil de la Delegación del Gobierno en Canarias, gracias a la previa colaboración establecida entre la Unidad de Canarias del IGME y la Unidad de Protección Civil.
- *Seguimiento y observaciones directas y aéreas del proceso volcánico.* El IGME realizó un seguimiento detallado del proceso volcánico a través tanto de observaciones directas sobre el terreno, como a través de

vuelos aéreos con drones pilotados por científicos y técnicos en Ciencias de la Tierra (STA, Servicio de Trabajos Aéreos del IGME-CSIC), con el objetivo de localizar los frentes de las coladas así como su avance (figura 2), analizando datos como la velocidad, potencia y anchura de las distintas coladas desbordantes, cambios en el estilo eruptivo y modificaciones geomorfológicas en toda la zona afectada por la erupción, con atención especial a la evolución de los distintos centros de emisión que se abrieron durante el proceso eruptivo, el seguimiento de la evolución morfométrica del cono, deslizamientos de los flancos del edificio volcánico e incluyendo también la formación y evolución de los deltas lávicos.



Fig. 2: Imagen tomada por un dron de los lóbulos de avance de una colada el día 26/09/2021 (STA, IGME-CSIC)

Una mención especial merece el trabajo realizado por los especialistas del STA, pues durante toda la erupción y gracias a sus conocimientos de los procesos geológicos, los cientos de vuelos realizados en colaboración con el servicio de drones del GES del Gobierno de Canarias, se convirtieron en las primeras personas que interpretaban los fenómenos volcánicos mediante las imágenes de drones para los gestores de la emergencia (figura 3).

Se realizaban al menos tres vuelos diarios, a primera hora de la mañana, a mediodía y por la tarde, además de aquellos que se hacían para cubrir los eventos y sucesos que sucedían a diario, como apertura de nuevos centros de emisión, colapsos de zonas del edificio volcánico, lle-

gada de la colada al mar, etc.). Las imágenes del vuelo de la mañana, tomadas justo antes de amanecer, se visionaban e interpretaban en la reunión del grupo de coordinación de medios para saber dónde había que concentrar los esfuerzos o prestar especial atención. Se compartían también en la reunión del Comité Científico y en la del Comité Director para explicar la evolución de la erupción desde la noche anterior. Con el tiempo, y para poder cubrir y abarcar toda la zona afectada por la erupción, los vuelos se realizaban en coordinación con la UME y la Policía Nacional.



Fig. 3: Pilotos de drones del STA-IGME y del GES preparándose para realizar un vuelo de dron en la parte oeste del volcán durante la emergencia (La Palma)

—*Cartografía de coladas*. Las imágenes obtenidas por el servicio de drones, se enviaban paralelamente a los técnicos de Patrimonio y Geodiversidad y del Servicio de Cartografía Geocientífica y de Sistemas de Información Geográfica, localizados en la sede del IGME en Madrid, que realizaban la cartografía diaria de las áreas afectadas por el avance de las coladas (figura 4) con mayor resolución que la facilitada por Copernicus y, ocasionalmente, también se suministraban modelos digitales de elevación, con lo que se podía estimar la posible trayectoria de los frentes de las coladas.

a) «Análisis de dispersión de piroclastos». Se recogieron, de forma sistemática, muestras de piroclastos por toda la isla, para su análisis en los laboratorios del IGME-CSIC. En el campo, se realizaba tam-

bién una caracterización mineralógica y textural del material recogido (composición, tamaño, etc.).

- b) Se obtuvieron también datos del «espesor de los piroclastos de caída», con los que se elaboró un mapa de inicial de dispersión de piroclastos a escala insular. Se pidió colaboración a la población mediante la «Operación Cenicienta», una iniciativa de ciencia ciudadana para recopilar información sobre la caída de cenizas en un área mucho mayor, incluyendo otras islas cercanas, como El Hierro, La Gomera o Tenerife, que permitía a la población colaborar en el estudio de la erupción, de sus productos, y de las consecuencias e impacto del proceso volcánico.

