Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias

Eumenio Ancochea · Carlos Sangil *et al.* · Félix M. Medina *et al.*
Luca D'Auria · Nemesio M. Pérez

Tajogaite
Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)

XVIII Semana Científica Telesforo Bravo

Tajogaite
Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)

Editado
por
Julio Afonso-Carrillo

XVIII Semana Científica Telesforo Bravo
INSTITUTO DE ESTUDIOS HISPÁNICOS DE CANARIAS
2023

© Los autores
© De esta edición: 2023, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias,
C/. Quintana, 18. Puerto de la Cruz, Tenerife,
Islas Canarias, E-38400.
www.iehcan.com

Maquetación de portada y Preimpresión:
Javier Figueroa

Primera edición: octubre 2023

Imprime:
Litografía La Palma
C/ El Galión 18 - 38700 Santa Cruz de La Palma
CIF: B38340501

Depósito Legal: TF 904-2023

ISBN: 978-84-09-54782-1

Presentación

Como a una gran parte de los canarios, la televisión me mantuvo enganchado durante todo el tiempo que duró la pasada erupción de La Palma de 2021. Fui un fiel seguidor de noticiarios, reportajes, entrevistas, debates y, sobre todo, de las espectaculares imágenes que de manera continuada emitió la televisión. De modo similar a como había ocurrido en las erupciones previas de las que había sido testigo (Teneguía y Tagoro), durante los días previos en los que los científicos, tras analizar numerosos parámetros, informaban de que existía una alta probabilidad que apuntaba hacia el inminente nacimiento de un nuevo volcán, me embargaba un no disimulado entusiasmo. No sólo ante la posibilidad de volver a ser testigo de unos de los fenómenos más grandiosos que nos brinda la naturaleza, sino también de poder comprobar directamente el mecanismo mediante el cual las islas Canarias se han ido construyendo, poco a poco, durante millones de años. Para muchos científicos estudiosos del vulcanismo una erupción constituye una oportunidad única para investigar en el ámbito de su especialidad. Para los biólogos una coyuntura excepcional para indagar sobre sus efectos sobre la peculiar biodiversidad que evoluciona aislada en un entorno insular. Para los canarios supone una ocasión extraordinaria para profundizar en los fundamentos de nuestra particular identidad territorial.

Temor y curiosidad son posiblemente los adjetivos que mejor definen los sentimientos que han provocado entre sus habitantes la mayor parte de las plácidas erupciones históricas acontecidas en las islas Canarias. Pero con algunas notables excepciones en las que del temor y la curiosidad se transitó precipitadamente a la consternación, la tragedia y la desolación. Así sucedió, por ejemplo, con la erupción del volcán de Arenas Negras en Tenerife (1706), cuyas coladas arrasaron al entonces floreciente pueblo de Garachico, o con la prolongada erupción de Timanfaya en Lanzarote (1730-1736) que sepultó

once poblaciones, arrasó una cuarta parte de la superficie insular y provocó que muchos de sus habitantes abandonaran la isla.

Habitar en un territorio con vulcanismo activo nos obliga a conocer y aprender de nuestro pasado para disponer de criterios para actuar en el futuro. Siempre he sentido una particular curiosidad por cómo los canarios han reaccionado ante los procesos eruptivos y como los naturalistas y los científicos han pretendido encontrar respuestas mediante sus observaciones y sus estudios sobre el terreno durante las erupciones de Canarias. Aparte de la mera descripción de los distintos fenómenos que se suceden a lo largo de una erupción, me ha interesado indagar acerca de los medios técnicos en los que se apoyaban en cada ocasión, para poder documentar con criterios científicos lo que estaba ocurriendo durante (también, antes y después) de una erupción volcánica.

La primera erupción científicamente documentada en Canarias fue la del Chinyero, que ocurrió en Santiago del Teide (Tenerife) en 1909. Hasta entonces, las erupciones históricas de Canarias habían sido descritas con limitados detalles por las autoridades locales, los curas párrocos o por testigos oculares que manejaban la escritura, puesto que por aquellos tiempos, no solo las islas sino también España, carecía de naturalistas con conocimientos en vulcanología con capacidad para realizar el informe de una erupción. Sin embargo, a principios del siglo XX la ciencia española estaba empezando a despegar tímidamente, a pesar de que el país apenas contaba con estructuras universitarias para sustentar la formación de científicos.

Cuando el 18 de noviembre de 1909 el Chinyero entró en erupción, el profesor Lucas Fernández Navarro, catedrático de la universidad Central de Madrid, era uno de los pocos geólogos que contaba con cierta experiencia en el estudio de materiales volcánicos. Fue designado por el Ministerio de Instrucción Pública para que se desplazara hasta Tenerife y estudiara la erupción volcánica. Pero, a pesar de que los trámites burocráticos para llevar a cabo el viaje fueron reducidos al máximo, cuando Fernández Navarro llegó a Tenerife el 4 de diciembre, la erupción que apenas duró 10 días, ya había concluido. Aunque no pudo asistir a la fase activa de la erupción, realizó sus investigaciones recogiendo las manifestaciones de los testigos oculares, entre los que se encontraba el que fuera su discípulo, Agustín Cabrera, que lo acompañó en el trabajo de campo. Cabrera era catedrático de Historia Natural del Instituto de Canarias de La Laguna y había realizado dos excursiones al volcán durante el periodo de erupción. Fernández Navarro analizó la fase residual, cartografió las coladas de lava y conos piroclásticos y muestreó los materiales emitidos. El estudio científico realizado por Fernández Navarro en el Chinyero tuvo una gran repercusión y hoy se considera un trabajo ejemplar.

La siguiente erupción, la de San Juan en La Palma en 1949, fue la más importante de las registradas en Canarias durante el siglo XX, y también fue

documentada mediante informes científico-técnicos. Duró 42 días, tras iniciarse el 24 de junio (festividad de San Juan) y también se le conoce como erupción de Nambroque o de Las Manchas. Contó con tres bocas eruptivas principales espaciadas entre sí, todas ellas localizadas en el municipio de El Paso. La de El Duraznero y Hoyo Negro, se abrieron a unos 1800 m s.n.m. en la zona de cumbre, mientras que la de Llano del Banco, surgió a unos 1300 m s.n.m. en la ladera occidental de Cumbre Vieja. La erupción tuvo lugar en unos años críticos para la ciencia española, con las secuelas posteriores a la Guerra Civil y poco después de finalizada la Segunda Guerra Mundial. Un periodo de autarquía y aislamiento internacional, caracterizado por una larga y profunda depresión económica, durante el cual prácticamente no se destinaron recursos a la investigación científica.

Con escasos medios humanos y técnicos, la erupción fue documentada principalmente mediante la observación y los datos registrados fueron escasos e imprecisos. El ingeniero geógrafo Juan Bonelli Rubio y el ingeniero de minas José Romero Ortiz, fueron comisionados, respectivamente, por el Instituto Geográfico y Catastral y el Instituto Geológico y Minero, para trasladarse a la isla de La Palma, seguir el desarrollo de la erupción, estudiar sus características y los fenómenos a que pudiera dar lugar y rendir el oportuno dictamen. También Simón Benítez Padilla, erudito historiador que presidió el Museo Canario de Las Palmas y que disponía de conocimientos en geología, elaboró un informe sobre la erupción. Sin embargo, la mayor parte del conocimiento que en la actualidad se tiene sobre la erupción de San Juan está vinculada a los numerosos estudios realizados en décadas posteriores.

En El Duraznero y Hoyo Negro, ocurrieron episodios muy violentos, debido a la interacción del magma con una bolsa de agua subterránea, que dio lugar a columnas eruptivas que se elevaron a gran altitud. Por el contrario, en Llano del Banco la erupción fue claramente efusiva con coladas muy fluidas de lava que descendieron con rapidez favorecidas por la pendiente, en su recorrido afectaron al barrio de Las Manchas donde destruyeron viviendas y cultivos, y llegaron hasta el mar por la zona de Puerto Naos donde crearon un amplio delta lávico (isla baja o fajana). Sólo al final de la erupción se produjo una reactivación en el cráter de Hoyo Negro, que originó una colada de lava fluida que avanzó por la vertiente oriental de la isla, en el municipio de Mazo, y que no llegó a alcanzar el mar. Hace unos años tuve la posibilidad de ver las filmaciones que en su día sirvieron para dar a conocer el suceso a través del reportaje en blanco y negro que rodaron las cámaras del Noticiario Cinematográfico Español, el popular NO-DO, ahora conservadas en el archivo de RTVE.

Veintidós años más tarde, con la erupción del volcán Teneguía iniciada el 26 de octubre de 1971, viví por primera vez la experiencia de ser testigo de una erupción volcánica en Canarias. Sucedió cuando cursaba el año previo

al acceso a la universidad y mi vocación por las ciencias de la naturaleza se estaba consolidando. Por su corta duración, de apenas 24 días, y por las propias limitaciones de los medios de comunicación de aquellos años, tengo que reconocer que fue una erupción que me supo realmente a poco. Hace cincuenta años la tecnología al uso no permitía difundir las noticias ni con la celeridad y ni con la calidad visual con la que se hace ahora. La información se difundía principalmente a través de los medios oficiales, Radio Nacional de España, la agencia EFE, TVE, y la prensa. Y aunque se publicaron espectaculares fotografías en blanco y negro, e incluso algunas filmaciones, debo reconocer que las primeras imágenes en color, diapositivas o películas, las vería meses después de finalizada la erupción. Primero en las conferencias que, ilustradas con numerosas diapositivas, impartió Telesforo Bravo en el Instituto de Estudios Hispánicos, y luego en los espléndidos reportajes a todo color que difundió el NO-DO.

La erupción de Teneguía, aconteció cerca de la costa en Fuencaliente (La Palma), no afectó a zonas habitadas y los daños ocasionados fueron relativamente modestos. Advertidos por Telesforo Bravo cuando se inició la erupción, permitió reunir en la isla a los principales vulcanólogos y geógrafos nacionales a los que también se unieron unos pocos especialistas extranjeros. Canarias tenía en Telesforo Bravo un experto geólogo conocedor del vulcanismo. Ya catedrático de Petrología y Geoquímica de la Universidad de La Laguna, era el único experto en volcanes que residía en Canarias y fue el primer científico en llegar al lugar de la erupción. Después se incorporó el equipo del Departamento de Petrología y Geoquímica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) bajo la dirección de José María Fúster Casas, junto con un grupo del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Fúster, además de liderar el trabajo científico, colaboró con las autoridades en el establecimiento de las medidas de seguridad. A José María Fúster y Telesforo Bravo les unían vínculos profesionales y personales, puesto que Fúster fue el director de tesis de Bravo, y siempre hubo colaboración en sus investigaciones en Canarias. El equipo de Fúster también contaba con jóvenes geólogos como Vicente Araña y Juan Carlos Carracedo.

A pesar del progreso conseguido por la ciencia en España, hoy se acepta que los conocimientos científicos y el apoyo tecnológico con los que contaron los estudiosos de la fase activa del volcán Teneguía fueron ciertamente modestos, si los comparamos con los conocimientos y los recursos que la tecnología ha puesto a disposición de los científicos durante las últimas décadas. De manera que la instrumentación que utilizaron fue bastante limitada y rudimentaria. La monitorización en el Teneguía fue más bien artesanal, con los medios del momento. Así, por ejemplo, los científicos llegaron a dormir cerca del volcán en sacos de dormir, no utilizaron la protección de las mascarillas e incluso se acercaron a zonas peligrosas, ahora

absolutamente vedadas. Pero consiguieron muestrear y estudiar las lavas. Observaron y documentaron un fenómeno al que se enfrentaban por primera vez de forma práctica en su vida profesional.

Por otra parte, el volcán se convirtió en un atractivo turístico, y se programaron numerosos vuelos *charter* para cubrir la demanda de pasajes de los miles de canarios y turistas que quisieron ver el volcán, y no encontraron billetes en las líneas regulares de Iberia y Transmediterránea. La erupción se convirtió en un espléndido espectáculo que se pudo contemplar plácidamente desde lo alto, en el modesto anfiteatro que ofrecía la carretera a Fuencaliente. Incluso algunos vuelos sobrevolaron el volcán para que los pasajeros pudieran observan al Teneguía en erupción.

Por 1971 no se disponía de ningún sistema de vigilancia volcánica, pero en los fondos marinos próximos a la isla de La Palma había una serie de sensores sísmicos que comenzaron a detectar a mediados de octubre temblores anómalos. Por los años sesenta, un sistema hidrófono de sensores vinculado a la Universidad de Columbia de Nueva York y supuestamente destinado a la detección de cetáceos fue emplazado en Puerto Naos. Después se conoció que la estación de Puerto Naos había sido instalada por el ejército de EEUU, con el consentimiento de las autoridades españolas, con el propósito de detectar el paso de submarinos nucleares soviéticos. De este modo, la detección temprana de la inminente erupción se debió a la CIA norteamericana que fue quien alertó al gobierno español. Probablemente esta fue la tecnología más puntera utilizada, aunque indirectamente, en el estudio del proceso eruptivo del Teneguía.

Consecuencia de los cambios en las políticas de investigación y ciencia desarrolladas a partir de la instauración de la democracia, cuando finalizó el siglo XX Canarias ya contaba con un significativo número de expertos que estudiaban desde centros situados en Canarias diferentes materias relacionadas con el vulcanismo de este archipiélago, abordadas desde sus diferentes especialidades. Se trata de científicos que han ido adquiriendo un reconocido prestigio y están adscritos a distintas instituciones públicas como las dos universidades canarias (ULL y ULPGC), el Instituto de Productos Naturales y Agrobiología del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), las delegaciones del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y el Instituto Geográfico Nacional (IGN), el Instituto Español de Oceanografía (IEO) y el Instituto Tecnológico de Energías Renovables (ITER).

En el ITER, su grupo volcanológico del Área de Medioambiente liderado por Nemesio Pérez, se ha ido especializando en la emisión difusa de gases en sistemas volcánicos, y apuesta decididamente por la vigilancia volcánica. Estudian las emisiones silenciosas de dióxido de carbono (CO_2) porque son importantes para evaluar la dinámica de los procesos de desgasificación, puesto que estas emanaciones experimentan cambios

significativos mucho antes de que ocurra una erupción. Es así como en las islas comienza a ser habitual la programación de actividades divulgativas que tienen como temática la vigilancia volcánica. Se comienza a asumir que, con mediciones sistemáticas y periódicas en los volcanes activos de diferentes parámetros físicos y químicos, se consigue conocer su comportamiento, y reconocer los cambios que puedan indicar una posible reactivación volcánica. Canarias es ahora un territorio densamente poblado y con un número elevado de infraestructuras, por lo que su vulnerabilidad se ha incrementado de forma notable. Además, tiene en el turismo su principal motor económico y el paisaje volcánico juega un papel destacado en el desarrollo de la actividad turística, pero para un apropiado funcionamiento de este sector, la seguridad, o simplemente el transporte aéreo, extremadamente vulnerable a la presencia de ceniza volcánica en la atmósfera, son fundamentales. De manera que la vigilancia volcánica permite disponer de un tiempo valioso para tomar decisiones que afectan a la seguridad de la población.

Investigadores e instituciones interesadas por el vulcanismo canario van generando publicaciones científicas que suponen un incremento valioso del conocimiento. Pero durante la crisis volcánica que aconteció en Tenerife en 2004, resultó patente la necesidad de coordinación cuando se traslada información científica a la sociedad. Durante la llamada «crisis de 2004» se detectaron en Tenerife señales sísmicas asociadas al movimiento de fluidos en el interior de la Tierra, y por lo tanto claramente de origen volcánico. Su localización en la zona cercana al Teide con mayor riesgo volcánico generó discusión y una prolongada polémica en la que intervinieron expertos, técnicos y políticos a propósito de si concurrían suficientes evidencias como para poner en marcha un plan de protección civil con el que gestionar la que podría resultar una erupción inminente.

Esta crisis evidenció la ausencia de preparación en la administración para gestionar adecuadamente este tipo de emergencias y también que la sociedad canaria parece no ser consciente del riesgo que supone vivir en un territorio volcánico activo. Los organismos públicos no actuaron de manera coordinada y eficiente al no contar con los planes necesarios para hacer frente a una situación de riesgo para la población. A la descoordinación entre las instituciones públicas se añadió la proliferación de informaciones contradictorias expresadas por diferentes vulcanólogos. Fueron opiniones discordantes que restaron credibilidad y afectaron al propio prestigio de la comunidad científica. Suscitaron la proliferación de bulos y rumores, provocaron incluso que cundiera cierto pánico y que algunos ciudadanos atemorizados hicieran acopio de agua y alimentos, cuando no había evidencias científicas que lo justificaran. Un escenario que podría haberse evitado si los científicos se hubieran coordinado y expresado con una sola voz. Sin embargo, las diferencias exhibidas entre organismos y las polémicas

entre científicos no acabarían al finalizar esta crisis. Un despropósito, porque el papel de la ciencia es esencial en el asesoramiento sobre los riesgos. La discusión en los medios de comunicación de sus diferentes interpretaciones, y no en los foros adecuados, generó confusión y desconcierto entre los ciudadanos, que en general carecen de criterio suficiente para discernir entre diferentes opiniones científicas. Más aún cuando los escasos argumentos expuestos son acompañados de descalificaciones personales.

Es así como el año 2004 pudo marcar un punto de inflexión para la vulcanología en Canarias. Los canarios fueron conscientes del riesgo volcánico, las instituciones se percataron de que no estaban preparadas para afrontar una crisis de tal calibre, y que era preciso la designación de un organismo que asumiera la responsabilidad de liderar la toma de decisiones. El Estado decidió otorgar la responsabilidad de la «observación, vigilancia y comunicación de la actividad volcánica en el territorio nacional y determinación de los riesgos asociados» al Instituto Geográfico Nacional (IGN), organismo público con sede en Madrid configurado como una dirección general, actualmente del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, pero con subsedes en cada una de las comunidades autónomas. Una decisión no falta de polémica puesto que el IGN, organismo de referencia en geodesia, cartografía y sismicidad, carecía de experiencia en vulcanismo.

En 2010 Canarias se dotó de un Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por Riesgo Volcánico (PEVOLCA), que nació para garantizar una respuesta rápida, eficaz, eficiente y coordinada, con el propósito de minimizar los posibles daños y permitir el restablecimiento de los servicios básicos para la población en el menor tiempo posible. La necesidad de este plan especial de emergencias de Protección Civil se justificó por las propias características de una emergencia volcánica, la alta probabilidad de tenga lugar, y las importantes consecuencias para la población, los bienes o el medioambiente, en un territorio reducido y densamente poblado.

En el preámbulo del decreto de creación del PEVOLCA se reconoció que las etapas de inactividad volcánica ocasionan que la población tenga una baja percepción del riesgo volcánico. Las islas tienen diferentes niveles de actividad eruptiva reciente, y distintas probabilidades de que en un futuro cercano se produzcan erupciones volcánicas. Además, el rápido crecimiento demográfico de las islas en las últimas décadas, el elevado tránsito de turistas, junto con la fragilidad y grado de dependencia de la red de servicios básicos, convierten al archipiélago en un territorio notablemente vulnerable, lo que obliga a prestar especial atención a las medidas de vigilancia y prevención. Un documento en el que se definieron la estructura orgánica, los procedimientos de actuación, de información a la población, y las fases de actuación.

También en 2010, el Cabildo de Tenerife creó el Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN) después de que el Senado (2005), el Parlamento de Canarias (2006) y el Congreso de los Diputados (2009) hubieran expresado por unanimidad la conveniencia de su creación. Lo constituyeron investigadores del Área de Medioambiente del Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER), con el objetivo de mejorar y optimizar la gestión del riesgo volcánico.

Un año después, la crisis sísmica y erupción de El Hierro volvió la mirada hacia esa isla, ahora protagonista de un proceso eruptivo que también fue seguido por los canarios con elevado interés. Los herreños habían soportado, con inquietud y expectación, las incomodidades y sobresaltos de la etapa sísmica previa a la erupción, que había alterado el placentero ritmo de vida de la isla. Esperaban que una erupción volcánica tranquila, similar a las del vulcanismo reciente de La Palma y Tenerife, podría convertirse en un singular espectáculo de la naturaleza y en un valioso reclamo turístico. El atractivo de una erupción volcánica y su adecuada gestión podían significar un nuevo aval para El Hierro, en su apuesta decidida por la sostenibilidad. Algunos vislumbraron en la erupción un nuevo y potente recurso con valiosas connotaciones culturales, paisajísticas, ecológicas y turísticas, que se podría sumar al que puede ser considerado el espacio marino más impresionante de Canarias: El Mar de Las Calmas. Sin embargo, la erupción submarina, localizada a unos 5 kilómetros al sur de La Restinga, dejó un regusto bastante amargo en los habitantes de El Hierro.

La erupción fue poco violenta y ocurrió en el fondo del mar, ocultando a los ojos de los herreños y de los potenciales visitantes, la belleza salvaje de un espectáculo de estas características. Afectó de lleno al Mar de Las Calmas y a todas las actividades pesqueras, comerciales y turísticas de La Restinga. La crisis volcánica provocó que se procediera a la evacuación de La Restinga y a la prohibición de las actividades pesqueras y subacuáticas. Una extensa mancha verdosa, debida a las emanaciones sulfúreas, se extendió por el mar al sur de la isla, con fragmentos de lava humeante en suspensión y miles de peces muertos arrojados a la costa. Lo que inicialmente se esperó como un incentivo de atracción turística se fue transformado en una pesadilla, que ocasionó pérdidas económicas elevadas debido a la paralización de la actividad económica. La erupción afectó a su patrimonio natural más preciado y al sector turístico que había apostado por la calidad en el buceo y las actividades subacuáticas. Afortunadamente, todo el proceso eruptivo se cerró sin tener que lamentar daños personales. Después de cinco meses de erupción se configuró un edificio volcánico submarino con cima a 89 metros bajo el nivel del mar, que en 2016 fue oficialmente denominado volcán Tagoro.

El recién aprobado PEVOLCA se estrenó en esta nueva crisis volcánica. El Comité Científico estuvo formado por representantes del IGN y el CSIC,

y no integró otros organismos como las universidades canarias, el IGME o el INVOLCAN. La exclusividad otorgada a estos organismos levantó suspicacias en el resto de instituciones científicas. De manera que las rencillas y enconos entre instituciones y personas fueron nuevamente obstáculos para realizar y trasmitir un análisis correcto de la situación. Las tensiones entre los científicos llegaron a los medios de comunicación que se hicieron eco, con titulares del tipo «Fisura entre los científicos que vigilan el volcán» o de «Guerra abierta entre los vulcanólogos en El Hierro». La multiplicidad de declaraciones contradictorias expresadas por científicos y expertos que ya provocó sonrojo durante la crisis del 2004, continuó vigente durante la erupción de El Hierro.

Aparte de los organismos ya citados otros centros o laboratorios de investigación de Canarias no fueron tenidos en cuenta. No se invitó a instituciones y expertos en oceanografía y biología marina. No se previó disponer de un barco equipado con el instrumental necesario para estudiar directamente la erupción. De modo que algunos medios calificaron la gestión como manifiestamente mejorable y señalaron que la deficiente actuación del Comité Científico condicionó la toma de decisiones por el PEVOLCA. Resultó evidente la falta de cooperación entre las distintas instituciones científicas y la escasa integración de los recursos técnicos disponibles. A pesar de esta perfectible gestión de cara a la sociedad, los estudios científicos llevados a cabo antes, durante y después de la erupción, generaron valiosos avances en el conocimiento y permitieron la publicación de decenas de artículos científicos en prestigiosas revistas de ámbito internacional. De modo, que la erupción de El Hierro fue una fuente de excelente información sobre el vulcanismo canario, principalmente en su vertiente submarina, y de sus efectos sobre la biota marina.

En 2018 Canarias aprobó un nuevo PEVOLCA para adaptarlo a la legislación nacional, incluyendo sustanciales mejoras tras las evidentes deficiencias detectadas en la gestión de la crisis de Tenerife en 2004 y la erupción de El Hierro en 2011. Entre otras cuestiones se estableció la composición del Comité Científico de Evaluación y Seguimiento de Fenómenos Volcánicos (CCES), que contaría con un representante de las siguientes instituciones: Instituto Geográfico Nacional (IGN), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), cada una de las Universidades Públicas de Canarias (ULL y ULPGC), Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN), Instituto Geológico y Minero de España (IGME), e Instituto Español de Oceanografía (IEO). Incluyó también normas de funcionamiento para el comité, que tendría un representante único y una sola voz.

Cuando estaba finalizando el verano de 2021, y todavía se mantenían restricciones provocadas por la emergencia sanitaria de la COVID-19, la isla de La Palma comenzó a mostrar signos evidentes de reactivación de la

actividad volcánica. La Palma es la isla con mayor número de erupciones recientes y la erupción del Teneguía resultó tan inofensiva que invitaba a soñar con una erupción similar. Sin embargo, después de varios días con continuos enjambres de movimientos sísmicos y otras numerosas evidencias, los científicos presagiaron una inminente erupción que localizaron en Cumbre Vieja, próxima al municipio de El Paso.

El domingo 19 de septiembre a las 15:10 horas se inició la erupción en la Hoya de Tajogaite, en el municipio de El Paso. Radio Televisión Canaria (RTVC), que se había desplegado en la isla después de que el PEVOLCA activara una alerta de nivel amarillo anticipando una posible erupción, retransmitió el momento en directo al término del informativo, cuando una densa columna de gases se elevó en el aire, junto con el grito «¡volcán, volcán!» de una de sus reporteras. El despliegue informativo de RTVC permitió dar voz e imágenes a la que posiblemente haya sido la erupción más televisada de la historia. Se establecieron cámaras fijas, que monitorizaron y ofrecieron imágenes en directo y en abierto de forma continua durante toda la erupción, siendo el conducto de información oficial para el ciudadano de Canarias. El seguimiento de la erupción por RTVC fue reconocida con un Premio Ondas en 2021, y las imágenes han sido utilizadas por los científicos como una valiosa herramienta para documentar diferentes procesos de la erupción. El recuerdo de esas imágenes permite ahora rememorar aquellas jornadas. Al principio vividas entre la emoción y la curiosidad científica de ser testigos del impresionante fenómeno natural que ha permitido a lo largo de millones de años la génesis y construcción de los diferentes edificios insulares que hoy constituyen las islas Canarias. Después, con la inmensa tristeza y consternación al contemplar en directo como la lava fue arrasando barrios enteros, edificios, plazas, colegios, calles o huertas, arrebatando a muchos palmeros todo cuanto poseían. El fruto de una vida de trabajos y sacrificios, sepultando los sueños y los recuerdos que habían ido atesorando día a día, en el curso de los años.

Del primer día de la erupción recuerdo los cortes de carreteras y las primeras evacuaciones de vecinos de los barrios próximos, y de aquellos otros que podían quedar aislados si la lava cortaba las carreteras de acceso: Puerto Naos, La Bombilla, El Remo y Charco Verde. Las primeras coladas de lava comenzaron a cortar carreteras y alcanzaron las primeras casas. En menos de 48 horas una colada que avanzó a unos 120 metros por hora, alcanzó Todoque, mientras que hacia Las Manchas avanzó otra mucho más lenta. En los días siguientes la erupción entró en una fase más explosiva, con gran emisión de cenizas, con las coladas avanzando muy lentamente, pero ensanchando considerablemente su frente junto a Todoque. Se abrieron más bocas eruptivas, se evacuaron más barrios (Tajuya, Tacande de Abajo, y Tacande de Arriba), y la columna de cenizas alcanzó hasta 6 km de altura, dejando inoperativo el aeropuerto de La Palma. Cuando se cumplió una

semana del inicio de la erupción la colada de lava frente a Todoque se reactivó, sobrepasó el barrio, y las imágenes captaron el derrumbe del campanario de la iglesia de san Pío X. La pavorosa tragedia apenas había comenzado.

La segunda semana de erupción se inició con un llamativo cese de actividad que fue seguido por la emisión de una gran cantidad de lava menos viscosa que descendió a mayor velocidad ensanchando las coladas previas y afectando a construcciones que habían resistido hasta entonces. Al siguiente día la lava sobrepasó la montaña de Todoque, arrasó a su paso invernaderos de plataneras, cortó la carretera de la costa, y hacia las once de la noche llegó al mar en la playa de El Perdido, y comenzó a construir el primer delta lávico. Con posterioridad, otras dos coladas alcanzaron el mar.

A partir de este momento se fueron sucediendo aperturas de nuevas bocas de emisión en el edificio volcánico, derrumbes de las laderas del edificio, emisión de nuevas coladas que discurrieron sobre las anteriores o tomaron nuevas direcciones ampliando la superficie afectada y la destrucción de bienes. Se mantuvo la actividad sísmica y la emisión de inmensas cantidades de cenizas volcánicas. Y todos los días, hacia el mediodía, escuchamos la información que ofrecían los portavoces del PEVOLCA. Los rostros y las voces de Miguel Ángel Morcuende, director técnico del PEVOLCA, y de María José Blanco, directora del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en Canarias, y portavoz del Comité Científico del PEVOLCA, fueron los que nos ofrecieron la información oficial durante todo el proceso eruptivo.

La erupción generó un gran revuelo entre las instituciones científicas de todo el mundo, puesto que supuso una ocasión única para monitorizar este fenómeno como nunca antes se había hecho en España. La erupción congregó en La Palma a científicos de todo el planeta. Mas de un centenar de investigadores de una veintena de países y más de medio centenar de centros de investigación trabajaron en la isla durante la erupción. Decenas de investigadores aportaron su granito de arena desde sus respectivos campos de investigación. Esta emergencia volcánica sustentó una fluida colaboración entre los distintos organismos nacionales e internacionales. Esa colaboración permitió la rápida y completa respuesta que los científicos proporcionaron a las distintas instituciones (insular, autonómica y nacional), y a los habitantes de La Palma. Además, los científicos se prestaron en todo momento a facilitar información acerca de lo que estaba ocurriendo a los medios de información, en esta ocasión, sin discrepancias y sin enfrentamientos.

Las instituciones científicas nacionales que investigaron la erupción fueron el Instituto Geográfico Nacional (IGN), el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), el Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN), el Instituto Español de Oceanografía (IEO), el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), la Agencia Estatal de Meteorología

(AEMET) y las dos universidades canarias (ULL y ULPGC), a las que se añadieron grupos de investigación de diferentes universidades que colaboraron con algunas de las entidades previamente reseñadas. De centros europeos participaron activamente científicos de Italia, Alemania, Reino Unido, Francia, Portugal, Finlandia, Austria, Rusia, Suecia, Suiza y Bélgica; además de estadounidenses, mexicanos y japoneses. Y es que esta erupción volcánica, en un territorio de la Unión Europea, se brindó asequible para investigadores de todo el mundo, entre otras razones por la amplia oferta de transporte aéreo que comunica Canarias. Desde el punto de vista científico la erupción supuso una gran oportunidad para conocer mejor el vulcanismo de Canarias, y para investigar sobre en una amplia variedad de cuestiones asociadas a la erupción. Una fuente de conocimiento que se plasmará en numerosos artículos científicos. También permitió a muchas instituciones tener una mayor visibilidad fuera de España. Fue una gran oportunidad para ubicar a la ciencia canaria ante el resto del mundo, por su buen hacer en la gestión de una crisis tan compleja, y por la ingente cantidad de datos científicos que pudieron ser obtenidos durante la erupción.

Tajogaite fue la primera erupción urbana en territorio de la Unión Europea estudiada con medios modernos, y dejó numerosas lecciones, además de una verdadera avalancha de investigaciones que están viendo la luz de manera creciente. Supuso una oportunidad increíble para la ciencia española puesto que fue la primera vez que este país ha contado con la capacidad científica necesaria para aprovechar al máximo una erupción volcánica. Una erupción que, geofísica y geoquímicamente resultó correctamente caracterizada y cuyos materiales se pudieron muestrear de forma ordenada.

Fue una erupción del siglo XXI, en la que se contó con todo el conocimiento que se ha almacenado, y las metodologías, tecnologías e instrumentación científicas más punteras. Se utilizaron satélites y drones equipados con instrumentos que permitieron realizar mediciones en zonas inaccesibles. Científicos de diferentes ámbitos aportaron información desde sus respectivas especialidades. Científicos formados y con experiencia, que viajan por todo el mundo, que han estudiado otras erupciones y que contrastan sus resultados con colegas expertos en congresos internacionales. De sus conocimientos, de contar con la instrumentación adecuada y fruto de la discusión entre científicos de los datos obtenidos desde cada uno de sus ámbitos de investigación, nacieron los informes al PEVOLCA.

El 13 de diciembre de 2021 el tremor volcánico prácticamente desapareció y tras cuatro días sin actividad, los expertos apuntaron a un probable final del proceso eruptivo, que fue confirmado siete días después. La erupción concluyó después de 85 días. Finalizada la erupción, una frase de Miguel Ángel Morcuende, director técnico del PEVOLCA, sirve como una correcta síntesis: «Todos aprendimos mucho, y todo ha quedado para la

investigación y para la seguridad. Aprendieron los científicos y aprendimos los técnicos».

Al finalizar la erupción, el nuevo volcán carecía de nombre oficial, y los medios de comunicación e incluso los primeros artículos científicos publicados hicieron referencia a él como el volcán de Cumbre Vieja. Por tradición, en La Palma se da nombre a los nuevos volcanes bien por el lugar geográfico en el que se ha originado, de acuerdo con la topografía aborigen, o por el nombre del santo en cuya festividad comenzó la erupción. La propuesta de *Tajogaite*, nombre benahoarita del área en la que ocurrió la erupción (Hoya de Tajogaite), fue el nombre con más amplio apoyo popular en la isla en un proceso participativo no vinculante diseñado para dar nombre al nuevo volcán.

La XVIII Semana Científica Telesforo Bravo fue proyectada con el objetivo de remarcar las principales conclusiones que la ciencia ha podido obtener en los primeros estudios realizados sobre la erupción. Pero resulta incongruente no dedicar unos pocos párrafos en esta presentación a recordar la imponente tragedia humana que supuso la erupción, en la que sólo hubo que lamentar un fallecimiento, por inhalación de gases, cuando se retiraban cenizas en una vivienda. Es probable que una de las primeras enseñanzas que nos deje la erupción es que la expansión urbanística que ha ocurrido en las islas desde mediados del pasado siglo, ha reducido considerablemente la probabilidad de que una próxima erupción volcánica no afecte nuevamente a una zona urbanizada. Esta es una certeza que no debemos olvidar. Vivimos en un territorio volcánicamente activo, con evidente riesgo volcánico que debemos conocer y asumir. También que, a pesar de ese riesgo, existen otras muchas razones que compensan y hacen muy ventajoso habitar en un territorio volcánico como Canarias.

Después de casi tres meses de erupción, se calculó que el volcán había expulsado casi 160 millones de metros cúbicos de lava que cubrieron más de 1200 hectáreas de tierra, sepultando más de 70 kilómetros de carreteras y afectando a cerca de 3000 edificaciones (viviendas, cuartos de uso agrícola, fábricas y naves industriales, negocios de ocio y hostelería, colegios, templos y espacios de uso público). La cifra de daños a bienes superó los 842 millones de euros, principalmente en infraestructuras viarias, destrucción de cultivos y pérdidas en producción y destrucción de edificios. La erupción supuso la paralización económica de las zonas afectadas, por las propias pérdidas materiales o por la imposibilidad de acceder a centros de trabajo. Fueron particularmente devastadoras en el sector primario, con 370 hectáreas de cultivo arrasadas más muchas otras dañadas por las cenizas y la prohibición de faenar en el área de Tazacorte. El sector turístico, con la cancelación de más de 500 vuelos, cayó en visitas y pernoctaciones. Puerto Naos, su principal referente, íntegramente evacuado. Desde el punto de vista sanitario, secuelas en la salud respiratoria, ocular, dermatológica y mental de los

habitantes de la isla. El vulcanismo y sus consecuencias psicosociales por los múltiples estresores simultáneos en el tiempo a lo largo de tres meses, que involucran a las pérdidas (lugares, recuerdos, vecinos, el trabajo, la propiedad), el desarraigo (de raíces sociales, identidad personal, pérdida de sentido vital, cultural y social), y la incertidumbre (miedo e inquietud por el presente y un futuro desconocido, novedoso e imprevisible).

La declaración de situación de emergencia supuso la movilización inmediata del Gobierno de España, la Comunidad Autónoma de Canarias, el Cabildo Insular de La Palma y los Ayuntamientos de El Paso, Los Llanos de Aridane y Tazacorte. En los primeros días fueron evacuadas cerca de 5000 personas, cifra que se fue incrementando hasta superar las 7000. Muchas infraestructuras dañadas afectaron a la actividad agrícola. Como ejemplo, la lava inutilizó los canales norte-sur del agua para el regadío. Fue necesario un buque cisterna para garantizar el abastecimiento para el riego de las plataneras de la costa. Se instalaron máquinas desaladoras y realizaron obras de elevación e impulsión de caudales para el riego. Un buque de la Armada Española, trasladó diariamente a los agricultores desde el puerto de Tazacorte hasta las plataneras de la costa, sin comunicación terrestre tras la erupción.

Dedicar la Semana Científica a tratar el proceso eruptivo de La Palma, que había coincidido en el tiempo con el ciclo del año anterior, se postuló desde un principio como una temática obligada, más aún cuando estas jornadas llevan el nombre de Telesforo Bravo. También hubo unanimidad en mantener un enfoque exclusivamente desde la perspectiva científica, puesto que las terribles consecuencias económicas y humanitarias provocadas por la erupción en la población palmera, permitía abordarla desde diferentes puntos de vista. El objetivo era exponer y divulgar entre la población cuales son los principales logros conseguidos por la comunidad científica durante la monitorización de la erupción, o lo que es lo mismo, resaltar lo más relevante que hemos aprendido de la reciente erupción.

Con «*Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)*», lema elegido para la Semana Científica, pretendíamos conocer de primera mano los primeros resultados que se van obteniendo, y con ese propósito invitamos a científicos expertos en diferentes áreas (Petrología y Geoquímica, Geofísica o Vulcanología) que participaron activamente investigando la fase eruptiva, además de expertos en Biología, que analizan los efectos de la erupción sobre la biodiversidad terrestre o la colonización marina de los nuevos deltas lávicos ganados al mar. La programación de la Semana Científica se desarrolló en el salón de actos de la sede del IEHC, con sesiones diarias iniciadas a partir de las 18:00 horas durante la semana del 14 al 18 de noviembre. Como en ciclos previos, cada sesión fue retransmitida en directo a través de Facebook y el canal de YouTube del IEHC, y las grabaciones se conservan a disposición del público en la videoteca del IEHC (http://www.iehcan.com/publicaciones/videos/).

El ciclo se inició con la salutación de bienvenida por parte de Marco A. González Mesa, alcalde de Puerto de la Cruz y responsable del área de Cultura, quien destacó la importancia de poner en el debate y la reflexión la pasada erupción de La Palma que mantuvo en vilo a la población canaria. También felicitó al IEHC por su apuesta clara por hacer de la cultura una referencia, en este caso a través de la ciencia, la investigación y la educación. A continuación, Jaime Coello Bravo y Julio Afonso Carrillo presentaron la programación científica de esta nueva edición de la Semana Científica Telesforo Bravo, agradecieron a los diferentes conferenciantes su buena predisposición para aceptar la invitación para participar en el ciclo y la fidelidad de los muchos seguidores que siguen estas jornadas. Finalmente, y antes de dar paso a la primera conferencia, se realizó una breve presentación del libro «*Mujeres de la Ciencia*», que incluye los artículos de las cinco conferencias impartidas en el ciclo celebrado en 2021, y que como es tradicional, constituye el acto formal con el que se cierra la XVII Semana Científica, y se procede a la apertura de la XVIII edición.

Las conferencias que conformaron el programa de la XVIII Semana Científica Telesforo Bravo fueron las siguientes:

Lunes, 14 noviembre 2022.
Eumenio Ancochea: «Las rocas de la erupción de Cumbre Vieja 2021 y su variabilidad composicional».

Martes, 15 noviembre 2022.
Carlos Sangil: «Primeros organismos colonizadores en los deltas lávicos del volcán Tajogaite (La Palma, islas Canarias)».

Miércoles, 16 noviembre 2022.
Félix M. Medina: «El destino de la biodiversidad durante la reciente erupción volcánica de Tajogaite, La Palma».

Jueves, 17 noviembre 2022.
Luca D'Auria: «La vigilancia volcánica: una herramienta fundamental para la reducción del riesgo volcánico en Canarias».

Viernes, 18 noviembre 2022.
Nemesio M. Pérez: «Estrategia canaria para la reducción del riesgo volcánico: una necesidad».

El presente libro contiene los artículos elaborados por los propios ponentes, en los que se desarrollan los contenidos expuestos en cada una de estas conferencias.

A Eumenio Ancochea Soto, Catedrático de Petrología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid le correspondió iniciar el ciclo con una documentada exposición sobre las rocas originadas en la erupción y las variaciones en su composición. Nos explicó que los datos que comentaría fueron obtenidos por un grupo de investigadores de la Universidad Rey Juan Carlos (URJC), de la Fundación Telesforo Bravo – Juan Coello (FTB-JC) y de la Universidad Complutense de Madrid, coordinado por los responsables del Instituto Geológico y Minero de España, con el propósito de muestrear y analizar los materiales lávicos emitidos cada día. De acuerdo con Ancochea, conocer la composición de las rocas ayuda a deducir las características fisicoquímicas de los magmas, explicar el proceso eruptivo y predecir la dinámica eruptiva. De este modo, el muestreo diario fue importante para poder reconstruir la evolución de la erupción puesto que muchas de las coladas que se emitieron los primeros días fueron cubiertas por coladas posteriores haciéndolas inaccesibles. Nos detalló e ilustró los materiales rocosos emitidos por esta erupción estromboliana de magmas básicos: unos que son resultado del enfriamiento del magma (materiales lávicos), y otros que son expulsados fragmentados de forma explosiva por el volcán (materiales piroclásticos). Finalmente destacó la importancia del estudio petrográfico (microscópico) de las rocas que no sólo permite conocer su composición mineralógica, sino que además, por la morfología y tamaño de los minerales y de las relaciones entre ellos (textura) deducir cuál ha sido su historia de formación y los procesos que afectaron al magma a lo largo de su ascenso desde su zona de generación hasta la superficie.