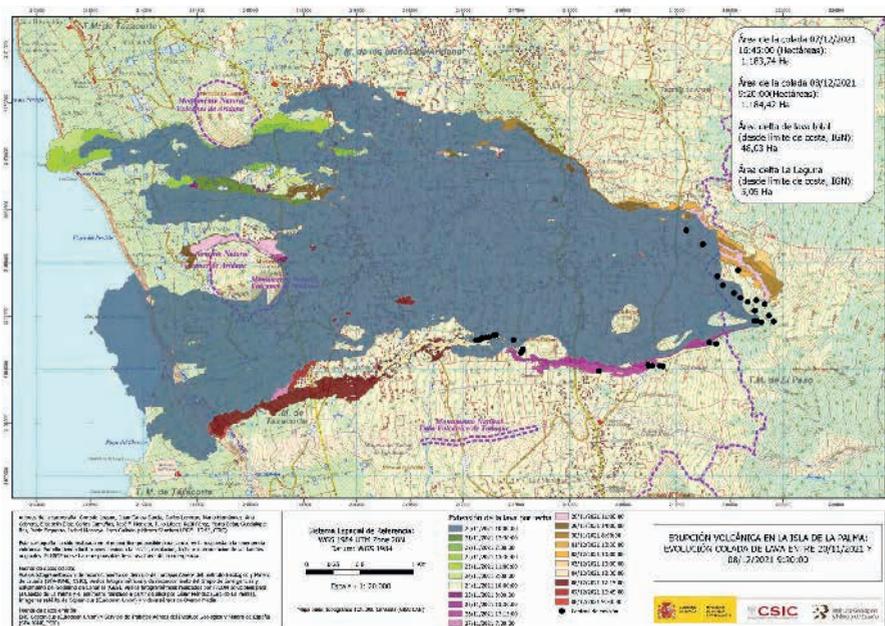


Figura 4: Cartografía de evolución de las coladas y centros de emisión correspondiente al 08/12/2021 a las 09:20 h canaria (IGME-CSIC)

—*Muestreo de lavas y piroclastos para estudios petrológicos y petrográficos.* En colaboración con la Unidad Militar de Emergencias (UME), el IGME recogió numerosas muestras de lavas y piroclastos (figura 5) para realizar estudios petrológicos y petrográficos en sus laboratorios en Tres Cantos (Madrid), junto con equipos colaboradores de la Universidad Complutense de Madrid y la Universidad Rey Juan Carlos. Se realizaron análisis geoquímicos, granulométricos, de densidad y propiedades

físicas de las muestras. Se investigó también la posible presencia de metales pesados adheridos a las cenizas.

- a) El equipo desplegado en campo disponía de un equipo portátil de rayos X para poder realizar un análisis geoquímico rápido de los piroclastos y de la lava, lo que permitía conocer de forma bastante aproximada las características del magma *in situ*.
- b) También se realizó un experimento piloto para analizar la composición química de las lavas a distancia, mediante espectrometría de plasma inducida por láser, en colaboración con la Universidad de Málaga y la Unidad Militar de Emergencias.

—*Análisis de lixiviados.* El IGME ha estudiado en laboratorio los elementos químicos que se liberan por las cenizas una vez depositadas mediante lixiviación, evaluando su potencial impacto en el suelo y las aguas subterráneas.

—*Medidas de gases y temperatura.* En colaboración con el Grupo de Intervención en Emergencias Tecnológicas y Medioambientales (CIETMA) de la UME, se llevaron a cabo mediciones de los gases liberados durante la erupción, algunos de los cuales podían representar un riesgo para la salud de los intervinientes en la emergencia. También se han realizado mediciones de la temperatura de las coladas de lava en los frentes y laterales de las mismas.



Fig. 5: Miembros del equipo URGE del IGME-CSIC muestreando piroclastos en el llano del Jable (La Palma)

- Análisis de datos de satélite*. En colaboración con investigadores de distintos centros nacionales y extranjeros, se analizaban datos de diferentes satélites para identificar zonas con deformaciones y cambios morfológicos o con elevada radiación térmica:
- a) Seguimiento de la activación del sistema Copernicus.
  - b) Análisis de DEMs de alta resolución a partir de imágenes *Pleiades*.
  - c) Control y medición de deformaciones y deslizamientos de ladera mediante interferometría radar. Análisis imágenes *Capella*. Esta actividad se realizó en colaboración con el IPNA (CSIC), el Institut de Physique du Globe de Paris, de datos de la NASA y el CIENT2/ForM@Ter/ISDeforminitiative.
- Asesoramiento en riesgos volcánicos secundarios*. Se han llevado a cabo estudios experimentales en campo durante la erupción para estimar el desencadenamiento de *lahares*/flujos hiperconcentrados asociados a la removilización de piroclastos emitidos por el volcán, especialmente después de episodios intensos de lluvias. Se realizaron también, como ya se ha mencionado, estudios de desprendimientos, incluyendo los que se identificaban en la base de datos del Observatorio Ciudadano de Desprendimientos del proyecto europeo AGEO (<https://ageoatlantic.eu/>).
- Análisis volcano-tectónico*. Se han llevado a cabo estudios detallados sobre microfracturación, sismicidad y sismotectónica para analizar el campo de esfuerzos y posibles cambios durante el proceso volcánico. Se realizó un seguimiento exhaustivo de la actividad eruptiva para determinar la posible aparición de nuevos centros de emisión alejados del cono principal a lo largo de toda la erupción. Además, se han comparado datos estructurales de la superficie con datos de sismicidad en profundidad, utilizando información previa del análisis de la deformación frágil recopilada por el grupo de investigación en un proyecto anterior.
- Análisis de mineralizaciones asociadas a desgasificación y en tubos volcánicos*. Se han muestreado con un protocolo especial los minerales inestables que se forman en las fumarolas, puntos de desgasificación y tubos volcánicos para su análisis químico y mineralógico, para monitorizar su evolución en el tiempo.
- Estudio hidrogeológico*. Se instalaron sensores de parámetros físico-químicos en varios pozos para recopilar datos que están siendo ahora analizados con el objetivo de estudiar el impacto de la erupción en las aguas subterráneas.

- Atención a alertas.* El IGME ha colaborado con el personal de Seguridad y Emergencias del Gobierno de Canarias y del CECOPIN de La Palma para verificar y comprobar diversas alertas comunicadas por la población como la apertura de grietas en patios, anomalías térmicas en viviendas o cambios en la coloración y olor del agua de abasto.
- Patrimonio geológico y geoconservación durante la erupción volcánica.* El equipo de intervinientes del IGME-CSIC ha realizado la catalogación de los elementos con mayor valor científico y mayor fragilidad. Para evitar su pérdida se realizó una conservación *ex situ* de elementos volcánicos susceptibles de ser movilizados, antes de verse modificados por la propia actividad volcánica, como por la acción antrópica derivada de la emergencia, como son: i) fragmentos de las coladas de lava con estructuras y texturas singulares; ii) secuencias singulares de tefra (lapilli, ceniza) mediante la realización de réplicas de *Peel*; o iii) por contener eventos volcánicos; bombas y salpicaduras (*spatter*) singulares por su tamaño, morfología, composición o situación; y iv) precipitados y sublimados de paragénesis minerales, fundamentalmente relacionadas con el azufre en fumarolas, fracturas y hornitos. Una vez finalizados los estudios este patrimonio mueble se entregará al Cabildo de La Palma y los ayuntamientos. Una de las réplicas de los depósitos de tefra ya se expone en el Centro de Interpretación de Caños de Fuego.
- Comunicación y divulgación.* Se creó y actualizó diariamente un sitio web con información sobre la erupción, en la que se incluía la cartografía actualizada periódicamente en formato 2D y 3D. Esta plataforma ha sido una fuente de información clave para la ciudadanía, que se mantiene en la actualidad. Además, se atendió a la prensa y se desarrolló material divulgativo para informar adecuadamente sobre la situación. Toda esa información puede ser consultada, con referencia a otras fuentes externas en las que obtener información adicional, en: <https://info.igme.es/eventos/Erupcion-volcanica-la-palma>.