A Carlos Sangil, doctor en Biología, profesor del área Botánica de la ULL y uno de los principales referentes en la investigación de la Biología Marina en Canarias, le correspondió participar en la segunda sesión. Su conferencia estuvo dedicada a exponernos los datos iniciales sobre el proyecto que está llevando a cabo con su equipo, relativo a la colonización por organismos marinos de los nuevos deltas lávicos originados por el volcán Tajogaite. Un proyecto en el que intervienen numerosos investigadores y que presenta la complejidad adicional de las campañas de muestreo a realizar en una zona aún de exclusión, para la que acceder requiere numerosas autorizaciones, además de hacerlas coincidir en el tiempo con la disponibilidad de los investigadores docentes y con el buen estado del mar. De acuerdo con Sangil, la colonización de los nuevos sustratos se está llevando a cabo por animales y plantas procedentes de zonas próximas no afectadas por la erupción, siguiendo dos estrategias. La de los organismos con gran capacidad de movilidad en fase adulta (peces), y los que la tienen en las fases larvarias (invertebrados) o diásporas (algas), lo que condiciona la velocidad con la que van a evolucionar las diferentes comunidades. Después de explicarnos las diferentes técnicas de muestreo empleadas, tanto

en el intermareal como en el submareal, nos presentó los primeros datos obtenidos de campañas realizadas cada dos meses en los que resulta muy evidente la rapidez con la que las especies pioneras se asentaron en los nuevos sustratos, y como progresivamente estas comunidades iniciales están siendo reemplazadas por otras más complejas. En la preparación del manuscrito para esta publicación Carlos Sangil ha contado con los miembros de su equipo de investigación que están participando en estos estudios (Daniel Álvarez-Canali, Javier Reyes, Julián Rodríguez, Julio Afonso-Carrillo, Sabin Liulea, Nereida Rancel-Rodríguez, Viviana Peña, Ana Tronholm, Yésica Concepción Marante, Fernando Dumpiérrez y Marta Sansón).

Félix M. Medina, doctor en Biología, técnico de la Unidad de Biodiversidad de la Consejería de Medio Ambiente del Cabildo de La Palma, intervino en la tercera sesión y dedicó su conferencia a explicarnos lo que había acontecido con la biodiversidad terrestre que se había visto directamente influenciada por los materiales expulsados durante la erupción. Medina nos explicó que la erupción supuso una oportunidad única para estudiar sus efectos sobre la biodiversidad, y que éstos nunca antes habían sido estudiados de forma simultánea a la fase eruptiva. La mayor parte de los trabajos científicos sobre la biodiversidad vinculados con el vulcanismo se han dedicado a examinar los procesos de regeneración de la vegetación afectada y a establecer la sucesión ecológica en los procesos de recolonización de los nuevos hábitats creados por el volcán, pero siempre basados en seguimientos llevados a cabo una vez finalizada la erupción. También desarrolló cómo fueron los primeros momentos, cómo se afrontó el estudio y seguimiento de la flora y fauna en una situación de emergencia, y nos explicó algunos de los resultados más relevantes obtenidos relativos a la flora y vegetación, invertebrados, saurios, aves y mamíferos. Los efectos de la perturbación provocada por la erupción volcánica en los ecosistemas naturales fueron graduales, disminuyendo al aumentar la distancia al punto de emisión, debido a la disminución del espesor de cenizas, de los gases emitidos y de los efectos directos de las coladas de lava. En la preparación del manuscrito para esta publicación Félix M. Medina ha contado con el resto de investigadores que están participando en estos estudios (María Guerrero-Campos, Joaquín J. Quirós Priego, Rafael García Becerra, Silvia Fajardo, Patricia Marrero y Manuel Nogales).

Luca D'Auria, doctor en Geofísica, director del Área de Vigilancia Volcánica del Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN), que ha llevado a cabo una intensa actividad investigadora durante la reciente erupción de La Palma, intervino en la cuarta jornada. Nos explicó que la vigilancia volcánica constituye una herramienta fundamental para la reducción del riesgo volcánico, puesto que permite prevenir las erupciones, hacer el seguimiento de la actividad eruptiva y entender mejor como

funcionan los volcanes. Este proceso de vigilancia se realiza con la medición de diferentes parámetros físicos y químicos en estaciones permanentes, por teledetección o por campañas periódicas, que informan de eventos sísmicos, deformación del terreno, emisión de gases, química de aguas subterráneas, o cambios de temperatura. La vigilancia afecta a las diferentes fases del volcán: la fase inter-eruptiva (que da información de base del volcán), la fase pre-eruptiva (permite prever la erupción), la fase sin-eruptiva (seguimiento y finalización de la erupción) y la fase post-eruptiva (peligros posteriores a la erupción). De acuerdo con D'Auria, la erupción de Tajogaite puede ser calificada como una erupción de récords debido a la brevedad de la fase pre-eruptiva, la superficie cubierta por la lava, los máximos de lava emitidos, el índice de explosividad, la alta emisión de SO_2, la larga duración, el número de bocas simultáneamente activas, el número y la intensidad de los sismos, o los tres deltas lávicos formados en la costa. El INVOLCAN cubrió durante todo el proceso eruptivo todo el espectro de actividades de vigilancia volcánica gracias a recursos propios y a colaboraciones nacionales e internacionales, y durante su exposición D'Auria nos fue documentando con datos la variación de diferentes parámetros durante las diferentes fases de la vigilancia, destacando principalmente aquellos que fueron obtenidos mediante técnicas novedosas que se utilizaron por primera vez para documentar esta erupción.

En la quinta sesión intervino Nemesio M. Pérez. Doctor en Geoquímica, vulcanólogo, coordinador científico del INVOLCAN, para explicarnos la necesidad de que Canarias cuente con su propia estrategia para la reducción del riesgo volcánico. Después de realizar un breve recorrido por el vulcanismo histórico de Canarias y resaltar que la reciente erupción de La Palma constituyó la erupción más importante en Europa en los últimos 75 años por los elevados daños ocasionados, nos explicó la elevada probabilidad de que tenga lugar otra erupción en los próximos 50 años, y que Tenerife y La Palma (por este orden) son las islas que cuentan con mayor probabilidad. Para Pérez el riesgo volcánico se ha incrementado en Canarias, no porque los procesos eruptivos sean ahora más frecuentes, sino debido al exponencial crecimiento de la población que puede convertir cualquier evento volcánico en catastrófico. Para reducir el riesgo volcánico es necesario dotarse de mapas de peligrosidad volcánica (para mejor uso del territorio), un programa multidisciplinar para la vigilancia volcánica (red de toma de datos) y planes de emergencia (para educar a la población ante el fenómeno volcánico y minimizar las pérdidas en vidas). Seguidamente Pérez pasó a detallar el largo camino recorrido por la histórica reivindicación que persigue dotar a Canarias de un instituto volcanológico, iniciada tras la erupción del Chinyero en 1909, para finalizar señalando algunos de los problemas que dificultan la gestión del riesgo volcánico en Canarias (pobre percepción por la sociedad, falta de compromiso de algunas administraciones, falta de coordinación entre

los grupos de investigación que trabajan en la gestión del riesgo volcánico, ausencia de programas educativos, o presiones del sector turístico para evitar hablar de este tema).

El presente libro se ha hecho posible gracias a la valiosa colaboración de los conferenciantes, que aceptaron con agrado la invitación para participar en la Semana Científica, y preparar posteriormente los artículos aquí incluidos. La financiación, imprescindible tanto para la celebración de la Semana Científica como para la publicación del libro fue aportada por el GOBIERNO DE CANARIAS, el CABILDO DE TENERIFE y el AYUNTAMIENTO DE PUERTO DE LA CRUZ.

Como en los libros anteriores de esta colección, el diseño de la portada y documento de preimpresión son resultado de la altruista colaboración que JAVIER FIGUEROA ha mantenido desde su inicio con esta iniciativa editorial del IEHC. Para la organización del ciclo de conferencias la labor de IRIS BARBUZANO DELGADO fue fundamental, tanto en el diseño gráfico de la programación, como en la gestión administrativa relacionada con la Semana Científica y la publicación del libro. Finalmente, ALEJANDRO AMADOR (Puerto Informática) fue el responsable de la retransmisión y grabación de cada una de las sesiones, que incrementan significativamente la difusión del ciclo de conferencias, dadas las limitaciones de aforo del salón de actos.

El seguimiento de estas jornadas por el público, tanto de manera presencial en salón de actos del IEHC o en directo en las retransmisiones de cada una de las conferencias, así como, el elevado número de visualizaciones contabilizadas de los videos después de depositados en la videoteca del instituto, demuestran el interés y el cariño con que cada año es acogido este ciclo ya convertido en un clásico del mes de noviembre. El agradecimiento del IEHC a todos los seguidores.

Como en libros anteriores, queremos dejar constancia de que con esta publicación se mantiene el compromiso inicial de este instituto de dedicar su Semana Científica a la divulgación de la ciencia, rindiendo simultáneamente reconocimiento al profesor Telesforo Bravo.

Julio Afonso Carrillo
Vicepresidente de Asuntos Científicos del IEHC

ÍNDICE

Págs.

1. **Las rocas de la erupción de Cumbre Vieja 2021 y su variabilidad composicional,**
por EUMENIO ANCOCHEA SOTO ..... 25 – 61

2. **Primeros colonizadores en los deltas lávicos del volcán Tajogaite (La Palma, islas Canarias),**
por CARLOS SANGIL, D. ÁLVAREZ-CANALI, J. REYES, J. RODRÍGUEZ, J. AFONSO-CARRILLO, S. LIULEA, N. RANCEL-RODRÍGUEZ, V. PEÑA, A. TRONHOLM, Y. CONCEPCIÓN MARANTE, F. DUMPIÉRREZ & M. SANSÓN..... 63 – 116

3. **El destino de la biodiversidad durante la reciente erupción volcánica de Tajogaite, La Palma: investigando un evento natural catastrófico,**
por FÉLIX M. MEDINA, M. GUERRERO-CAMPOS, J.J. QUIRÓS PRIEGO, R. GARCÍA BECERRA, S. FAJARDO, P. MARRERO & M. NOGALES ..... 117 – 151

4. **La vigilancia volcánica: una herramienta fundamental para la reducción del riesgo volcánico en Canarias,**
por LUCA D'AURIA..... 153 – 190

5. **Estrategia canaria para la reducción del riesgo volcánico: una necesidad,**
por NEMESIO M. PÉREZ..... 191 – 229

1. Las rocas de la erupción de Cumbre Vieja 2021 y su variabilidad composicional

Eumenio Ancochea Soto

Catedrático de Petrología y Geoquímica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid
anco@ucm.es

En primer lugar, agradecer al Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias y a Julio Afonso que me hayan invitado a participar, por segunda vez, en una «Semana Científica Telesforo Bravo». En este caso para analizar algunos aspectos de la erupción de La Palma de 2021.

La reciente erupción de La Palma es sólo el último episodio de la historia geológica de la isla, pero nos ha proporcionado claves para poder entender mejor su evolución anterior. Los datos sobre esta erupción que se exponen a continuación han sido obtenidos por un grupo de investigadores de la Universidad Rey Juan Carlos (URJC), de la Fundación Telesforo Bravo – Juan Coello (FTB-JC) y de la Universidad Complutense (UCM), que juntaron sus esfuerzos para ayudar durante la emergencia en los aspectos relacionados con la geología y la petrología de la erupción.

Introducción

La erupción de Las Palma de 2021 ha sido una ocasión única para que importantes grupos de científicos de diferentes campos, con distintos enfoques y con distintos objetivos, trabajaran todos centrados en el estudio de un único episodio volcánico. Este hecho está permitiendo profundizar mucho más en el conocimiento de este tipo de procesos y comprender mejor

cómo afectan a la naturaleza y a la vida de las islas Canarias y de otras islas de origen similar. Las conferencias de esta Semana son un ejemplo de ello. (Afonso-Carrillo, 2023).

Durante la emergencia volcánica hemos estado pendientes de los sismos, de la nube eruptiva, de los gases y también de los materiales no gaseosos emitidos por el volcán, porque todos ellos proporcionaban una información imprescindible para que los organismos competentes pudieran tomar las decisiones pertinentes. Nuestro grupo, coordinado por los responsables del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), nos ocupamos de muestrear y analizar esencialmente los materiales lávicos emitidos cada día (Figs 1 y 2). Conocer la composición de las rocas ayudaba a deducir las características fisicoquímicas de los magmas (temperatura, viscosidad, densidad…) y a tener una idea de cuál podía ser el proceso eruptivo esperable. Del mismo modo, era básico controlar las posibles variaciones en la composición a lo largo de la erupción, por si pudieran tener implicaciones en la dinámica eruptiva.

Fig. 1. De izquierda a derecha Raquel Herrera (URJC), Eumenio Ancochea (UCM) y Álvaro Márquez (UCM) con una muestra de la colada en Todoque (23/09/2021).

Una vez finalizada la erupción se ha demostrado que ese muestreo diario no fue sólo importante durante la emergencia, sino que ha sido imprescindible para poder reconstruir la evolución del proceso eruptivo. Muchas de las coladas que se emitieron los primeros días han sido cubiertas por coladas posteriores y hoy día es prácticamente imposible muestrearlas o

muestrearlas con la seguridad de saber el día exacto en que se emitieron. Si no se hubiera hecho ese muestreo se habría perdido una información indispensable.

En la conferencia nos centraremos en dar a conocer aspectos de las rocas en los que otro tipo de comunicaciones científicas no se detienen. Expondremos primero, brevemente, cómo aparecen las rocas en el terreno, para, a continuación, comentar cuáles son sus principales características petrológicas, mineralógicas y geoquímicas y que nos dicen estas características composicionales sobre el origen de los magmas.

Fig. 2. Juan J. Coello-Bravo (FTB-JC) muestreando la colada todavía caliente del primer delta de lava en la playa de Los Guirres (06/10/2021).

Las rocas en el terreno

En general, en una erupción se forman dos grandes grupos de productos rocosos cuando se enfría y consolida el magma: los que son expulsados fragmentados por el volcán, como consecuencia de fenómenos explosivos (materiales o productos o rocas piroclásticas) y los que son emitidos por el volcán de forma más tranquila y continua, esencialmente como coladas de lava (materiales o productos o rocas lávicas). Los materiales de esta erupción fueron similares a los de cualquier otra erupción estromboliana de magmas

básicos y por lo tanto a los de cualquiera de las erupciones históricas canarias. Pasaremos revista de forma rápida a esos productos, resaltando aquellas características más significativas o específicas de las rocas que se formaron en este caso.

Productos piroclásticos

Los productos piroclásticos reciben diferentes denominaciones según su tamaño: bombas o bloques si superan los 64 mm, lapilli entre 2 mm y 64 mm y ceniza si su tamaño es inferior a 2 mm. En general, los fragmentos más gruesos caen más cerca del centro de emisión y cuanto más finos son, más lejos pueden llegar.

Bombas: Las bombas y bloques cayeron en las proximidades de las bocas eruptivas y su acumulación constituyó una parte fundamental del cono volcánico. Por estar incandescentes eran especialmente visibles por la noche, cuando se podía apreciar mejor que seguían trayectorias de transporte balísticas, que estaban fundidas cuando caían y que rodaban después por la ladera del volcán (Fig. 3). Llegaron a alcanzar distancias de hasta un kilómetro y medio del centro de emisión (PEVOLCA Informe del Comité Científico 211225).

Fig. 3. Bombas cayendo en la ladera N del cono y rodando y acumulándose en las zonas bajas. Atardecer del 13 de diciembre de 2021, a pocas horas de finalizar la erupción.

Cuando caían podían producir impactos destructivos en edificios y construcciones (Fig. 4) y, si caían sobre materiales blandos dar lugar a cráteres de impacto muy abundantes y llamativos (Figs 5 y 6).

Fig. 4. Impacto de una bomba en una tapia a unos 1200 m al NNO del cono principal (09/10/2021).

Fig. 5. Campo de bombas con las marcas de impacto, a unos 400 m al este del cono volcánico (12/12/2021).

Fig. 6. Bombas y cráteres de impacto sobre depósitos de lapilli (12/12/2021).

Las bombas llegaron a tener varios metros de tamaño (PEVOLCA Informes del Comité Científico 211003 y 211213) y rara vez tenían la morfología fusiforme característica de las bombas volcánicas que giran durante su trayectoria por el aire (Fig. 7). Su superficie exterior era rugosa y áspera (Fig. 8) y no eran frecuentes las superficies en «corteza de pan», tan habituales en bombas de otras erupciones. Esa superficie rugosa era en ocasiones una costra escoriácea de algún centímetro que rodeaba una roca de la misma erupción, pero menos vesiculada y mucho más densa (Fig. 9). En algunos casos las bombas aún incandescentes rodaban por la ladera y se acumulaban en la base del cono (Fig. 10). A veces caían más fundidas, no producían estructuras de impacto y se aplastaban contra el suelo (bombas en «plasta de vaca», Fig. 11).

Lapilli: Los lapilli (2-64 mm) constituyen el material piroclástico más abundante en las zonas externas del cono volcánico (Fig. 12). Cabría destacar entre sus características más diferenciales la irregularidad de sus formas, el intenso color negro, el brillo vítreo, su gran vesicularidad y su fragilidad. Con frecuencia al caminar sobre él se rompían produciendo un sonido de vidrio roto. A veces, tenían formas alargadas, como bastoncillos o ramitas, pero siempre con terminaciones puntiagudas o espinosas (Figs 13 y 14).

Fig. 7. Bomba fusiforme en las proximidades del extremo oriental del cono. (13/12/2021).

Fig. 8. Bomba con superficie externa muy irregular y rugosa. (12/12/2021).

Fig. 9. Bomba y cráter de impacto. Se puede observar la costra rugosa muy vesiculada y el interior la roca más masiva (12/12/2021).

Fig.10. En el primer plano, huellas de impacto de bombas. En el pie del cono puede verse una acumulación de bombas que rodaron por la ladera (flecha). Foto tomada durante la parada de la erupción de la mañana del 12 de diciembre del 2021.

Fig. 11. Bomba en «plasta de vaca». Impactó sobre un lapilli fino (12/12/2021).

Fig. 12. Acumulación de capas de lapilli y cenizas en la zona de El Corazoncillo a unos 1200 m de distancia del cono volcánico principal.

Fig. 13. Aspecto general de un lapilli. El de la foto es de tamaño algo superior al máximo de lapilli (64 mm), pero es muy representativo de los mismos.

Fig. 14. Lapilli de tamaño medio (16 a 32 mm). Se puede apreciar la vesicularidad, color y brillo característicos y la forma alargada de alguno de ellos (13/11/2021).

Cenizas: El material piroclástico más fino son las cenizas (<2 mm). Su distribución está controlada por el viento. Cubrieron grandes extensiones, especialmente hacia el suroeste del volcán, arrastradas por los vientos alisios. Su espesor fue considerable hasta unos 6-7 km al suroeste del cono volcánico (Figs 15 y 16).

Las cenizas constituyeron un importante problema para las edificaciones, para los cultivos (Fig. 16) y para la vida diaria de la población, causando molestias en la piel, ojos y vías respiratorias. El examen al microscopio electrónico nos permite ver la morfología ampliada de los granos de ceniza, su gran vesicularidad, rugosidad y aspereza, ilustrándonos claramente sobre los daños que podían causar en las personas (Fig. 17).

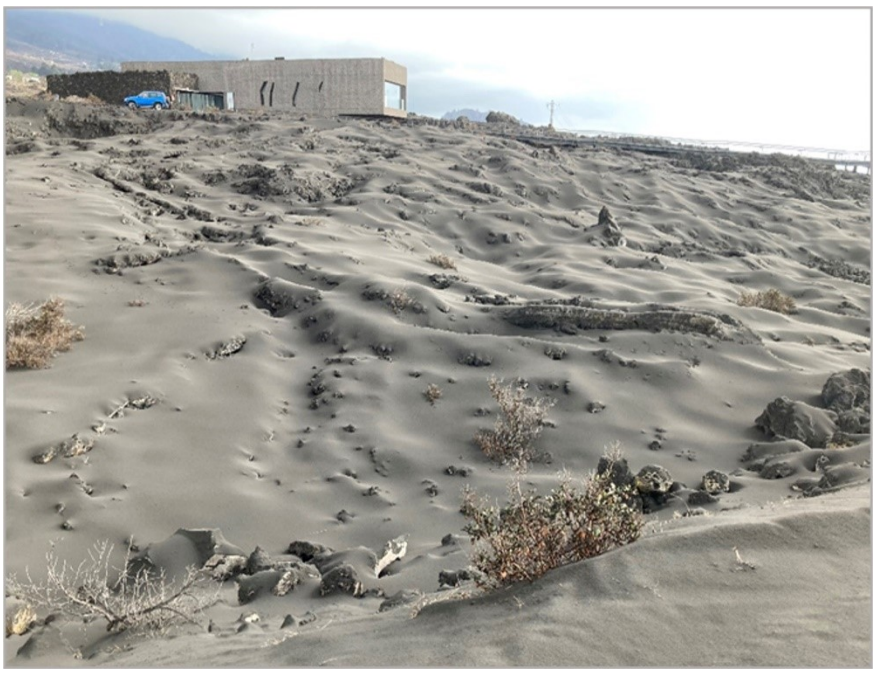


Fig. 15. Coladas de la erupción del San Juan (1949), cubiertas de cenizas, junto al Centro de Interpretación Caños de Fuego (12/10/2021).

Coladas de lava

Las coladas de lava fueron las que causaron mayor destrucción recorriendo los 6-7 km que separaban las bocas de salida del mar y cubriendo todo a su paso. Su composición no varió mucho, pero sus características sí fueron diferentes a lo largo de la erupción y a lo largo de su recorrido, puesto que al irse alejando de la boca eruptiva se enfriaban, aumentando su

viscosidad y variando su tipología. Aunque mayoritariamente fueron lavas «aa», en los frentes, y sobre todo los primeros días, eran coladas en bloques, de gran espesor y de avance muy lento (pocos metros por hora) (Figs 18-20).

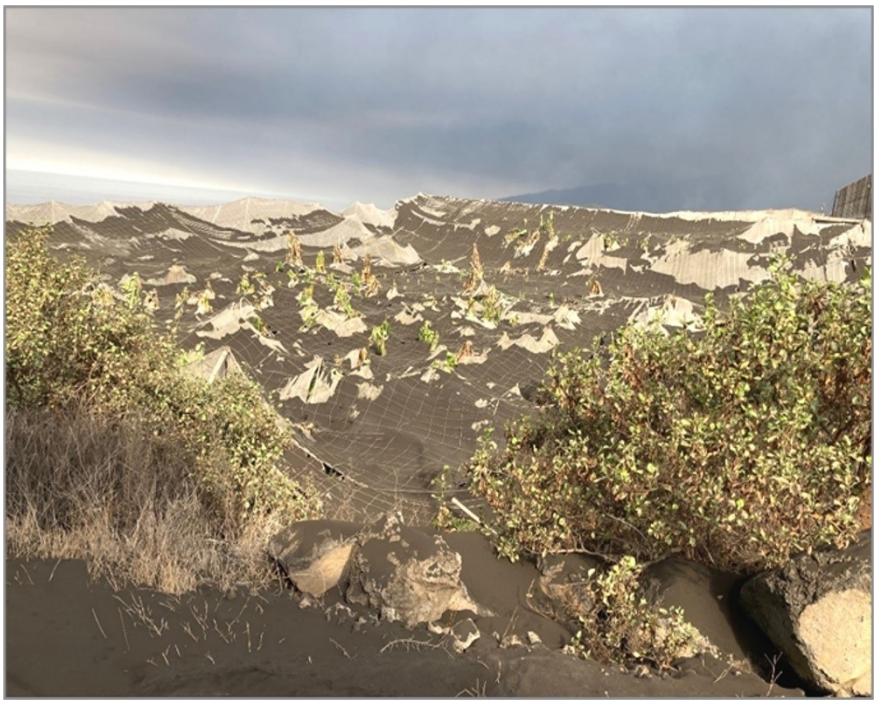


Fig. 16. Techo de invernaderos hundidos por el peso de las cenizas en las proximidades de Puerto Naos, a 4,5 km del cono del volcán (noviembre 2021).

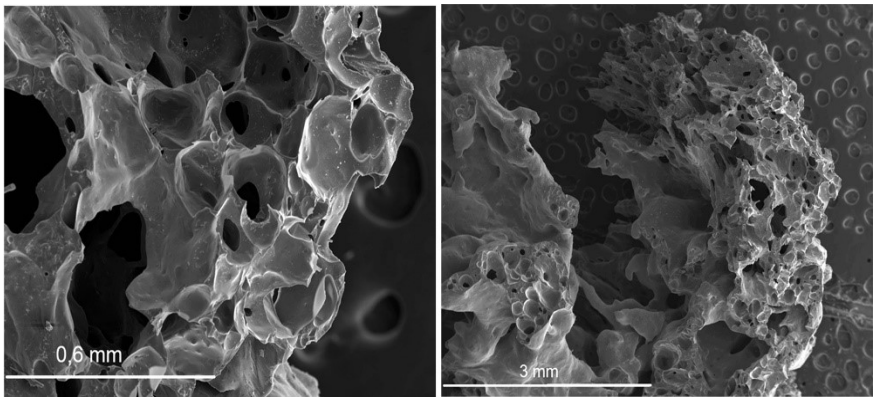


Fig. 17. Imágenes de electrones secundarios de las cenizas de los primeros días de la erupción (Unidad de Técnicas Geológicas, CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueometría Universidad Complutense de Madrid y Arroyo *et al*., 2021).

Fig. 18. Frente de colada en bloques en Todoque, en los primeros días de la erupción (26/09/2021).

Fig. 19. Colada de lava de gran espesor que cubrió una parte de El Corazoncillo los primeros días de la erupción. En la foto, hecha desde Montaña Cogote, se aprecia su gran espesor en comparación con las casas. Su morfología externa aparece suavizada por depósitos posteriores de lapilli y de ceniza (06/11/2021).

Fig. 20. Primeras coladas en bloques, casi detenidas en Todoque (24/09/2021).

Fig. 21. Coladas «aa» avanzando lentamente en la carretera de Tajuya (13/10/2021).

Otras veces, días más tardes, eran coladas «aa» de espesores mucho menores, que avanzaban más rápidamente, sin grandes bloques, pero siempre con una escoria bien desarrollada en la parte superior y frontal de la misma (Figs 21 y 22).

Fig. 22. Escoria de techo y frontal de la colada «aa» de la figura 21 (13/10/2021).

También se emitieron coladas pahoehoe, pero en menos ocasiones. Fueron frecuentes en algunas bocas en la zona norte del campo de lavas y especialmente en el borde sur, donde a finales de noviembre se emitieron por centros marginales, alejados del cono principal. Su espesor es mucho menor que el de las demás coladas. Su superficie externa presentó distintas morfologías típicas de este tipo de coladas: en placas, en tripas, en dedos, cordadas…, pero siempre con la superficie áspera, rugosa o espinosa (Figs 23-25).

Fig. 23. Colada pahoehoe en El Corazoncillo, descendiendo de las zonas altas, junto al cono principal.

Fig. 24. Aspecto general de la superficie de una colada pahoehoe en El Corazoncillo, suavizada por depósitos posteriores de ceniza (13/12/2021).

Fig. 25. Estructuras cordadas en las coladas pahoehoe de El Corazoncillo parcialmente cubiertas por cenizas posteriores (12/12/2021).

Xenopómeces (restingolitas)

Durante la erupción se emitieron también fragmentos de rocas de carácter extraño al magma (xenolitos) y arrastrados al exterior por él. Entre ellos destacan unos fragmentos claros muy vesiculares y ligeros, similares a pómeces y análogos a los de la erupción de El Hierro de 2011 (Troll *et al*., 2011), que también habían aparecido en otras erupciones como la del Teneguía (Araña & Ibarrola, 1973) y que han sido denominados xenopómeces o restingolitas. Normalmente han tenido tamaño lapilli y estaban rodeados parcialmente por una costra negra del magma de la erupción. Fueron frecuentes durante el mes de octubre, en un área de unos 2 km alrededor de las bocas de emisión principales. Los más abundantes eran de color blanco, pero también los había de color gris (Fig. 26).

Composición de las rocas

El análisis de la composición de las rocas puede realizarse a diferentes escalas: en muestra de mano, al microscopio o con diferentes análisis

Fig. 26. Xenopómeces (restingolitas).

químicos. Durante la erupción el examen de las muestras de mano, aunque menos preciso, era una buena herramienta para conocer la composición de los magmas de forma rápida y detectar posibles cambios.

Las rocas de la erupción han tenido siempre colores negros o grises oscuros, con diferentes grados de vesicularidad y con pocos cristales visibles. En las rocas de los primeros días se reconocían cristales negros milimétricos que podían corresponder tanto a anfíboles, como a piroxenos (Fig. 27).

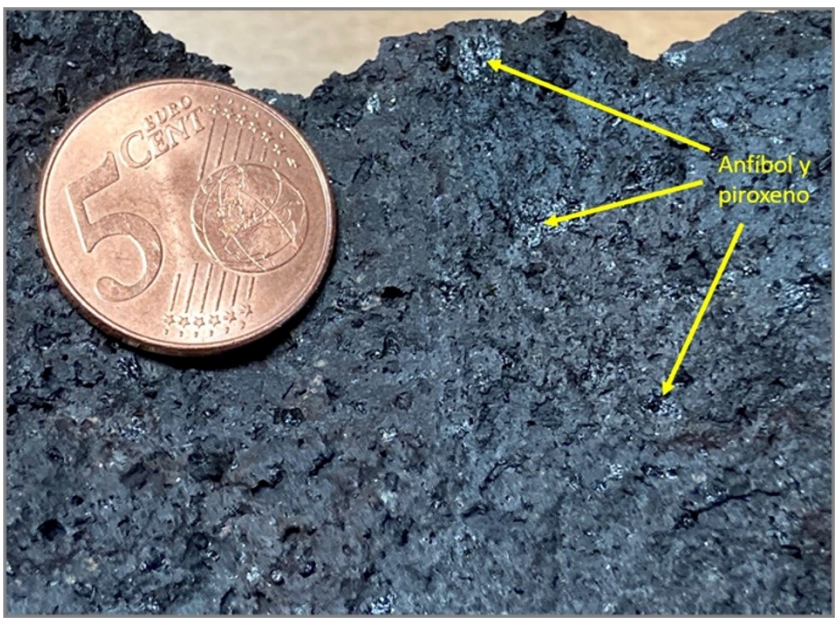


Fig. 27. Muestra de tefrita anfibólica, poco vesiculada de los primeros días de la erupción (23/09/2021).

Después cambió la composición, el anfíbol desapareció y aparecieron cristales de olivino, más fácilmente reconocibles (Fig. 28). Ocasionalmente se podían ver cristales de plagioclasas de hasta algún centímetro (Fig. 29). La vesicularidad aumentó claramente en las coladas pahoehoe (Fig. 30).

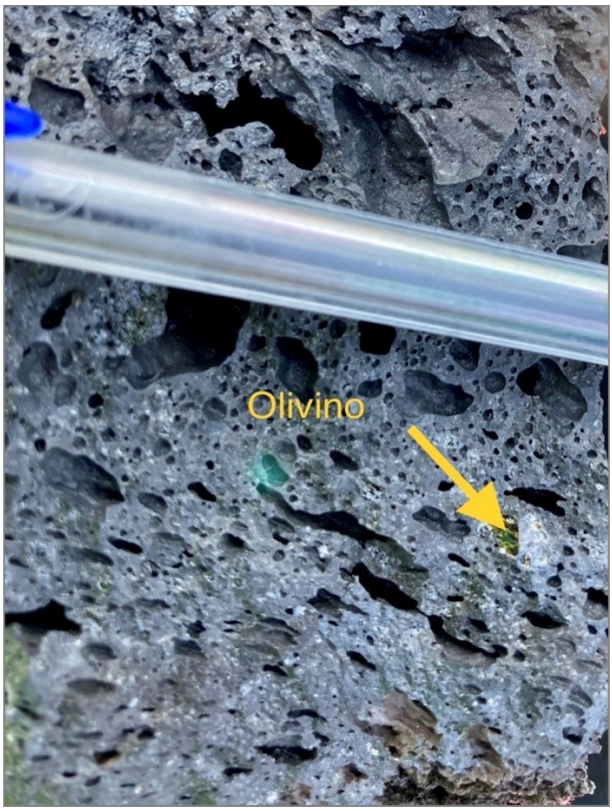


Fig. 28. Basanita piroxénico - olivínica vesiculada, con cristales visibles de olivino (06/10/2021).

La clasificación correcta de una roca volcánica debe hacerse a partir de su análisis químico, proyectando su contenido en SiO_2 y $Na_2O + K_2O$ en el Diagrama TAS de la IUGS (Le Maitre *et al*., 2002) (Fig. 31); pero ese análisis tarda días en obtenerse. Por eso, al principio de la erupción las rocas recibieron denominaciones poco precisas. Se hablaba bien de basanitas o bien de tefritas. En sentido estricto, por la mineralogía visible, no podían recibir ninguna de esas dos denominaciones, pues para eso haría falta que se vieran minerales de tipo feldespatoide (nefelina, haüyna…) y éstos no se observaban. Lo correcto, con el grado de conocimiento que se tenía en esos momentos, era haber denominado a las rocas: basaltos (basaltos anfibólicos,

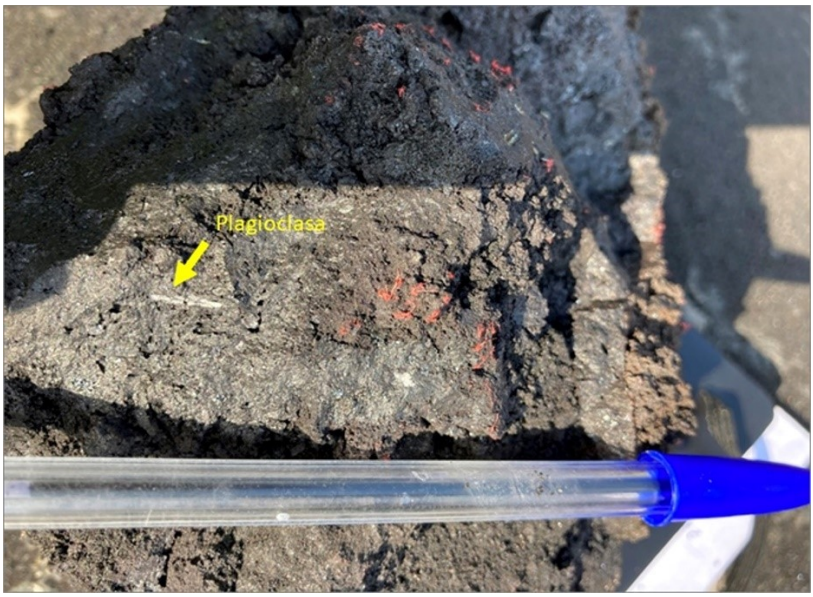


Fig. 29. Basanita piroxénico - olivínica, con un cristal centimétrico de plagioclasa (09/10/2021).

Fig. 30. Muestra de colada pahoehoe muy vesiculada (05/12/2021).

basaltos piroxénicos…), como se hizo, por ejemplo, con las rocas del Teneguía, que hoy sabemos que también eran basanitas y tefritas. Se utilizaron esas denominaciones porque, desde el punto de vista químico, los «basaltos», en La Palma, suelen ser tefritas o basanitas, no porque se tuviera certeza de que realmente lo fueran.

Como hemos mencionado, a lo largo de la erupción ha habido dos tipos rocosos: un Tipo 1, emitido durante los primeros días, que eran rocas con cristales visibles de piroxeno y anfíbol y después, hasta el final de la erupción, un Tipo 2: que eran rocas con cristales visibles de piroxeno y olivino. Lo mismo sucedió en la erupción del Teneguía (Araña & Fúster, 1974; Ibarrola, 1974), con la diferencia que, en esa ocasión, el Tipo 1 se emitió durante mucho más tiempo que el Tipo 2.

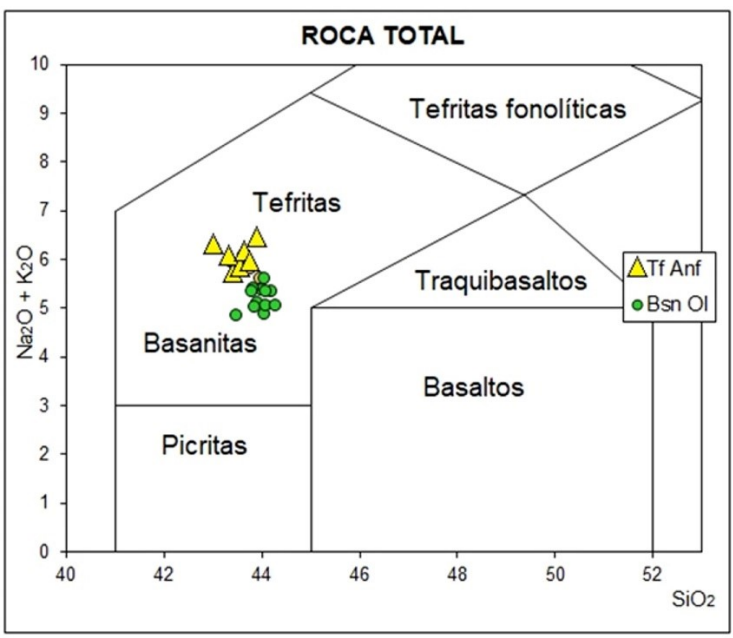


Fig. 31. Diagrama TAS de clasificación de las rocas volcánicas (sólo un sector del mismo) y proyección de las rocas de la erupción. Todas se proyectan en el campo de basanitas y tefritas. La diferencia entre ambas es que mientras las basanitas tienen olivino frecuente (>10%), en las tefritas éste es escaso (<10%). Triángulos: las rocas del Tipo 1 y círculos: las del Tipo 2.

Una vez realizados los análisis químicos se pudo comprobar (Fig. 31) que las rocas del Tipo 1 eran tefritas y las del Tipo 2 eran basanitas, eso, unido al tipo de minerales que aparecían con más frecuencia permite decir que las primeras son **tefritas piroxénico anfibólicas** y las segundas son **basanitas piroxénico olivínicas**.

Las rocas al microscopio: textura y mineralogía

La importancia del estudio petrográfico (microscópico) de las rocas radica en que no sólo permite conocer la composición mineralógica de las mismas, sino que también, a partir de la morfología y tamaño de los minerales y de las relaciones entre ellos (textura) deducir cuál ha sido su historia de formación y cuáles han sido los procesos que afectaron al magma a lo largo de su ascenso desde su zona de generación a la superficie. Eso es posible porque en las rocas volcánicas, el magma, al enfriarse rápidamente en la superficie terrestre, conserva las características que tenían esos minerales cuando estaban en profundidad en el manto o en la corteza terrestre.

En las rocas volcánicas podemos diferenciar unos minerales, los que denominamos fenocristales, que son los cristales de mayor tamaño (> 0,1 mm) que a veces, si son grandes, son visibles a simple vista y que están rodeados por una masa (que denominamos «matriz») de minerales más pequeños o de vidrio (Fig. 32).

Los fenocristales ya están en el magma que hace erupción. Han ido creciendo durante su ascenso o durante los momentos que han podido estar en reservorios magmáticos. Las variaciones que observamos en su composición o en su textura nos ayudan a identificar y caracterizar esos estadios de su crecimiento. La matriz y, a veces, el borde más externo de los fenocristales se forma en los últimos momentos de ascenso y enfriamiento del magma.

En las figuras 32 y 33 pueden verse dos ejemplos característicos de los dos tipos rocosos de la erupción.

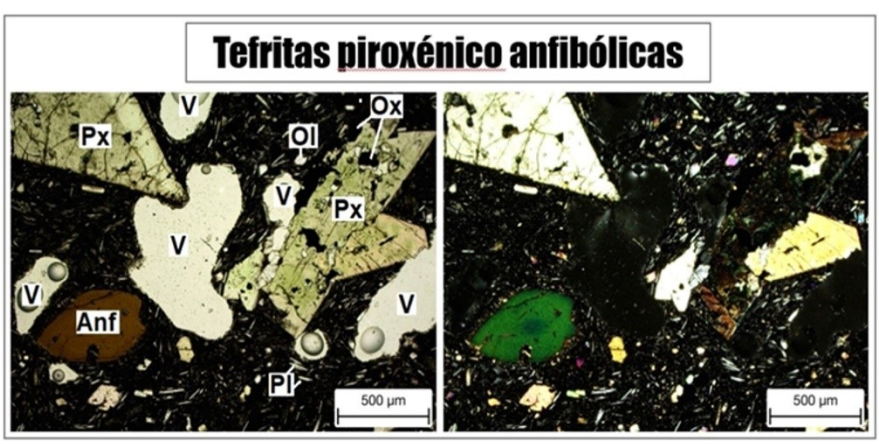


Fig. 32. Microfotografía de una tefrita piroxénico anfibólica. A la izquierda con polarizadores paralelos y a la derecha con polarizadores perpendiculares. Px: piroxeno; Anf: anfíbol; Pl: plagioclasa; Ol: olivino; Ox: óxidos de Fe y Ti; V. vesículas. Los cristales más grandes (fenocristales) están incluidos en una matriz con cristales más pequeños y vidrio (de color negro).

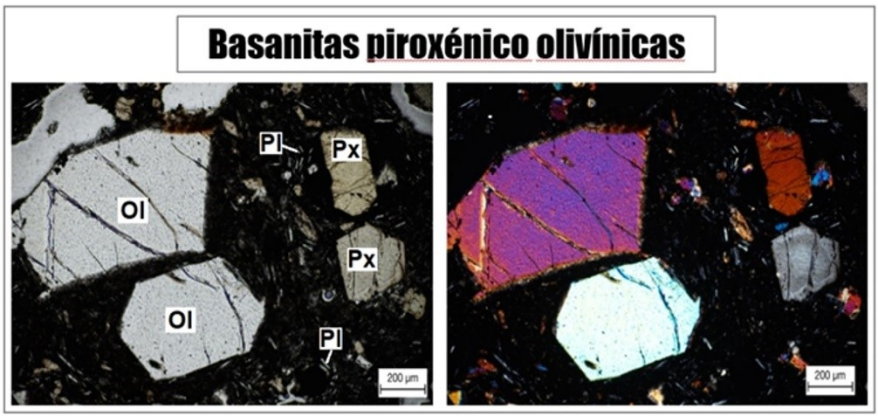


Fig. 33. Microfotografía de una basanita piroxénico olivínica. A la izquierda con polarizadores paralelos y a la derecha con polarizadores perpendiculares Ol: olivino; Px: piroxeno; Pl: plagioclasa.

Tanto en las basanitas, como en las tefritas la matriz es el componente más abundante (65-70%). Las vesículas constituyen de media el 15% en ambos tipos de rocas, pero las variaciones de unas muestras a otras son muy importantes. El contenido medio en fenocristales, excluidas las vesículas, es del 15% en tefritas y algo más del 20% en basanitas.

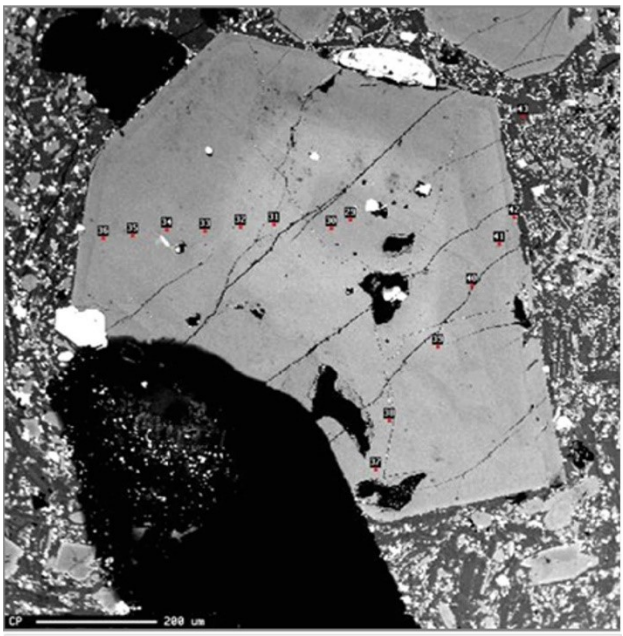
El piroxeno es el fenocristal predominante: del orden del 60% en el total de los fenocristales, similar en ambos tipos de rocas. En las tefritas el anfíbol es el segundo fenocristal en abundancia (≈ 19%) y en las basanitas lo es el olivino (≈ 28%). La plagioclasa es minoritaria en ambos tipos (≈ 5%).

Composición de los minerales

Así como las características texturales de los minerales se estudian mediante el microscopio polarizador, la composición química de los minerales se analiza mediante microsonda electrónica. De esa forma podemos conocer la composición química de cualquier punto dentro de un mineral (Fig. 34).

Los fenocristales más abundantes son de **piroxeno**. Se trata de un clinopiroxeno, normalmente de pocos milímetros, habitualmente sub-idiomorfo maclado y muy zonado (Figs 34 y 35).

Aunque se observan importantes variaciones composicionales dentro de un único cristal de piroxeno (Fig. 34), en términos generales son todos diópsidos (Fig. 36), sin que se aprecien variaciones de la composición de tefritas a basanitas, ni variaciones de la composición a lo largo de la erupción. La composición media de 500 análisis es Di_{50}-En_{37}-Fs_{13} (diópsido 50%, enstatita 37%, ferrosilita 13%).



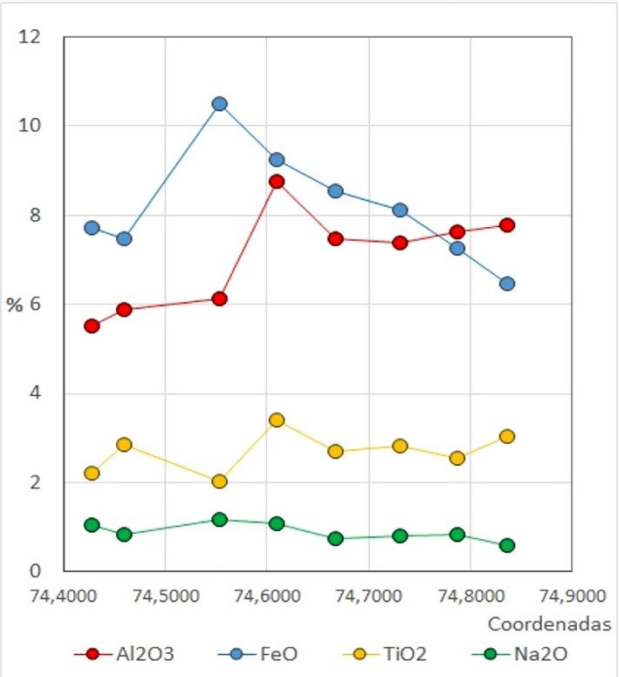


Fig. 34. Arriba: imagen de microsonda de un piroxeno. En él se pueden apreciar cambios de coloración, que reflejan cambios composicionales, que permiten conocer los distintos momentos de formación del cristal. Los puntos que aparecen dentro de él son los puntos en los que se han realizado los análisis. Abajo: variación del contenido en diferentes elementos en ese piroxeno.

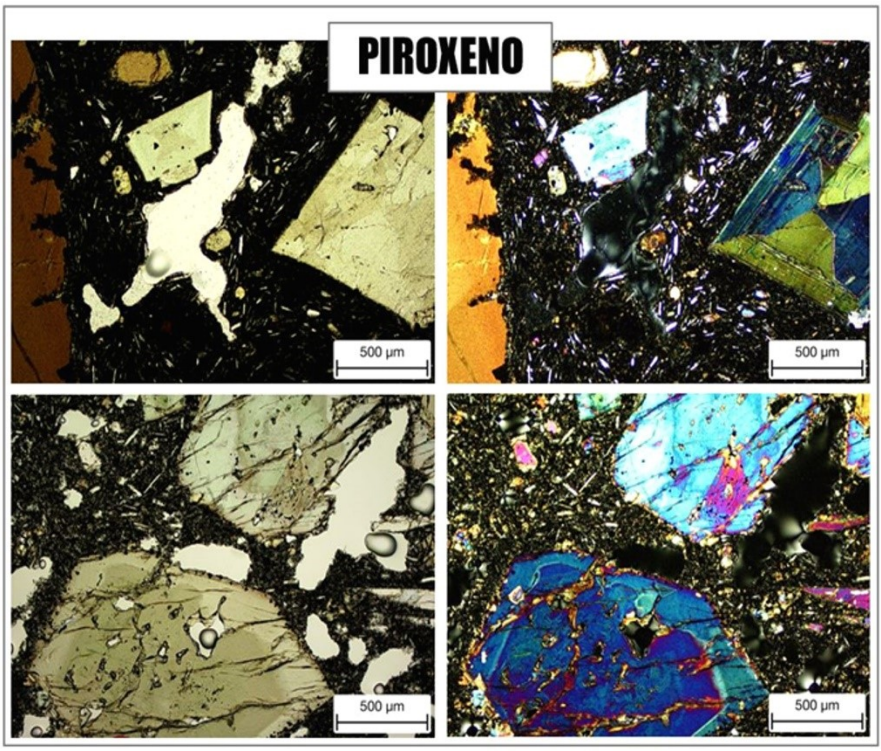


Fig. 35. Microfotografías de piroxenos (Px). A la izquierda con polarizadores paralelos y a la derecha con polarizadores cruzados (perpendiculares).

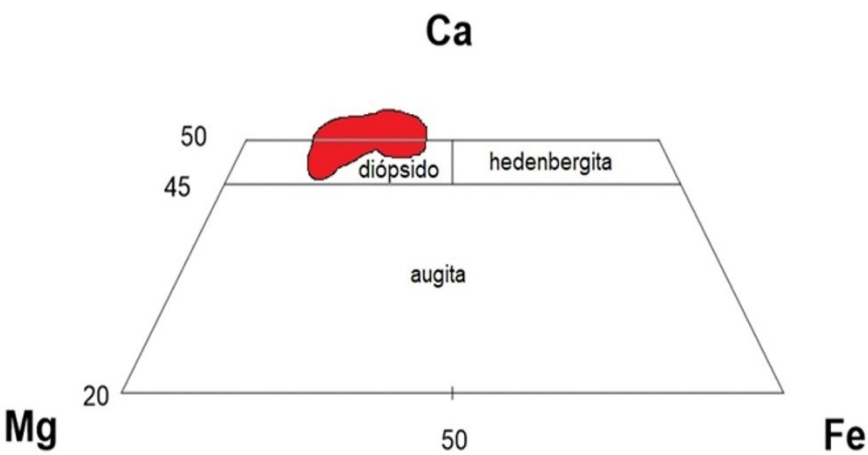


Fig. 36. Clasificación de los piroxenos. Proyección en el diagrama Mg-Ca-Fe.

El **anfíbol** es el segundo mineral en abundancia en las tefritas y aparece sólo esporádicamente en algunas basanitas. Tienen todos unos aspectos muy similares. Al microscopio aparecen esencialmente como fenocristales aislados anaranjados y ocasionalmente en agregados con los demás fenocristales habituales (clinopiroxeno y olivino). Los fenocristales tienen tamaños que varían de 0,3 µm a algunos milímetros. Son subidiomorfos a alotriomorfos, redondeados con bordes de reacción de 25 a 150 µm (Fig. 37). Composicionalmente todos son anfíboles cálcicos de tipo kaersutita (Leake *et al*., 2004).

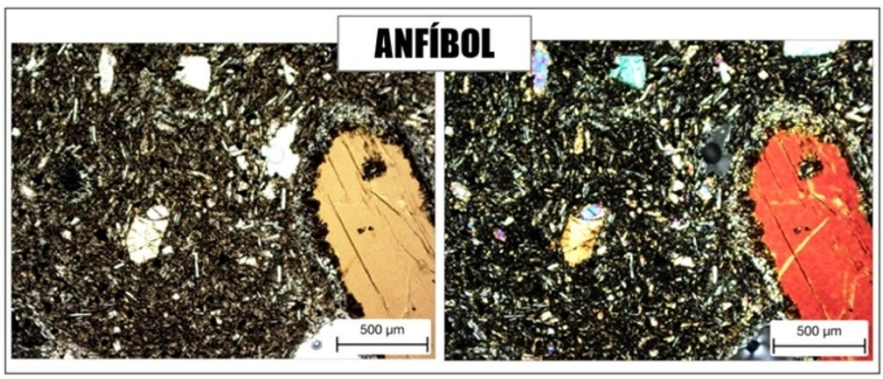


Fig. 37. Microfotografías de anfíboles (Anf) con bordes de reacción. A la izquierda con polarizadores paralelos y a la derecha con polarizadores cruzados (perpendiculares).

El olivino es el segundo fenocristal más abundante en las basanitas y es también frecuente en las tefritas. Es idiomorfo o subidiomorfo, en ocasiones con formas hexagonales. Su composición es la de forsterita: Fo_{78-85} y la media de los 200 análisis es: Fo_{82} (Fig. 38). Puede estar ligeramente zonado.

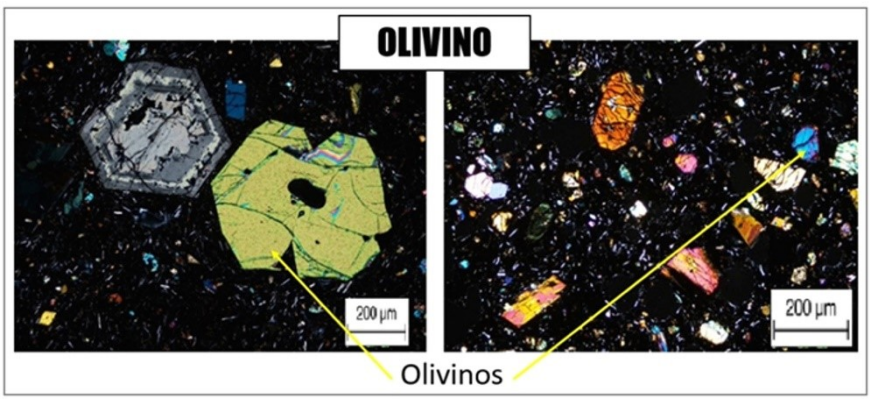


Fig. 38. Microfotografías de olivinos. Los cristales coloreados sin las flechas son esencialmente piroxenos. Polarizadores cruzados (perpendiculares).

Las plagioclasas aparecen siempre en la matriz, como bastones alargados en cristales muy pequeños (<100 µm). Es menos frecuente que se observen cristales de mayor tamaño, como fenocristales. Aun así, constituyen el cuarto fenocristal en abundancia. En los fenocristales se puede observar su maclado polisintético característico (Figs 29 y 39). Su composición es muy homogénea, son labradoritas, media (200 medidas): $An_{62}Ab_{36}Or_2$ (anortita 62%, albita 36%, ortosa 2%) y no hay diferencias a lo largo de la erupción (Fig. 40). Los fenocristales son ligeramente diferentes a los microlitos.

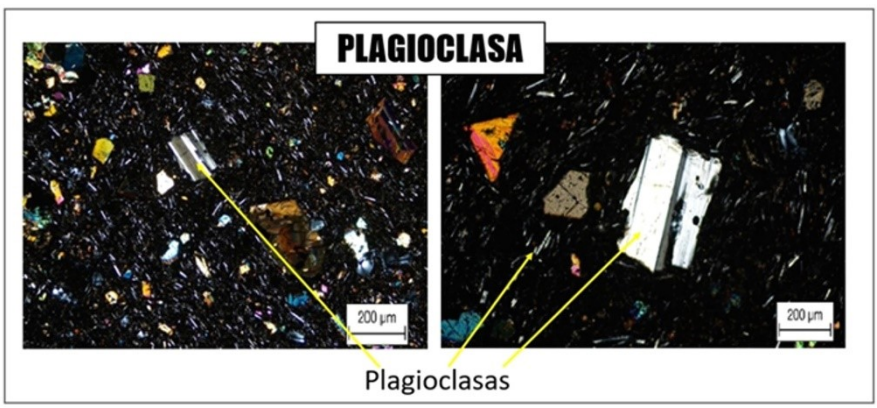


Fig. 39. Microfotografías de plagioclasas. En los cristales más grandes (fenocristales) se aprecia la macla polisintética. En la matriz aparecen como microlitos. Los cristales coloreados sin las flechas son esencialmente piroxenos. Polarizadores cruzados (perpendiculares).

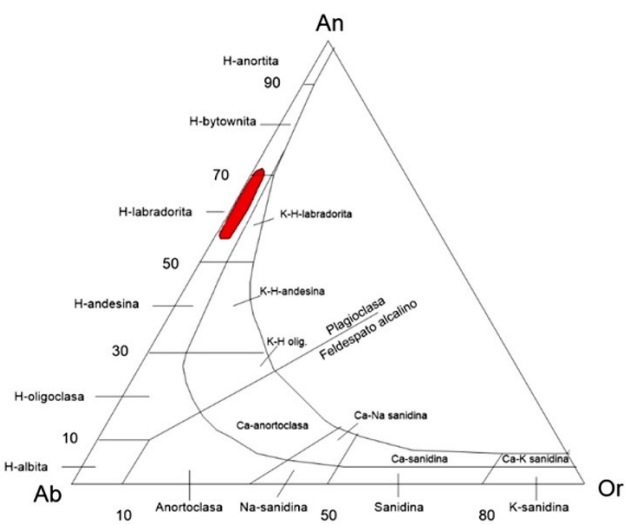


Fig. 40. Clasificación de las plagioclasas. Proyección en el diagrama Ab (albita) – An (anortita) – Or (ortosa).

Composición química de las rocas

Las características químicas de las rocas se utilizan en primer lugar, como hemos destacado, para clasificarlas. Todas las rocas de la erupción tienen un contenido en SiO_2 muy parecido: entre el 42,5% y el 44,5% del total en peso de la roca y un contenido en álcalis ($Na_2O + K_2O$) entre el 4,5% y el 6,5%, lo que indica que todas son basanitas o tefritas (Fig. 31).

Los contenidos medios (Tabla 1) evidencian algunas diferencias: el contenido medio en SiO_2 de las tefritas (43,6%) es casi igual que el de las basanitas (43,7%). En cambio, el contenido medio en álcalis es claramente superior en tefritas que en basanitas: 6,0% frente 5,1%. Lo mismo sucede con el Al_2O_3: 14,7% frente 13,5%. Por el contrario, los contenidos medios en MgO y CaO son más bajos en tefritas que en basanitas: MgO: 6,4% en tefritas frente a 8,0% en basanitas y CaO: 10,6% frente a 11,4% respectivamente. Todas estas diferencias, aunque escasas, son significativas e indican que las tefritas son claramente rocas más evolucionadas que las basanitas.

Tabla 1. Composición media (elementos mayores) de los dos tipos litológicos (datos de Pankhurst *et al*. 2021, Day *et al*. 2022 e Inéditos (IGME).

	Tefritas	Basanitas
SiO_2	43,6	43,7
Al_2O_3	14,7	13,5
$Fe_2O_{3(Tot)}$	13,3	13,4
MnO	0,2	0,2
MgO	6,4	8,0
CaO	10,6	11,4
Na_2O	4,2	3,6
K_2O	1,8	1,5
TiO_2	3,8	3,6
P_2O_5	1,0	0,8
LOI	-0,4	-0,5
Total	99,4	99,6

Composición y origen de las rocas

Las características composicionales de las rocas están siendo estudiadas en detalle por diferentes e importantes grupos de científicos de todo el mundo (p.e.: Day *et al*., 2022) y, entre ellos, por nuestro grupo (Ubide *et al*., 2022;

Ubide *et al*., 2023) y están obteniendo resultados muy interesantes e importantes, que se irán dando a conocer. Por eso, en este apartado nos limitaremos a hacer unas consideraciones de carácter muy general sobre diferentes aspectos genéticos y compararemos la composición de las rocas de la erupción de 2021 con el resto de las erupciones históricas de La Palma.

La proyección de la composición de las rocas en el diagrama TAS de la IUGS (Le Maitre *et al*., 2002) nos proporciona una información inicial, pero muy importante, sobre los magmas/rocas. El grado de alcalinidad de las rocas es un primer indicador de sus condiciones de formación. En el caso de la isla de La Palma (Fig. 41) la mayor parte de las rocas analizadas se proyecta en los campos de las rocas fuertemente alcalinas, lo que indica que se trata de magmas que se han formado por menor grado de fusión parcial y/o mayor profundidad que los de otras islas como Tenerife, Gomera, Lanzarote o Fuerteventura (Fig. 42).

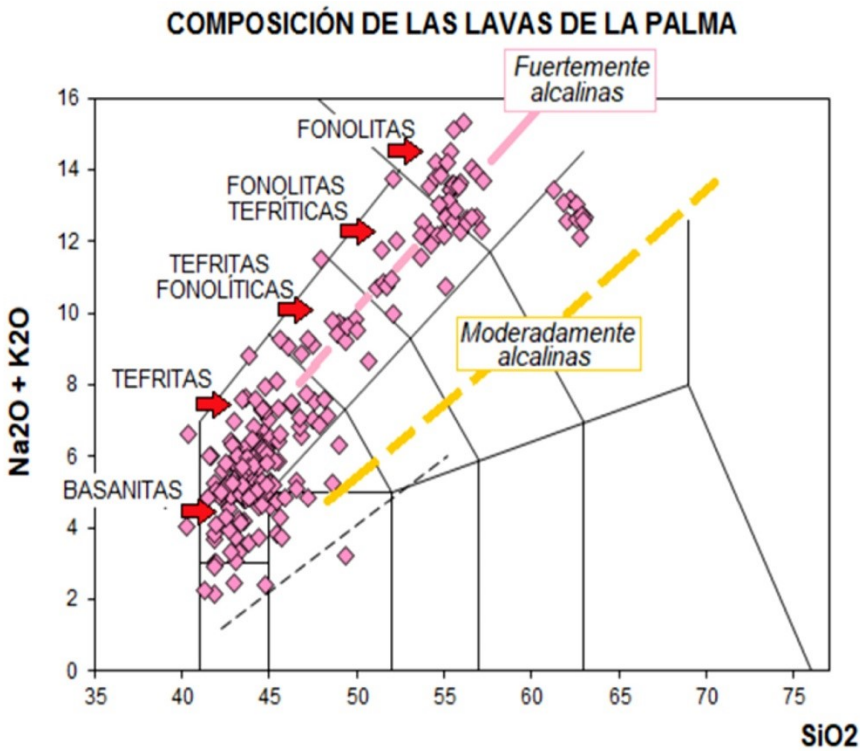


Fig. 41. Proyección de la composición de las rocas de toda la isla de La Palma en el diagrama TAS de la IUGS (Le Maitre *et al*., 2002). La mayor parte de las rocas son fuertemente alcalinas.

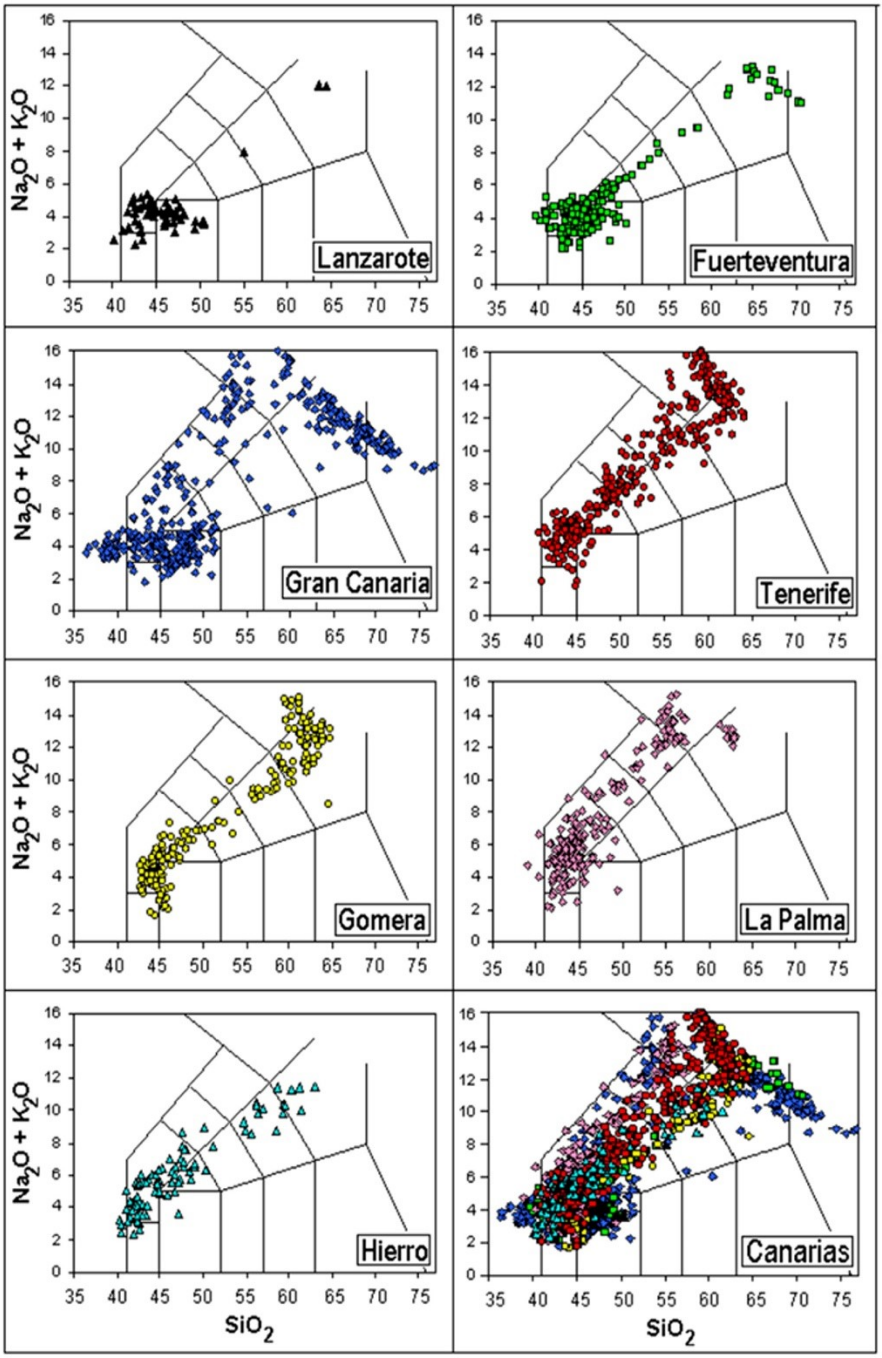


Fig. 42. Proyección en el diagrama TAS de las rocas de las islas Canarias (Ancochea & Brändle, 2004). Las rocas más alcalinas son las de La Palma, las de Gran Canaria las de mayor variabilidad composicional.

Por otro lado, también en términos generales y para rocas de la misma familia, cuanto menor es el contenido en SiO_2 y en álcalis ($Na_2O + K_2O$) de una roca, menor es el grado de evolución magmática de la misma. De modo que, dentro de las rocas fuertemente alcalinas, las menos evolucionadas son las basanitas y las más evolucionadas las fonolitas (Fig. 41). Las de la erupción del 2021 (Fig. 31) son, por lo tanto, todas ellas rocas poco evolucionadas.

Las erupciones históricas de La Palma han sido composicionalmente muy parecidas (Hernández Pacheco & Valls, 1982; MAGNA, 2015). Todas son rocas fuertemente alcalinas, mayoritariamente basanitas y tefritas, poco evolucionadas. Sólo en las erupciones de Jedey y en la de San Juan hay algunas rocas más evolucionadas (Fig. 43). Esa similitud composicional tiene como consecuencia que, si no hay otros factores, el tipo de erupción esperable en esta ocasión (y en ocasiones futuras) iba a ser similar al de otras erupciones históricas, como así ha sido, en términos generales.

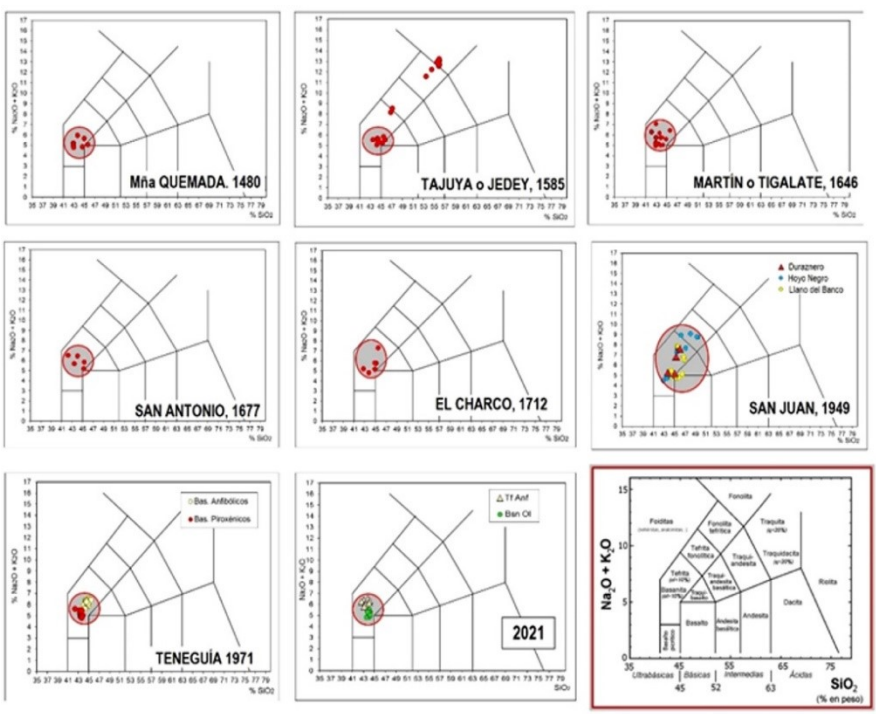


Fig. 43. Composición de las rocas de las erupciones históricas de La Palma (Datos de Hernández Pacheco & De La Nuez, 1983; De Vicente Mingarro,1986; Krügel *et al*., 1999; MAGNA, 2015 e IGME, inéditos).

La similitud con las rocas de la erupción del Teneguía, resulta especialmente llamativa. Las dos erupciones empezaron con la emisión de

lavas de tefritas anfibólicas y terminaron con lavas de basanitas olivínicas (Fig. 44). Aunque hubo una gran diferencia: en el Teneguía las tefritas se emitieron durante la mayor parte de la erupción (hasta el 12 de noviembre), mientras que en la erupción de 2021 sólo se emitieron los primeros días (Figs 45 y 46).

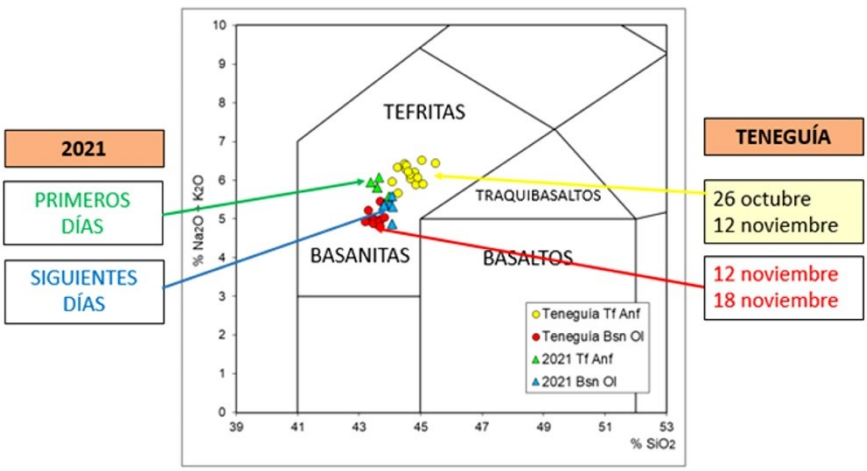


Fig. 44. Comparación de la composición de las rocas de la erupción del Teneguía (Ibarrola, 1974) y de la erupción del 2021 (IGME, inéditas), en el diagrama TAS de la IUGS.

Por otra parte, mientras que el cambio de composición en la erupción del 2021 según Day et al. (2022) fue gradual (ver, por ejemplo, la variación de MgO, Fig. 45), el del Teneguía fue brusco (Fig. 46).

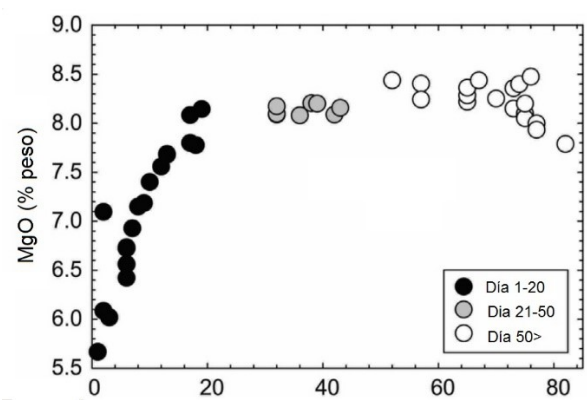


Fig. 45. Variación del contenido en MgO a lo largo de la erupción del 2021. Las muestras en negro corresponden a las tefritas (Day *et al*., 2022). Se puede apreciar que existe un cambio gradual de composición.

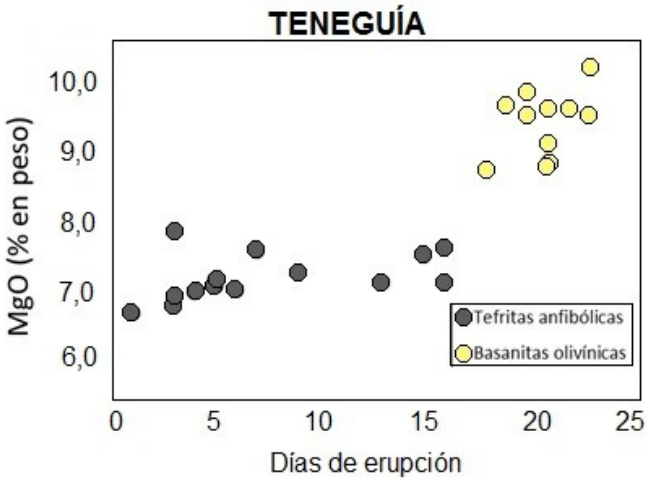


Fig. 46. Variación del contenido en MgO a lo largo de la erupción del Teneguía. Las muestras en negro corresponden a las tefritas (basado en Ibarrola, 1974). Se puede apreciar que, en este caso, el cambio de composición es más tardío y brusco.

Aunque las basanitas y las tefritas son tipos de rocas poco evolucionadas, las tefritas lo son algo más que las basanitas (más álcalis, menos CaO y MgO). Las basanitas pueden en ocasiones ser magmas primarios, es decir magmas que se han formado en el manto y han llegado a la superficie rápidamente, sin experimentar procesos de evolución magmática, que requieren que el magma en su ascenso se detenga en algún momento.

Para saber si un magma es muy poco o nada evolucionado (magma primario) existen diferentes criterios químicos, como son, por ejemplo, el contenido en Cr o Ni. En general, se considera que los magmas poco evolucionados tienen un contenido en Ni superior a 400 ppm y de Cr superior a 1000 ppm. En la figura 47 podemos ver como las tefritas, tanto de la erupción de 2021, como las del Teneguía, tienen menos Cr y Ni que las basanitas (de nuevo son más evolucionadas) y ninguna alcanza contenidos en esos elementos para poder suponer que son magmas primarios. Lo mismo podemos decir del resto de los magmas de las erupciones históricas.

Otro criterio que suele utilizarse para identificar un magma primario es el contenido en forsterita de los olivinos que suele ser superior al 86% en los olivinos de magmas primarios; como hemos visto ninguno de los 200 olivinos medidos alcanza ese valor.

En resumen, estos primeros datos composicionales nos indican que, ni en esta erupción, ni en todas las erupciones históricas, hay rocas que procedan del enfriamiento de magmas primarios y que por lo tanto han tenido que estar retenidos un tiempo en reservorios en su ascenso desde el manto superior donde se originaron, a la superficie.

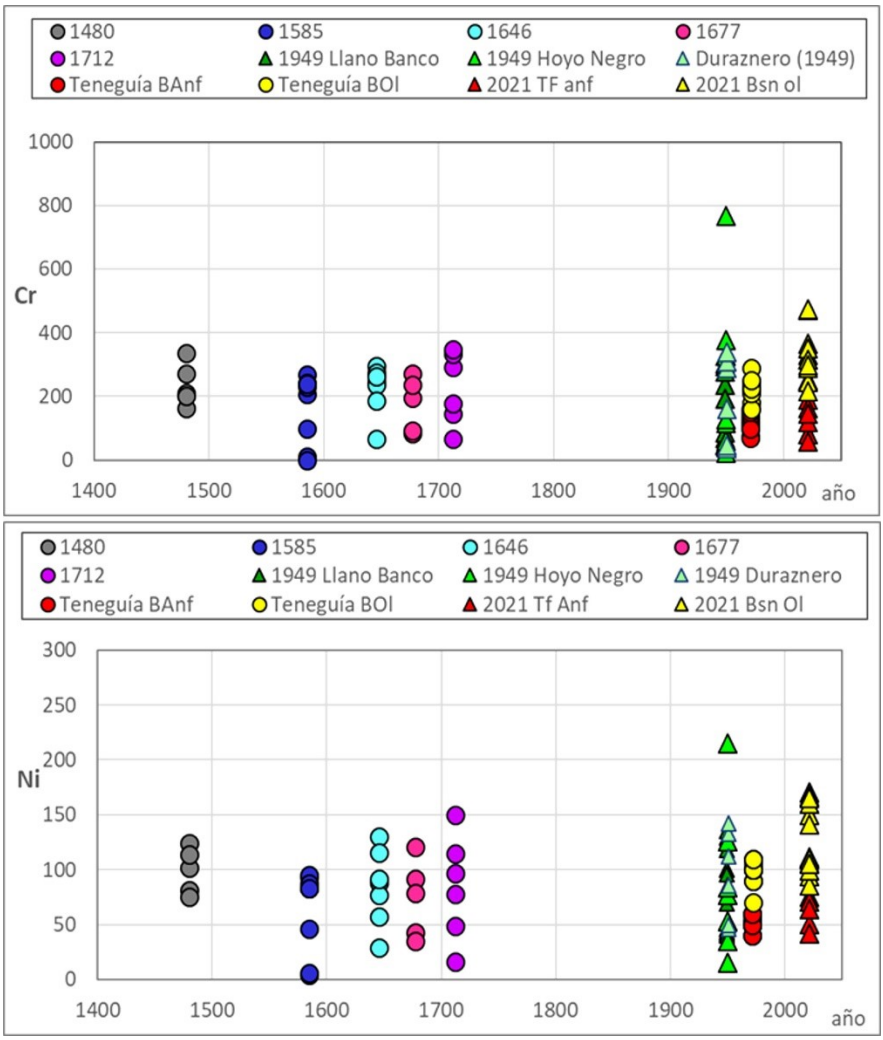


Fig. 47. Contenido en Cr y Ni de las rocas de las erupciones históricas de La Palma (Datos de Hernández Pacheco & De La Nuez, 1983; De Vicente Mingarro,1986; Krügel *et al*., 1999; MAGNA, 2015 e IGME, inéditos).

Los modelos conceptuales basados en datos petrogenéticos que se han propuesto para las erupciones históricas de La Palma o incluso para todo el Edificio Cumbre Vieja (p.e.: Klügel *et al*., 2000 o Barker *et al*., 2015) plantean efectivamente la existencia de reservorios magmáticos en el manto superior y en la corteza, en los que los magmas se detienen y evolucionan antes de hacer erupción. Esos modelos parecen perfectamente válidos también para la erupción del 2021 (p.e.: Day *et al*., 2022; Ubide *et al*., 2023).

Consideración final

En el fragor de la erupción, es posible que a nivel del público general se le diera una importancia menor a la composición de las rocas y que éste haya sido uno de los aspectos más desconocido. Espero haber podido cubrir esa laguna y haber puesto en evidencia la importancia que tiene el estudiar las rocas para poder entender los procesos volcánicos y como el conocerlas puede ayudar en las actuaciones durante las emergencias volcánicas.

AGRADECIMIENTOS.- El equipo que ha obtenido los datos que se exponen en esta conferencia está formado por Raquel Herrera (URJC), Álvaro Márquez, María José Huertas y el autor (UCM), Juan José Coello y Jaime Coello (FTB-JC), David Sanz e Inés Galindo (IGME) y Teresa Ubide (Universidad de Queensland, Australia). Un agradecimiento especial por el apoyo en el trabajo de campo y muestreo durante la erupción de 2021 a Pilar Llanes, Marta Rincón, Fidel Martín, Iván López, Jacinto Leralta, Gabriel Leralta, Javier Coello, María Pilar García-Alonso, Ricardo Balcells y todos los participantes en el equipo de urgencias del IGME-CSIC URGE, así como a Carmen López y Ramón Casillas por las facilidades para el acceso a la toma de muestras. Nuestro agradecimiento también a Alfredo Larios del Centro Nacional de Microscopía Electrónica de la Universidad Complutense, por su ayuda en los análisis de los minerales y a María Ascensión Barajas, Carmen Valdehita y Pedro Lozano por su trabajo en la preparación de las muestras, realizado con una urgencia especial. Para las campañas de campo se ha contado con la ayuda económica de la Universidad Complutense de Madrid (Acción Especial AENC1/21-29277) y de la Universidad Rey Juan Carlos.

Bibliografía

AFONSO-CARRILLO, J. (Ed.) (2023). *Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)*. XVIII Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, Puerto de la Cruz.

ANCOCHEA, E. & J.L. BRÄNDLE (2004). Capítulo 8.1.9: Características composicionales del vulcanismo canario. En: J.A. Vera (Ed.), *Geología de España*, pp. 662-665. Instituto Geológico y Minero de España y Sociedad Geológica de España.

ARAÑA, V. & J.M. FÚSTER (1974). La erupción del volcán Teneguía, La Palma, Islas Canarias, 1971. *Estudios Geológicos* Vol. Teneguía, pp. 15-18.

ARAÑA, V. & E. IBARROLA (1973). Rhyolitic pumice in the basaltic pyroclasts from the 1971 eruption of Teneguía volcano, Canary Islands. *Lithos* 6: 273-278.

ARROYO, X., L. ANDREU, S. LÓPEZ-ANDRÉS, M.L. GARCÍA-LORENZO, M.J. HUERTAS & E. ANCOCHEA (2021). Caracterización de materiales geológicos del volcán de Cumbre Vieja (La Palma, España) y su posible revalorización como materia prima en aplicaciones ambientales. *XXVII Reunión de la Sociedad Española de Arcillas, Póster y Libro de Resúmenes*, pp. 13-14.

BARKER, A.K., V.R. TROLL, J.C. CARRACEDO & P.A. NICHOLLS (2015). The magma plumbing system for the 1971 Teneguía eruption on La Palma, Canary Islands. *Contrib. Mineral. Petrol*. 170: 1-21.

DAY, J.M.D., V.R. TROLL, M. AULINAS, F.M. DEEGAN, H. GEIGER, J.C. CARRACEDO, G.G. PINTO & F.J. PÉREZ-TORRADO (2022). Mantle source characteristics and magmatic processes during the 2021 La Palma eruption. *Earth Planet. Sci. Lett.* 597, 117793.

DE VICENTE MINGARRO, I. (1986). *Estudio Geoquímico de las Erupciones Históricas del Archipiélago Canario*. Tesis de Licenciatura. Universidad Complutense de Madrid.

HERNÁNDEZ-PACHECO, A. & J. DE LA NUEZ (1983). Las extrusiones sálicas del sur de la Isla de la Palma. *Estudios Geol*. 39: 3-30.

HERNÁNDEZ-PACHECO, A. & M.C. VALLS (1982). The historic eruptions of La Palma Island (Canarias). *Arquipelago, Universidade dos Açores. Série Ciências da Natureza* 3: 83-94.

IBARROLA, E. (1974). Temporal modification of the basaltic materials from 1971 eruption of the Teneguía volcano (La Palma, Canary Islands). *Estudios Geol*., Vol. Teneguía, pp. 49-58.

KLÜGEL, A., K.A. HOERNLE, H.U. SCHMINCKE & J.D.L. WHITE (1999). The chemically zoned 1949 eruption on La Palma (Canary Islands): Petrologic evolution and magma supply dynamics of a rift-zone eruption. *Jour. Geophys. Res*., 94 (1-4): 267-282.

KLÜGEL, A., K.A. HOERNLE, H.U. SCHMINCKE & J.D.L. WHITE (2000). The chemically zoned 1949 eruption on La Palma (Canary Islands): petrologic evolution and magma supply dynamics of a rift zone eruption. *Jour. Geophys. Res., Solid Earth*, 105 (B3): 5997-6016.