#### 4. ACTIVIDADES DEL IGME-CSIC EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN

Una vez finalizada la erupción, el personal técnico y científico del IGME ha continuado brindando apoyo a la emergencia y a las tareas de recuperación, además de emprender diversos estudios para mejorar el asesoramiento científico en futuras erupciones. Estos estudios abarcan diversas áreas:

- Identificación y análisis del nuevo patrimonio geológico generado durante la erupción.* Se ha realizado una zonificación del nuevo paisaje

volcánico generado, con el fin de identificar elementos y procesos de gran interés científico, cultural, turístico y/o educativo para la recuperación del valle de Aridane. Tras la identificación y valoración de estos nuevos Elementos Volcanológicos de Interés con una metodología especialmente diseñada para este caso y que es de aplicación en otras regiones volcánicas, se ha propuesto a las administraciones públicas competentes los posibles usos recomendados para cada zona, incluyendo la protección natural y el uso turístico del patrimonio identificado.

El nuevo volcán de La Palma es el Lugar de Interés Geológico más joven de España y por su valor científico, didáctico y turístico está incluido en el Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IE-LIG) con el código IC6031 «Volcán, coladas y piroclastos de la erupción de 2021 de la Palma». La investigación para la correcta identificación y la valoración cuantitativa de los elementos volcánicos singulares y únicos que forman el patrimonio geológico de esta erupción, se realiza en el marco de la zonificación de las zonas afectadas por la erupción, con el objetivo principal de contribuir eficazmente a compatibilizar la protección de este singular patrimonio natural con el uso público a través del geoturismo y la educación ambiental.

Es necesario e imprescindible implicar a los habitantes, a las administraciones regionales y locales de La Palma y al tejido empresarial, siendo uno de los retos para lograr compatibilizar la conservación de este nuevo patrimonio natural y la recuperación real. Para ello, es imprescindible mejorar el conocimiento y la valoración del patrimonio geológico desde el ámbito científico, y con los resultados conseguidos involucrar a todos los agentes implicados en la recuperación, demostrando así la eficacia de la concienciación de la sociedad y las administraciones en este proceso.

La educación ambiental y el geoturismo son herramientas eficaces que contribuyen a la aceptación social del gran cambio que ha supuesto esta erupción. En este sentido, es fundamental que se conozca el valor y la oportunidad que representa este nuevo y novedoso recurso geológico con una planificación estructurada que se ha planteado desde el IGME en tres fases temporales principales: 1) corto plazo: año 2022, respuesta inmediata; 2) medio plazo: 2023-2026 integrar nuevos empleos y nuevas infraestructuras; y 3) largo plazo: 2027-2030 consolidar el producto de destino y consolidación social.

- *Diseño de una estrategia para el desarrollo de un modelo geoturístico sostenible en torno al volcán.* Se estableció un grupo de trabajo específico nada más terminar la erupción entre el Cabildo de La Palma, el IGME-CSIC y los ayuntamientos de El Paso, Tazacorte y Los Llanos de Aridane para seleccionar las mejores zonas para el uso turístico en tor-

no al volcán. El objetivo era crear un producto turístico nuevo para las empresas locales, que contribuyera a la recuperación de este sector empresarial, pero sobre todo para responder a la alta demanda turística para conocer el volcán con garantías de seguridad y de conservación, que se puso en marcha en la campaña de Semana Santa de 2022. Esta fue la primera fase planteada para la recuperación, solo tres meses después del final de la erupción. Se diseñó la ruta circular para la campaña de verano, que parte del Llano del Jable, se hizo un cálculo de la capacidad de carga y se interpretaron las cuatro paradas que tiene la ruta para conocer el fenómeno volcánico (figura 6). En paralelo, se impartieron dos cursos de formación para guías y empleados del sector del turismo de naturaleza de La Palma, uno de ellos en campo.



Fig. 6: Trazado circular del sendero de Cabeza de Vaca para el uso turístico del sector este de la erupción de 2021. Sendero para el uso turístico del volcán puesto en marcha en la campaña de Semana Santa de 2022, en la fase inmediata para la recuperación

- *Estudio del enfriamiento del campo de lavas.* Se ha desarrollado una metodología para crear un mapa de peligrosidad de temperaturas en el campo de lavas a uno y tres metros de profundidad (figura 7), que considera la cartografía diaria de las coladas realizada por el IGME durante la erupción, los vuelos de drones con cámaras térmicas y ópticas, datos satelitales de las coladas activas y su fecha de emisión, así como la altura de los apilamientos de lavas. Se han instalado sensores térmicos y meteorológicos para monitorear y evaluar las temperaturas de enfriamiento indicadas por los modelos y así poder reajustar los resultados de los modelos. Esta información precisa sobre el estado de las coladas de lava está sirviendo para facilitar la rehabilitación y recupe-

ración de La Palma; un ejemplo es la monitorización de la temperatura a lo largo de la nueva carretera de La Laguna a Las Norias para minimizar en lo posible el riesgo para los trabajadores y los usuarios de esta nueva vía de comunicación, así como para la propia infraestructura.

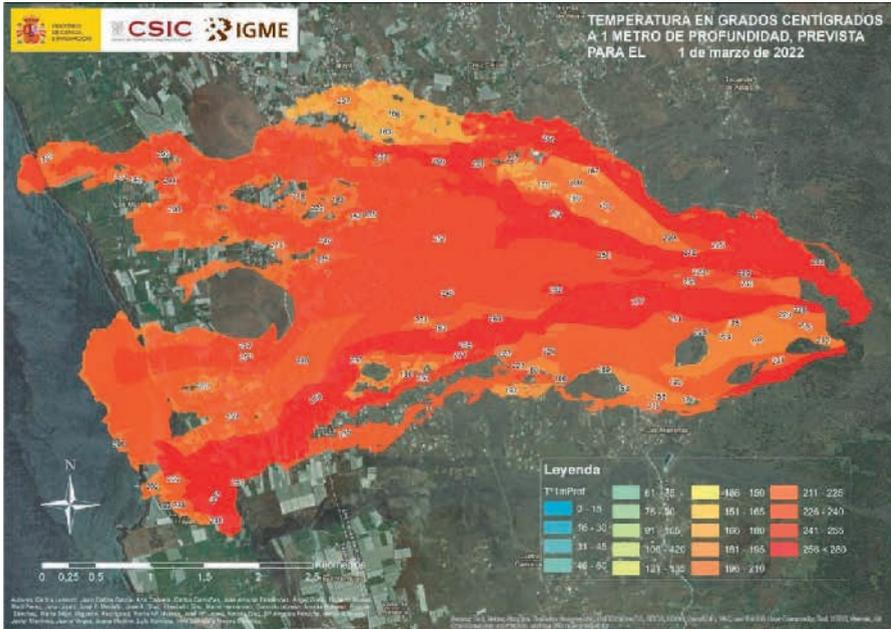


Fig. 7: Modelo de enfriamiento de las coladas, con estimación de la temperatura a 1 m de profundidad prevista para el 01/03/22, realizado en diciembre de 2021 (IGME-CSIC)

- *Estudio hidrogeológico del acuífero insular.* Se están realizando trabajos en colaboración con el Consejo Insular de Aguas del Cabildo de La Palma para evaluar posibles afecciones debidas a la actividad volcánica en las aguas subterráneas y apoyar la reposición del suministro en las zonas afectadas.
- *Análisis del impacto de la caída de piroclastos en las infraestructuras.* En colaboración con la Universidad de Leeds, se está estudiando la resistencia de las infraestructuras a la carga de cenizas, utilizando imágenes de drones, observaciones de campo y análisis de laboratorio. El objetivo es establecer el umbral de altura de piroclastos que soporta cada tipo de estructura.
- *Fracturación y análisis de la deformación frágil.* Se está llevando a cabo un análisis *in situ* de la deformación frágil generada durante todo

el proceso eruptivo en zonas previamente inaccesibles debido a la erupción y presencia de gases. Esto ha permitido determinar la existencia de fallas activas en las zonas norte y sur de área cubierta por las coladas, cuyo movimiento lento, provoca grietas y daños en viviendas e infraestructuras. La identificación de estas zonas de falla, así como su localización y extensión, es fundamental de cara a la reconstrucción de las infraestructuras en las zonas afectadas.