LE MAITRE, R.W. (ED.), A. STRECKEISEN, B. ZANETTIN, M.J. LE BAS, B. BONIN, P. BATEMAN, G. BELLIENI, A. DUDEK, S. EFREMOVA, J. KELLER, J. LAMERE, P.A. SABINE, R. SCHMID, H. SORENSEN & A.R. WOOLLEY (2002). *Igneous Rocks: A classification and glossary of terms*. Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission of the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press.

LEAKE, B.E., A.R. WOOLLEY, W.D. BIRCH, E.A. BURKE, G. FERRARIS, J.D. GRICE, F.C. HAWTHORNE, H.J. KISCH, V.G. KRIVOVICHEV, J.C. SCHUMACHER, C.N. SSTEPHENSON & E. WHITTAKER (2004). Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association´s amphibole nomenclature. *European Journal of Mineralogy* 16: 191-196.

MAGNA: MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA 1085 III-IV El Pueblo (2015). Escala 1:25.000. Instituto Geológico y Minero de España. *Mapa y Memoria,* 170 pp.

PANKHURST, M.J., J.H. SCARROW, O.A. BARBEE, J. HICKEY, B.C. COLDWELL, ROLLINSON, J.A.R. RODRÍGUEZ-LOSADA, A. MARTÍN-LORENZO, F. RODRÍGUEZ, W. HERNÁNDEZ, P.A. HERNÁNDEZ & N.M. PÉREZ (2021). Petrology of the opening eruptive phase of the 2021 Cumbre Vieja eruption, La Palma, Canary Islands. *Volcanica* 5: 1-10.

PEVOLCA Informe del Comité Científico 211003. https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/wp-content/uploads/2021/12/251221-INFORME-Comit%C3%A9-Cient%C3%ADfico-PDF.pdf

PEVOLCA Informe del Comité Científico 211213. https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/wp-content/uploads/2021/12/131221-INFORME-Comi% C3%A9-Cient%C3%ADfico-PEVOLCA-PDF.pdf

PEVOLCA Informe del Comité Científico 211225. https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/wp-content/uploads/2021/12/251221-INFORME-Comit%C3%A9-Cient%C3%ADfico-PDF.pdf

TROLL, V., A. KLÜGEL, M.-A. LONGPRÉ, S. BURCHARDT, F.M. DEEGAN, J.C. CARRACEDO, S., WIESMAIER, U. KUEPPERS, B. DAHREN, L.S. BLYTHE, T. HANSTEEN, C. FREDA, D.A. BUDD, E.M. JOLIS, E. JONSSON, F. MEADE, S. BERG, L. MANCINI & M. POLACCI (2011) Floating sandstones off El Hierro (Canary Islands, Spain): The peculiar case of the October 2011 eruption. *Solid Earth Discuss.* 3: 975-999.

UBIDE, T., Á. MÁRQUEZ, E. ANCOCHEA, M.J. HUERTAS, R. HERRERA, J.J. COELLO-BRAVO, D. SANZ-MANGAS, J. MULDER, A. MACDONALD & I. GALINDO (2023). Discrete magma injections drive the 2021 La Palma eruption. *Science Advances* 9 (27), eadg4813. DOI: 10.1126/sciadv.adg4813.

UBIDE, T., Á. MÁRQUEZ, R. MAGEE, E. ANCOCHEA, M.J. HUERTAS, D. SANZ, R. HERRERA, J.J. COELLO-BRAVO, A. MACDONALD, J. MULDER, E. CONN, J.T. CAULFIELD & I. GALINDO (2022). Using high-resolution geochemistry to monitor variations in magma dynamics during eruption, *EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23-27 May 2022*, EGU22-9743, 2022.

2. Primeros colonizadores en los deltas lávicos del volcán Tajogaite (La Palma, islas Canarias)

Carlos Sangil[a], Daniel Álvarez Canali[a], Javier Reyes[a,b], Julián Rodríguez[a], Julio Afonso-Carrillo[a], Sabin Liulea[a], Nereida Rancel-Rodríguez[a], Viviana Peña[c], Ana Tronholm[d], Yésica Concepción Marante[e], Fernando Dumpiérrez[b] y Marta Sansón[a]

[a] *Departamento de Botánica, Ecología y Fisiología Vegetal, Universidad de La Laguna.*
[b] *Consejería de Educación, Universidades, Cultura y Deportes, Gobierno de Canarias.*
[c] *Grupo de investigación BioCost, Departamento de Biología, Universidad de A Coruña.*
[d] *Department of Biological and Environmental Sciences, University of Gothenburg (Suecia).*
[e] *Área de Medio Ambiente, Cabildo Insular de La Palma.*

La erupción del volcán Tajogaite ha creado un nuevo ecosistema, un laboratorio natural ideal para el estudio de procesos ecológicos, muchos de los cuales no pueden reproducirse en condiciones controladas de laboratorio. La sucesión primaria se ha podido estudiar de forma temprana, apenas dos meses después del final del proceso eruptivo, y ha incluido diferentes grupos de organismos, lo que nos ha permitido tener una visión amplia de la formación de un ecosistema. Algunos organismos colonizaron las coladas de lava más rápido que otros, la capacidad de movilidad de los peces fue una ventaja que les permitió llegar primero y evolucionar rápidamente hacia comunidades clímax. El resto de comunidades de organismos estudiadas, invertebrados y algas, han evolucionado más lentamente. Sólo en las algas encontramos un

reemplazo de especies a través de la sucesión, mientras que en peces e invertebrados, las especies que colonizaron primero las coladas de lava fueron esencialmente las mismas que estaban presentes en la zona de control. Describimos un ecosistema donde aún las interacciones entre organismos son incipientes, esto ha dado lugar al asentamiento e insólita proliferación de algunas especies. Esta contribución, como las futuras en las que estamos trabajando, nos permitirán aportar conocimiento de las variaciones espacio-temporales de las comunidades y de las dinámicas a largo plazo en territorios volcánicos de nueva formación, tan necesarios para una correcta gestión de la biodiversidad.

Introducción

Las erupciones volcánicas son acontecimientos extraordinarios para los habitantes de un territorio concreto, sin embargo, se tratan de las perturbaciones y desastres naturales más comunes, y los que con mayor frecuencia afectan a los ecosistemas marinos. Cada año entran en erupción decenas de volcanes, muchos de ellos pasan inadvertidos puesto que ocurren a centenares o miles de metros de profundidad (Global Vulcanism Program, 2023). Variables en su intensidad, y en el tipo de materiales emitidos, las erupciones volcánicas son capaces de causar fuertes impactos en los ecosistemas (Crisafulli *et al*., 2015). Las coladas de lava incandescente son los materiales emitidos que a priori provocan mayor impacto puesto que tienen efectos devastadores sobre el territorio, aniquilando todas las formas de vida a su paso (Thorton, 2007). Pero también, los piroclastos y las cenizas pueden afectar a una zona cubriendo total o parcialmente la superficie del terreno, diezmando o modificando la biodiversidad de los ecosistemas, aunque en este caso sin provocar la mortalidad de todas las formas de vida (Vrom & Zgliczynski, 2011; Schils, 2012; Hart *et al*., 2022).

A pesar de estos efectos catastróficos de las erupciones volcánicas, la vida en los océanos tiene una capacidad de resiliencia asombrosa e inmediatamente después de que las coladas de lava se enfrían, las especies comienzan a asentarse nuevamente dando inicio a una serie de procesos y dinámicas ecológicas. Se habla en este caso de un proceso de sucesión primaria donde las comunidades de organismos evolucionan en el tiempo partiendo de un sustrato inicial completamente estéril, diferente de las denominadas sucesiones secundarias, donde las comunidades cambian o se recuperan a partir de unas pocas especies residentes previas a la perturbación y que sobrevivieron a su impacto (Prach & Walker, 2018). Estos primeros pasos en la evolución de un ecosistema pueden ser cruciales en el futuro de la biota que alberga, y a menudo rigen su trayectoria de un ecosistema durante años, décadas o siglos (Walker & Moral, 2011). Las primeras etapas en una

sucesión, especialmente en la sucesión primaria, suelen ser estocásticas e impredecibles, debido a que están fuertemente condicionadas a la disponibilidad y capacidad de migración de las especies, a su capacidad de supervivencia en estos nuevos ambientes, y por las interacciones entre los nuevos colonos. La colonización de las coladas de lava comienza rápidamente, y organismos bentónicos como las microalgas pueden observarse tan solo unos pocos días después de que la lava haya llegado al mar. Muchas de las comunidades que prosperan inicialmente en los nuevos hábitats están formadas por especies pioneras, caracterizadas por una baja competitividad y una alta dinámica demográfica, es decir, capaces de multiplicarse rápidamente (Connell & Slatyer, 1977).

En el medio marino el sustrato es apto para ser colonizado prácticamente desde su formación, por eso la colonización y la fundación de ecosistemas es más rápida que en medios terrestres. Las macroalgas y las microalgas, por ejemplo, a diferencia de los vegetales superiores, no necesitan de un sustrato evolucionado en forma de suelo mineralizado para prosperar (Railkin, 2003), puesto que toman los nutrientes que necesitan directamente del agua circundante y del sustrato únicamente obtienen una superficie a la cual anclarse. En los ambientes marinos, la dispersión y la capacidad de colonizar un nuevo sustrato a distancia, encuentran menos limitaciones y barreras que en los terrestres. Las corrientes marinas, y a veces la propia capacidad de dispersión de las especies, aporta a la sucesión una rápida y continua incorporación de organismos (Valiela, 1995; Cowen & Sponaugle, 2009). Pese a tratarse de frecuentes catástrofes naturales, en el medio marino pocas veces ha sido posible estudiar tempranamente y sin la asistencia de medios remotos la colonización de nuevas coladas lávicas. Estas limitaciones en parte se han debido a la imposibilidad logística de preparar campañas de investigación tan pronto como un ecosistema se crea.

Sin embargo, aunque escasos, los trabajos que han abordado esta temática constituyen importantes contribuciones al conocimiento de las sucesiones primarias en los ecosistemas marinos, y procesos ecológicos en general. Doty (1967) estudió los organismos pioneros en el intermareal, principalmente algas, en las coladas del volcán Kilawea (Hawái) tres meses después que la erupción del año 1957 finalizara. Jónsson (1968) y Jónsson & Gunnarsson (1982) en la erupción de 1964 que dio lugar a la isla de Surtsey (Islandia), así como Jewett *et al*. (2010) en la erupción de la isla Kasatochi en 2006 (archipiélago de las Aleutianas, Estados Unidos) encontraron que las comunidades de algas en las primeras etapas de la sucesión estaban dominadas por especies de rápido crecimiento y baja complejidad morfológica. También encontraron que las comunidades inicialmente fueron muy dinámicas, y que el número de especies aumentó con el tiempo, a la par que las especies perennes fueron reemplazando a las especies efímeras primocolonizadoras. En estos trabajos los autores señalaron que uno de los

principales obstáculos en la evolución de estos ecosistemas fue el aislamiento de las islas que impidió la llegada de especies con reducida capacidad de dispersión.

Más comunes han sido los estudios de sucesión primaria iniciados uno o más años después de finalizados los procesos eruptivos. Existen varios ejemplos donde se estudian las comunidades de organismos a partir de coladas de lava de diferentes edades, varios años, décadas e incluso centenares o miles de años. Parrish (2015) encontró que comunidades batiales de corales en Hawái necesitaron miles de años para alcanzar su clímax o madurez. Igualmente, aunque con una evolución más rápida, decenas de años, se ha reportado la existencia de diferencias en las comunidades de corales y esponjas establecidas en coladas someras del sublitoral con diferentes edades, como describieron Schleyer *et al*. (2016) y Jouval *et al*. (2020) en la isla de La Reunión. Las sucesiones ecológicas pueden ser a menudo complejas, por lo que resulta difícil predecir cómo será la biodiversidad de un territorio incluso en sus etapas iniciales. Comúnmente en los ecosistemas marinos hay fuertes interacciones entre especies fruto de miles de años de coevolución, y muchas veces es necesario que sobre una colada de lava se establezcan unas especies determinadas para favorecer la posterior incorporación de otras. Eso sucedió también en La Reunión donde los peces coralívoros no prosperaron en las nuevas coladas lávicas hasta que previamente se asentaron corales hermatípicos (Pinault *et al*., 2013).

En Canarias las erupciones volcánicas no sólo son las responsables de haber creado las islas y modelado su paisaje, sino que además influyen y determinan la biodiversidad que se desarrolla sobre este territorio. Una quincena de erupciones volcánicas, de ellas siete en la isla de La Palma, han ocurrido en Canarias en los últimos 500 años. Tener un conocimiento preciso de cómo estos eventos afectan a nuestro territorio revierte directamente sobre el conocimiento de la biodiversidad y su gestión. En estos momentos la ciencia tiene una gran oportunidad de profundizar en la comprensión de los mecanismos y procesos que gobiernan los ecosistemas gracias a la observación directa (Underwood *et al*., 2000), y no nos cabe duda de que las coladas marinas del volcán de Tajogaite se convertirán en un valioso laboratorio natural.

Los deltas lávicos

El 19 de septiembre de 2021 entró de nuevo en actividad el complejo volcánico Cumbre Vieja (<150.000 años), una alineación norte sur de volcanes localizada en la mitad sur de la isla de La Palma (De la Nuez *et al.*, 2018). Este nuevo volcán situado en la ladera noroeste de Cumbre Vieja en el lugar conocido como Cabeza de Vaca recibió con el paso de las semanas el nombre de Tajogaite (Fig. 1a). Fue una erupción típica similar a otras

históricas en las islas y de tipo estromboliano fisural, con algunos eventos freatomagmáticos que incrementaron su explosividad. El volcán generó siete bocas eruptivas constituyendo finalmente, tras 85 días de erupción, un cono volcánico que se elevó unos 200 m, y hasta los 1100 m s.n.m. (Taddeucci *et al*., 2021). El volumen de material emitido durante el proceso en forma de coladas de lava fue de unos 200 millones de metros cúbicos, además se emitieron unos 45 millones de metros cúbicos de materiales piroclásticos en forma de fino lapilli y cenizas, los cuales se depositaron por toda isla llegando incluso a las islas vecinas más próximas (Carracedo *et al*., 2022; Copernicus, 2022). En cuanto a la superficie afectada por las coladas de lava esta fue de 12,35 km^2, en algunos puntos próximos al cono las coladas alcanzaron un grosor de 70 m (IGME, 2022). La erupción ha generado muchas investigaciones desde diferentes perspectivas y algunos de los resultados iniciales fueron analizados un año después de finalizada la erupción (Afonso-Carrillo, 2023).

A su llegada al mar, las coladas de lava formaron dos zonas de deltas lávicos al pie de los acantilados de la parte sur del municipio de Tazacorte, en el área antes conocida como Playa de Los Guirres y Playa de La Viña (Fig. 1b). Las coladas de lava que formaron estos deltas llegaron al menos en siete oleadas entre el 29 de septiembre y el 13 de diciembre de 2021 (Carracedo *et al*., 2022), formaciones que en La Palma se suelen denominar fajanas. Un pequeño delta está situado hacia el norte de la zona con una superficie emergida de unas 5,9 hectáreas y un perímetro de costa de unos 700 m, mientras que el delta mayor, situado más al sur, que solapa por el sur con el delta originado por el volcán San Juan, ocupa una extensión de unas 88 hectáreas y un perímetro de costa de unos 1900 m. El frente de la colada quedó conformado inicialmente por abruptos y pequeños acantilados, algunos bloques irregulares, una treintena de playas de grava y arena, y algunas plataformas intermareales (Fig. 2) (Alonso *et al*., 2023). Esta fue la configuración inicial, la cual ha variado significativamente, en especial tras los otoños e inviernos de 2021-2022 y de 2022-2023. El mar de fondo que afecta esta parte de la isla, con frecuentes eventos de altura de ola significativa de más de 4 m, ha desmantelado parte del frente marítimo original y ha hecho retroceder los deltas lávicos varios metros hacia atrás, y muchas de las playas que inicialmente se formaron también han desaparecido.

A partir de modelos digitales del terreno publicados sobre la erupción (IDECanarias, 2023) hemos realizado una primera aproximación para estimar la superficie submarina que ocuparon las nuevas coladas, que rondaría, sumando ambos deltas, aproximadamente unas 30 hectáreas. Las coladas de lava penetraron en el mar de forma desigual. En el delta pequeño apenas llegaron a unos 10 m de profundidad, puesto que aquí el volumen de lava que llegó al mar fue limitado. En el delta grande las coladas de lava

Fig. 1. Volcán Tajogaite durante el proceso eruptivo: **a**. Cono volcánico expulsando lavas y piroclastos (24 octubre 2021). **b**. Formación de los deltas lávicos donde se observan las coladas de lava desbordando por el acantilado y columnas de vapor de agua provocadas por el rápido enfriamiento de la colada a su llegada al mar (10 de noviembre de 2021) (imagen cedida por Van Marty).

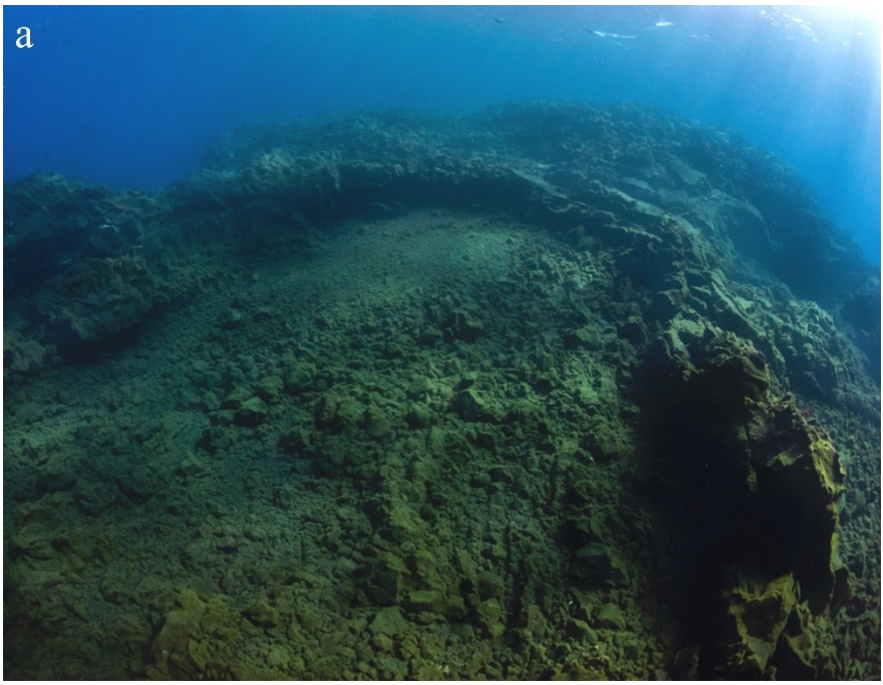
Fig. 2. Formaciones litorales de los deltas lávicos: **a.** Pequeña plataforma litoral que se localizaba al norte del delta grande, en la que se observa una fumarola de vapor de agua (febrero 2022). Esta plataforma desapareció por la erosión en el invierno de 2023. **b.** Detalle de la costa acantilada, con un roque y una playa, en la parte central del delta grande (febrero 2022).

llegaron a mayor profundidad, aunque la profundidad alcanzada a lo largo del frente de avance de la lava sobre el lecho marino fue muy variable. Hacia el tercio situado más al sur la profundidad máxima no fue superior a 20 m, en el tercio medio las coladas alcanzaron cotas entre 20 y 40 m, mientras que fue en el tercio norte donde las coladas llegaron a mayor profundidad, con brazos de lava que llegaron a más de 125 m de profundidad (datos obtenidos con un vehículo de observación remota, Sangil, obs. pers.). Aquí, las coladas de lava alcanzaron el talud insular, por lo que discurrieron sobre el mismo logrando una mayor profundidad. En los tercios norte y medio de este delta, y a partir de unos 30-40 m de profundidad, el frente de avance de las lavas está numerosas veces interrumpido por afloramientos rocosos de sustratos antiguos, como el conocido punto de buceo «Baja de las Hermanas», o por fondos arenosos.

Los nuevos fondos rocosos son muy abruptos, heterogéneos y con notable pendiente. Las lavas basálticas predominantes son de aspecto pedregoso y áspero, y muy fragmentadas «tipo-aa», también se observan lavas de «tipo-pahoehoe» y «tipo-almohadilladas». Coladas consolidadas como grandes bloques de roca alternan con fragmentos de roca suelta de diferente tamaño y forma irregular (Figs 3 y 4). Al igual que la zona litoral, el frente submarino de las coladas de lava sufrió un enfriamiento muy rápido en su contacto con el agua y como resultado la roca adquirió una consistencia frágil, que literalmente, al principio se podía deshacer con las manos. Con el oleaje de los dos primeros temporales, el fondo marino se ha remodelado significativamente, grandes estructuras se han desplomado y ha habido un gran desplazamiento de todos aquellos materiales que estaban sueltos en el fondo. A medida que estos materiales están siendo removidos quedan expuestos materiales más duros que se enfriaron más lentamente. Los sedimentos finos son también notables en la zona y son puestos en suspensión continuamente con el mínimo oleaje.

Los fondos marinos de la zona previos a la erupción

Antes de la erupción la zona no destacaba ni por su biodiversidad ni singularidad, y probablemente era uno de los lugares más hostiles para el desarrollo de la vida de la isla, al menos en lo que a sus fondos someros se refiere. Dos factores, o la conjugación de ambos para ser más precisos, afectaban negativamente, limitando el número de organismos que allí eran capaces de asentarse. La zona se caracterizaba por presentar muchos sedimentos, debido a la escasa pendiente de su plataforma insular y a los aportes frecuentes a través de las escorrentías del Barranco de Las Angustias. Además, por tratarse de una costa orientada al oeste y desprovista de cualquier tipo de protección frente al mar de fondo proveniente tanto del noroeste como del oeste, que es el que tiene mayor altura de ola y energía de



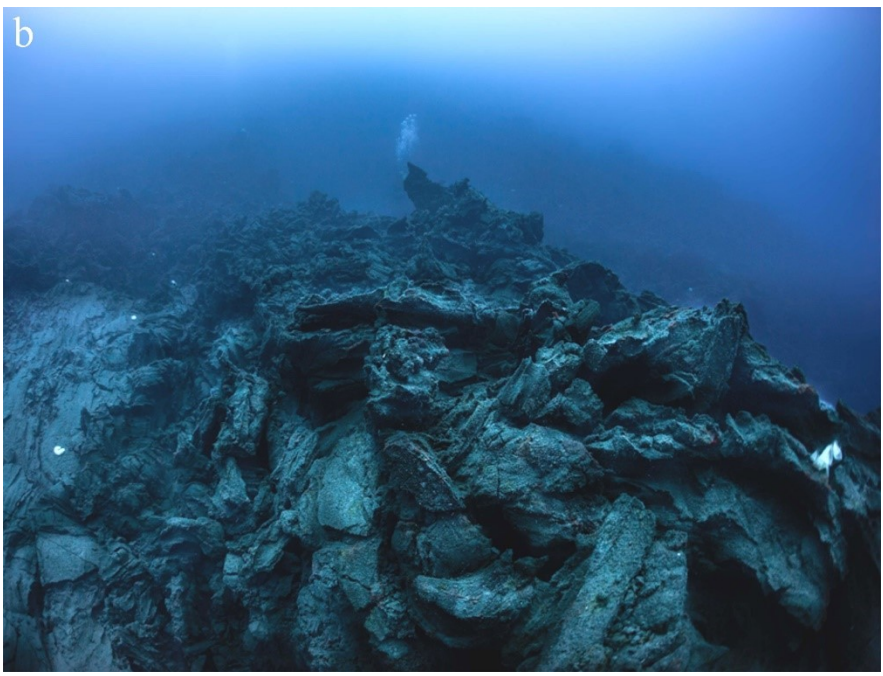


Fig. 3. Formaciones rocosas submarinas de los deltas lávicos: **a.** Colada de lava y fragmentos rocosos sueltos a unos 10 m de profundidad (abril 2022). **b.** Colada de lava a 40 m de profundidad (abril 2022).

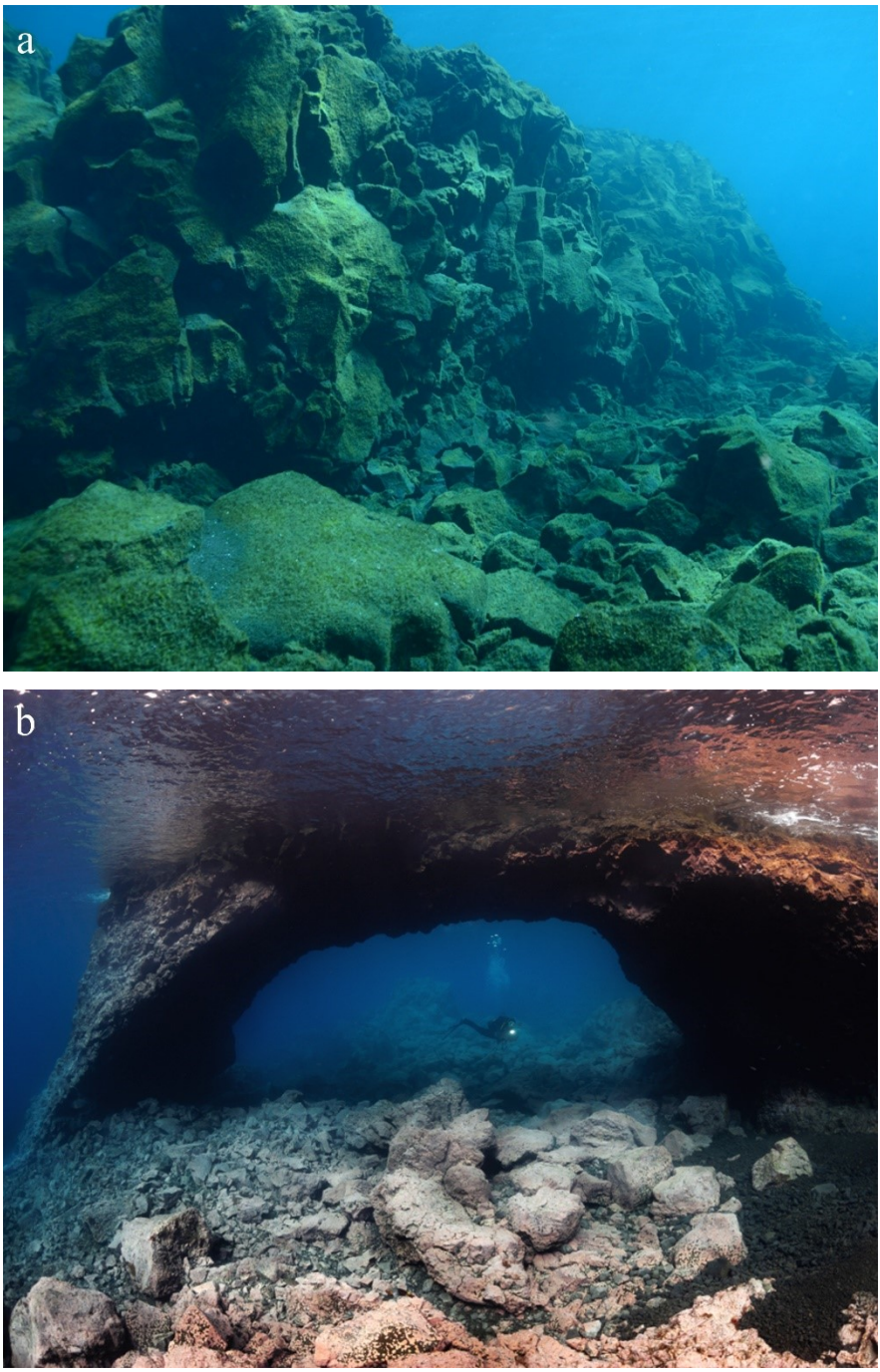


Fig. 4. Formaciones rocosas submarinas de los deltas lávicos: **a.** Pequeño bajío situado a 7 m de profundidad (febrero 2022). **b**. Arco situado a 5 m de profundidad (julio 2022). Esta última estructura desapareció en diciembre de 2022.

los que afectan al archipiélago. Los fondos arenosos son inestables, y durante buena parte del año son removidos por las olas. Sedimentos y arenas en suspensión tienen también fuertes efectos abrasivos que impiden que prosperen la mayoría de las especies longevas o perennes.

La zona intermareal que discurría entre las playas La Viña, El Perdido, playa Nueva o de los Guirres estaba ocupada por cantos rodados, gravas y arenas muy pobres en especies. Más ricas e interesantes eran sin embargo los afloramientos rocosos situados entre la playa Nueva y la playa El Charcón, donde habían algunas plataformas intermareales en las que se desarrollaban comunidades de algas cespitosas, generalmente algas coralinas geniculadas (*Corallina*, *Jania*) y rodomeláceas (*Laurencia*, *Palisada*) (Fig. 5). Como elemento más destacado existían poblaciones de gelidiáceas, entre ellas las de una especie amenazada y en grave regresión, *Gelidium arbuscula*, que en el oeste de la isla constituía una rareza (Sangil *et al*., 2005). También las poblaciones de invertebrados se veían favorecidas por la presencia de numerosos charcos. En los fondos también predominaban los sustratos inestables, las arenas, las cuales ocupaban gran parte de la plataforma submarina hasta el talud insular situado a unos 40-50 m de profundidad. A partir de esta cota aparecían afloramientos rocosos profundos, junto con cañones y taludes arenosos. Estos lechos arenosos tenían una suave pendiente

Fig. 5. Plataformas rocosas intermareales situadas al sur de la playa de Los Guirres o playa Nueva, durante una de nuestras campañas de muestreos previas a la erupción (junio 2021).

pero eran un lugar inhóspito para la vida como ya indicamos. Las únicas poblaciones abundantes en la zona eran las de las anguilas jardineras (*Heteroconger longissimus*), junto con algún que otro macroinvertebrado, pero únicamente a partir de 40 m de profundidad (Martín-García *et al*., 2013). Entre los fondos arenosos someros en la zona existían también algunos enclaves rocosos. En su parte más somera dominaban las comunidades de algas coralinas geniculadas e incrustantes (no geniculadas), algas dictiotáceas como *Lobophora* spp., *Dictyota* spp. o *Canistrocarpus cervicornis*, *Stypopodium zonale*, y algunas algas rojas filamentosas como *Lophocladia trichoclados* y *Cottoniella filamentosa*; mientras que en las partes más profundas, por debajo de 30-35 m, era posible encontrar fondos con esponjas como *Axinella damicornis* e incluso poblaciones de coral negro, *Antipathella wollastoni*.

Nuestras investigaciones en los deltas lávicos

Nuestras investigaciones en los deltas lávicos del volcán Tajogaite tienen como objetivo principal evaluar el impacto de la erupción sobre las comunidades de organismos bentónicos, estudiar los procesos de colonización y sucesión a corto y medio plazo, y determinar a largo plazo la evolución de todo el ecosistema. Para responder a esta serie de objetivos, desarrollamos diferentes actividades como el seguimiento *in situ* y periódico de las principales comunidades de organismos que se han establecido sobre las coladas, la realización de experimentos, la recolección de material para estudios de biodiversidad, y recolección de material para estudios moleculares. Nuestro trabajo se desarrolla en unos puntos concretos que denominamos «localidades» los cuales se están visitando con regularidad, hasta ahora con una periodicidad de 2-3 meses, es decir, cuatro veces al año. Las actividades tienen respaldo económico para continuar al menos hasta 2026. Inicialmente los muestreos se llevaron a cabo en 12 localidades, incluyendo seis localidades en los deltas lávicos, tres de ellas para el estudio de las comunidades intermareales y otras tres para el estudio de las comunidades submareales, y seis localidades de una zona control situada al sur de los deltas. Debido a la pérdida de dos de las plataformas intermareales en los deltas por los procesos erosivos, y la alteración de una de las localidades intermareales de la zona control, el modelo inicial se tuvo que modificar incluyendo una nueva localidad en el intermareal de los deltas y otra en la zona control (Fig. 6).

En todo estudio de monitoreo de un impacto en la naturaleza, es necesario, si es posible, incluir una zona control para evaluar en el tiempo cómo es la tendencia de una zona impactada respecto a otra no impactada, y así predecir con mayor certidumbre los cambios y evolución futura del ecosistema. Elegimos una zona al sur de los deltas de lava lo más cercana

posible, ante la necesidad de encontrar un área que reuniera las mismas condiciones oceanográficas a las que están sujetas los deltas lávicos. En esta parte de la isla el oleaje es muy variable a lo largo del año e interfiere notablemente en el desarrollo de las comunidades bentónicas (Sangil *et al*., 2013, 2014a). También desde el punto de vista geomorfológico es necesario que ambas zonas sean lo más similares posible, con el propósito de minimizar el efecto «sitio» que muchas veces interfiere en la interpretación de los resultados en los estudios espacio-temporales. Los sitios de muestreo del

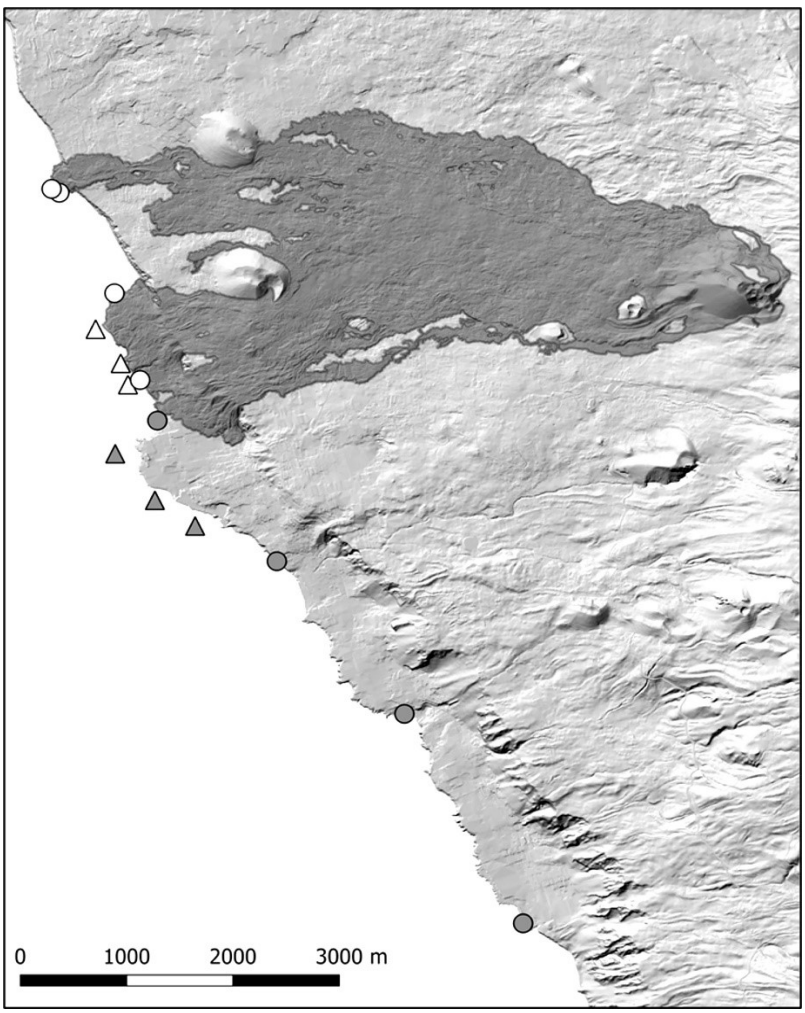


Fig. 6. Situación de las localidades donde realizamos nuestros muestreos. En blanco, localidades situadas en los deltas lávicos; en gris, localidades situadas en la zona control. Círculos, localidades intermareales; triángulos, localidades submareales. [Base cartográfica Modelo digital del terreno 2022 de IDE Canarias, perímetro de la colada vuelo del dron 211215 OpenDataLaPalma].

intermareal de la zona control son también deltas de lava pertenecientes a erupciones volcánicas recientes: San Juan (1949), El Charco (1712) y Tajuya (1585).

Las campañas de muestreos en la zona no han sido campañas al uso. Debido a la situación de emergencia y a los gases nocivos, las autoridades responsables han restringido el acceso por tierra y mar a los deltas lávicos, y también a otras zonas donde se localizan algunas de nuestras localidades control. En cuanto a la zona marina en torno a los deltas existe una zona de exclusión en la que se prohíbe todo tipo de actividad, entre ellas la pesca, hasta 500 m de la costa de los deltas, modificada con posterioridad hasta 300 m. Las únicas actividades permitidas han sido las relacionadas con el monitoreo de la erupción y de sus impactos. Con todo ello los preparativos y permisos necesarios para realizar nuestra actividad en el campo han requerido de una planificación minuciosa. Los elementos de seguridad han sido, y son necesarios para nuestro trabajo, puesto que existen en la zona riesgos reales para la salud. El detector de CO_2 forma parte del material en todos nuestros muestreos. Como parte de la sociedad en la isla es escéptica de sus efectos sobre la salud vamos a contar nuestra experiencia. El CO_2 lo hemos registrado en ocasiones en concentraciones anómalas. Por ejemplo, en nuestra localidad intermareal situada en Los Lajones (Puerto Naos), el sensor de gases registró niveles de CO_2 del 5% en algún punto o grieta a ras del suelo. La experiencia más desagradable la tuvimos en abril de 2022 cuando nos pidieron que desembarcáramos en el norte del delta grande en la confluencia con los acantilados costeros para recoger y poder estudiar «algún ave muerta que se había visto por la zona» (Fig. 7). Nos dejaron una nevera de corcho de unos 150 litros, pensamos que excesiva para recoger una o dos aves, pero cuando accedimos a la playa la imagen fue dantesca. En un espacio de unos 100 m^2 encontramos muertas y de pocos días diez pardelas, una gaviota, un zarapito, un halcón y una paloma. El detector de gases a aire libre y a una altura del 1,5 m registraba en la zona concentraciones de CO_2 entre el 3 y 4 %. La nevera se quedó pequeña.

¿Cómo realizamos los muestreos y qué datos tomamos en nuestro trabajo de campo?

Además de los datos puramente biológicos, sobre la abundancia de diferentes especies y obtención de muestras para estudios en laboratorio, durante el trabajo de campo también tomamos datos de variables ambientales como la temperatura y pH, debido a que durante el periodo activo de erupción se registraron valores infrecuentes de temperatura, pH, salinidad y anomalías en el sistema de carbono inorgánico (González-Santana *et al*., 2022). Para las aguas intermareales y submareales poco profundas usamos una sonda

Fig. 7. Ejemplar muerto de pardela cenicienta (*Calonectris borealis*) localizado en el límite norte del delta grande (abril 2022).

multiparamétrica portátil y sensores de temperatura (HOBO®), mientras que en el submareal registramos la temperatura en continuo, mediante un ordenador de buceo calibrado (Suunto D5) y recogemos muestras de agua para estudio del pH.

La mayor parte del trabajo de campo lo realizamos regularmente en cortas campañas de 5 a 6 días de duración. Hasta el momento hemos muestreado en febrero, abril-mayo, julio, y octubre de 2022, y enero, abril y julio de 2023. Como ya adelantamos hemos establecido una serie de localidades que son visitadas en cada campaña (Fig. 6). El estudio de la evolución de la colonización en los deltas lo realizamos mediante muestreos *in situ* de cinco comunidades de organismos. En el submareal estudiamos las comunidades de peces, las de macroinvertebrados (exceptuando esponjas incrustantes), y las de algas. Mientras que en el intermareal muestreamos los invertebrados vágiles y las algas.

En la zona submareal los muestreos se realizan mediante buceo autónomo hasta una cota de 20 m. Para recoger la mayor variabilidad y repartir equitativamente las muestras en las zonas de estudio, los muestreos siguen un diseño estratificado en tres niveles de profundidad 15-20 m, 10-15 m y 5-10 m. En cada uno de estos niveles realizamos tres censos visuales,

nueve por localidad, para estimar la abundancia de peces. Para ello empleamos un método visual estacionario denominado punto fijo, donde el observador situado en el centro de un círculo imaginario de aproximadamente 100 m^2 registra el número y el tamaño de cada uno de los individuos de las distintas especies durante 5 minutos (Bortone *et al*., 1989). Para los invertebrados utilizamos el método del transecto, tres por nivel de profundidad, nueve por localidad. Cada transecto tiene 10 m de largo por 2 m de ancho, y para llevarlo a cabo nos ayudamos de una cinta métrica que colocamos sobre el fondo. Registramos únicamente los individuos de las especies que son visibles, sin levantar o voltear rocas (Fig. 8a). Para estudiar la superficie que ocupan (cobertura) las diferentes especies de macroalgas, utilizamos el método de fotocuadrantes, realizando fotografías a un cuadrante (25 x 25 cm, subdividido en áreas de 5 x 5 cm) (Fig. 8b), con un equipo réflex subacuático. A partir de esta fotografía estudiamos *a posteriori* el porcentaje de cobertura de cada especie en el cuadrante. Por cada nivel de profundidad realizamos 10 fotocuadrantes, de modo que obtenemos 30 por localidad. En dos de las localidades situadas en los deltas realizamos también muestreos a mayor profundidad, en dos niveles adicionales, a 47-42 m y 33-28 m de profundidad, en los que estimamos la abundancia de invertebrados y la cobertura de las algas según el método descrito con anterioridad. Como localidades control de los muestreos más profundos hemos seleccionado dos localidades situadas en el sur de la isla en la Punta de Fuencaliente. La regularidad con la que realizamos estos muestreos es de dos veces al año, debido a que los requerimientos y preparativos para la práctica de buceo a estas profundidades son más complejos.

En el intermareal empleamos técnicas de muestreo similares, aunque con algunas modificaciones (Fig. 9). Los muestreos se realizan siempre en marea baja y coincidiendo con los días de mayor amplitud de marea del mes, y también en diferentes niveles. Niveles que atienden a la diferente tolerancia a la desecación de los organismos, donde diferenciamos un intermareal bajo, otro medio y finalmente uno superior (Lewis, 1964). El número de individuos de cada especie de invertebrado se estima en este caso mediante tres transectos de 10 x 1 m, en cada uno de los niveles del intermareal, completando nueve por localidad. También registramos en cada una de estas localidades la talla de unos 30-45 individuos de burgados (*Phorcus sauciatus*) y lapas (*Patella* spp.), taxones de los moluscos de interés marisquero, para futuros estudios. El cálculo del porcentaje de cobertura de las algas se realiza *in situ* utilizando el cuadrante de 25 x 25 cm, realizando un número de siete por cada nivel, veintiuno por localidad. Sólo muestreamos en superficies emergidas debido a que los charcos están poco representados en las plataformas rocosas de los deltas.