- *Análisis composicional y textural de depósitos minerales y sublimados de gases.* Se está contrastando una nueva metodología desarrollada durante la emergencia para tomar muestras de las diferentes capas de piroclastos y su análisis *in situ* con un equipo portátil de FRX. También se utiliza el equipo Dino-Lite para analizar los hábitos cristalinos, embutiendo los cristales en resina *in situ* para su posterior estudio en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM). Además, se mide la temperatura en el punto de emisión de la fumarola y se analizan los gases de la fumarola.
- *Realización de MDTs a partir de fotogrametría de detalle de las coladas.* Se están utilizando vuelos realizados durante y después de la erupción para analizar los procesos de enfriamiento de lavas, la inestabilidad del edificio volcánico, la identificación de colapsos de techos de tubos volcánicos y la zonificación de los nuevos espacios creados.
- *Causas y efectos de la evolución de los centros eruptivos.* Se está realizando un análisis de los procesos gravitacionales que han afectado al edificio volcánico (deslizamientos, desprendimientos) y cómo han influido en la salida de lavas, utilizando información recopilada durante la erupción.
- *Estudio de tubos volcánicos y morfologías asociadas en las coladas, como jameos o shatterrings.* Se está realizando un estudio de detalle de los accesos a los tubos volcánicos formados durante la erupción, estudiando las diferentes tipologías, morfologías, temperaturas, etc. Este estudio puede proporcionar información fundamental sobre la dinámica de las lavas y la evolución de las mismas durante la erupción, además de ayudar a explicar los patrones de temperaturas observadas en el campo de lavas. La localización de los tubos volcánicos es fundamental en el proceso de reconstrucción, pues su presencia condiciona el desarrollo de cualquier infraestructura en la superficie de las coladas.
- *Estudio de «lahares».* Se están elaborando modelos de flujos hiperconcentrados basados en columnas estratigráficas de depósitos piroclásticos (figura 8), parámetros físicos y resultados de ensayos de infiltración, es-

pecíficos para las condiciones de la isla de La Palma, adaptando los modelos genéricos a los materiales volcánicos emitidos en la erupción.



Fig. 8: Estudio de removilización de cenizas y formación de lóbulos tras lluvias intensas (La Palma)

## 5. CONCLUSIONES

Desde unos días antes del comienzo de la erupción de La Palma de 2021, un equipo del IGME ya estaba desplazado para estudiar las posibles áreas que pudieran verse afectadas por desprendimientos ante el aumento de sismicidad. Pocos días después del inicio de la erupción, llegó personal nuevo de refresco para dar apoyo al primer equipo. Desde entonces y hasta un mes después de finalizada la erupción, hubo siempre un equipo de seis a ocho personas del IGME trabajando con el único objetivo de asesorar en la emergencia declarada por la erupción volcánica. A partir de ese momento, el IGME ha venido trabajando en La Palma y viajando periódicamente para recopilar datos y realizar las investigaciones que no pudieron realizarse previamente por ser la prioridad la atención a la emergencia, como institución de servicio público de la Administración General del Estado.

Algunos de estos trabajos e investigaciones han sido presentados en congresos y reuniones internacionales, otros han sido publicados en revistas científicas internacionales (ver referencias al final del artículo). Mientras tanto, seguimos trabajando para avanzar en el conocimiento de los procesos volcánicos que dieron lugar a la formación de un nuevo edificio volcánico en la parte sur de la isla de La Palma, que tanto impacto ha provocado en la sociedad y que ha dejado una profunda huella en el paisaje isleño. En el futuro se producirán nuevas erupciones, y el conocimiento y experiencia adquiridos a tan alto precio en esta erupción, nos ayudarán a estar más preparados cuando ocurra, y a recuperarnos mejor tras el desastre que implica una erupción volcánica en una zona urbana.