Al margen del seguimiento *in situ* de las comunidades, también realizamos otra serie de muestreos y experimentos. En el caso de las algas

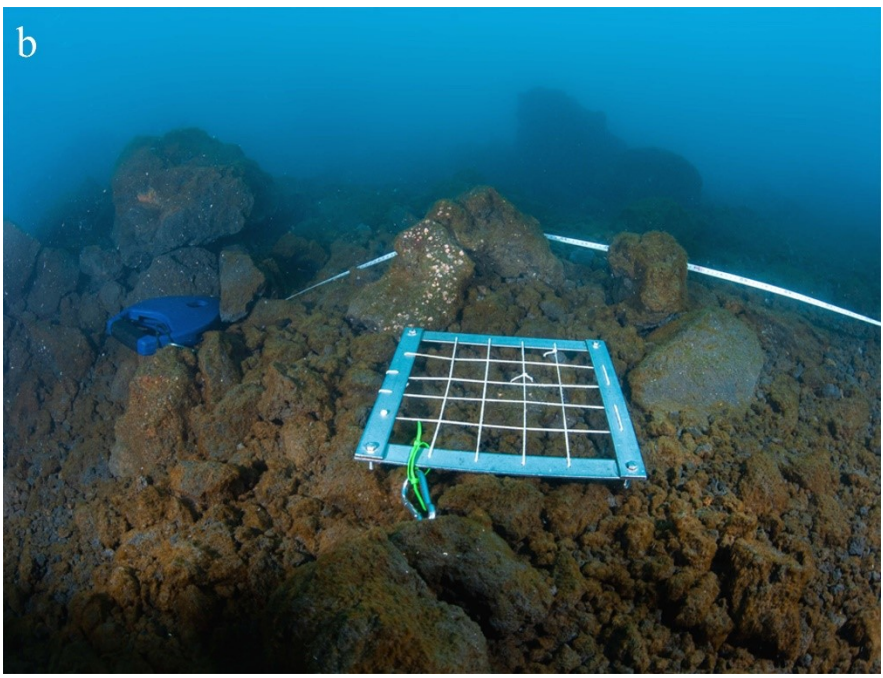


Fig. 8. Métodos empleados para la estima de la abundancia de los organismos en el submareal: **a**. Buceador haciendo un recuento del número de invertebrados sobre el transecto. **b**. Cuadrante empleado para estudiar el porcentaje de cobertura de las algas.

Fig. 9. Muestreos en la zona intermareal. **a**. Estudio de invertebrados utilizando el transecto y estima del porcentaje de cobertura de las algas mediante cuadrante. **b**. Muestreos en una plataforma del delta grande, ya desaparecida.

para tener un mayor conocimiento sobre su biodiversidad, especialmente para las especies incrustantes y aquellas especies que por su tamaño pueden pasar inadvertidas en los muestreos con los cuadrantes, o porque requieren de estudios en laboratorio para confirmar su identificación, realizamos recolecciones de diverso material mediante raspados en el sustrato rocoso o directamente extrayendo pequeños fragmentos de roca (Fig. 10a). Con estas muestras ya en el laboratorio seleccionamos fragmentos para realizar observaciones con estereomicroscopios y microscopios. Para algunas algas coralinas estamos obteniendo secuencias de ADN para resolver la identificación de las especies desde el punto de vista molecular. Para algunas microalgas, como cianobacterias y diatomeas, realizamos aislamientos y cultivos de cepas en cámaras de cultivo para obtener suficiente material, crítico para estudios de microscopía y moleculares.

Realizamos también experimentos con sustratos experimentales (bloques de basalto) en el submareal para estudiar la evolución de las comunidades. Cada año de estudio, y mediante la colocación y retirada de bloques cada 2-3 meses, evaluamos como varían las comunidades de algas primocolonizadoras a lo largo de todo el proceso de la sucesión, tanto en los deltas como en la zona control. Con este experimento testamos la relación de las especies primocolonizadoras con su entorno, ya que diásporas y propágulos que fundan las nuevas comunidades proceden en su mayoría de lugares próximos. Muchas de las especies dominantes en las comunidades climácicas (comunidades en máximo desarrollo y estabilidad temporal) de la zona control tienen poca capacidad de dispersión, y por eso tardan en incorporarse a las comunidades de los deltas. En paralelo a este experimento estudiamos las primeras etapas de la sucesión utilizando también sustratos experimentales. En febrero de 2022 se colocaron bloques en dos localidades de los deltas lávicos y dos localidades de la zona control que se han ido retirando paulatinamente a los 2, 4, 5, 7 y 11 meses (Fig. 10b). Los primeros resultados que hemos obtenido indican que la sucesión en la zona de los deltas sigue una trayectoria diferente a la zona control con diferencias claras en la composición y abundancia de las diferentes especies que han colonizado los sustratos experimentales.

Mas allá del estudio de la diversidad de organismos en las comunidades bentónicas de los deltas, estamos abordando también un estudio sobre la diversidad genética de las poblaciones de algunas especies de algas a lo largo de esta sucesión. Como modelo hemos elegido algas pardas (Phaeophyceae) de la familia Dictyotaceae, en concreto seis especies fueron seleccionadas, *Canistrocarpus cervicornis*, *Dictyota dichotoma*, *Lobophora canariensis*, *Lobophora schneideri*, *Stypopodium zonale y Taonia atomaria*. Se trata de especies dominantes en las comunidades submareales de Canarias (Sangil *et al*., 2011) y bien delimitadas y estudiadas desde el punto de vista genético (p.e., Tronholm *et al*., 2010; Vieira *et al*., 2020). Pese a ser especies muy

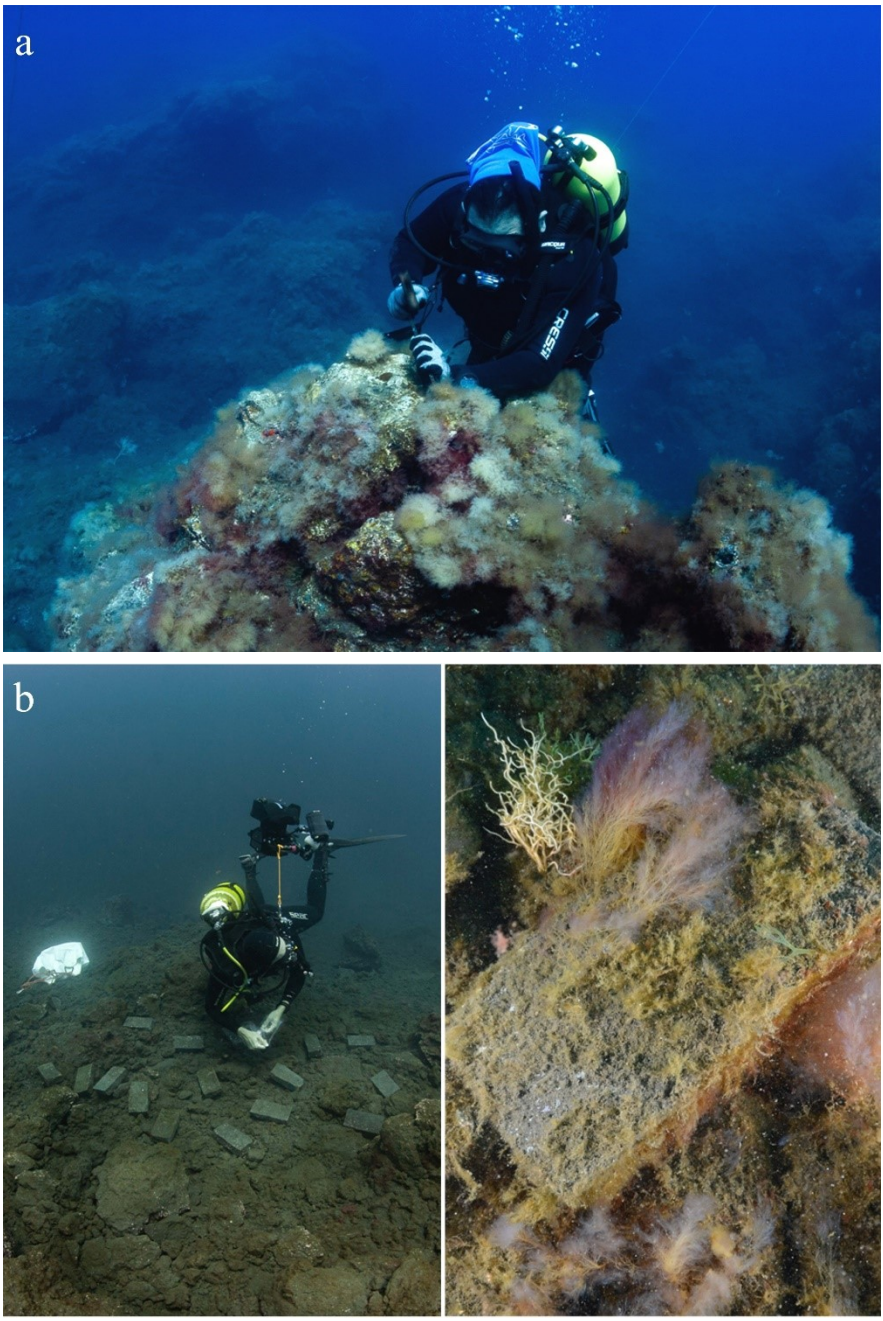


Fig. 10. Recolección de muestras y colocación de sustratos experimentales. **a**. Buceador recolectando fragmentos de roca para estudio en laboratorio de las algas incrustantes. **b**. Buceador colocando los sustratos experimentales (bloques de basalto) para estudiar la primocolonización sobre el fondo (izquierda); Detalle de un bloque de basalto después de dos meses en el agua (derecha).

próximas entre sí con ciclo de vida (diplohaplonte) y organización estructural de sus talos (parenquimatosa) común, presentan, sin embargo, estrategias de vida diferentes. Algunas de ellas presentan importantes dinámicas poblacionales con varias generaciones de individuos a lo largo de un año, las especies efímeras; mientras que en el otro extremo encontramos a las especies perennes capaces de sobrevivir varios años. En cuanto al tipo de reproducción sexual o asexual, y la frecuencia de esporofitos y gametofitos en las diferentes poblaciones, trabajamos sobre la hipótesis de que existen también diferencias entre estas especies. De partida esperamos que la heterocigosidad [parámetro que estima la diversidad genética a través de la frecuencia de determinadas porciones del genoma (locus)], o más correctamente su promedio, va a ser diferente en los deltas lávicos respecto a la zona control. En este sentido en poblaciones en equilibrio, como las que debe de haber en la zona control, la heterocigosidad debe presentar valores más elevados que en los deltas, en los que debería ser más baja debido a eventos fundacionales de las poblaciones donde las primeras poblaciones se originan a partir de la llegada de un número limitado de progenitores. Esperamos que los valores de heterocigosidad vayan con el tiempo siendo poco a poco similares en los deltas lávicos y en la zona control, y que además varíen entre las especies atendiendo a sus rasgos biológicos y dinámicas poblacionales.

Un adelanto de los resultados obtenidos

Condiciones ambientales anómalas: un lugar para los organismos extremófilos

En las localidades que visitamos regularmente no hemos registrado ningún tipo de anomalía en cuanto a temperatura, salinidad o pH. Sin embargo, en los deltas lávicos existen una serie de pequeños puntos con fuertes anomalías de pH. El grupo QUIMA de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria que realiza un seguimiento de las condiciones físico-químicas desde que la lava llegó al mar (González-Santana *et al*., 2022) ha encontrado varios puntos en el delta grande con intrusiones anómalas de CO_2 que modifican la química inorgánica del carbono del agua de mar provocando la disminución del pH (González-Dávila, *com. pers*.). Nosotros en el delta norte también hemos encontrado un punto cercano a una de nuestras localidades de monitoreo donde el pH registra valores bajos, incluso por debajo de 7 unidades. Estos lugares son pequeños puntos de desgasificación de los procesos eruptivos, y no son los únicos que se han encontrado en la isla, recientemente también se han localizado otros en la zona de la Punta de Fuencaliente (Hernández *et al*., 2016; González-Delgado *et al*., 2021). Estos lugares son muy interesantes desde el punto de vista científico ya que en ellos

se produce una acidificación natural que recrea las condiciones ambientales que tendrán los océanos en décadas futuras. Son ambientes extremos que condicionan el crecimiento de los organismos, ya que la acidificación, entre otros efectos, impide a los organismos la captación y retención de carbonatos para construir sus bioestructuras. El punto que nosotros conocemos en el delta norte presenta comunidades de algas singulares y en ellas las especies que utilizan el carbonato cálcico están prácticamente ausentes, sucediendo aquí algo similar a lo que se ha descrito en la playa del Faro de Fuencaliente (González-Delgado *et al*., 2023).

Las primeras evidencias de la existencia de este charco (al que denominamos «charco caliente»), las obtuvimos cuando revisamos fotografías y vídeos realizados con drones, cuando preparábamos la primera campaña de investigación. Situado tierra adentro, a unos 30-40 m de la línea de costa en el delta sur, se distinguía lo que parecía un pequeño charco. Empleamos tiempos verbales en pasado ya que se trata de un ambiente que resultó efímero, puesto que desapareció en el invierno de 2022-2023, cuando el oleaje rellenó con piedras y gravas la depresión donde este ambiente se localizaba. No obstante, tuvimos la oportunidad de muestrearlo y caracterizarlo (Fig. 11a). Se trataba de un charco que presentaba una fuerte oscilación en su volumen. En marea baja el charco se reducía a una superficie de unos 5 m^2 y apenas 1 m de profundidad, pero en marea llena llegaba a alcanzar más de 25 m^2 y casi 2,5 m en su punto más profundo. La principal singularidad de este charco era su temperatura del agua, un ambiente extremo que oscilaba entre 36 y 41ºC (15-20ºC superior a la temperatura que normalmente se registra en aguas abiertas en la zona). El charco alcanzaba esta temperatura debido a que el agua empujada por las mareas se infiltraba por las coladas de lava que aún tenían calor residual. De hecho, la temperatura en el charco se incrementaba cuando subía la marea (Fig. 11b). Por los valores extremos de temperatura que allí se registraban únicamente fueron capaces de colonizar y sobrevivir largo plazo unos pocos organismos, en concreto microalgas termófilas. Fruto de su actividad llegaron a formar un grueso tapete que recubría toda la roca (Figs 12a-d). Mediante microscopía y aún de forma preliminar se han identificado varios géneros de microalgas pertenecientes a cianobacterias o algas verde azules (Cyanobacteria) y diatomeas (Bacillariophyta). Dentro de las procariontes, *Chroococcus* (Chroococcales) fue el género más común en la muestra, incluyendo tanto individuos aislados como agrupados en pequeñas colonias irregulares. Se trata de un grupo de algas cosmopolitas capaces de sobrevivir en ambientes dispares (Fig. 12e). Otra de las más comunes fue *Phormidium* (Oscillatoriales) cuyas células se disponen una al lado de la otra formando filamentos rectos, curvos o incluso espiralados (Figs 12e,f). También fue común en las muestras el género *Planktothrix* (Oscillatoriales), filamentos caracterizados por presentar una caliptra en su parte terminal y vesículas

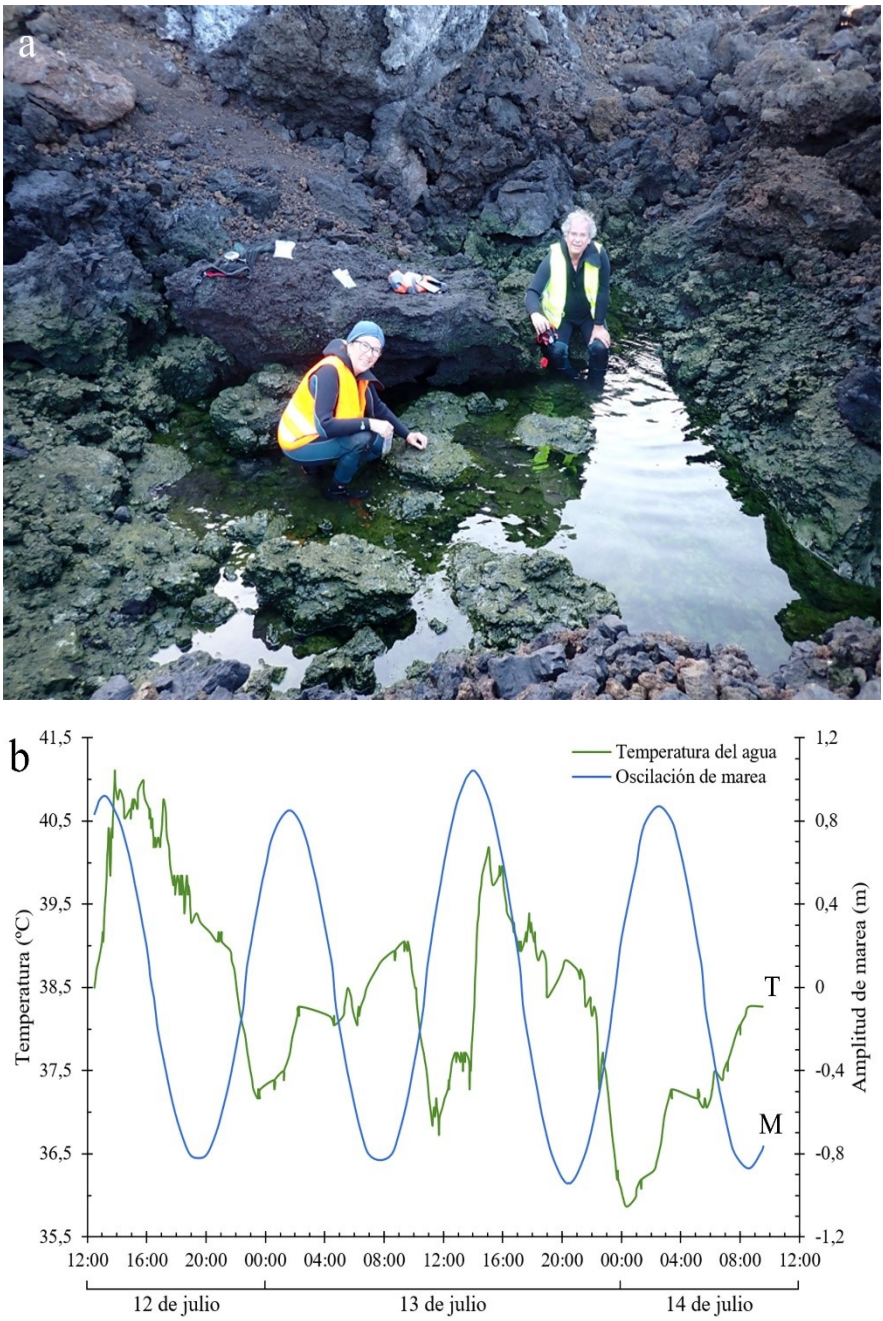


Fig. 11. El «charco caliente», situado en un punto medio del delta grande y a unos 30-40 m de la orilla desapareció sepultado por rocas después de los temporales del invierno de 2022 / 2023. **a**. El charco en marea baja (julio 2022). **b**. Oscilación de la temperatura y de la amplitud de la marea durante 45 h (12-14 de julio de 2022).

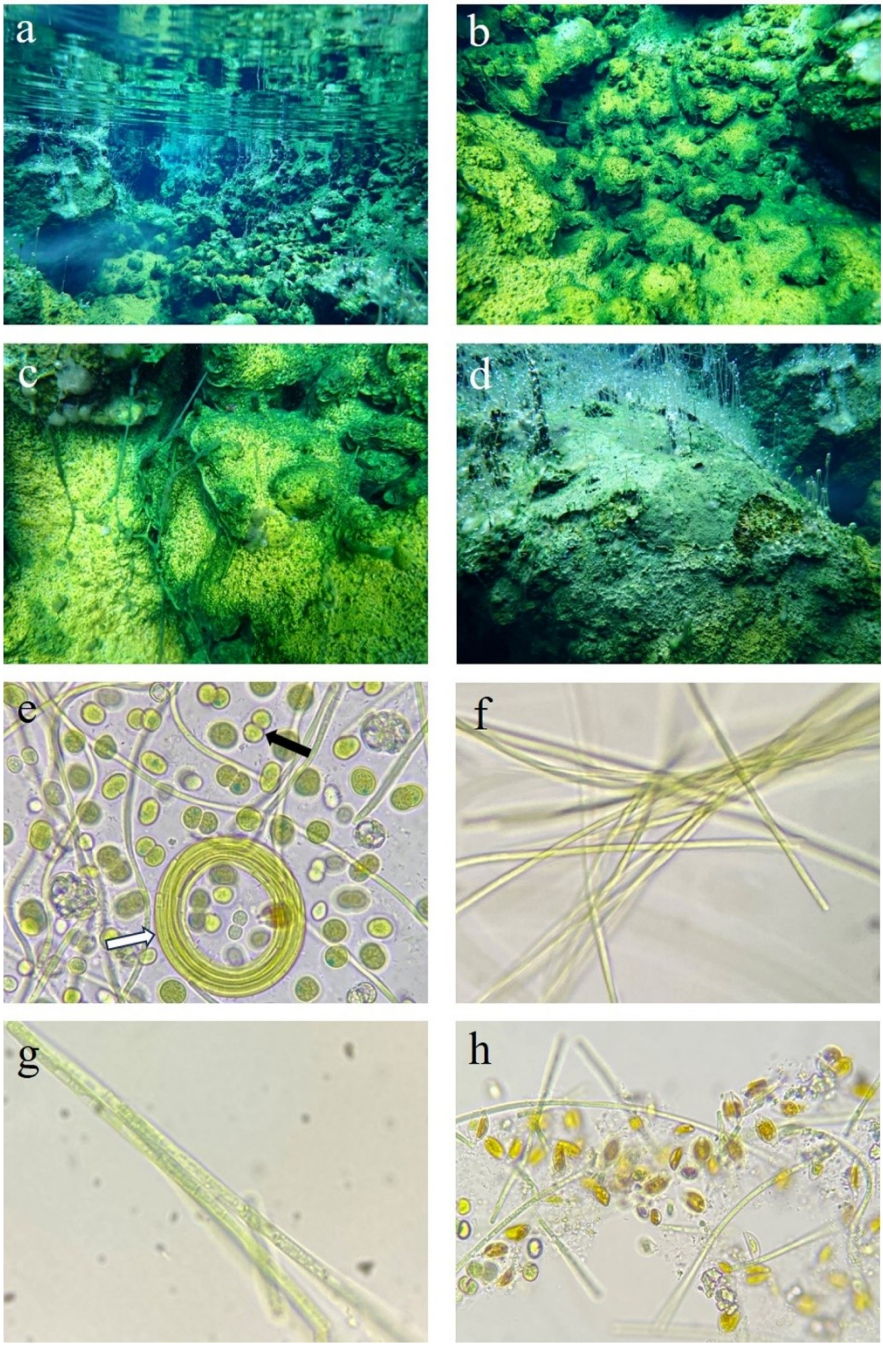


Fig. 12. Comunidades del «charco caliente»: **a-d**. Cubierta de cianobacterias sobre el fondo del charco. **e.** *Chroococcus*, cianobacteria (flecha negra), *Phormidium*, cianobacteria (flecha blanca). **f.** *Phormidium.* **g**. *Planktothrix*, cianobacteria. **h**. *Amphora*, diatomea.

gaseosas distribuidas por su protoplasto (Fig. 12g). Entre las diatomeas se reconocieron miembros del género *Amphora* (Bacillariophyceae), organismos solitarios que tienen forma elongada y estrecha, similar a la de una botella, de ahí su nombre (Fig. 12h). Las muestras recolectadas forman parte de las colecciones de microalgas de nuestro grupo de investigación, y es necesario ampliar los estudios moleculares sobre las especies encontradas para poder identificarlas a nivel especifico, incrementando así el escaso conocimiento que se tiene sobre las microalgas en los ambientes extremos marinos de Canarias.

Monitoreo de las comunidades bentónicas

Si hay que utilizar un adjetivo para describir el proceso de colonización de las coladas de lava del volcán Tajogaite este sería el de rápido, ya que muchas especies han llegado y proliferado en la zona después de apenas unos meses. Ha sido un proceso progresivo de incorporación de especies, donde las diferentes comunidades de organismos han ido aumentando su diversidad y complejidad. La colonización de los deltas ha seguido en general y hasta el momento una tendencia predecible, común a las clásicas sucesiones ecológicas (Connell & Slatyer, 1977), y donde las comunidades que aquí se han desarrollado han ido convergiendo en el tiempo con las comunidades establecidas en la zona control. No obstante, no todas las comunidades han evolucionado igual a lo largo de este periodo, puesto que ha habido comunidades que han cambiado más rápidamente que otras. En este sentido, la sucesión parece más avanzada en unas comunidades más que otras. Parte de estas diferencias iniciales pueden estar basadas en la capacidad de dispersión de los organismos. La dispersión es un factor clave que rige la conectividad entre diferentes zonas e influye en las primeras etapas en la sucesión primaria (Cowen & Sponaugle, 2009). En el medio marino los organismos tienen diferentes estrategias de dispersión (Cowen *et al*., 2007), y dependiendo de su efectividad unas especies se establecen en nuevos hábitats antes que otras. A las coladas de lava han arribado especies de diferentes maneras que determinan la evolución inicial del ecosistema: por desplazamiento activo de adultos o juveniles, como en los peces, o por dispersión pasiva ayudada por corrientes y oleaje, como sucede con los estadios larvarios de los invertebrados y los propágulos germinativos o vegetativos de las algas.

Los peces:
los más rápidos

Los peces fueron de los organismos que más rápidamente alcanzaron los deltas lávicos, en términos de diversidad, número de especies por muestra, esta ya fue similar a la de la zona control después de siete meses (Fig. 13a).

No se trata de algo excepcional, es una respuesta que previamente también se había observado en deltas lávicos similares (Godwin & Kosaki, 1989). Obviamente, los peces adultos tienen la mayor capacidad de movimiento, característica que les permite colonizar rápidamente nuevos territorios y fundar nuevas comunidades (Leitao *et al*., 2008). Los peces no encontraron grandes barreras espaciales ni físicas (bancos de arena, grandes profundidades) que sortear para llegar a los deltas, e incluso fueron capaces de migrar desde las proximidades sin perder el contacto con los fondos rocosos. Además, las áreas aledañas a las coladas de lava no sufrieron impactos significativos, y las poblaciones de organismos que allí se desarrollaban sobrevivieron a pocos metros del avance de las lavas incandescentes. Aunque también hay que señalar que para algunas especies aún no hemos registrado su presencia en los deltas. Se trata en todo caso de especies poco abundantes en comunidades no alteradas. En cuanto al número de individuos total (la suma de los individuos de todas las especies), fue claramente menor en los dos primeros periodos muestreados, pero a partir del tercer muestreo empezamos a observar que el número de peces comenzó a ser superior en los deltas (Fig. 13b). Lo que sucedió a partir del tercer periodo de muestreo es un asentamiento masivo de juveniles de distintas especies desde larvas procedentes del plancton. Si contrastamos estos datos con los de biomasa (Fig. 14a) observamos que esta es mayor en la zona control, algo que es lógico ya que aunque el número de peces era menor, tenían una talla muy superior. Si nos centramos en casos particulares de especies, como la vieja *Sparisoma cretense* (Fig. 14b), lo podemos comprender más claramente. En el caso de esta especie los individuos del rango de talla 2,5-5, juveniles recién asentados, fueron más de tres veces frecuentes en los deltas lávicos. La colonización masiva por juveniles de peces es común en coladas de lava (Godwin & Kosaki, 1989). La causa probablemente esté relacionada con la baja depredación que existe en el ecosistema. Los peces piscívoros pueden ser claves en los procesos de sucesión primaria al controlar las poblaciones de reclutas (Herrera *et al*., 2002), y en su ausencia, algunas especies pueden proliferar con mayor éxito. *Aulostomus* es uno de los principales piscívoros de los ecosistemas tropicales y subtropicales (Aronson, 1983), y también de Canarias. En los deltas, descubrimos que la densidad de población del pejetrompeta *Aulostomus strigosus* era 20 veces menor que en la zona de control. En conclusión, en los deltas ha habido una colonización mixta de adultos y juveniles. Los adultos han colonizado los deltas hasta un cierto punto ya que estos proceden de zonas limítrofes y nunca su número en los deltas ha sido superior al que hay en las proximidades. El resto de stock de las poblaciones se ha completado vía incorporación de nuevos individuos.

Muchas veces, especialmente cuando se trata de sucesiones vegetales, es posible distinguir diferentes etapas en la sucesión donde unas especies van

sustituyendo a otras en el tiempo. Sin embargo, en el caso de los peces a lo largo de la sucesión encontramos que las especies que son más abundantes, y dominan las comunidades ícticas en los deltas, son las mismas que dominaban en la zona control; y aunque a lo largo del estudio se detectaron diferencias en los periodos iniciales, estas respondieron fundamentalmente a la mayor o menor abundancia de ciertas especies, y no a la presencia o ausencia de una especie particular en los deltas o zona control. En este sentido, las especies escasamente abundantes en la zona de control o aún no presentes en los deltas tuvieron poca influencia en las diferencias entre las comunidades. Por tanto, se ha producido una sucesión primaria sin recambio de especies (Mori *et al*., 2008). Lo sucedido en los deltas lávicos no parece coincidir con otras sucesiones primarias descritas anteriormente en otros eventos catastróficos naturales similares, los cuales sugieren que, ya sea en

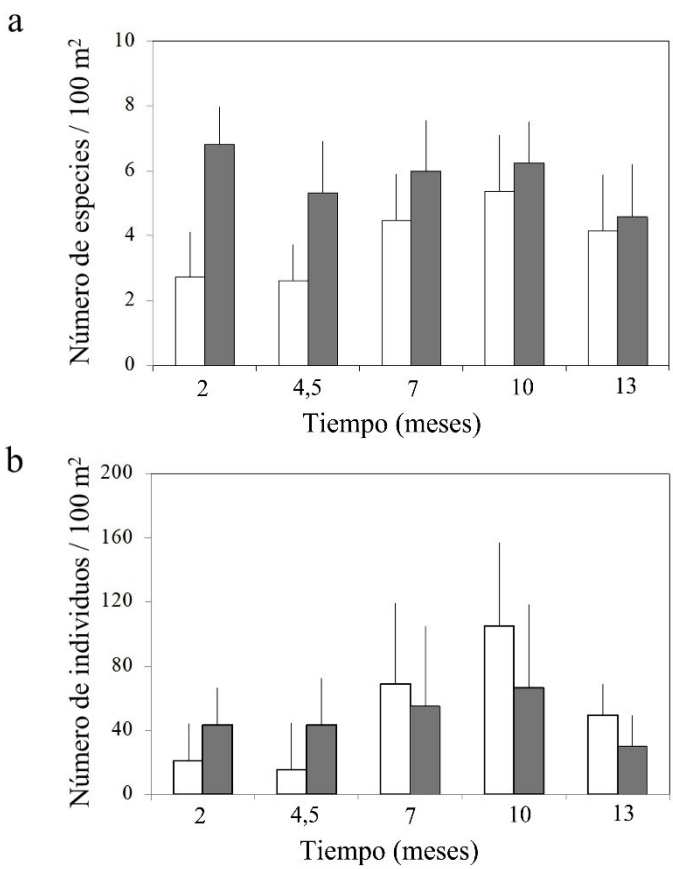


Fig. 13. Evolución de las comunidades de peces en los trece primeros meses. **a**. Número medio de especies (+ DS) por muestra. **b**. Número medio de individuos (+ DS) por muestra. Barras blancas deltas lávicos, barras negras zona control.

una etapa temprana en la sucesión (unos pocos meses) (Godwin & Kosaki, 1989), o más tardía (unos años más tarde) (Pinault *et al*., 2013) existen diferencias en la composición específica de la comunidad íctica. Aunque hay que señalar que estos dos ejemplos corresponden a comunidades de arrecifes de coral, donde existen especies de peces fuertemente ligadas a otros organismos bentónicos como los corales, sin los que su presencia no puede prosperar. En el caso de Canarias las poblaciones de peces demersales también dependen de otros organismos bentónicos, las macroalgas (Sangil *et al*., 2013), y aunque en los deltas las algas que han colonizado inicialmente el sustrato no son las que potencialmente dominarán en el ecosistema, no han impedido el normal desarrollo de las diferentes poblaciones de peces.

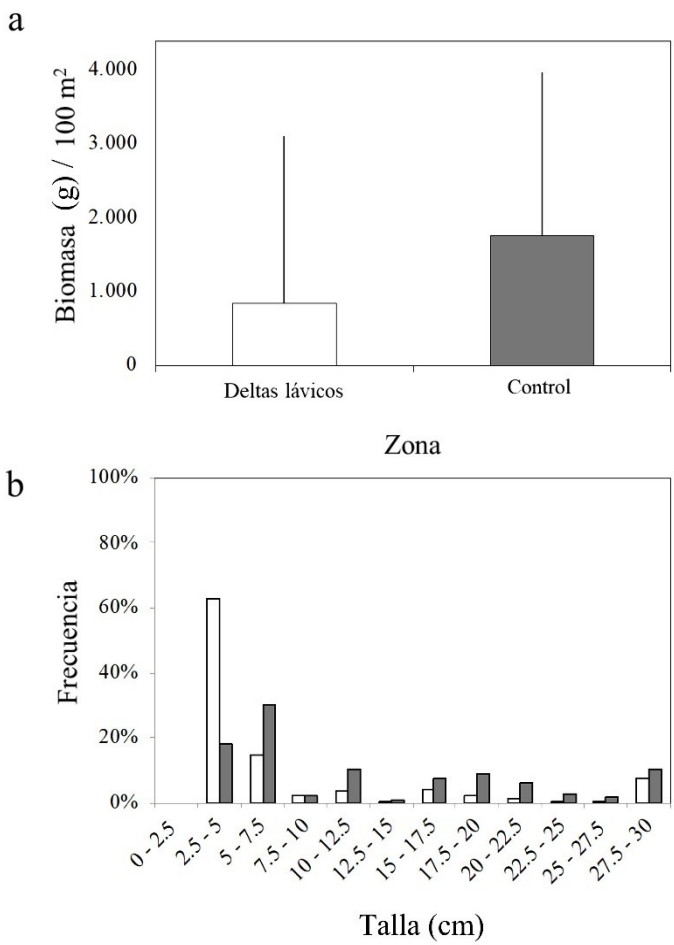


Fig. 14. Evolución de las comunidades de peces en los trece primeros meses. **a**. Biomasa total media (+ DS) por muestra. **b**. Frecuencia de la talla de los individuos de la vieja *Sparisoma cretense* muestreados. Barras blancas deltas lávicos, barras negras zona control.

Centrándonos en las especies de peces más abundantes, observamos diferentes patrones y respuestas. Por ejemplo, la boga *Boops boops* y la fula blanca *Chromis limbata*, ambas especies bento-pelágicas y mayormente planctotróficas (El-Maremie & El Mor, 2015; Anderson *et al*., 2017), fueron las especies que más rápidamente colonizaron los deltas lávicos y desde muy pronto en el monitoreo no existieron diferencias en el tamaño poblacional de estas especies respecto a la zona control. Al tratarse de especies que no comen en el fondo, dependen en menor medida de las comunidades de otros organismos establecidos en los deltas. Otras especies como el pejeverde *Thalassoma pavo* o la fula negra *Similiparma lurida*, en estos casos con fuerte relación con el fondo, e incluso territoriales como la fula negra, fueron inicialmente escasas. En los primeros meses los deltas fueron principalmente colonizados por adultos y aunque a partir de julio de 2022 observamos la incorporación de un importante contingente de juveniles, las poblaciones de estas especies en los deltas continuaron inferiores a las de la zona control. En el otro extremo, están la vieja *Sparisoma cretense* y la gallinita *Canthigaster capistrata*, cuyas poblaciones durante estos primeros meses fueron más numerosas en los deltas, gracias a la incorporación significativa de juveniles.

Los invertebrados: trayectorias diferentes en intermareal y submareal

La mayoría de los invertebrados que han colonizado los deltas lávicos proceden de asentamientos larvarios de aguas circundantes. Pocos son los ejemplos de individuos adultos que llegaron hasta las coladas por sus propios medios, entre ellos, el pulpo *Octopus vulgaris*, el choco *Sepia officinalis*, o el cangrejo remador y especie invasora *Cronius ruber*. Esta circunstancia ha podido condicionar las primeras etapas de la sucesión para este grupo de especies. La incorporación de individuos vía larvaria en un momento dado depende de los ciclos de vida de las especies, ya que no siempre hay disponibilidad en la columna de agua de larvas preparadas para asentarse (Levin, 1984; Coma *et al*., 2000). Este hecho puede ser importante en el devenir de las comunidades puesto que, en los eventos fundacionales, el asentamiento de unas u otras especies puede dirigir la trayectoria inicial de las sucesiones (Underwood & Chapman, 2006). Está ampliamente documentado que las poblaciones de larvas de especies de invertebrados bentónicos pueden variar significativamente a lo largo del año (Wong *et al*., 2022; Menéndez, 2023). En este sentido, justo después de la formación de los deltas de lava, muchas de las especies de invertebrados comunes en las comunidades bentónicas podrían no estar en su periodo reproductivo, e inicialmente sólo se han asentado en los deltas una pequeña proporción de la diversidad de invertebrados presentes en la isla.

La colonización de los hábitats intermareales y submareales, no sólo difiere en las especies, sino también en la velocidad a la cual se establecieron las especies. En el intermareal no fue hasta el segundo muestreo, cuatro meses y medio después del cese de la erupción, cuando comenzamos a detectar los primeros ejemplares de burgados (*Phorcus sauciatus*) y lapas (*Patella aspera*, *P. ordinaria*) (Figs 15a,b). Estos primeros colonizadores son también los que dominan en las comunidades climácicas de otras zonas rocosas intermareales de la isla (López *et al*., 2012). Nuevamente, y al igual que sucedió con los peces, no existió una comunidad de especies primocolonizadoras *per se* que fuera sustituida en el tiempo, aunque este aspecto también ha sido previamente descrito para eventos volcánicos similares (Gulliksen *et al*., 2004; Bollard *et al*., 2013). La escasez inicial de estos moluscos puede ser debido a sus periodos de reproducción. Aunque las lapas y los burgados tienen múltiples periodos reproductivos a lo largo del año, la producción de los gametos se concentra en verano-principio de otoño, tras la cual se produce la fecundación y la formación de las larvas veliger que se asientan rápidamente después de unos pocos días (Sousa *et al*., 2018). Por lo tanto, el periodo de asentamiento óptimo de estas especies no coincidió en el tiempo con la formación de los deltas de lava. No obstante, y pese al retraso inicial, estos moluscos ya han proliferado en los deltas y se pueden distinguir varias cohortes en sus poblaciones. Además, también han crecido rápidamente (Figs 15c,d), quizás gracias al gran desarrollo de especies de algas altamente palatables, como veremos a continuación. Otro factor a tener en cuenta, y que sumado a los anteriores ha permitido que las poblaciones de estos moluscos sean después de 19 meses (julio 2023) superiores en los deltas que en la zona control, es la baja interacción con otros organismos. Uno de sus principales predadores, la púrpura *Stramonita haemastoma* (Watanabe & Young, 2006), no la comenzamos a detectar hasta después de 13 meses (enero 2023) (Fig. 15e).

La incorporación de otras especies en la sucesión ha sido más lenta pero paulatina. Los primeros cangrejos grápsidos (*Grapsus adscensionis*, *Pachygrapsus transversus*) aparecieron junto con burgados y lapas (Fig. 15f), y los chirimiles *Tectarius striatus* no se detectaron hasta octubre de 2022 (Fig. 15g). En la última campaña (julio 2023) hemos detectado las primeras holoturias (*Holoturia sanctori*), y los primeros cangrejos ermitaños (*Clibanarius aequabilis*). La presencia de esta última especie estaba supeditada a que previamente hubiera mortalidad de burgados, puesto que este braquiuro tiene como comportamiento la selección de conchas de gasterópodos que utiliza como habitáculo para protegerse. Este es un claro ejemplo de interacción facilitadora en una sucesión ecológica (Connell & Slatyer, 1977; Bruno *et al*., 2003), donde el asentamiento de una especie depende de que previamente se hubieran establecido otras para «preparar su hábitat». En este caso, aunque hubiera disponibilidad en la columna de agua

Fig. 15. Invertebrados en la zona intermareal de los deltas lávicos. **a**. Juvenil de burgado, *Phorcus sauciatus* (abril 2022). **b**. Juvenil de lapa negra, *Patella ordinaria* (abril 2022). **c**. Burgados adultos (enero 2023). **d**. Lapas negras adultas (enero 2023). **e**. Ejemplar de purpura, *Stramonita haemastoma* (enero 2023). **f**. Ejemplar de cangrejo moro, *Grapsus adscensionis* (julio 2022). **g**. Ejemplar de chirimil, *Tectarius striatus* (octubre 2022).

de larvas de ermitaños, estas no podrían prosperar sin que antes hubieran llegado los burgados, y además, hubieran muerto por muerte natural o depredación. Pero todavía después de todos los meses transcurridos, están ausentes en los deltas muchas especies que son abundantes en la zona control. Por ejemplo, las lapas de la especie *Patella piperata* aún no han sido registradas.

La colonización de las lavas en el submareal fue inicialmente más rápida, y desde el primer muestreo algunas especies de invertebrados presentaron importantes poblaciones en los deltas. Sin embargo, la evolución de la riqueza de especies y el tamaño poblacional de las mismas está oscilando en el tiempo, con periodos en los que las poblaciones son relativamente abundantes, mientras que en otros estas disminuyen notablemente. Estas variaciones temporales responden principalmente al cambio anual en el régimen de oleaje. Como comentamos anteriormente el sustrato rocoso de los deltas lávicos está formado por coladas frágiles y mucha roca suelta, las cuales han sido removidas fuertemente en los periodos de mayor oleaje. Como resultado de la inestabilidad del sustrato, todavía las diferencias en las comunidades entre los deltas y la zona control son elevadas, a pesar de todos los meses transcurridos. Todas las especies que inicialmente han llegado a los deltas son compartidas con la zona control, aunque todavía hay notables ausencias de algunos táxones.

Parece que la limitación larvaria no existió para las especies que colonizaron los hábitats submareales, o por lo menos, inicialmente como sucedió en el intermareal. Por ejemplo, el cangrejo araña *Percnon gibbesi* proliferó notablemente desde el inicio, y hoy por hoy su densidad de población es mayor en los deltas que en la zona control (Figs 16a,b), en parte debido a que las larvas de esta especie están presentes en las aguas canarias durante todo el año (Landeira & Lozano-Soldevilla, 2018). Tampoco se puede descartar que parte del éxito de esta especie recaiga, al menos en inicio, en la depredación ya que es presa común de muchos peces demersales (Guerra-Marrero *et al*., 2023).

Otras especies que durante algunas épocas han sido abundantes son los equinodermos, como la comátula *Antedon bifida* y el erizo negro de púas cortas *Arbacia lixula* (Figs 16c,d). Estos últimos en ocasiones con decenas de individuos por metro cuadrado. Ciertamente el hábitat, con muchas grietas y huecos, ha favorecido su reclutamiento y proliferación masiva, pero también es verdad que las poblaciones de *A. lixula*, y al menos las de *A. bifida* que se disponen en aguas más someras, sufren el rigor del oleaje y la inestabilidad del sustrato, desapareciendo en gran medida tras los temporales. Otra especie que ha proliferado en los deltas es la ascidia *Ascidia mentula*. También se han detectado pulpos *Octopus vulgaris* a lo largo de todo el periodo de estudio, y aunque en menor abundancia que en la zona control,

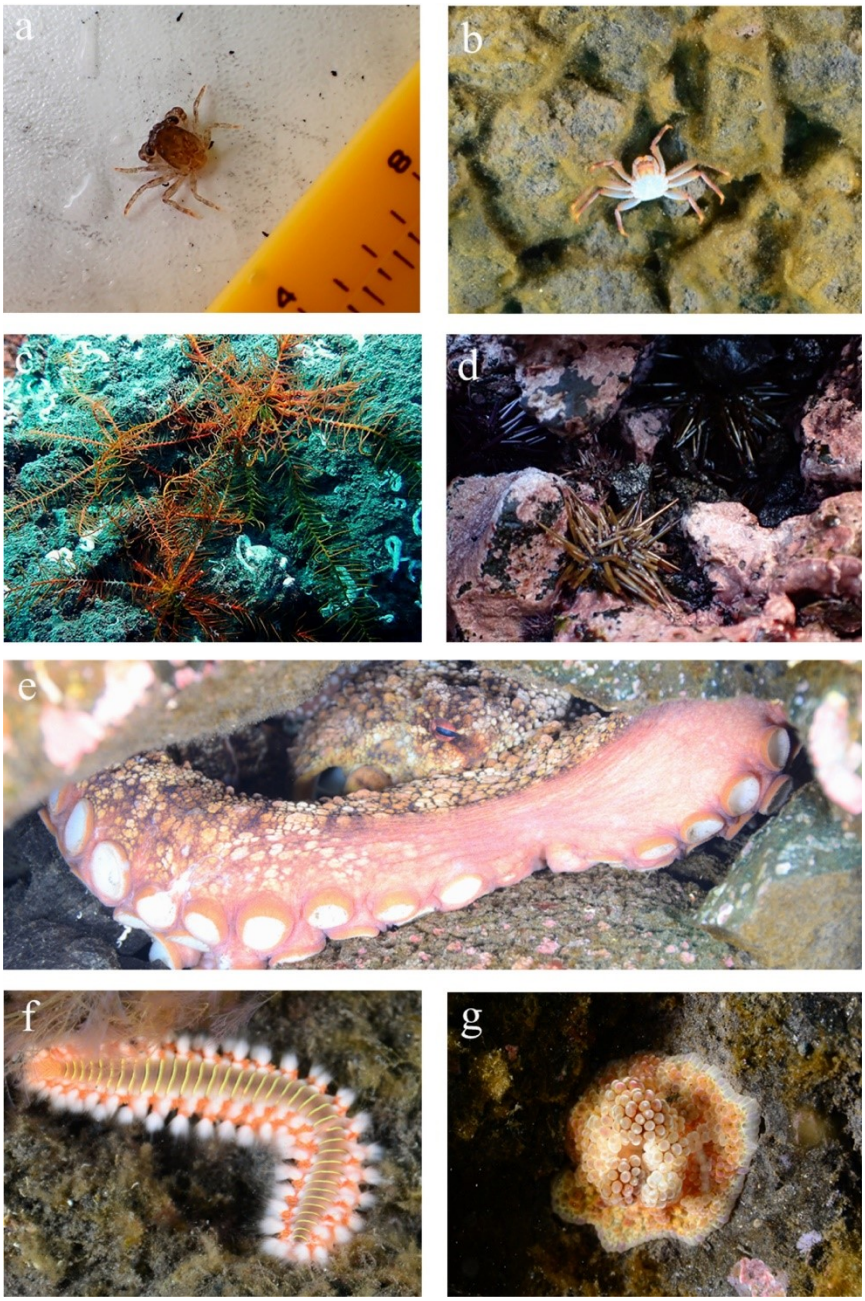


Fig. 16. Invertebrados en la zona submareal de los deltas lávicos. **a**. Larva megalopa de un grápsido (abril 2022). **b**. Muda de cangrejo araña, *Percnon gibbesi* (febrero 2022). **c**. Comátulas, *Antedon bifida* (octubre 2022). **d**. Juveniles de erizo de púas negras, *Arbacia lixula*, y de erizo pelón *Paracentrotus lividus* (abril 2023). **e**. Pulpo, *Octopus vulgaris*. **f**. Gusano de fuego, *Hermodice carunculata* (febrero 2022). **g**. Anémona, *Alicia mirabilis* (febrero 2022).

son bastante comunes las poblaciones del gusano de fuego *Hermodice carunculata* (Figs 16e,f).

También en ecosistemas desequilibrados y en las primeras etapas de una sucesión pueden suceder eventos de asentamientos anómalos debido a la baja interacción entre organismos, bien por competencia o depredación (McCook & Chapman, 1993). Uno de estos asentamientos fue el de la anémona *Alicia mirabilis* (Fig. 16g) la cual fue relativamente común en febrero de 2022, pero resultó una presencia efímera puesto que no se detectaron individuos de la especie con posterioridad. De momento, como ausencias notables a destacar en el submareal de los deltas, son la holoturia *Holothuria sanctori* y el erizo negro de púas largas *Diadema africanum.*

Las algas:
los cambios más profundos en la sucesión

Las comunidades de algas, tanto en el intermareal como submareal de los deltas lávicos, han sido las comunidades que han experimentado los cambios más profundos durante este periodo. A lo largo de las primeras etapas de la sucesión se han producido cambios en la diversidad y en la dominancia de las especies (Sangil *et al*., 2023). En este caso, nuestros resultados han coincidido con otros estudios de colonización de algas en coladas volcánicas (Doty, 1967; Jónsson, 1968; Zubia *et al*., 2018), o de sustratos experimentales (Serisawa *et al*., 1998; Jung & Choi, 2022).

Las primeras etapas de la sucesión primaria en comunidades de algas se caracterizan por presentar el predominio de especies efímeras de rápido crecimiento, baja complejidad morfológica y gran capacidad de propagación (Sousa, 1979; Littler & Littler, 1980). Estas características, junto a la baja competitividad inicial, favorecen las altas dinámicas y las explosiones demográficas de estas especies. Estas especies primocolonizadoras, por lo general, están ausentes o son inusuales en las comunidades climácicas finales (Huston & Smith, 1987; McCook, 1994). Las siguientes etapas en la sucesión, también observada en los deltas lávicos, consisten en la incorporación progresiva de especies perennes, más complejas morfológicamente y de crecimiento más lento, pero más competitivas desde el punto de vista biológico y capaces de desplazar a las especies efímeras (Mariath *et al*., 2013). Como en el resto de las comunidades estudiadas, la trayectoria de las comunidades de algas en los deltas ha tendido poco a poco a parecerse a las comunidades de la zona control, aunque debido al establecimiento inicial de una comunidad de primocolonizadoras estas comunidades presentan un retraso en su evolución si lo comparamos con el resto.

Aunque las comunidades de algas del intermareal y submareal de los deltas evolucionarán finalmente a comunidades muy distintas en cuanto a la

composición de las especies, inicialmente compartieron bastantes similitudes. En lo que respecta a las especies que fundaron las comunidades, ambos hábitats comparten muchas de ellas. Los valores de cobertura total sobre la roca también fueron inicialmente elevados. En el intermareal todo el sustrato rocoso estaba recubierto por algas, mientras que en el submareal, aunque también fue elevado, no llegó al 100% de cobertura. Como es bien sabido, en su comienzo las sucesiones primarias se caracterizan por una baja interacción entre organismos, y muchas de las comunidades de algas en su momento de fundación y primeras etapas, no convivieron con herbívoros o estos fueron poco abundantes (Mayakun *et al*., 2020; Srednick *et al*., 2023). Recordemos que en el caso del intermareal, los gasterópodos burgados y lapas fueron muy escasos los primeros meses, y no fue hasta después de un año cuando sus tamaños poblacionales se igualaron con los de la zona control, lo que sin duda favoreció la abundancia de algas (Williams *et al*., 2000). Una vez que las poblaciones de herbívoros alcanzaron un tamaño crítico en el intermareal, la cobertura de las algas ha ido disminuyendo paulatinamente. En cuanto a la riqueza de las comunidades, el número de especies ha ido creciendo progresivamente, pero en las comunidades del submareal los valores de riqueza media por muestra se han aproximado de forma más rápida a los de la zona control. El hábitat también puede interaccionar en las sucesiones primarias y las especies suelen llegar a colonizar más fácilmente las lavas de los ambientes submareales (Guliksen *et al*., 1980).

Las primeras comunidades de la zona intermareal de los deltas lávicos estaban dominadas inicialmente (primeros meses) por céspedes de color pardo cobrizo, que fueron los dominantes, correspondían a algas pardas filamentosas Ectocarpales (p.e., *Feldmannia*, *Kuckuckia*, *Hincksia*, *Pilinia*), sobre las que crecían algunas diatomeas (Bacillariophyta, p.e., *Licmophora*, *Melossira*, *Striatella*, *Odontella*). Los lechos de color purpura o rojizo, y con aspecto de largos pelos, correspondían a *Bangia fuscopurpurea* (Fig. 17a), y los de color verde pertenecían a ulváceas que incluían a diferentes especies del género *Ulva* (Fig. 17b). Las cianobacterias (Cyanophyta, p.e., *Nostoc*, *Oscillatoria*, *Meristopedia*) fueron también comunes en esta etapa inicial, pero no tan abundantes como las especies previamente mencionadas. Muchos de estos taxones, a excepción de las ulváceas y sólo en determinadas circunstancias, no son especies dominantes en comunidades finalistas. Ello no ha impedido que posiblemente a partir de un contingente limitado de diásporas se hayan fundado poblaciones que en pocas semanas recubrieron todo el sustrato rocoso disponible. Estas especies, además de contar con un acelerado crecimiento, realizan un importante esfuerzo reproductivo y una parte importante, o la totalidad de sus talos, puede convertirse en células propagadoras, lo que permite que sus poblaciones se multipliquen exponencialmente una vez establecidas en una nueva zona (De Wreede &

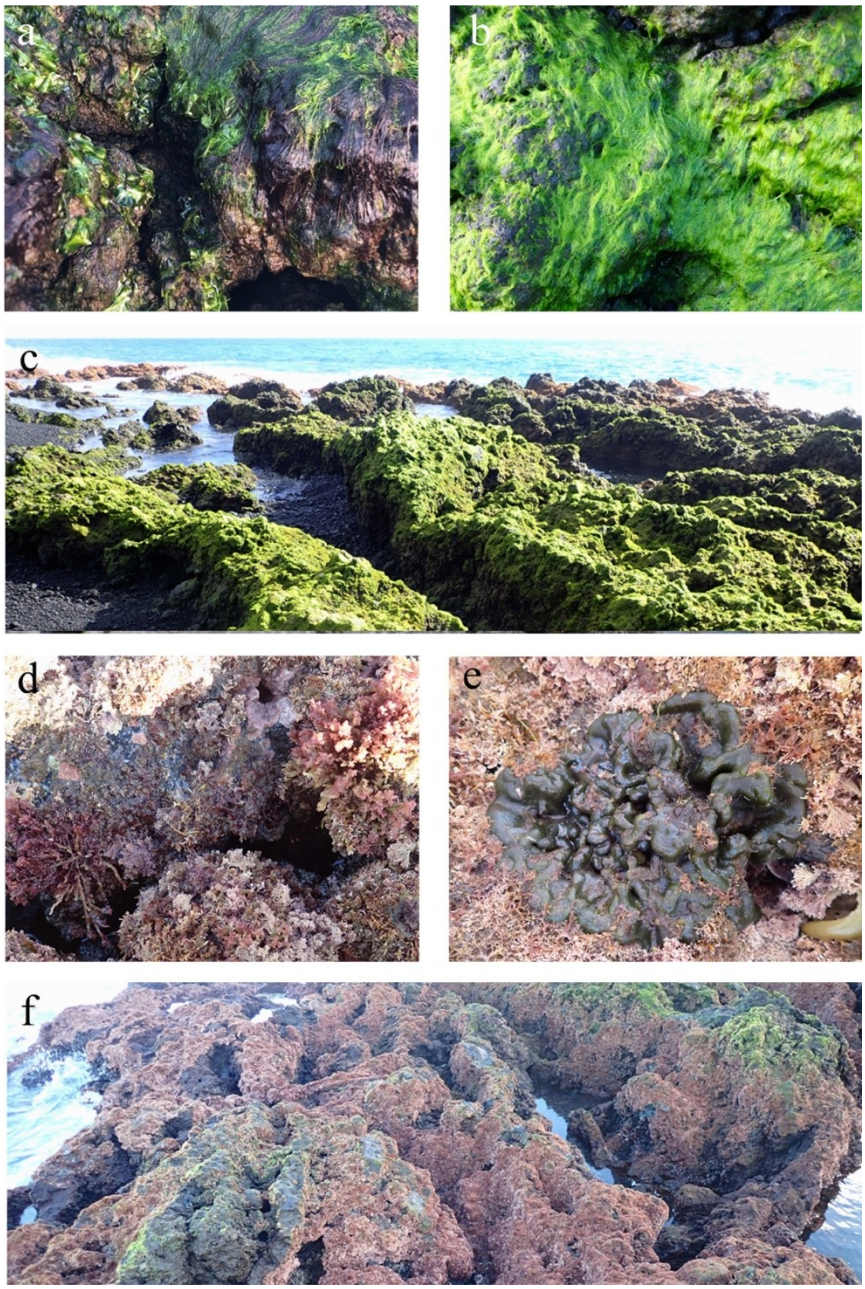


Fig. 17. Algas en la zona intermareal de los deltas lávicos. **a**. *Bangia fuscopurpurea*, en color rojizo (abril 2022). **b**. Poblaciones de *Ulva prolifera* y *U. compressa* (abril 2022). **c**. Ulváceas (*Ulva* spp.) en la zona intermareal del delta pequeño (octubre 2022). **d**. Césped de rodomeláceas (*Laurencia dendroidea*, *L. obtusa*) (abril 2023). **e**. *Codium intertextum* (abril 2023). **f**. Césped de algas coralinas geniculadas (*Corallina*, *Jania*) (abril 2023).

Klinger, 1988; Santelices, 1990). Otro aspecto a destacar fue la fisionomía de la vegetación, que aunque estaba formada por un ensamble de diferentes colores, todo el intermareal desde sus niveles superiores a los inferiores, tenía un aspecto homogéneo (Fig. 17c).

Progresivamente, y a partir del segundo muestreo, comenzaron a observarse en el intermareal especies de algas perennes, principalmente algunas algas coralinas que son las que dominan en la zona control y en las comunidades climácicas de Canarias (Sangil *et al*., 2009, 2014a). En abril de 2022 detectamos las primeras algas coralinas costrosas. En cada muestreo posterior a estas fechas comprobamos como estas especies iban poco a poco desplazando a las especies primocolonizadoras. También detectamos la incorporación de muchos otros taxones como las rodomeláceas (*Laurencia s.l.*) (Fig. 17d), algas cespitosas como las coralinas geniculadas con las cuales suelen crecer entremezcladas, y talos costrosos como *Codium intertextum* (Fig. 17e). La incorporación de algas filamentosas ceramiáceas, como *Wrangelia argus* y algunas especies de *Ceramium*, muy comunes en comunidades cespitosas de la zona control y del litoral canario en general (Sansón, 1991), comenzó a partir de enero de 2023, aumentando su cobertura a partir de entonces. La fisionomía del intermareal también fue cambiando y la organización en bandas de las diferentes poblaciones de algas, conocida como zonación, que no es más que la organización espacial de las especies en respuesta a la desecación, ha comenzado a ser muy evidente en los últimos muestreos (Fig. 17f).

En el submareal, inicialmente también dominaron las ectocarpales (e.j., *Feldmannia*, *Hincksia*, *Discosporangium*) y diatomeas (*Amphora*, *Navicula*, *Cylindrotheca*) (Figs 18a-c). Tempranamente llegaron a los deltas las algas coralinas costrosas, y a destacar también desde el inicio, la presencia de *Dasya pedicellata*, una especie común en la zona control pero que en determinados periodos presentó en los deltas una abundancia muy superior a la zona control. A partir del segundo y tercer muestreo se fueron incorporando a la comunidad especies típicas de la zona control, como las algas rojas filamentosas *Cottoniella filamentosa* y *Lophocladia trichoclados* las cuales fueron relativamente abundantes al final del primer año de monitoreo (Fig. 18d). Durante estos meses fuimos comprobando la llegada a los deltas de otros taxones que son característicos de las comunidades submareales de las islas, como las algas pardas dictiotáceas (*Lobophora*, *Canistrocarpus*, *Dictyota*, *Taonia*) que con los años serán las especies dominantes en las comunidades submareales (Fig. 18e). Todas estas especies fueron desplazando con los meses a las ectocarpales y diatomeas, las cuales a finales de 2022 alcanzaron los valores mínimos desde el inicio de la sucesión. En julio de 2022 fuimos espectadores de la proliferación masiva de algas rojas liagoráceas (*Liagora*, *Ganonema*) (Figs 18d,f). Estas especies son efímeras, sus gametofitos proliferan entre finales de primavera y principios

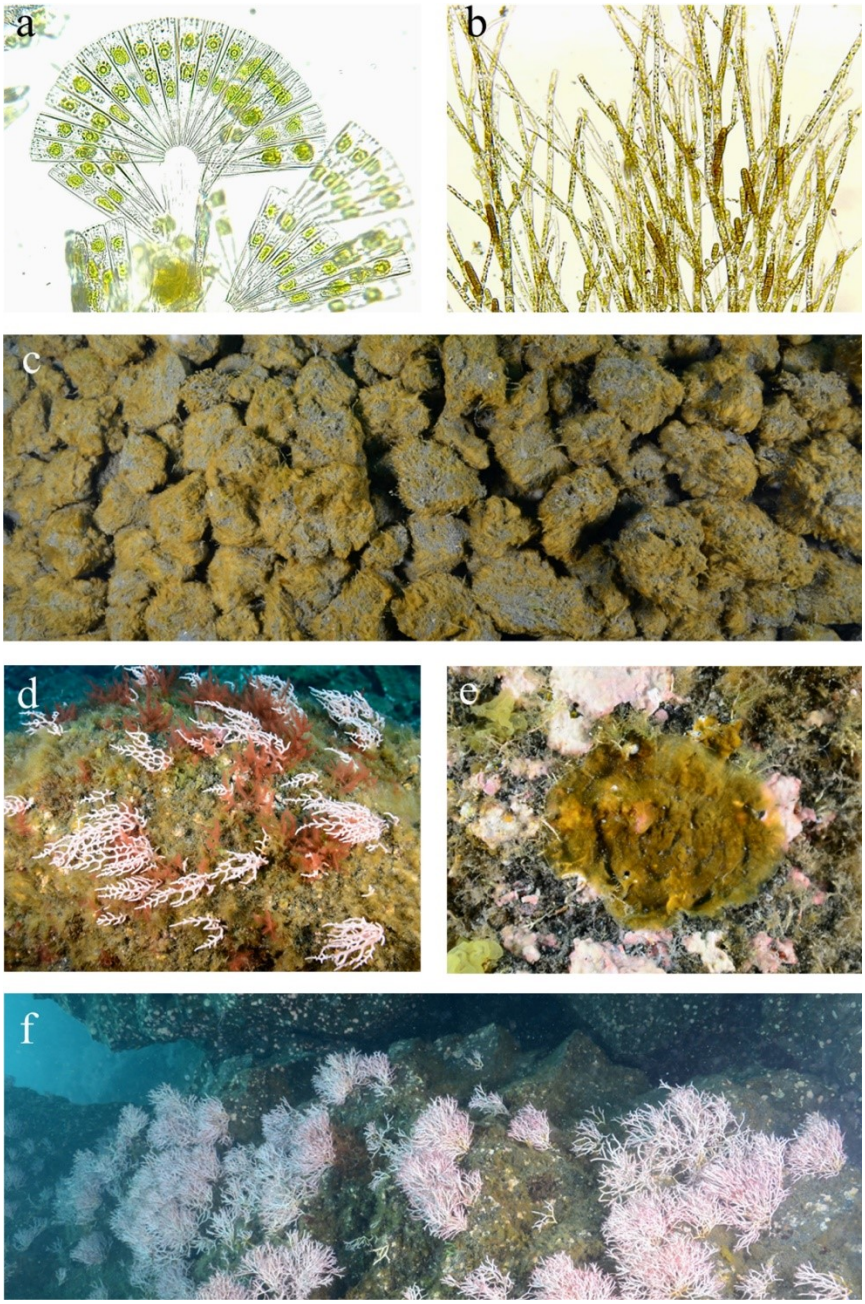


Fig. 18. Algas en la zona submareal de los deltas lávicos. **a**. *Licmophora*, diatomea (febrero 2022). **b**. Alga parda filamentosa, *Kuckuckia spinosa* (febrero 2022). **c**. Poblaciones de ectocarpales y diatomeas (febrero 2022). **d**. Poblaciones de algas rojas *Dasya pedicellata* (color rojo) y *Ganonema lubrica* (color blanco) (julio 2022). **e**. Alga parda costrosa, *Lobophora canariensis* (julio 2022). **f**. Poblaciones de liagoráceas, (*Liagora* spp.) (julio 2022).

de verano cuando el mar de fondo y la fuerza de oleaje desciende en frecuencia. En otoño e invierno, estos taxones se desarrollan sobre pequeñas piedras y callaos que son movidos por las olas y que reciben también la influencia de la arena. Persisten en estos ambientes como esporofitos, la fase microscópica resistente. En los deltas no sólo proliferaron sobre las rocas sueltas, sino que excepcionalmente también lo hicieron sobre el sustrato consolidado, lo que sin duda respondió a la baja competencia que existía en estos ambientes con otras especies de algas. En el segundo año de muestreo se repitió nuevamente la proliferación de estas especies, indicando que estas comunidades son aún poco maduras.

De manera similar a lo sucedido con las comunidades de invertebrados del submareal, la falta de estabilidad del sustrato y la fragilidad de la roca va a interaccionar con la sucesión, al menos en lo que se refiere a su evolución temporal durante los próximos años. Los cambios en las comunidades se han ralentizado puesto que el oleaje ha removido el sustrato rocoso y diezmado muchas de las poblaciones de algas perennes que habían proliferado después de un año. Como resultado, a principios de 2023 comprobamos como muchas comunidades habían involucionado hacia etapas iniciales, en las que nuevamente predominaban las ectocarpales, y las coralinas costrosas redujeron significativamente su abundancia. Esta circunstancia genera cierta incertidumbre sobre cómo irán evolucionando estas comunidades, ya que su estabilidad temporal no se alcanzará hasta que el sustrato deje de ser removido por el oleaje.

Las algas coralinas: especies claves en las comunidades bentónicas

Las denominadas algas coralinas constituyen el grupo más amplio entre las algas rojas en las que el carbonato cálcico está presente como constituyente de las paredes celulares (Johansen, 1981; Afonso-Carrillo, 1982). Agrupan en la actualidad alrededor de 800 especies, pero se ha estimado que la diversidad de especies es de dos a cuatro veces superior a la actualmente conocida (Richards *et al.,* 2018). En las algas coralinas, el carbonato cálcico les permite construir plantas con segmentos regulares no calcificados (coralinas geniculadas) y otras casi íntegramente calcificadas (coralinas no geniculadas), que varían desde formas diminutas a otras de decenas de centímetros que llegan a formar estructuras sólidas y duraderas que incluso sustentan formaciones como los arrecifes tropicales o los lechos de rodolitos (Woelkerling, 1988; Littler & Littler, 2013; Riosmena *et al*., 2017). Están distribuidas por todos los mares y en Canarias son un grupo abundante y diverso omnipresente en todas las comunidades bentónicas (Afonso-Carrillo, 2021). La mayor parte de las algas coralinas que fueron identificadas en las primeras etapas de colonización de los deltas lávicos

habían sido previamente identificadas en la isla de La Palma (Sangil *et al*., 2003, 2005, 2008), de manera que es asumible atribuir a las poblaciones de zonas costeras próximas no afectadas por la erupción la procedencia de las diásporas colonizadoras.

Era bien conocido que las algas coralinas estaban presentes en el proceso de sucesión de colonización de nuevos sustratos, como ocurre en las nuevas coladas lávicas que llegan hasta el mar. Pero los datos hasta ahora conocidos procedían de muestreos realizados al menos dos años después de finalizada la erupción, y en los que las formas no geniculadas de algas coralinas habían sido reportadas sin identificar, agrupadas conjuntamente como «coralinas costrosas» (ver Gulliksen, 1974; Jónsson *et al*., 1987; Gunnarsson, 2000). Esta es la primera vez que se documenta una participación tan temprana de algas coralinas en el proceso de colonización de las coladas lávicas, y además se identifican las principales especies que intervienen. Es un error agrupar y tratar colectivamente a estas algas bajo el nombre de «coralinas costrosas» (CCA o «crustose coralline algae», en la bibliografía anglosajona), puesto que se concede un mismo papel ecológico a especies con diferentes funciones, como las especies anuales oportunistas, o las especies perennes de las etapas finales de la sucesión (Sangil *et al*., 2014b; Afonso-Carrillo, 2021).

Las algas coralinas costrosas fueron de los primeros organismos pluricelulares marinos que se establecieron sobre los nuevos sustratos. Apenas dos meses después de finalizada la erupción, las algas coralinas ya se habían asentado sobre la superficie de rocas volcánicas previamente colonizadas por diatomeas y bacterias. Tanto en el intermareal como en el submareal somero, las primeras algas coralinas colonizadoras correspondieron a especies con morfologías relativamente simples, definidas por plantas costrosas, diminutas (pocos milímetros de ancho), muy delgadas (menos de 50 µm de alto en las partes vegetativas), una vida efímera de pocas semanas, que formaron sobre las coladas una delicada cubierta blanquecina. En las muestras examinadas en el laboratorio se reconocieron varias especies diferentes del género *Hydrolithon*, similares a las que previamente habían sido descritas sobre las hojas de *Cymodocea nodosa* en los sebadales canarios, y caracterizadas por la numerosa presencia de células pelo (tricocitos), ya sea aislados o reunidos en densos grupos (campos de tricocitos) (Reyes, 1989; Reyes & Afonso-Carrillo, 1995) (Fig. 19a). Cuando las plantas de *Hydrolithon* estaban fértiles las reconocíamos porque sobre su superficie se formaban numerosas estructuras prominentes, los conceptáculos, con diferentes tipos de estructuras reproductoras en su interior (Reyes, 1989; Afonso-Carrillo, 2021), y cuya morfología nos permitió diferenciar distintas especies. Sin embargo, detectamos numerosas plantas de *Hydrolithon* desprovistas de conceptáculos, pero que por el contrario portaban sobre su superficie multitud de diminutas estructuras planas triangulares dispuestas al final de un corto pie cilíndrico. Confirmamos que

se trataba de unas estructuras especializadas, propágulos vegetativos, que intervienen en procesos de multiplicación vegetativa, un fenómeno que ya había sido documentado en Canarias, donde estos propágulos exhiben formas diferentes que tienen interés como carácter con valor diagnóstico (Solms-Laubach, 1881; Coppejans, 1978; Afonso-Carrillo, 1989). La alta proporción de plantas de *Hydrolithon* portadoras de estos propágulos que observamos en las numerosas muestras examinadas, nos sugiere que la reproducción vegetativa mediante la participación de estas estructuras especializadas puede jugar un papel relevante en estas primeras etapas de colonización.

Tanto en el intermareal como en el submareal somero comprobamos que estas diminutas algas coralinas pioneras resultaron inmediatamente cubiertas por otras algas coralinas más grandes y gruesas, que fueron identificadas mediante estudios morfo-anatómicos y moleculares (Peña *et al*., 2023). En el intermareal, durante algunos meses fueron muy abundantes unas plantas costrosas lobuladas de color rosa blanquecino relativamente grandes (hasta 2 cm de ancho), de alrededor de un tercio de milímetro de espesor, con la superficie lisa y los bordes gruesos que se elevaban ligeramente formando incipientes crestas al contactar entre sí los márgenes de distintas costras. La calcificación parecía no excesivamente intensa puesto que resultaba factible obtener secciones transversales utilizando una hojilla sin eliminar el carbonato. Estas plantas carecían de conceptáculos, pero mostraban en su superficie una serie de pústulas similares en aspecto a los campos de tricocitos (células pelo) comunes en algunas algas coralinas. Posteriormente comprobamos que a partir de estas costras se erguían ramas erectas geniculadas tipo *Corallina* (Fig. 19b), que paulatinamente fueron proliferando y con su crecimiento terminaron por ocultar las costras iniciales. Con datos morfológicos y moleculares, se confirmó que la porción costrosa y las ramas erectas pertenecían a un mismo taxon, que fue identificado de manera fehaciente como *Corallina berteroi*, una especie bastante común en el intermareal de las costas de Canarias, pero que hasta hace unos años había sido determinada erróneamente como *Corallina elongata*, y más reciente por sus sinónimos *Corallina caespitosa* o *C. ferreyrae* (Afonso-Carrillo, 2021).

En los últimos años se ha comprobado que *Corallina berteroi* presenta una amplia distribución a nivel mundial, habiendo sido identificada en numerosas regiones con nombres diferentes que las evidencias moleculares han confirmado como sinónimos de una sola entidad específica, cosmopolita de las regiones templadas (Calderón *et al*., 2021). Precisamente, uno de estos sinónimos es *Yamadaia melobesioides*, un curioso taxon descrito para Japón (Segawa, 1955), que fue caracterizado por constar de una porción costrosa como parte dominante, a partir de la cual y sólo ocasionalmente, se desarrollaban algunas cortas ramas erectas tipo *Corallina*, que portarían los conceptáculos. Hemos comprobado que la estructura de las costras dominantes en el intermareal de las coladas es idéntica a la descrita por

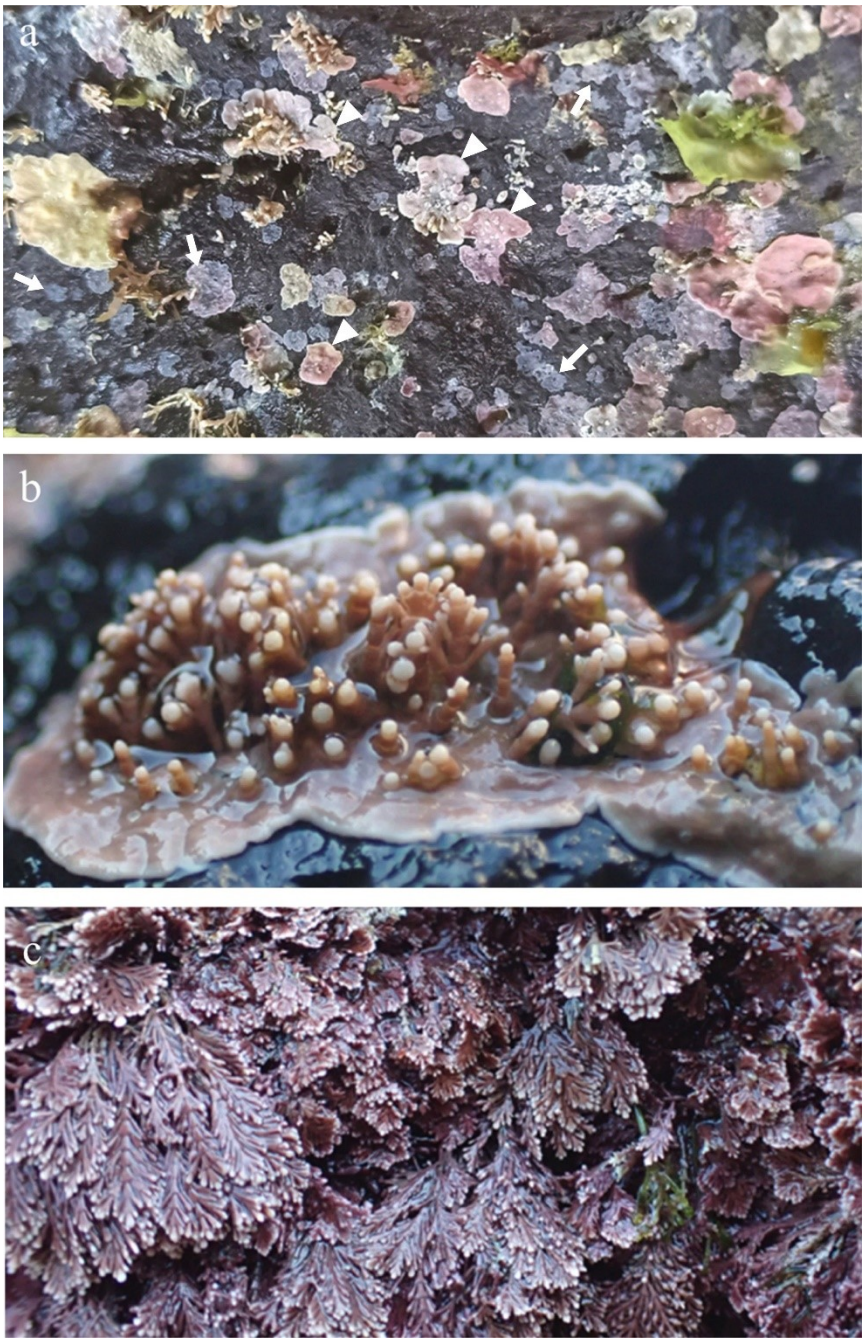


Fig. 19. Algas coralinas en la zona intermareal de los deltas lávicos. **a**. Primeras especies detectadas: *Hydrolithon* spp. (flechas) y costras de *Corallina berteroi* (cabezas de flecha) (abril 2022). **b**. Costra de *C. berteroi* iniciando la porción erecta de su talo (julio 2022). **c**. Césped desarrollado de *C. berteroi* (octubre 2022).

Segawa (1955) para las plantas de Japón. Todas estas evidencias sugieren que, bajo determinadas condiciones ambientales, la porción costrosa puede proliferar y tener un desarrollo preferente frente a la formación de las ramas erectas. Así, cuando la disponibilidad de sustrato para la fijación no es un factor limitante, como ocurre durante el proceso de colonización de los nuevos sustratos desnudos creados por la lava, resulta ecológicamente más ventajoso ocupar en primer lugar la mayor parte de superficie dando prioridad al crecimiento y la proliferación de las bases costrosas, posponiendo en el tiempo el gasto dedicado a formar las ramas erectas. Con la formación de las ramas erectas se incrementará notablemente la superficie de la planta que está en contacto directo con el agua, aumentando también la capacidad de intercambio con el medio, pero parece más ventajoso una vez que la ocupación del espacio haya sido asegurada. Las limitaciones que podrían exhibir las bases costrosas por su reducida superficie hábil para el intercambio con el medio, se superan por la abundancia de campos de tricocitos, en los que numerosas y largas células pelo, multiplican la superficie en contacto con el agua, favorecen el intercambio y facilitan el desarrollo de las plantas (Johansen, 1981; Afonso-Carrillo, 2021).

El rápido crecimiento como oportunista y colonizador temprano que hemos comprobado en las bases costrosas de *Corallina berteroi* no había sido anteriormente documentado, y puede ayudar a explicar el éxito alcanzado por esta especie, como se desprende de su amplia distribución mundial por las aguas templadas. Las etapas post-germinación de las esporas de *C. berteroi* tienen su óptimo de crecimiento con temperaturas del agua de mar entre 20-25 ºC, soportan irradiancias elevadas y no sufren fotoinhibición (Hosoi & Kato, 2023), condiciones que están presentes en el delta lávico. Sólo cuando la disponibilidad de sustrato resultó limitante, detectamos bases costrosas de *C. berteroi* significativamente más pequeñas con precoz presencia de ramas erectas.

Muy probablemente, *C. berteroi* representa la primera especie perenne que se estableció en el intermareal del delta lávico del Tajogaite, y seis meses después de finalizada la erupción el denso y característico césped de *C. berteroi* ya crecía en muchas zonas de las coladas de lava (Fig. 19c). En ese momento, también se habían incorporado a estas comunidades pioneras otras especies de algas coralinas, tanto geniculadas como no geniculadas, pero todas todavía con una muy reducida participación (p.e., *Amphiroa beauvoisii*, *Jania pedunculata* var. *adhaerens*, *Jania virgata*, *Neogoniolithon orotavicum*). Hay también otra *Corallina* que puede llegar a ser abundante, con costra reducida y ramas delgadas, que sobre el terreno recuerda por su aspecto a *Jania virgata*, y que continúa en estudio.

En el sublitoral somero, por el contrario, las poblaciones pioneras de las mismas especies de *Hydrolithon* identificadas en el intermareal no resultaron cubiertas por costras de *Corallina*, ausentes en estos ambientes. Una especie

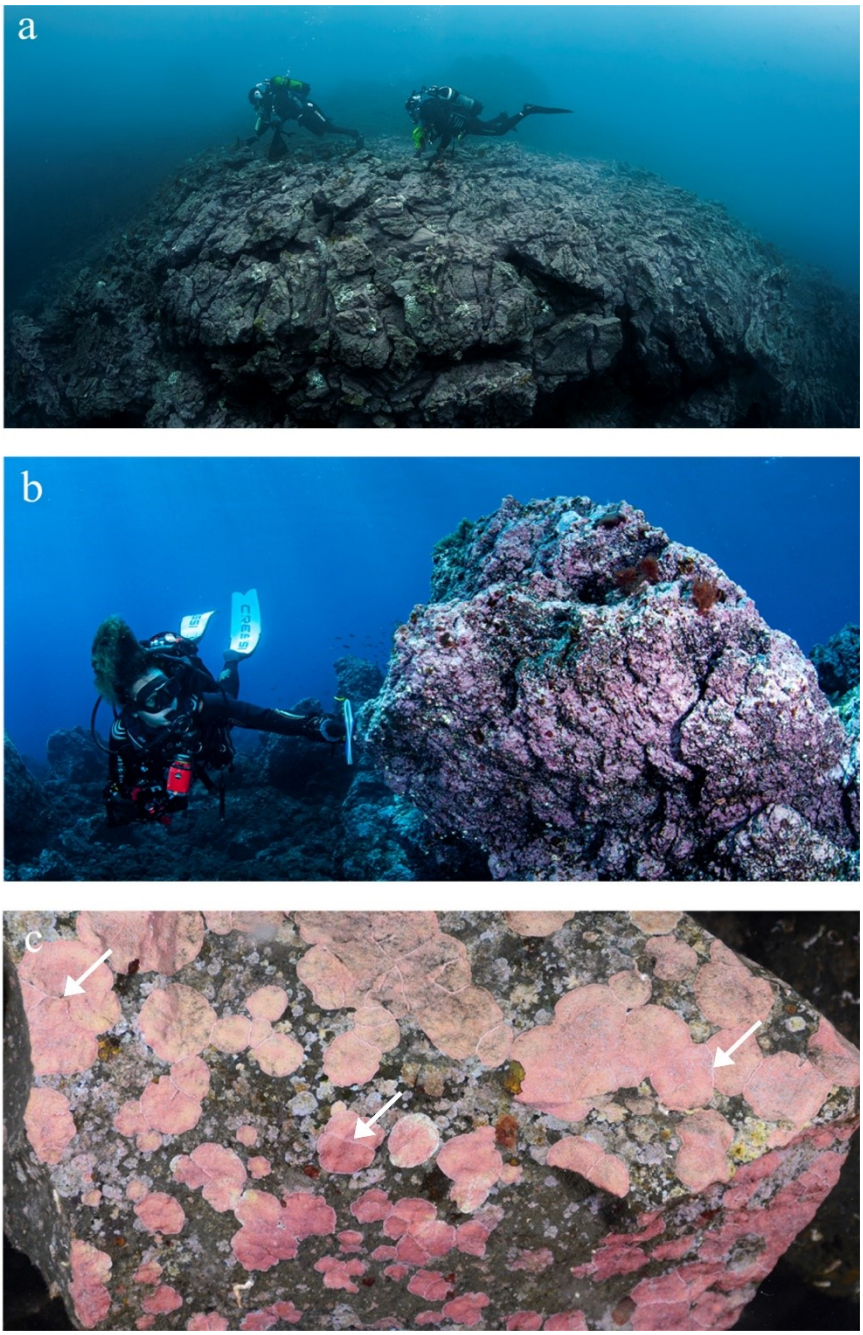


Fig. 20. Algas coralinas en la zona submareal de los deltas lávicos. **a**. Aspecto de los fondos rocosos someros recubiertos por algas coralinas (enero 2023). **b**. Densas poblaciones de *Porolithon* cubren la mayor parte de una roca (octubre 2022). **c**. Detalle de ejemplares de *Porolithon* mostrando pequeñas crestas en los márgenes enfrentados (flechas) (julio 2022).

no geniculada fue claramente dominante desde dos meses después de finalizada la erupción (Figs 20a,b), caracterizada morfológicamente por sus costras de circulares a lobuladas de color blanquecino a rosa-salmón, dependiendo del grado de exposición a la luz, relativamente grandes (hasta 4 cm de ancho), de alrededor de un tercio de milímetro de espesor, con la superficie lisa y los bordes no engrosados, ligeramente más claros, y formando pequeñas crestas cuando chocaron distintas costras entre sí (Fig. 20c). Durante los primeros meses todas estas costras no desarrollaron conceptáculos, pero en su superficie fueron muy abundantes los campos de tricocitos. Sin embargo, antes de finalizar el primer año después del final de la erupción, estas costras se mostraron fértiles, y se reconocieron todos los tipos de conceptáculos (con tetrasporangios, con espermatangios y con carpogonios-carposporangios). Las evidencias morfológicas y moleculares permitieron identificar estas plantas de forma inequívoca como una especie de *Porolithon* (Peña *et al*., 2023).