#### AGRADECIMIENTOS

Equipo IGME-CSIC en La Palma (por orden alfabético): Marta Béjar Pizarro, Eva Bellido Martín, Guadalupe Bru Cruz, Ana María Cabrera Ferrero, Carlos Camuñas Palencia, Mercedes Reyes Castillo Carrión, Elisabeth Díaz Losada, José Ángel Díaz Muñoz, Andrés Díez Herrero, Pablo Ezquerro Martín, José Antonio Fernández Merodo, Marta García Alonso, Ana Gimeno García, Mario Hernández Ruiz, Ana Belén Lobato Otero, José María López García, Carlos Lorenzo Carnicero, Gonzalo Lozano Otero, Javier Martínez Martínez, María del Pilar Mata Campo, Rosa María Mateos Ruiz, José Francisco Mediato Arribas, Isabel Montoya Montes, Begoña del Moral González, Berta Ordóñez Casado, Raúl Pérez López, Ángel Prieto Martín, Miguel Ángel Rodríguez Pascua, Amalia Romero Prados, Javier Sánchez España, David Sanz Mangas, Amalia de Vergara Pardeiro.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EZQUERRO, P., BRU, G., GALINDO, I., MONSERRAT, O., GARCÍA-DAVALILLO, J. C., SÁNCHEZ, N., MONTOYA, I., PALAMÀ, R., MATEOS, R. M., PÉREZ-LÓPEZ, R., GONZÁLEZ-ALONSO, E., GRANDIN, R., GUARDIOLA-ALBERT, C., LÓPEZ-VINIELLES, J., FERNÁNDEZ-MERODO, J. A., HERRERA, G., BÉJAR-PIZARRO, M. (2023). Analysis of SAR-derived products to support emergency management during volcanic crisis: La Palma case study. *Remote Sensing of Environment*, 295 (Amsterdam), 113668. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113668.
- FERRER-VALERO, N., VEGAS, J., GALINDO, I., LOZANO, G. (2023). A geoheritage valuation to prevent environmental degradation of a new volcanic landscape in the Canary Islands. *Land Degradation & Development*, 34 (Hoboken, Nueva Jersey), pp. 2494-2507. DOI: 10.1002/ldr.4623.
- MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J., ORDÓÑEZ-CASADO, B., DEL MORAL, B., MATA, M. P., MEDIATO ARRIBAS, J. F., VEGAS, J., RODRÍGUEZ PASCUA, M. A., PÉREZ-LÓPEZ, R., MATEOS, R. M., SÁNCHEZ, N., GALINDO, I. (2022). Caracterización de depósitos minerales asociados a fumarolas de la erupción de 2021 en Cumbre Vieja (La Palma). *Macla*, 26 (Madrid), pp. 110-111.
- MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J., MEDIATO, J. F., MATA, M. P., ORDÓÑEZ, B., DEL MORAL, B., BELLIDO, E., PÉREZ-LÓPEZ, R., RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A., VEGAS, J., LOZANO OTE-

- RO, G., MATEOS, R. M., SÁNCHEZ, N., GALINDO, I. (2023). Early fumarolic minerals from the Tajogaite volcanic eruption (La Palma, 2021). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 435 (Amsterdam), 107771. DOI:10.1016/j.jvolgeores.2023.107771.
- MATA, M. P., ORDÓÑEZ-CASADO, B., DEL MORAL, B., MEDIATO ARRIBAS, J. F., BELLIDO MARTÍN, E., CASTILLO, M., VEGAS, J., MARTÍNEZ MARTÍNEZ, J., SÁNCHEZ-ESPAÑA, J., PÉREZ, R., SÁNCHEZ, N., GALINDO, I. (2022). Composición del material piroclástico de la erupción de 2021 en Cumbre Vieja (Isla de La Palma). *Macla*, 26 (Madrid), pp. 116-117.
- PALANCO, S., PÉREZ-LÓPEZ, R., GALINDO JIMÉNEZ, I., BERNAL, A., ARANDA, S., LÓPEZ-ESCALANTE, M. C., LEINEN, D., MEDIATO, J. F., LÓPEZ-GUTIÉRREZ, J., RAMOS-BARRADO, J. R. (2022). Field deployment of a man-portable stand-off laser-induced breakdown spectrometer: a preliminary report on the expedition to the Cumbre Vieja volcano (La Palma, Spain, 2021). *Spectrochimica Acta Part B, Atomic Spectroscopy*, 190 (Amsterdam), 106391. DOI: 10.1016/j.sab.2022.106391.
- PÉREZ-LÓPEZ, R., RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A., LÓPEZ-GUTIERREZ, J., MEDIATO, J. F., SANZ-MANGAS, D., MARRERO, R., MONTOYA, R., GALINDO, I., SÁNCHEZ, N., BÉJAR-PIZARRO, M., LOZANO, G., GARCÍA LÓPEZ-DAVALILLO, J. C., EZQUERRO, P., BRU, G., MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J., HERNÁNDEZ, M., JIMÉNEZ-GARCÍA, I., GUARDIOLA-ALBERT, C., MATEOS, R. M. (2022). Structural control of rapid magma ascent during Cumbre Vieja eruption (La Palma, 2021): the role of fault intersection in dyke ascent. En: *10ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica (10 AHPGG)*. 28 noviembre-3 diciembre 2022, Toledo, España.
- SÁNCHEZ-ESPAÑA, J., MATA, M. P., VEGAS, J., LOZANO, G., MEDIATO, J., MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J., GALINDO, I., SÁNCHEZ, N., DEL MORAL, B., ORDÓÑEZ, B., DE VERGARA, A., NIETO, A., ANDRÉS, M., VÁZQUEZ, I., BELLIDO, E., CASTILLO-CARRIÓN, M. (2023). Leaching tests reveal fast aluminum fluoride release from ashfall accumulated in La Palma (Canary Islands, Spain) after the 2021 Tajogaite eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (Amsterdam) (en prensa).
- SANZ-MANGAS, D., GALINDO, I., PÉREZ-LÓPEZ, R., GARCÍA-DAVALILLO, J. C., SÁNCHEZ, N., RODRÍGUEZ PASCUA, M. A., PERUCHA, M.A. (2022). Distal magmatic pulse injections at La Palma eruption 2021. En: *10ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica (10 AHPGG)*. 28 noviembre-3 diciembre 2022, Toledo, España.
- SANZ-MANGAS, D., GALINDO, I., FERNÁNDEZ LORENZO, O., VEGAS, J., LÓPEZ-GUTIÉRREZ, J., PÉREZ-LÓPEZ, R., GARCÍA-DAVALILLO, J. C., LORENZO, C., HERNÁNDEZ, M., CAMUÑAS, C., MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J., MEDIATO, J., SÁNCHEZ, N. (2023). Lava tubes and skylights formed during La Palma volcanic eruption in 2021: an analog for planetary volcanoes and ancient flood basaltic eruptions. In: *4th International Planetary Caves Conference*, Abstract #1044, 4-7 mayo 2023, Haría, Lanzarote, España.
- VEGAS, J., DÍEZ-HERRERO, A., GALINDO, I., SÁNCHEZ, N., MEDIATO, J. F., MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J., LÓPEZ-GUTIÉRREZ, J., RODRÍGUEZ-PASCUA, M.A., PERUCHA, M. Á., MORENO, X., PÉREZ-LÓPEZ, R., LOZANO, G., BAEZA, E. (2022). Geoconservación ex situ de patrimonio geológico efímero durante una emergencia volcánica: la erupción de La Palma 2021. *Geo-Temas*, 19 (Salamanca), pp. 91-94.

*Cómo citar este artículo / Citation:* Sánchez, Nieves, Vegas, Juana, García, Juan Carlos, Galindo, Inés. Asesoramiento científico en la emergencia y en la recuperación post-desastre en la erupción volcánica de 2021 en La Palma (IGME-CSIC). *Cosmológica*, n.º 3 (Santa Cruz de La Palma, 2023), pp. 81-98.

Fecha de recepción: 28 de julio de 2023

Fecha de aceptación: 31 de julio de 2023