Hasta ahora, en Canarias el género *Porolithon* estaba representado por una sola especie, *Porolithon oligocarpum*, una especie muy común, perenne, con costras gruesas de hasta 3 mm de espesor con conceptáculos estacionales poco numerosos, dominante en las etapas finales de la sucesión de los fondos rocosos del sublitoral somero bien iluminados y expuestos al oleaje (Afonso-Carrillo, 2021). Sin embargo, en las lavas del Tajogaite la planta que proliferó desde una fase muy temprana cubrió directamente a las algas coralinas primocolonizadoras evitando el desarrollo de otras coralinas costrosas que en Canarias son habituales en las fases intermedias de la sucesión. Las costras de este *Porolithon*, relativamente delgadas y con una elevada densidad de conceptáculos en su superficie a finales del primer año, exhibieron el comportamiento característico de las especies oportunistas: crecimiento rápido, escasa diferenciación estructural, baja biomasa y alto esfuerzo reproductor (Littler & Littler, 1980). Las evidencias moleculares también confirmaron que se trataba de un taxon diferente a *Porolithon oligocarpum*, ahora en estudio, y que no había sido documentado en Canarias. Ese comportamiento oportunista de esta especie como colonizador temprano en etapas intermedias de la sucesión, y que muy probablemente será cubierto posteriormente por otras especies perennes más gruesas, puede ayudar a explicar por qué su presencia ha pasado previamente inadvertida en Canarias. Posteriormente se detectó la incorporación de otras algas coralinas, tanto geniculadas como no geniculadas, pero siempre con una muy escasa participación (p.e., *Mesophyllum expansum, Titanoderma pustulatum*).

Las comunidades bentónicas profundas del submareal

Con la profundidad la vida se ralentiza y los organismos tienen un crecimiento más lento. La luz comienza a ser un factor limitante para el

desarrollo de los organismos fotosintetizadores y la abundancia de las algas en términos de cobertura es inferior a la de los fondos someros bien iluminados. La composición de las comunidades también varía significativamente y aparecen con la profundidad especies de algas que no son comunes en los fondos iluminados (Lüning, 1990). En las comunidades bentónicas del submareal profundo son abundantes los invertebrados sésiles, corales y esponjas, en parte por la menor competencia con las algas por el sustrato. Por razones logísticas la frecuencia y el número de muestreos que hemos realizado en estas comunidades es inferior a los muestreos del submareal somero. Hasta ahora lo que hemos podido comprobar es que la colonización de las coladas de lava entre 30-50 m de profundidad es muy incipiente. Por ejemplo, con respecto a la fauna invertebrada únicamente hemos detectado la presencia de seis invertebrados vágiles: el cangrejo araña *Percnon gibbesi*, el cangrejo obispo *Stenorrhynchus lanceolatus*, la cigala canaria *Enoplometopus antillensis*, el gusano de fuego *Hermodice carunculata*, la comátula *Antedon bifida*, y el cono *Conus pulcher.* Aunque estas especies son las más frecuentes en la zona control, sólo representan una fracción de la biodiversidad total que se puede encontrar en este tipo de fondos. De momento no hemos registrado ninguna especie de invertebrado sésil. En cuanto a las algas, las más comunes hasta la fecha son las coralinas costrosas junto con algunas dictiotáceas (*Dictyota, Lobophora*) y algas rojas filamentosas como *Lophocladia trichoclados*.

CRÉDITOS DE LAS IMÁGENES Y MATERIAL AUDIOVISUAL EXTRA.- Todas las imágenes que ilustran este capítulo han sido realizadas por nuestro equipo investigador, a excepción de la figura 1b cuyo autor es Marten Van Dijken Paul (Van Marty), al cual agradecemos nos haya permitido utilizarla en esta publicación.

Escaneando este código QR podrás acceder al material audiovisual (imágenes y vídeos) que regularmente vamos obteniendo en nuestras campañas de investigación.

AGRADECIMIENTOS.- La PLOCAN (Plataforma Oceánica de Canarias) apoyó el desarrollo de nuestro trabajo de campo en La Palma en el marco del proyecto MAMPALMA, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Un agradecimiento especial al personal de PLOCAN desplazado en La Palma, Gabriel Juanes y Mariona Casamayor. Nuestro trabajo ha sido sustentado por los siguientes proyectos: «*Seguimiento de la erupción volcánica en La Palma y sus efectos sobre la población y el territorio*» de la Universidad de La Laguna, financiado por el

Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España; «*Naturgrad (PID2021-124538NA -100)*», financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Agencia Estatal de Investigación); el «*Campus Océano*» convenio de colaboración entre la Fundación General de la Universidad de La Laguna y el Cabildo de La Palma; y «*Dotaciones económicas para proyectos dirigidos por noveles investigadores, iniciación a la actividad investigadora*», plan propio de investigación de la Universidad de La Laguna 2022.

Bibliografía

AFONSO-CARRILLO, J. (1982). Revisión de las especies de la familia Corallinaceae en las islas Canarias. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna.

AFONSO-CARRILLO, J. (1989). Morphology, anatomy and vegetative reproduction of *Fosliella paschalis* (Corallinaceae, Rhodophyta). *Phycologia* 28: 331-341.

AFONSO-CARRILLO, J. (2021). Las algas coralinas (Rhodophyta) ante la acidificación del océano con especial referencia a las islas Canarias. *Scientia Insularum* 4: 145-204.

AFONSO-CARRILLO, J. (ed.) (2023). *Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)*. XVIII Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, Puerto de la Cruz.

ALONSO, I., F.J. SANTANA-SARMIENTO, F. ANDRÉS-ARAUJO, M. CASAMAYOR, I. MONTOYA-MONTES, A. BRENES, R. HERRERA & M.J. SÁNCHEZ-GARCÍA (2023). Morpho-sedimentary characteristics and formation mechanisms of new beaches generated after the Tajogaite volcano eruption of 2021 (La Palma, Spain). *Marine Geology* 107099.

ANDERSON, A.B., E.M. SALAS, L.A. ROCHA & S.R. FLOETER (2017). The recent colonization of south Brazil by the Azores chromis *Chromis limbata*. *Journal of Fish Biology* 91(2): 558-573.

ARONSON, R.B. (1983). Foraging behavior of the west Atlantic trumpetfish, *Aulostomus maculatus*: use of large, herbivorous reef fishes as camouflage. *Bulletin of Marine Science* 33(1): 166-171.

BOLLARD, S., M. PINAULT, J.P. QUOD, E. BOISSIN, L. HEMERY & C. CONAND (2013). Biodiversity of echinoderms on underwater lava flows with different ages, from the Piton de La Fournaise (Reunion Island, Indian Ocean). *Cahiers de Biologie Marine* 54: 491-497.

BORTONE, S.A., J.J. KIMMEL & C.M. BUNDRICK (1989). A comparison of three methods for visual assessing reefs fish communities: time and area compensated. *Northeast Gilf Science* 10: 85-96.

BRUNO, J.F., J.J. STACHOWICZ & M.D. BERTNESS (2003). Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends in ecology & evolution* 18(3): 119-125.

CALDERON, M.S., D.E. BUSTAMANTE, P.W. GABRIELSON, P.T. MARTONE, K.R. HIND, S.R. SCHIPPER & A. MANSILLA (2021). Type specimen sequencing, multilocus analyses, and species delimitation methods recognize the cosmopolitan *Corallina berteroi* and establish the northern Japanese *C. yendoi* sp. nov. (Corallinaceae, Rhodophyta). *Journal of Phycology* 57(5): 1659-1672.

CARRACEDO, J.C., V.R. TROLL, J.M.D. DAY, H. GEIGER, M. AULINAS, V. SOLER, F.M. DEEGAN, F.J. PÉREZ-TORRADO, G. GISBERT, E. GAZEL, A. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ & H. ALBERT (2022). The 2021 eruption of the Cumbre Vieja volcanic ridge on La Palma, Canary Islands. *Geology Today* 38(3): 94-107.

COMA, R., M. RIBES, J.M. GILI & M. ZABALA (2000). Seasonality in coastal benthic ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution* 15(11): 448-453.

CONNELL, J.H. & R.O. SLATYER (1977). Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *American Naturalist* 111: 1119-1144.

COPERNICUS, EUROPEAN UNION EARTH OBSERVER PROGRAM (2022). https://www.copernicus.eu/en/news/news/observer-copernicus-eyes-la-palma-eruption

COPPEJANS, E. (1978). Sur les propagules de *Fosliella farinosa* (Lamouroux) Howe var. *farinosa* (Rhodophyceae, Cryptonemiales). *Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique* 111: 55-61.

COWEN, R.K., G. GAWARKIEWICZ, J. PINEDA, S.R. THORROLD & F.E. WERNER (2007). Population connectivity in marine systems an overview. *Oceanography* 20(3): 14-21.

COWEN, R.K. & S. SPONAUGLE (2009). Larval dispersal and marine population connectivity. *Annual Review of Marine Science* 1: 443-466.

CRISAFULLI, C.M., F.J. SWANSON, J.J. HALVORSON & B.D. CLARKSON (2015). Volcano Ecology: Disturbance Characteristics and Assembly of Biological Communities. In Sigurdsson, H: *The encyclopedia of volcanoes*, 2º edition, Elsevier, pp. 1265-1284.

DE LA NUEZ J., R. CASILLAS, J.R.C. NAVARRO, C.F. RODRÍGUEZ, R. LUKÁCS, S. HARANGID & Y.F. JOURDAN (2018). La Palma: desde las entrañas hasta la piel de un volcán. En Afonso-Carrillo, J. (ed.), *La Palma agua, tierra, fuego y cielo.* Actas XIII Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, pp. 45-82.

DE WREEDE, R.E. & T. KLINGER (1988). Reproductive strategies in algae. In Doust, J.L. & L.L. Doust (eds), *Plant reproductive ecology.* Oxford University Press, Oxford. pp. 267-284.

DOTY, M.S. (1967). Pioneer intertidal population and the related general vertical distribution of marine algae in Hawaii. *Blumea: Biodiversity, Evolution and Biogeography of Plants* 15(1): 95-105.

EL-MAREMIE, H. & M. EL-MOR (2015). Feeding habits of the bogue, *Boops boops* (Linnaeus, 1758) (Teleostei: Sparidae) in Benghazi coast, eastern Libya. *Journal of Life Sciences* 9(5): 189-196.

GLOBAL VOLCANISM PROGRAM, 2023. Database, Volcanoes of the World (v. 5.0.3; 13 Mar 2023). Distributed by Smithsonian Institution, compiled by Venzke, E. https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW5-2022.5.0

GODWIN, J.R. & R.K. KOSAKI (1989). Reef fish assemblages on submerged lava flows of three different ages. *Pacific Science* 43(4): 289-301.

GONZÁLEZ-DELGADO, S., D. GONZÁLEZ-SANTANA, M. SANTANA-CASIANO, M. GONZÁLEZ-DÁVILA, C.A. HERNÁNDEZ, C. SANGIL & J.C. HERNÁNDEZ (2021). Chemical characterization of the Punta de Fuencaliente CO_2-enriched system

(La Palma, NE Atlantic Ocean): a new natural laboratory for ocean acidification studies. *Biogeosciences* 18(5): 1673-1687.

GONZÁLEZ-DELGADO, S., O.S. WANGENSTEEN, C. SANGIL, C.A. HERNÁNDEZ, B. ALFONSO, A.Z. SOTO, R. PÉREZ-PORTELA, S. MARIANI & J.C. HERNÁNDEZ (2023). High taxonomic diversity and miniaturization in benthic communities under persistent natural CO_2 disturbances. *Proceedings of the Royal Society B*, 290(1995): 20222417.

GONZÁLEZ-SANTANA, D., J.M. SANTANA-CASIANO, A.G. GONZÁLEZ & M. GONZÁLEZ-DAVILA (2022). Coastal carbonate system variability along an active lava-seawater interface. *Frontiers in Marine Science* 9: 952203.

GUERRA-MARRERO, A., A. BONINO-PÉREZ, A. ESPINO-RUANO, L. COUCE-MONTERO, D. JIMÉNEZ-ALVARADO & J.J. CASTRO (2023). Life history parameters and fishing aspects of the alien nimble spray crab *Percnon gibbesi* in a native area of the Central-East Atlantic. *Animals* 13(8): 1427.

GULLIKSEN, B. (1974). Marine investigations at Jan Mayen in 1972. *Kongelige Norske videnskabers selskab Museet, Misellanea* 19: 1-46.

GULLIKSEN, B., F. BEUCHEL, T. BRATTEGARD & R. PALERUD (2004). The marine sublittoral fauna of Jan Mayen Island: zoogeography and succession on "new" lava grounds. In Skreslet, S. (ed.), *Jan Mayen Island in scientific focus* (pp. 159-171). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

GULLIKSEN, B., T. HAUG & O.K. SANDNES (1980). Benthic macrofauna on new and old lava grounds at Jan Mayen. *Sarsia* 65(2): 137-148.

GUNNARSSON, K. (2000). Benthic marine algal colonisation on the new lava at Heimaey, Vestmannaeyjar archipelago, southern Iceland. *Surtsey Research* 11: 69-74.

HART, M.B, J.K. FISHER, C.W. SMART, R. SPEERS & D. WALL-PALMER (2022). Re-colonization of hostile environments by benthic foraminifera: an example from Monserrat, Lesser Antilles Volcanic Arc. *Micropaleontology* 68: 1-27.

HERNÁNDEZ, C.A., C. SANGIL & J.C. HERNÁNDEZ (2016). A new CO_2 vent for the study of ocean acidification in the Atlantic. *Marine Pollution Bulletin* 109(1): 419-426.

HERRERA, R., F. ESPINO, M. GARRIDO & R.J. HAROUN (2002). Observations on fish colonization and predation on two artificial reefs in the Canary Islands. *ICES Journal of Marine Science* 59: 69-73.

HOSOI, T. & A. KATO (2023). Effects of seawater temperature and irradiance on the growth of sporelings of *Amphiroa* cf. *zonata* and *Corallina berteroi* (Corallinales, Rhodophyta) in Japan. *Phycologia* DOI: 10.1080/00318884.2023.2217066

HUSTON, M. & T. SMITH (1987). Plant succession: life history and competition. *The American Naturalist* 130(2): 168-198.

IDECANARIAS (2023). Grafcan. Mapas de Canarias. https://www.grafcan.es

IGME (2022). Erupción La Palma. Seguimiento de la erupción: Informes del Comité Científico, PEVOLCA.

JEWETT, S.C., J.L. BODKIN, H. CHENELOT, G.G. ESSLINGER & M.K. HOBERG (2010). The nearshore benthic community of Kasatochi Island, one year after the 2008 volcanic eruption. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 42: 315-324.

JOHANSEN, H.W. (1981). *Coralline Algae, A first synthesis*. Boca Raton, Florida: CRC Press.

JÓNSSON, S. (1968). Survey on the intertidal and subtidal algae on Surtsey in 1967. *Surtsey Research Progress Report* 4: 67-73.

JÓNSSON, S. & K. GUNNARSSON (1982). Marine algal colonization at Surtsey. *Surtsey Research Progress Report* 9: 33-45.

JÓNSSON S., K. GUNNARSSON & J.-P. BRIANE (1987). Évolution de la nouvelle flore marine de I'ile volcanique ce Surtsey, Islande. Research Marine Institute, Reykjavic 1-30.

JOUVAL, F., L. BIGOT, S. BUREAU, J. QUOD, L. PENIN & M. ADJEROUD (2020). Diversity, structure, and demography of coral assemblages on underwater lava flows of different ages at Reunion Island and implications for ecological succession hypotheses. *Scientific Reports* 10:20821.

JUNG, S.W. & C.G. CHOI (2022). Seaweed community and succession on a trapezoidal-shaped artificial reef. *Ocean Science Journal* 57: 130-140.

LANDEIRA, J.M. & F. LOZANO-SOLDEVILLA (2018). Seasonal of planktonic crustacean decapod larvae in the subtropical waters of Gran Canaria Island, NE Atlantic. *Scientia Marina* 82: 119-134.

LEITAO, F., M.N. SANTOS, K. ERZINI & C.C. MONTEIRO (2008). Fish assemblages and rapid colonization after enlargement of an artificial reef off the Algarve coast (Southern Portugal). *Marine Ecology* 29(4): 435-448.

LEVIN, L.A. (1984). Life history and dispersal patterns in a dense infaunal polychaete assemblage: community structure and response to disturbance. *Ecology* 65(4): 1185-1200.

LEWIS, J.R. (1964). *The ecology of rocky shores*. Cambridge University Press. London.

LITTLER, M.M. & D.S. LITTLER (1980). The evolution of thallus form and survival strategies in benthic marine macroalgae: field and laboratory tests of a functional form model. *The American Naturalist* 116: 25-42.

LITTLER, M.M. & D.S. LITTLER (2013). The nature of crustose coralline algae and their interactions on reefs. *Smithsonian Contributions to the Marine Sciences* 39: 199-212.

LÓPEZ, C., A. POLADURA, J.C. HERNÁNDEZ, L. MARTÍN, L. CONCEPCIÓN, C. SANGIL & S. CLEMENTE (2012). Contrasting effects of protection from harvesting in populations of two limpet species in a recently established marine protected area. *Scientia Marina* 76: 799-807.

MARIATH, R., R.R. RODRÍGUEZ & M.A. FIGUEIREDO (2013). Succession of crustose coralline red algae (Rhodophyta) on coral reefs exposed to physical disturbance in the southwest Atlantic. *Helgoland Marine Research* 67: 687-696.

MARTÍN-GARCÍA, L., C. SANGIL, L. CONCEPCIÓN-FRANCISCO & J. BARQUÍN-DIEZ (2013). *Cartografía de las comunidades bentónicas de los fondos litorales de*

la isla de La Palma. Consorcio Insular de la Reserva Mundial de La Biosfera. 62 pp. + cartografía digital.

MAYAKUN, J., A. PRATHEP & J.H. KIM (2020). Timing of disturbance, top-down, and bottom-up driving on early algal succession patterns in a tropical intertidal community. *Phycological research* 68(2): 135-143.

MCCOOK, L.J. (1994). Understanding ecological community succession: causal models and theories, a review. *Vegetatio* 110: 115-147.

MCCOOK, L.J., & A.R.O. CHAPMAN (1993). Community succession following massive ice-scour on a rocky intertidal shore: recruitment, competition and predation during early, primary succession. *Marine Biology* 115: 565-575.

MENÉNDEZ, M.C., C.A. BALEANI, E.M. ACHA & M.C. PICCOLO (2023). Holoplankton and meroplankton communities in surf zone waters of a temperate SW Atlantic sandy beach: seasonal patterns. *Marine Ecology*, e12750.

MORI, A.S., T., OSONO, M. UCHIDA & H. KANDA (2008). Changes in the structure and heterogeneity of vegetation and microsite environments with the chronosequence of primary succession on a glacier foreland in Ellesmere Island, high arctic Canada. *Ecological Research* 23: 363-370.

PARRISH, F.A. (2015). Settlement, colonization, and succession patterns of gold coral *Kulamanamana haumeaae* in Hawaiian deep coral assemblages. *Marine Ecology Progress Series* 533: 135-147.

PEÑA, V., J. AFONSO-CARRILLO, D. ÁLVAREZ-CANALI, S. LIULEA, N.M. RANCEL-RODRÍGUEZ, J. REYES, M. SANSÓN & C. SANGIL (2023). Coralline algae (Rhodophyta, Corallinales) early colonizers of the littoral lava flows of the recent volcanic eruption of La Palma (Canary Islands). In S. Connan, E. Creis, B. Jacquemin, G. Markov & P. Potin (eds), *Program and Book Abstracts 8th European Phycological Congress, Brest*, p. 206.

PINAULT, M., N. LOISEAU, P. CHABANET, P. DURVILLE, H. MAGALON, J.P. QUOD & R. GALZIN (2013). Marine fish communities in shallow volcanic habitats. *Journal of Fish Biology* 82(6): 1821-1847.

PRACH, K. & L.R. WALKER (2018). Differences between primary and secondary plant succession among biomes of the world. *Journal of Ecology* 107: 510-526.

RAILKIN, A.I., (2003). *Marine Biofouling: colonization processes and defenses*. CRC Press. Boca Raton.

REYES, J. (1989). Contribución al estudio del epifitismo incrustante en las hojas de *Cymodocea nodosa* en la playa de El Médano (Tenerife). Tesis de Licenciatura. Universidad de La Laguna.

REYES, J. & J. AFONSO-CARRILLO (1995). Morphology and distribution of nongeniculate coralline algae (Corallinaceae, Rhodophyta) on the leaves of the seagrass *Cymodocea nodosa* (Cymodoceaceae). *Phycologia* 34: 179-190.

RICHARDS, J.L., P.W. GABRIELSON, J.R. HUGHEY & D.W. FRESHWATER (2018). A re-evaluation of subtidal *Lithophyllum* species (Corallinales, Rhodophyta) from North Carolina, USA, and the proposal of *L. searlesii* sp. nov. *Phycologia* 57: 318-330.

RIOSMENA-RODRÍGUEZ, R., W. NELSON & J. AGUIRRE (eds.) (2017). *Rhodolith /maërl beds: A global perspective.* Coastal Research Library. Springer Int. Publ.

SANGIL, C., J. AFONSO-CARRILLO & M. SANSÓN (2005). Zonación del fitobentos en el litoral noroeste de La Palma (Islas Canarias). *Revista de la Academia Canaria de las Ciencias* 4: 75-90.

SANGIL, C., J. AFONSO-CARRILLO & M. SANSÓN (2008). Biodiversidad y biogeografía de las macroalgas bentónicas de la isla de La Palma. *Revista de Estudios Generales de la Isla de La Palma* 3: 457-479.

SANGIL, C., J. AFONSO-CARRILLO & M. SANSÓN (2009). Estructura y composición de los céspedes intermareales dominados por *Palisada perforata* y coralináceas geniculadas. *Vieraea* 37: 15-27.

SANGIL, C., D. ÁLVAREZ-CANALI, J. REYES, J. RODRÍGUEZ, S. LIULEA, J. AFONSO-CARRILLO, Y. CONCEPCIÓN, N. RANCEL-RODRÍGUEZ & M. SANSÓN (2023). Early steps in the primary succession of seaweed communities at the Tajogaite volcano lava flows (Canary Islands, Spain). In S. Connan, E. Creis, B. Jacquemin, G. Markov & P. Potin (eds), *Program and Book Abstracts 8th European Phycological Congress, Brest*, p. 286.

SANGIL, C., L. MARTÍN-GARCÍA, J.C. HERNÁNDEZ, L. CONCEPCIÓN, R. FERNÁNDEZ & S. CLEMENTE (2013). Impacts of fishing and environmental factors driving changes on littoral fish assemblages in a subtropical oceanic island. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 128: 22-32.

SANGIL, C., M. SANSÓN & J. AFONSO-CARRILLO (2003). Algas marinas de La Palma (Canarias): novedades florísticas y catálogo insular. *Vieraea* 31: 83-119.

SANGIL, C., M. SANSÓN & J. AFONSO-CARRILLO (2011). Spatial variation patterns of subtidal seaweed assemblages along a subtropical oceanic archipelago: thermal gradient vs herbivore pressure. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 94(4): 322-333.

SANGIL, C., M. SANSÓN & J. AFONSO-CARRILLO (2014a). Comunidades de macroalgas bentónicas de la isla de La Palma (Islas Canarias): distribución vertical y longitudinal. *Revista de Estudios Generales de la Isla de La Palma* 6: 119-138.

SANGIL, C., M. SANSÓN, T. DÍAZ-VILLA, J.C. HERNÁNDEZ, S. CLEMENTE & J. AFONSO-CARRILLO (2014b). Spatial variability, structure and composition of crustose algal communities in *Diadema africanum* barrens. *Helgoland Marine Research* 68: 451-464.

SANSÓN, M. (1991). Estudio de las especies de la familia Ceramiaceae (Rhodophyta) en las islas Canarias. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna.

SANTELICES, B. (1990). Patterns of reproduction, dispersal and recruitment in seaweeds. *Oceanography Marine Biology Annual Review* 28: 177-276.

SCHILS, T. (2012). Episodic eruptions of volcanic ash trigger a reversible cascade of nuisance species outbreaks in pristine coral habitats. *Plos One* 7: e46639.

SCHLEYER, M.H., Y. BENAYAHU, S. PARKER-NANCE, R.W.M. VAN SOEST & J.P. QUOD (2016). Benthos on submerged lava beds of varying age off the coast of Reunion, western Indian Ocean: sponges, octocorals and ascidians. *Biodiversity* 17: 93-100.

SEGAWA, S. (1955). Systematic anatomy of the articulated corallines (supplementary report). The structure and reproduction of *Yamadaia melobesioides* Segawa. *Botanical Magazine, Tokyo* 68: 241-247.

SERISAWA, Y., S. TAINO, M. OHNO & Y. ARUGA (1998). Succession of seaweeds on experimental plates immersed during different seasons in Tosa Bay, Japan. *Botanica Marina* 41: 321-328.

SOLMS-LAUBACH, H. (1881). Die Corallineen-Algen des Golfes von Neapel und der angrenzenden Meeresabschnitte. *Fauna Flora Golf. Neapel* 4: 1-64.

SOUSA, R., J. DELGADO, J.A. GONZÁLEZ, M. FREITAS & P. HENRIQUES (2018). Marine snails of the genus *Phorcus*: Biology and ecology of sentinel species for human impacts on the rocky shores. In Ray, S. (ed.), *Biological Resources of Water*, pp. 141-167.

SOUSA, W.P. (1979). Experimental investigations of disturbance and ecological succession in a rocky intertidal algal community. *Ecological Monographs* 49(3): 227-254.

SREDNICK, G., A. COHEN, O. DIEHL, K. TYLER & S.E. SWEARER (2023). Habitat attributes mediate herbivory and influence community development in algal metacommunities. *Ecology* 104(4): e3976.

TADDEUCCI, J., P. SCARLATO, D. ANDRONICO, T. RICCI, R. CIVICO, E. DEL BELLO, L. SPINA, L. D'AURIA, M. ASENSIO-RAMOS, D. CALVO, E. PADRÓN, P.A. HERNÁNDEZ & N.M. PÉREZ (2023). The explosive activity of the 2021 Tajogaite eruption (La Palma, Canary Islands, Spain). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 24(6): e2023GC010946.

THORTON, I. (2007). *Island colonization: the origin and development of island communities*. Cambridge University Press, Cambridge.

TRONHOLM, A., F. STEEN, L. TYBERGHEIN, F. LELIAERT, H. VERBRUGGEN, M.A. RIBERA SIGUAN & O. DE CLERCK (2010). Species delimitation, taxonomy, and biogeography of *Dictyota* in Europe (Dictyotales, Phaeophyceae). *Journal of Phycology* 46(6): 1301-1321.

UNDERWOOD, A.J. & M.G. CHAPMAN (2006). Early development of subtidal macrofaunal assemblages: relationships to period and timing of colonization. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 330: 221-233.

UNDERWOOD, A.J., M.G. CHAPMAN & S.D. CONNELL (2000). Observations in ecology: you can't make progress on processes without understanding the patterns. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 250: 97-115.

VALIELA, I. (1995). Development of structure in marine communities: colonization and succession. In: *Marine Ecological Processes*. Springer, New York, NY.

VIEIRA, C., F. HENRIQUES, S. D'HONDT, A. NETO, C.H. ALMADA, M. KAUFMANN, M. SANSÓN, C. SANGIL & O. DE CLERCK (2020). *Lobophora* (Dictyotales) species richness, ecology and biogeography across the North-Eastern Atlantic archipelagos and description of two new species. *Journal of Phycology* 56(2): 346-357.

VROOM, P.S. & B.J. ZGLICZYNSKI (2011). Effects of volcanic ash deposits on four functional groups of a coral reef. *Coral Reefs* 30: 1025-1032.

WALKER, L. & R. DEL MORAL (2011). Primary succession. In: eLS. John Wiley & Sons, Ltd: Chichester.

WATANABE, J.T. & C.M. YOUNG (2006). Feeding habits and phenotypic changes in proboscis length in the southern oyster drill, *Stramonita haemastoma* (Gastropoda: Muricidae), on Florida sabellariid worm reefs. *Marine Biology* 148(5): 1021-1029.

WILLIAMS, G.A., M.S. DAVIES & S. NAGARKAR (2000). Primary succession on a seasonal tropical rocky shore: the relative roles of spatial heterogeneity and herbivory. *Marine Ecology Progress Series* 203: 81-94.

WOELKERLING, W.J. (1988). *The coralline red algae: an analysis of the genera and subfamilies of nongeniculate Corallinaceae*. London & Oxford: British Museum (Natural History) & Oxford University Press.

WONG, E., C. YAU & K.Y.K. CHAN (2022). Seasonal and spatial dynamics of mesozooplankton community in a subtropical embayment. *Regional Studies in Marine Science* 56,102724.

ZUBIA, M., O. DE CLERCK, F. LELIAERT, C. PAYRI, L. MATTIO, C. VIEIRA, H. CAMBERT, J. QUOD, N. LOISEAU, S. GOLUBIC, S. LIN, S. LIU & M. PINAULT (2018). Diversity and assemblage structure of tropical marine flora on lava flows of different ages. *Aquatic Botany* 144: 20-30.

3. El destino de la biodiversidad durante la reciente erupción volcánica de Tajogaite, La Palma: investigando un evento natural catastrófico

Félix Manuel Medina[a], María Guerrero-Campos[b,c], Joaquín J. Quirós Priego[d], Rafael García Becerra[e], Silvia Fajardo[f], Patricia Marrero[b] y Manuel Nogales[c]

[a] *Unidad de Biodiversidad, Consejería de Medio Ambiente, Cabildo de La Palma, S/C de La Palma, Islas Canarias.*

[b] *Área de Medio Ambiente, Gestión y Planeamiento Territorial y Ambiental (Gesplan, S.A.), Tenerife, Islas Canarias.*

[c] *Instituto de Productos Naturales y Agrobiología (IPNA-CSIC), La Laguna, Tenerife, Islas Canarias.*

[d] *Servicio de Prevención de Riesgos Laborales (SPRL-CSIC), Delegación Institucional del CSIC en Andalucía y Extremadura, Sevilla.*

[e] *C/ El Pilar 8, 38700 S/C de La Palma, Islas Canarias.*

[f] *Servicio de Biodiversidad, Gobierno de Canarias, Tenerife, Islas Canarias.*

El 19 de septiembre de 2021 tuvo lugar el inicio de la erupción del volcán de Tajogaite en la vertiente oeste de la dorsal de Cumbre Vieja en la isla de La Palma. Después de 85 días de actividad, ésta ha sido la erupción histórica más larga en la isla y la octava que ha tenido lugar en periodo histórico, después de los volcanes de Tacande (1480), Jedey (1585), Martín y El Búcaro (1646), Fuencaliente (1677), El Charco (1712), San Juan, Hoyo Negro y Duraznero (1949) y Teneguía (1971). Ha sido uno de los volcanes mejor monitorizados desde el punto de vista geológico, pero los efectos de una erupción volcánica sobre la biodiversidad nunca habían sido estudiados simultáneamente al evento eruptivo. La

mayoría de los trabajos científicos en esta materia se han dirigido a conocer cuáles son los procesos de regeneración de la vegetación y de la sucesión ecológica una vez finalizadas las erupciones volcánicas. Por ello, el objetivo de este estudio es detallar cómo se plantearon los métodos de seguimiento de la biodiversidad en unas condiciones ambientales adversas como las producidas por la erupción de un volcán. Asimismo, se trató de responder algunas cuestiones relativas a sus efectos sobre las especies de la flora y fauna insular: ¿Están las especies insulares «adaptadas» a los factores de estrés provocados por el volcanismo? ¿Hay algunos tipos funcionales de plantas vinculados a ellos? El estudio de las escalas temporales y espaciales de esos patrones ayudará a conocer en qué medida estos eventos naturales catastróficos constituyen ventanas de oportunidad para que se produzcan o aceleren los procesos evolutivos que tienen lugar en la biota de islas oceánicas.

Introducción

La Palma es una de las islas más jóvenes del archipiélago canario, con unos 2 millones de años de antigüedad, y más activa en términos geológicos; en ella han tenido lugar la mitad de las erupciones volcánicas históricas acaecidas en Canarias (Carracedo, 2008). Desde la segunda mitad del siglo pasado, se han llevado a cabo en la isla numerosos estudios geológicos, muchos de ellos relacionados con la actividad volcánica de la dorsal de Cumbre Vieja (Carracedo, 2008). En las últimas décadas, en esta dorsal se han realizado seguimientos específicos de los procesos geoquímicos de desgasificación difusa del dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2), radón (^{222}Rn) y helio ($^{3}He/^{4}He$) (Padrón *et al*., 2015, 2022; Pérez *et al*., 1988, 2022), así como de la actividad sísmica y de las deformaciones del terreno (Fernández *et al*., 2021), los cuales se consideran fundamentales en la vigilancia volcánica.

La erupción del volcán de Tajogaite (Fig. 1) ha sido una de la más y mejor monitorizada en Canarias (Carracedo *et al*., 2022; González, 2022), tanto desde sus estados precursores, pasando por los momentos de mayor actividad (Romero *et al*., 2022; Sicard *et al*., 2022) y posterior finalización, el 13 de diciembre de 2021. El seguimiento de la erupción volcánica se llevó a cabo mediante la medición continua de gases (Palanco *et al*., 2022; Pérez *et al*., 2023; Rizzo *et al*., 2022), y el uso de nuevas y novedosas tecnologías como la espectroscopía láser (Palanco *et al*., 2022), drones (Civico *et al*., 2022; Román *et al*., 2022) o imágenes satelitales (De Luca *et al*., 2022; Plank *et al*., 2023; Walter *et al*., 2023). La aplicación de estos métodos científicos específicos permitió a las Administraciones Públicas dotarse de la

información básica que le permitiera establecer las medidas adecuadas para intentar minimizar, en lo posible, los daños sobre la población (Carracedo *et al*., 2022; Martín-Raya *et al*., 2023).

Fig. 1. Erupción del volcán de Tajogaite en la vertiente oeste de la dorsal de Cumbre Vieja en la isla de La Palma.

Sin embargo, las lavas finalmente cubrieron una superficie total de 1241 hectáreas, afectando a unas 3000 construcciones de distinta índole (Fig. 2). La destrucción de más de 1300 casas supuso que más de 2300 personas perdiesen sus hogares y su futuro inmediato. A este respecto, fue mucho lo que se publicó, sobre todo en redes sociales, acerca de los sentimientos encontrados que suponía enfrentarse a una erupción volcánica: la gran espectacularidad de un evento natural frente a la destrucción de bienes humanos (viviendas, infraestructuras, cultivos o industrias) de suma importancia para la actividad económica de los habitantes de esa zona de la isla. Caben destacar algunas publicaciones en las que quedaron reflejados los sentimientos que se tenían hacia el volcán como origen de todo el sufrimiento ocasionado por las pérdidas materiales y emocionales (Bleyhl, 2021; Frey, 2021; García Hernández, 2021; González, 2021; ILove the World, 2021, Jarabo Lorenzo, 2002; Nave & Ferrero, 2022). De igual manera, se expresó el agradecimiento y reconocimiento hacia las muestras de solidaridad

demostradas por los habitantes de la isla, del archipiélago y del resto de nuestro país, así como de todas las personas que llegaron de fuera, para ayudar a aquellos que lo necesitasen. Un año después de la erupción y abordados desde diferentes perspectivas, se analizaron algunos de los avances conseguidos en el conocimiento científico (Afonso-Carrillo, 2023).

Fig. 2. Efectos de las coladas de lava del volcán de Tajogaite en áreas urbanizadas y agrícolas de la comarca oeste de la isla de La Palma (Foto: TICOM Soluciones, S.L.).

No ajenos a esta pérdida, el evento natural que estaba teniendo lugar supuso una oportunidad única para estudiar sus efectos sobre la rica biodiversidad de una isla oceánica de origen volcánico, como La Palma (Nogales & Medina, 2021, 2022). Es la primera ocasión en la que se realiza un seguimiento sistemático de la flora y fauna al mismo tiempo que se produce una erupción volcánica. La mayoría de los estudios previos realizados en relación a los efectos de las erupciones volcánicas sobre la biodiversidad se han basado en seguimientos posteriores a la erupción, con el fin de estudiar, principalmente, los procesos de recolonización de los nuevos hábitats creados y la regeneración de la vegetación. Algunos de los ejemplos más conocidos son los estudios de la sucesión ecológica tras la

erupción del volcán Ksudach en Kamchatka (Grishin *et al*., 1996) y el de la isla de Krakatoa (Whittaker *et al*., 1999), sobre la recuperación de la vegetación cubierta por material volcánico (tefra) del Monte St. Helens (Zobel & Antos, 1997), y las dinámicas de regeneración vegetal en volcanes de Japón como el Usu (Tsuyuzaki, 1989) o el Monte Koma (Tsuyuzaki & Hase, 2005).

En el presente trabajo se expondrá cómo fueron los primeros momentos en los que tuvimos que afrontar el estudio y seguimiento de la flora y fauna en una situación de emergencia, como es el de una erupción volcánica. Por otro lado, se pretende investigar los procesos ecológicos y evolutivos que podrían estar asociados a las erupciones acaecidas en una isla oceánica. Asimismo, se analizarán algunos de los resultados más relevantes obtenidos durante el trabajo de seguimiento; y, por último, se comentarán aspectos relacionados con cómo el mantenimiento de la misma metodología de seguimiento, una vez finalizada la erupción, permitirá obtener resultados sobre la recuperación de la biodiversidad afectada por el volcán.

Ante todo… Seguridad

La erupción del volcán de Tajogaite se clasificó como una erupción fisural basáltica dominada por actividad estromboliana, con episodios de pulsos freatomagmáticos y moderadamente explosiva (Carracedo *et al*., 2022), que dio lugar a un edificio de 34 Mm^3 de volumen y unos 200 metros de altura, y que emitió más de 200 Mm^3 de material piroclástico y lava (Carracedo *et al*., 2022; PEVOLCA, 2021). Afectó casi a un 2% de la superficie total de la isla, acumulándose ceniza volcánica en prácticamente toda la isla y produciendo la emisión de, aproximadamente, 185 mil toneladas de dióxido de azufre (SO_2) (Weiser *et al*., 2022).

Durante la erupción, la emisión continua de lava, piroclastos, cenizas y gases complicó en gran medida cualquier trabajo que se quisiese realizar en las zonas afectadas (Fig. 3). Las lavas discurrían a velocidades variables dependiendo de su viscosidad y de la evolución de la propia erupción, oscilando entre 1 m/min y 30 km/h (Carracedo *et al*., 2022). Según estos autores, las bombas y lapilli expulsados con trayectorias balísticas, no cayeron a más de 1 km del cono. En base a estas premisas, el Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA), impuso unas restricciones y normas de obligado cumplimiento para el desarrollo de los trabajos de seguimiento alrededor del volcán. En lo que respecta al seguimiento de la biodiversidad, se estableció la prohibición de acercarse a menos de 200 metros alrededor de las coladas de lava y a no menos de 1 km del cráter.

Realizar la actividad preventiva a pie de campo en el contexto de una erupción volcánica es una tarea con pocos precedentes en España. Para poder

llevarla a cabo, hay que tener en cuenta el conjunto de riesgos derivados de los productos emitidos por los volcanes y que pueden ser perjudiciales para la salud humana (Horwell *et al.*, 2015; Mueller *et al.*, 2020). En el caso de La Palma, las principales lesiones de tipo traumático serían las causadas por la caída de piroclastos (aplastamiento, golpes, arrastre, asfixia simple o ahogamiento). Por otro lado, las lesiones térmicas (quemaduras) estarían provocadas por las emisiones volcánicas calientes como coladas o flujos piroclásticos que están compuestos de gas, ceniza y rocas a temperaturas de 700 a 1200ºC y velocidades de hasta 550 km/h (Martí Molist, 2011; Mueller *et al.*, 2020). Un impacto menos conocido es el eléctrico, causado por relámpagos generados por la fricción de las partículas en la pluma de ceniza (Mueller *et al.*, 2020).

Fig. 3. Emisión de gases y tefra del volcán de Tajogaite durante su erupción en la isla de La Palma (19 de septiembre – 13 de diciembre de 2021).

Los efectos toxicológicos de la contaminación atmosférica producida por la emisión de gases y aerosoles, tanto durante la erupción como en el posterior proceso de desgasificación, pueden dañar los sistemas respiratorio y cardiovascular (Stewart *et al.*, 2015; Torres, 2020). La acumulación en concentraciones letales de gases asfixiantes como, por ejemplo, el dióxido de

carbono (CO_2) es más probable que ocurra en las pendientes de un volcán, dentro de un cráter o cerca de una fisura, mientras que los gases irritantes como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), pueden ejercer sus efectos adversos incluso a una menor concentración y a muchos kilómetros a la redonda del volcán (Stewart *et al.*, 2022). La emisión difusa de gases producidos de forma no visible aprovechando todo tipo de fracturas y fisuras en el terreno, principalmente en el caso de emanaciones de monóxido de carbono (CO) y/o CO_2, pueden llegar a suponer un grave peligro para las personas en zonas no muy bien ventiladas y/o a alturas por debajo de un metro respecto al nivel del suelo (PEVOLCA, 2022a, b).

Las grandes erupciones pueden cubrir de ceniza amplias extensiones de terreno y aumentar las concentraciones de partículas en el aire, mucho más altas que las producidas normalmente por la actividad antropogénica (Stewart *et al.*, 2022). Las que se toman de referencia son las de tamaño < 2,5 µm y < 10 µm (denominadas *materia particulada* PM2,5 y PM10, respectivamente). La exposición aguda y/o crónica a las partículas PM2,5 puede provocar, por inhalación, asma y otras enfermedades respiratorias agudas en personas susceptibles, aumentando el riesgo de mortalidad y morbilidad (WHO, 2013a, b; Mueller *et al.*, 2020). Las emisiones volcánicas también provocan lesiones oculares y dérmicas, gastroenteritis, problemas en el embarazo, fluorosis dental, e incluso patologías cardiovasculares y relacionadas con la salud mental (Stewart *et al.*, 2022).

Las emisiones volcánicas gaseosas están compuestas típicamente por especies gaseosas condensables (H_2O, CO_2, SO_2, H_2S, HF y HCl) y no condensables (H_2, N_2, CO, CH_4, Ar, Rn y He, entre otros), cenizas de silicatos, vapores metálicos volátiles y aerosoles de sulfato formado por la conversión de gas a partículas del SO_2 (Torres, 2020). No obstante, entre los gases de origen magmático destaca el radón-222 (^{222}Rn). La exposición inhalatoria a este isótopo radiactivo, en cierto grado de origen natural (ICRP, 2014), se considera el segundo factor de riesgo del cáncer de pulmón y el primero en personas no fumadoras (WHO, 2009; ICRP, 2014).

Prevención de riesgos laborales en un entorno volcánico

El ordenamiento jurídico español es prolífico en materia de protección de la población trabajadora frente a los riesgos asociados a la actividad laboral que pudieran afectarle (Tabla 1), estableciendo como herramienta clave para la gestión de la prevención en las organizaciones, la evaluación de riesgos laborales.

En todo momento, la actividad realizada por el personal científico que estuvo estudiando *in situ* la erupción del volcán de Tajogaite, estaba dentro del ámbito de la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales. El entorno volcánico y sus condiciones suponen la mayor parte del riesgo potencial,

especialmente durante las fases iniciales de la erupción. A partir de ese momento, las evaluaciones de riesgo de los trabajos realizados en la zona de exclusión, supusieron un desafío adicional ante la especificidad del escenario y los gravísimos riesgos que potencialmente podían afectar al personal de campo. En base a cada riesgo se establecieron evaluaciones específicas sobre cada uno de ellos según transcurría la erupción.

Tabla 1. Normativa básica vigente relacionada con las materias de Prevención de Riesgos Laborales que se tuvo en cuenta durante la erupción del volcán de Tajogaite en La Palma.

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención.
- Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.
- Real Decreto 1299/2006, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro.
- Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.
- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.
- Real Decreto 665/1997, de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo. Y posteriores actualizaciones.
- Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.
- Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural.
- Decreto 112/2018, de 30 de julio, por el que se aprueba el Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA).

Resultados de las exposiciones y medidas adoptadas

En general, el trabajo científico de campo tiene unos riesgos inherentes relacionados con accidentes, enfermedades profesionales, o lesiones de tipo ergonómico (músculo-esquelético, sobreesfuerzos y/o fatiga física). Sin embargo, no se está preparado para asumir psicológicamente, en un primer momento, el nivel de destrucción causado por una erupción volcánica, lo que puede hacer mella y causar angustia. Por tanto, es necesario incluir, en este tipo de trabajos, los riesgos de índole psicosocial.

Específicamente, ante la necesidad e importancia de disponer de lecturas en tiempo real de las concentraciones de gases emitidos por el volcán, se dispuso de detectores personales de gases (*Industrial Scientific*, modelo *IBRID MX6*) equipado con sensores de O_2, SO_2, H_2S, HCl y CO. Además, se recomendó el uso de equipos de protección respiratoria filtrantes (Fig. 4) cuando la concentración de gases tóxicos superara el 10% de sus respectivos valores límite ambientales (0,05 ppm para SO_2, 0,5 ppm para H_2S y 2,0 ppm para CO). Cuando se activaba alguna alarma en los detectores, el equipo de protección respiratoria que se utilizó fue del tipo media máscara (norma UNE-EN140:1999) con los filtros de gases (*A1B1E1K1 Hg P3 R D* o *A1B1E1K1 P3 R + formaldehído*, norma UNE-EN 14387:2021).

Fig. 4. Uso de equipos de protección respiratoria (EPR) personales utilizados como medida de protección de riesgos laborales durante el proceso eruptivo del volcán de Tajogaite.

Los equipos de protección individual también incluyeron: mascarilla (tipo FFP2) frente a partículas, casco de seguridad con barboquejo (norma UNE–EN 397:2012+A1:2012), gafas de seguridad de montura integral (norma UNE-EN 166:2002), chalecos de alta visibilidad (norma UNE-EN ISO 20471:2013/A1:2017) y guantes de seguridad frente a riesgo mecánico (norma UNE EN 388:2016+A1:2018).

En conclusión, se considera que si bien durante todo el proceso eruptivo se tuvieron en cuenta todas las medidas de seguridad y de prevención de riesgos laborales que marca la normativa legal vigente en esta materia, existe la necesidad de profundizar en el conocimiento sobre la posibilidad de que las exposiciones crónicas puedan desencadenar el desarrollo de enfermedades cardiorrespiratorias potencialmente mortales, así como acerca de los efectos crónicos sobre la salud que pueden ser el resultado de exposiciones agudas derivadas de un proceso volcánico (Stewart *et al.*, 2022).

Igualmente, serían necesarios controles estrictos de vigilancia de la salud, en el contexto de la especialidad preventiva de Medicina del Trabajo, para minimizar los efectos de la exposición del personal interviniente en la gestión, control y seguimiento de una erupción volcánica. Las interacciones entre las erupciones volcánicas, la atmósfera y el clima, son una importante línea de investigación con respecto a los impactos en la salud, dado que las condiciones ambientales influyen en la dispersión y permanencia en la atmósfera de las especies químicas emitidas, así como la «removilización» de cenizas en climas áridos, y en especial ventosos, que pueden prolongar su exposición a la población (Stewart *et al.*, 2022).

La información y directrices sobre temas de salud elaborados por *International Volcanic Health Hazard Network* (IVHHN) para la ciudadanía general, la comunidad científica, y las agencias y organismos gubernamentales, pueden servir de referencia a los gestores de riesgos al objeto de facilitar la toma de decisiones informadas sobre las intervenciones sanitarias durante o poco después de una erupción volcánica (Mueller *et al.*, 2020).

El destino de la biodiversidad

La erupción se originó en una zona conocida por Hoya de Tajogaite, en el flanco oeste de la dorsal de Cumbre Vieja, a una altitud aproximada de 900 m s.n.m. Por lo tanto, comenzó en una zona dominada por un pinar canario parcialmente modificado por el desarrollo de cierta actividad agro-ganadera. En su discurrir hacia cotas menores de altitud, las coladas volcánicas atravesaron áreas características de un matorral termófilo altamente modificado por la acción antrópica, con la presencia de áreas habitadas, zonas

industriales y comerciales, carreteras y cultivos. Finalmente, al llegar al mar, cubrió amplias zonas de matorral xérico, cuyas reminiscencias estaban acantonadas en los acantilados naturales que no habían sido ocupados por cultivos o cubiertos por las coladas de las erupciones históricas previas como las del San Juan y El Charco.

El primer objetivo que se planteó fue el de establecer un método de trabajo que permitiese caracterizar biológicamente las zonas que se podrían ver afectadas por la erupción. Además, el método que se seleccionase debería tener en cuenta la heterogeneidad de los ecosistemas, con características biológicas y fisionómicas completamente diferentes, por lo que las medidas que se tomasen tendrían que ser comparables entre sí. La precaria situación en la que se encontraban las zonas de trabajo como consecuencia de la emisión de ingentes cantidades de lava, piroclastos y gases, solo permitía permanecer en ellas el tiempo mínimo necesario para realizar su seguimiento de manera segura. Se pudieron establecer, inicialmente, un total de 32 parcelas alrededor de la erupción: desde el cráter, bordeando las coladas lávicas, hasta el nivel del mar. El número de parcelas en cada hábitat fue proporcional a la superficie que cada uno de ellos presentaba en esa zona (ver Nogales *et al*., 2023). En estas parcelas se inventariaron y cuantificaron todas las especies de la flora y fauna, incluyendo plantas con flores, invertebrados, saurios, aves y murciélagos.

Flora y vegetación

Con el fin de llegar a un compromiso entre el tiempo de estancia en cada lugar seleccionado y su adecuada caracterización, el estudio de la vegetación se realizó en cuadrículas de 30 x 30 metros. Este tipo de muestreo en cuadrículas es uno de los más utilizados para la estimación de poblaciones y comunidades vegetales (Kent & Coker, 1992; Krebs, 1998) ya que el tamaño de cuadrícula permite incluir la mayor variabilidad en la fisonomía de la vegetación. Se realizó un inventario de las especies vegetales presentes, se contabilizó el número de ejemplares de cada una de ellas, así como de su cobertura (en porcentaje) en la parcela, además de su estado vegetativo y de conservación (Fig. 5).

Del total del área cubierta por esta erupción, el 13% coincidió con áreas de pinar, el 67% de matorral termófilo y el 20% de matorral xérico (Nogales *et al*., 2022). El ecosistema a mayor altitud se correspondía con un pinar canario con codesos de monte (*Loto hillebrandii-Pinetum canariensis* subas. *adenocarpetosum foliolosi*) y comunidades y complejos de vegetación rupícola (del Arco *et al*., 2006). Las especies más comunes detectadas durante la erupción fueron: el pino canario (*Pinus canariensis*), el corazoncillo (*Lotus campylocladus*), el poleo de monte (*Bystropogon origanifolius*), el amagante (*Cistus symphytifolius*), el codeso (*Adenocarpus*

foliolosus) y el tagasaste (*Chamaecytisus proliferus*); éste último también plantado como forraje para el ganado. Además, había cultivos como almendros (*Prunus dulcis*), castañeros (*Castanea sativa*), higueras (*Ficus carica*), tuneras (*Opuntia maxima*) y viñedos (*Vitis vinifera*). El abandono de estas tierras de labranza favoreció la aparición de un matorral de sustitución compuesto, principalmente, por la vinagrera (*Rumex lunaria*), la malpica (*Carlina falcata*), la tabaiba amarga (*Euphorbia lamarckii*), la tedera (*Bituminaria bituminosa*), el verode (*Kleinia neriifolia*), la cerraja (*Sonchus hierrensis*), el romerillo (*Phagnalum umbelliforme*), o los bejeques (*Aeonium davidbramwellii, A. hierrense* y *A. arboreum*, además del rarísimo híbrido de *Aeonium* x *kunkelii*) (Medina *et al*., 2021).

Fig. 5. Toma de medidas biométricas en ejemplares de pino canario (*Pinus canariensis*) afectados por la erupción volcánica del Tajogaite en La Palma.

El pinar fue el ecosistema más afectado puesto que fue en él donde se originó el volcán, produciendo un impacto directo por efecto del calor y la emisión de lava y piroclastos. No obstante, uno de los efectos más visuales de la erupción volcánica sobre este ecosistema fue la aparición de clorosis en

los pinos (amarilleamiento de las acículas) (Fig. 6), como consecuencia de una fotosíntesis subóptima causada por las elevadas emisiones de gases, sobre todo, dióxido de azufre que, al reaccionar con la humedad de la atmósfera y el oxígeno, se dispersan como ácido sulfúrico y aerosoles ácidos (Nogales *et al*., 2022).

Fig. 6. Amarilleamiento del pinar canario en las cercanías de la zona de erupción del volcán de Tajogaite, por efecto de la clorosis provocada por la emisión de gases.

Se pudo observar un patrón espacial definido en cuanto a la afección por clorosis hacia el suroeste del cráter, debido a la dominancia de los vientos alisios procedentes del noroeste, alcanzando los 7 km de distancia (Weiser *et al*., 2022). La clorosis fue también detectada a una distancia de 2 km en dirección norte del cráter. En varias ocasiones, a lo largo de toda la erupción, se pudieron observar efectos muy localizados en el pinar causados por lluvia ácida (Nogales *et al*., 2023).

El siguiente hábitat que se vio afectado por la erupción volcánica fue el matorral termófilo, en este caso principalmente por las coladas de lava y la caída de ceniza. La vegetación natural de las zonas de medianías, que incluían formaciones de retamar blanco (*Euphorbio lamarckii-Retametum rhodorhizoidis*) y pinar térmico con sabinas (*Loto hillebrandii-Pinetum*

canariensis subas. *juniperetosum canariensis*) (del Arco *et al*., 2006), se encontraba básicamente relegada a zonas de cultivos abandonados o coladas volcánicas antiguas improductivas (Medina *et al*., 2021). Aparte de alguna de las especies de arbustos ya mencionadas en el pinar, destacaban la esparraguera (*Asparagus umbellatus*), el salado (*Schizogyne sericea*), la malvarrisco (*Lavandula canariensis*), la salvia canaria (*Salvia canariensis*), la magarza (*Argyranthemum haouarytheum*), o el jócamo (*Teucrium heterophyllum*).

El matorral costero, predominantemente formado por un tabaibal dulce (*Echio breviramis-Euphorbietum balsamiferae*) (del Arco *et al*., 2006), se encontraba muy restringido debido al desarrollo de cultivos de plataneras, por lo que estaba acantonado en los riscos y acantilados de la costa. Medina *et al*. (2021) mostraron como especies más relevantes en esta área a la retama (*Retama rhodorhizoides*), el arrebol (*Echium brevirame*), la tabaiba dulce (*Euphorbia balsamifera*), el cardón (*E. canariensis*), o el bejeque noble (*Aeonium nobile*). La llegada de las coladas de lava a estos acantilados provocó la completa desaparición de la única población de cardón de la zona.

Otro de los principales eventos de perturbación causados por las erupciones volcánicas es la emisión y caída de piroclastos (tefra), incluidas bombas, lapilli y ceniza (del Moral & Grishin, 1999). Durante la erupción del volcán de Tajogaite tuvo lugar, al menos, tres grandes eventos de producción y caída masiva de ceniza ultrafina (Nogales *et al*., 2023). El espesor alcanzó más de 2 metros a escasos metros del cráter y fue disminuyendo progresivamente llegando a apenas un centímetro a una distancia de 7 kilómetros, lo que puede producir un efecto diferencial sobre la vegetación (Grishin *et al*., 1996; del Moral & Grishin, 1999) dependiendo, también del nivel morfológico de organización de las plantas (Kent *et al*., 2001). Así, en las zonas más cercanas al cráter del volcán -unos 200 m de distancia- tanto por efecto del calor emitido por la erupción como por la acumulación de lava y piroclásticos, la vegetación no sobrevivió. En otras áreas algo más alejadas, hasta unos 4,5 kilómetros de distancia, la acumulación de cenizas produjo una reducción del volumen foliar y la rotura de ramas y árboles debido al exceso de peso, efectos observados, por ejemplo, en isla de Krakatoa (Whittaker *et al*., 1999). En zonas intermedias, las especies arbustivas, además de las arbóreas, que presentaban características de leñosidad secundaria pudieron sobrevivir (Nogales *et al*., 2022) (Fig. 7). En las zonas más alejadas al volcán, la vegetación apenas sufrió las consecuencias, más allá de una acumulación temporal de ceniza en hojas y ramas que desaparecieron por la acción del viento y la lluvia. Resultados similares fueron observados en otras erupciones volcánicas donde la acumulación de ceniza jugó un papel importante en la regeneración de la vegetación (Zobel & Antos, 1992, 1997; Tsuyuzaki, 1994; Grishin *et al*., 1996; Tsuyusaki & Hase, 2005).

Fig. 7. Las especies vegetales que presentaron características de leñosidad secundaria fueron las que presentaron un mayor índice de supervivencia como respuesta a los efectos de la acumulación de cenizas producidas por la erupción volcánica.

Por último, se hizo un seguimiento específico de algunas especies amenazadas de la flora insular como la garbancera canaria (*Cicer canariense*) o la dama palmera (*Parolinia aridanae*). Aunque el efecto de la caída de ceniza ultrafina sobre la población de garbancera canaria fue considerable, éste fue mucho menor en el caso de la dama palmera al estar mucho más alejada de la erupción; no obstante, la acción del viento y la lluvia lo eliminó por completo sin causarles mayores problemas de conservación en ambos casos (Nogales *et al*., 2023).

Invertebrados

Los primeros censos de invertebrados se realizaron a las pocas semanas de comenzar la actividad volcánica sorprendiendo, desde ese momento, su escasez en las zonas aledañas a la erupción. Inicialmente, se anotaron todas las especies observadas sobre la vegetación, el suelo y en vuelo, así como el número de ejemplares de cada una de ellas. No se pudo hacer búsquedas debajo de piedras y en el suelo debido a que los invertebrados habían desaparecido cubiertos por las coladas de lava y la caída de piroclastos. Los muestreos se realizaron en parcelas de 50 x 50 m y 30 minutos de duración en las mismas localidades en las que se caracterizó la vegetación de pinar,

matorral termófilo y matorral xérico. Posteriormente, y con la erupción más estabilizada, se pudo hacer un seguimiento más pormenorizado.

Existe una gran variedad de técnicas de muestreo en función del modo de vida de los invertebrados; sin embargo, se descartó la posibilidad de utilizar alguna de ellas debido a la lluvia de cenizas y el avance de las coladas. En cada parcela de estudio se seleccionaron pequeñas áreas con la vegetación más representativa, aplicando métodos mecánicos de captura directos y terrestres (Fig. 8). Para los organismos edáficos, como ácaros, isópodos, miriápodos y una amplia gama de insectos, se utilizó el tamizaje de suelo y hojarasca. Mientras que, para la recogida de invertebrados que viven ocultos en la vegetación, como arácnidos (ácaros, arañas, pseudoescorpiones, entre otros) e insectos (principalmente, coleópteros, lepidópteros, dípteros, himenópteros o heterópteros) se empleó el vareo con paraguas japonés considerado como el mejor sistema de colecta en estos casos. También se registraron los invertebrados divisados volando o sobre la vegetación (Barrientos, 2004).

Fig. 8. Muestreo de invertebrados en un pinar canario afectado por el volcán de Tajogaite.

En algunas localidades, desaparecidas posteriormente bajo las lavas, se tuvieron en cuenta listados de especies, obtenidos previamente a la erupción, realizados por uno de los autores (R. García Becerra).

Durante esos censos iniciales se contabilizaron, en todas las áreas de estudio, un total de 42 especies de invertebrados (Nogales *et al*., 2022, 2023), que contrastaban con los muestreos realizados antes de la erupción en parcelas destruidas por el volcán, donde el número total de especies censadas, de los mismos grupos, fue de 159. Esto representó la desaparición del 72% de las especies de invertebrados y del 97,5% de la biomasa que se conocía de esas zonas, lo que provocó el colapso de las redes tróficas y la considerable disminución en abundancia de saurios, aves y murciélagos (Nogales *et al*., 2022). De todas las especies detectadas, más de la mitad (52,2%) se correspondieron con endemismos canarios (17 de ellos endemismos insulares). Otras 69 especies se consideran nativas del archipiélago canario (Fig. 9) y solo 7 son alóctonas.

Fig. 9. Ejemplar de saltamontes (*Sphingonotus caerulans corsicus*) sobre la ceniza del volcán de Tajogaite, uno de los pocos invertebrados que pudo ser observado durante su erupción.

Los territorios destruidos por las lavas y aquellos sepultados por grandes acumulaciones de cenizas, perdieron prácticamente el 100% de su fauna invertebrada. Las altas temperaturas de insolación que adquieren las cenizas del volcán, impiden el asentamiento de nuevas poblaciones de artrópodos vinculados al suelo o a la vegetación herbácea -que representan el 27% del total. No obstante, es el momento de los xilófagos del pino, verdaderos especialistas que, debido a la muerte masiva de pinos, están teniendo la oportunidad de aumentar sus poblaciones considerablemente.

Durante la erupción del volcán de Tajogaite, se tuvo particular atención en las especies animales amenazadas que podían haberse visto afectadas. Este fue el caso, por ejemplo, del saltamontes áptero de El Remo (*Acrostira euphorbiae*). Si bien sus poblaciones no se vieron afectadas directamente por las coladas lávicas, cabía la posibilidad de que su hábitat se viese perjudicado por la caída de ceniza. Este saltamontes vive la mayor parte de su vida adulta sobre la tabaiba amarga, la cual constituye su principal fuente de alimento (García Becerra & Oromí, 1992; López *et al*., 2007). La continua caída de piroclastos y ceniza, incluso a distancias tan grandes (unos 7 km, aproximadamente), podría afectar al estado de conservación de esta especie (muchas tabaibas estaban cubiertas de ceniza y con piroclastos clavados en sus ramas) y con ello la disponibilidad de recursos tróficos. Además, las hembras de esta especie necesitan bajar al suelo para realizar su puesta. Para ello necesitan suelos con tierra fina y suelta que le permita introducir su abdomen a una profundidad de 3-4 cm donde depositar su ooteca. Si la acumulación de piroclastos fuese muy grande, las hembras tendrían muchos problemas para realizarla adecuadamente. Otro inconveniente añadido podría derivar de las dificultades de los imagos (juveniles) de atravesar esa capa de tefra una vez eclosionasen de los huevos. Sin embargo, la capa de ceniza observada en sus áreas de distribución, sólo tenía aproximadamente un centímetro de grosor, lo que no parece que fuese a constituir un grave problema para esta especie amenazada. Incluso la acumulada sobre la vegetación tampoco fue un gran problema ya que se eliminó en gran medida por acción del viento y la lluvia.

Por otro lado, al menos cinco endemismos locales -con distribución restringida en la isla- se vieron directamente influenciados por la actividad volcánica, ya que poseen pequeñas poblaciones relegadas a lugares específicos como consecuencia de la destrucción y fragmentación de sus hábitats. Estos fueron los casos de la mencionada *Acrostira euphorbiae* (ortóptero), así como los coleópteros: *Ceutorhynchus castroi*, *Metholcus abora*, *Stenidea lorenzoi* y *Attalus pardoalcaldei* (García Becerra & Medina, 2023). Aunque ninguna especie endémica o amenazada de la fauna invertebrada de La Palma se haya visto directamente afectada por la erupción del volcán de Tajogaite, ha quedado patente que un evento natural catastrófico como el de una erupción volcánica puede suponer la desaparición de especies únicas que se encuentran ya sometidas a una presión y amenaza por factores antrópicos (García Becerra & Medina, 2023).

Saurios

En La Palma están presentes, de forma natural, dos especies de saurios, el lagarto tizón (*Gallotia galloti*) y el perenquén de Delalande (*Tarentola delalandii*). Ambas se vieron gravemente afectadas por la actividad volcánica

debido, en gran parte, a su hábito de usar refugios bajo piedras que quedaron cubiertos y colmatados por las coladas de lava y la caída masiva de ceniza. Además, el agostamiento de la vegetación y la disminución de invertebrados contribuyeron a su desaparición por la falta de recursos tróficos que les permitiesen sobrevivir a las severas condiciones ambientales provocadas por esta erupción.

Ante la imposibilidad de realizar un muestreo exhaustivo de todos los saurios presentes en la zona, se planteó contabilizar únicamente a los lagartos. Solo se estimó su abundancia relativa en las distintas áreas muestreadas con el fin de poder comparar su evolución a lo largo del espacio y el tiempo (Tellería, 1986; Gibbs, 2000). Los principales métodos de censo de saurios incluyen el trampeo, captura en mano, lazos y marcaje individual (Blomberg & Shine, 1996). No obstante, debido al escaso tiempo disponible para realizar los censos, así como que el área de muestreo podía cambiar en cualquier momento por efecto del volcán se optó, como método de censo, el del transecto lineal con un recorrido de 30 m y una banda de 1 m a cada lado del observador (Fig. 10).

Fig. 10. Realización de un transecto lineal al borde de la colada de lava para el conteo de lagartos durante la erupción del volcán de Tajogaite. Ejemplo de una parcela de estudio que posteriormente desapareció cubierta por esa misma colada de lava.

Los muestreos se realizaron entre las 11:00 y las 15:00 horas, haciéndolos coincidir con las horas de más insolación y mayor actividad de

los lagartos. Se anotaron todos los individuos observados asignando un tamaño predeterminado, según su longitud hocico – cloaca (pequeños: < 7 cm; medianos: 7-10 cm; grandes: > 10 cm). Esta información era interesante para estudiar si las distintas clases de edad presentaban diferencias en cuanto a su resiliencia.

Debido a que muchos lugares de censo estuvieron cubiertos de ceniza, solo eran detectables las huellas como marcas de su presencia en la zona. Por ello, en cada estación se contabilizaron, dentro de esa misma banda de censo, el número total de huellas observadas como índice complementario de abundancia (Tellería, 1986).

La abundancia y actividad de los lagartos disminuyó considerablemente según se desarrollaba la erupción, mejorando solo su situación a una distancia de unos 2,5 km desde el cráter, donde sus efectos eran mucho menos considerables. Aun así, en algunos lugares se pudo observar cómo los ejemplares de menor tamaño fueron los que mejor sobrevivieron debido, probablemente, a sus menores requerimientos tróficos y fisiológicos, así como su mayor facilidad para encontrar refugios de menor tamaño (Nogales *et al*., 2023). Fue muy sobrecogedor observar, en muchas ocasiones, a ejemplares de ambas especies de saurios vagar en áreas completamente cubiertas de ceniza (Fig. 11), sin agua ni alimento y con una precaria condición corporal que los hicieron muy vulnerables frente a depredadores, tanto nativos como los cernícalos vulgares (*Falco tinnunculus*) o introducidos como los gatos (*Felis catus*).

Fig. 11. Ejemplar de lagarto tizón (*Gallotia galloti*) «perdido» en un mar de ceniza en una localidad cercana al volcán de Tajogaite.

Aves

Teniendo en cuenta los criterios anteriormente expuestos en relación a cómo hacer frente a un conteo de una población de animales (Tellería, 1986; Gibbs, 2000) durante una situación de extrema emergencia, se buscó un método que permitiese obtener unos índices de abundancia relativa comparables en el tiempo y en el espacio cubierto por el seguimiento que se estaba realizando. En el caso particular de las aves existe una gran variedad de tipos de muestreos dependiendo tanto del grupo de aves de que se trate como de su comportamiento (Tellería, 1986). Para este estudio, se seleccionó el censo por puntos de conteo (Índice Puntual de Abundancia – IPA), comúnmente utilizado para contabilizar aves que se encuentran distribuidas en el territorio de manera uniforme, como el caso de las aves territoriales (Gibbons *et al*., 1996). En las mismas áreas seleccionadas para caracterizar la vegetación, se llevaron a cabo estos censos registrando todas las aves vistas u oídas, en un periodo de 5 minutos (Fig. 12). Además, se marcó la distancia aproximada de las aves al observador en segmentos de 10 metros para calcular densidades relativas de cada especie. Los censos se realizaron desde la salida del sol hasta las 11:00 horas, con el fin de detectar a las aves en su periodo de mayor actividad.

Fig. 12. Observación de aves con prismáticos, método utilizado para su monitoreo mediante Índices Puntuales de Abundancia (IPA) en las zonas afectadas por el volcán de Tajogaite.

De forma general, la abundancia y actividad de las aves en todas las zonas muestreadas disminuyó considerablemente durante las dos primeras semanas de erupción, principalmente los casos de la paloma bravía (*Columba livia*), la chova piquirroja (*Pyrrhocorax pyrrhocorax*) y el canario (*Serinus canarius*) (Nogales *et al*., 2023). Sin embargo, la actividad dependió mucho del grupo de aves. Por ejemplo, las aves de mayor tamaño, como aguilillas (*Buteo buteo*), cernícalos vulgares o cuervos (*Corvus corax*), eran capaces de aproximarse bastante a la zona del cráter aprovechando las corrientes térmicas ascendentes para alzar el vuelo, aún a pesar de la gran cantidad de gases y piroclastos emitidos por el volcán.

También se pudieron ver algunas aves de pequeño tamaño como los canarios volando en grupo en zonas de pinar a menos de 400 m del volcán. Sin embargo, otra ave característica del pinar como el pinzón vulgar (*Fringilla canariensis*) desapareció de la zona prácticamente al día siguiente de iniciarse la erupción. Curiosamente, esta especie volvió a aparecer justo al día siguiente de su finalización, demostrando una gran adaptación a estos fenómenos naturales.

En zonas de medianías y costas, donde los mayores efectos del volcán eran causados por las coladas de lava y la caída de cenizas, las aves mostraron una elevada territorialidad, manteniéndose en el lugar hasta el último momento. Este fue el caso, por ejemplo, de los cernícalos vulgares o las currucas tomillera (*Curruca conspicillata*) y cabecinegra (*C. melanocephala*). Peor suerte tuvieron los pollos de pardela cenicienta (*Calonectris diomedea*) que estaban a punto de abandonar sus nidos que, por lo general, ocurre entre los meses de octubre y noviembre. Algunas zonas habituales de nidificación de esta especie de ave marina se habrían visto destruidas completamente al llegar las primeras coladas al mar, cubriendo los acantilados costeros en la zona de las playas de Los Guirres y El Charcón.

La llegada al mar de las coladas provocó la muerte de muchas especies marinas como cangrejos (*Grapsus grapsus*), morenas (*Muraena augusti*), erizos (*Diadema africanum*), estrellas de mar y algas. Sus restos depositados en las playas fueron aprovechados por aves como las gaviotas patiamarillas (*Larus michahellis*) o los vuelvepiedras (*Arenaria interpres*).

Otra de las consecuencias que se pudo observar durante la erupción, en el caso de las aves, fue el cambio en su comportamiento trófico. Debido a la disminución en las poblaciones de sus presas habituales, como invertebrados o lagartos, los cernícalos vulgares modificaron su comportamiento para depredar sobre otras presas como aves o ratas. Se observaron hasta 6 intentos de captura de tórtolas de collar (*Streptopelia decaocto*), así como un evento de depredación sobre una rata (*Rattus* cf. *rattus*) (Nogales *et al*., 2023) (Fig. 13).

De las observaciones hechas a pie de volcán, se concluye que las aves grandes, con mayor capacidad de desplazamiento, fueron mucho más

resilientes que las especies pequeñas, especialmente aves paseriformes, que tuvieron que moverse fuera del área afectada por la erupción, como ocurrió con el pinzón vulgar.

Fig. 13. Ejemplar de cernícalo vulgar (*Falco tinnunculus*) depredando sobre una rata (*Rattus* cf. *rattus*), una presa poco habitual.

Mamíferos

En La Palma se han citado hasta 18 especies de mamíferos (Medina, 2018); sin embargo, la mayoría son especies introducidas como el arruí (*Ammotragus lervia*), el muflón (*Ovis orientalis*), la cabra (*Capra hircus*), la oveja (*Ovis aries*), el perro (*Canis familiaris*), el gato, el hurón (*Mustela putorius furo*), el erizo moruno (*Atelerix algirus*), la rata negra (*Rattus rattus*), la rata parda (*R. norvegicus*), el ratón (*Mus musculus domesticus*), la ardilla moruna (*Atelerix algirus*) y el conejo europeo (*Oryctolagus cuniculus*). Solo las cinco especies de murciélagos presentes en la isla (Trujillo, 1991) se consideran nativas: el murciélago de Madeira (*Pipistrellus maderensis*), el murciélago montañero (*Hypsugo savii*), el nóctulo pequeño (*Nyctalus leisleri*), el orejudo canario (*Plecotus teneriffae*) y el murciélago rabudo (*Tadarida teniotis*). Por este motivo, este grupo de mamíferos fue el

único al que se le hizo un seguimiento durante la erupción volcánica del Tajogaite.

Todas las especies de murciélagos presentes en Canarias son insectívoras. Para orientarse y cazar a sus presas en la oscuridad, los murciélagos utilizan la ecolocalización; emisión de ultrasonidos que, al rebotar sobre los elementos del entorno, generan ecos que son analizados en el cerebro del animal para la obtención de imágenes muy precisas de su alrededor. Tanto la frecuencia de emisión como la cadencia de estos ultrasonidos son características de cada especie. Por tanto, dado el carácter nocturno y silencioso de los murciélagos, que hace imposible su identificación mediante la observación, el mejor método de muestreo para detectar su presencia de manera inmediata se basa en muestreos nocturnos con aparatos detectores de ultrasonidos para la localización e identificación de las especies (Guixé & Campodrón, 2018).

Para el presente estudio se realizaron escuchas de 5 minutos, en las mismas estaciones de muestreo establecidas, utilizando un detector de ultrasonidos Petterson D230 y anotando todos los contactos en ese periodo de tiempo (Fig. 14).

Fig. 14. Uso de detectores Petterson D230 para el censo de murciélagos en áreas afectadas por el volcán de Tajogaite (La Palma, islas Canarias).

Los muestreos se iniciaron aproximadamente a unos 15 minutos tras la puesta de sol, cuando los murciélagos comienzan su actividad nocturna. Se estableció una frecuencia inicial para las escuchas de entre 40 y 47 kHz (que se corresponde con la emitida por el murciélago de Madeira), modificándose en campo en caso necesario para tratar de localizar las emisiones producidas por murciélagos en alguna frecuencia diferente. Prácticamente, la totalidad de los murciélagos detectados mediante escuchas fueron murciélagos de Madeira que, por otra parte, es la especie más abundante y con mayor área de distribución de toda Canarias.

Se observó un claro gradiente en cuanto a la abundancia de ejemplares detectados, siendo alto el número de contactos en cotas bajas, principalmente en hábitat de cultivos de plátanos con presencia de charcas y puntos de agua, donde los murciélagos encuentran abundancia de presas (mosquitos y lepidópteros) y donde pueden beber con facilidad. La abundancia y densidad de murciélagos fue disminuyendo en cada estación a medida que nos acercamos al volcán activo, donde la caída de cenizas y piroclastos aumentaba. Según las observaciones realizadas, la presencia de insectos voladores (presas potenciales para los quirópteros) igualmente disminuía en esas cotas.

En una ocasión, se localizó un ejemplar solitario de nóctulo pequeño (frecuencia 33-35 kHz) cazando cerca de la Curva de los Castañeros (subida al Refugio del Pilar) al borde del pinar. Respecto al orejudo canario, hay que estar a muy poca distancia de su ubicación para poder detectarlo, por lo que su ausencia en los muestreos puede no corresponder a una ausencia real de la especie en la zona. Durante la erupción tampoco se detectó ningún murciélago rabudo, especie de mayor tamaño con vuelo muy alto y potente. En condiciones normales, este murciélago es bastante frecuente en La Palma y fácilmente detectable porque es el único que emite en un rango de frecuencia audible para el oído humano (17 kHz). Se sospecha que durante estos meses los ejemplares de esta especie debieron desplazarse a otras zonas con mejores condiciones para alimentarse.

El viento intenso resultó ser también un factor determinante para la actividad nocturna de los murciélagos. Se encontró que en lugares expuestos a vientos fuertes la presencia de quirópteros fue nula, aunque se localizó algún ejemplar en puntos cercanos que se encontraban más protegidos de estos vientos.

Evolución de la biodiversidad y conclusiones

La metodología empleada para monitorear la biodiversidad a lo largo de la erupción volcánica permitió tener una idea muy aproximada sobre cómo

los distintos ecosistemas y los grupos de plantas y animales, que en ellos se desarrollan, se vieron afectados, así como para comprobar cómo sus poblaciones fueron cambiando y adaptándose a las nuevas condiciones ambientales de su entorno (Nogales *et al*., 2022, 2023). Algunos de los resultados más interesantes de este seguimiento estuvieron relacionados con la adaptación de los pinos canarios al volcanismo, la prevalencia de la leñosidad secundaria en plantas con flores o la plasticidad trófica en vertebrados, procesos evolutivos que tienen lugar en islas oceánicas y que previamente habían sido poco asociadas a los procesos volcánicos (Nogales *et al*., 2022).

Los puntos de control tuvieron que ir siendo modificados paulatinamente según se iban destruyendo como consecuencia de la llegada de las coladas de lava; algo más del 70% de los puntos inicialmente establecidos desaparecieron. Los nuevos puntos de seguimiento se intentaron localizar en zonas lo más próximas a las anteriores, lo que también supuso, en algunos casos, su posterior pérdida. Finalmente, a lo largo de todo el proceso eruptivo, se caracterizaron un total de 42 parcelas. A pesar de estas dificultades, se considera que estos muestreos sistemáticos en condiciones de extrema dificultad durante un evento catastrófico como una erupción volcánica, han sido los adecuados y han permitido reflejar fielmente el destino que la biodiversidad ha sufrido a lo largo de todo el proceso (ver Nogales *et al*., 2022, 2023). Además, los puntos que no se vieron afectados directamente, permitirán llevar a cabo un seguimiento temporal de su evolución, una vez finalizada la erupción, tal y como se ha realizado en otras manifestaciones volcánicas (ver, por ejemplo, Zobel & Antos, 1997; Whittaker *et al*., 1999; Tsuyuzaki & Hase, 2005; Yeloff *et al*., 2007).

En líneas generales, el impacto causado por el volcán de Tajogaite ha sido dramático en los primeros 300 m alrededor del cráter provocando la muerte de prácticamente toda la vegetación presente en la zona (Fig. 15).

Los pinos canarios han demostrado una adaptación impresionante a los fenómenos volcánicos, probablemente debido a sus características biológicas, como poseer una corteza gruesa de unos 8 cm que le proporciona protección ante las altas temperaturas, el presentar células en el parénquima axial que proporciona una elevada capacidad de rebrote (Fig. 16), además de producir conos serótinos adaptados igualmente a liberar sus semillas en condiciones de elevada temperatura ambiental (Nogales *et al*., 2022).

Aunque durante las primeras semanas se observó el rebrote en los pinos debido a las reservas energéticas de las células del parénquima axial, finalmente, los daños a nivel radicular han debido ser fatales provocando la muerte de los ejemplares situados a esa mínima distancia del cráter. La fauna ha ido ocupando algunas áreas, sobre todo, las aves y algunos invertebrados xilófagos que se alimentan de restos vegetales muertos o en descomposición.

Fig. 15. Efecto diferencial de la erupción volcánica del Tajogaite en función de la distancia al cráter. En primer término, se observa la devastación total de la vegetación mientras que, a partir de los 300 m, aproximadamente, el pinar canario se ha ido recuperando paulatinamente.

El impacto continúa siendo bastante severo hasta los 2,5 km de distancia, donde la ceniza cubre buena parte del terreno. Las especies de menor porte fueron completamente enterradas y solo sobrevivieron aquellas especies que mostraron leñosidad secundaria, característica que ha sido planteada como una nueva hipótesis sobre una posible respuesta a las condiciones extremas causadas por las erupciones volcánicas en islas oceánicas (Nogales *et al*., 2022). En lo que respecta a los animales presentes en la zona, los lagartos siguen siendo escasos en el pinar, aunque en las zonas de los matorrales termófilos y costeros empezaron a recuperarse.

A distancias mayores de ese punto de inflexión de los 2,5 km, todos los ecosistemas se encuentran en buen estado de conservación. El nivel de acumulación de cenizas no ha sido suficiente para cubrir la vegetación herbácea y, debido a las abundantes lluvias que han tenido lugar a lo largo de este primer año después de la erupción, la vegetación se ha recuperado considerablemente. Esto ha supuesto el aumento de la abundancia de invertebrados y, por ende, la de aves y lagartos que se alimentan de ellos.

Fig. 16. Rebrote en el pino canario (*Pinus canariensis*) efecto de las reservas energéticas de las células del parénquima axial de esta especie perfectamente adaptada a los procesos volcánicos en islas oceánicas.

En conclusión, el efecto de la erupción volcánica y la perturbación que provoca en los ecosistemas naturales ha sido gradual, disminuyendo a medida que aumenta la distancia al punto de emisión, sobre todo debido a la disminución del espesor de cenizas, de los gases emitidos y de los efectos directos del flujo de las lavas (Zobel & Antos, 1997; del Moral & Grishin, 1999; Tsuyuzaki & Hase, 2007). Debido a este mismo efecto de la disminución de los impactos del volcán con la distancia, la recuperación de la biodiversidad ha seguido un patrón similar, aumentando a medida que aumenta la distancia al cráter (Fig. 17).

Una vez finalizado el seguimiento sistemático durante una temporada anual completa de los ecosistemas y las comunidades de las especies que lo conforman, queda por analizar los datos que permitan describir adecuadamente la capacidad de resiliencia de la biodiversidad insular frente a las erupciones volcánicas en islas oceánicas.

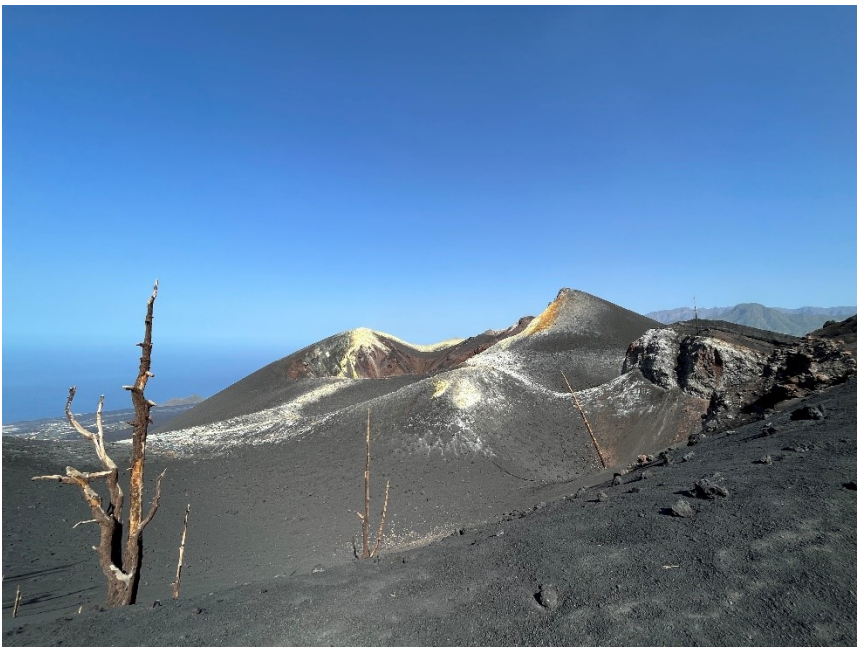


Fig. 17. Interior del cráter del volcán de Tajogaite una vez finalizada la erupción el 13 de diciembre de 2021.

AGRADECIMIENTOS.- Los autores están muy agradecidos a todas aquellas personas que colaboraron tanto durante los momentos más complicados de la erupción volcánica como en los posteriores trabajos de seguimiento. Especial mención a todo el personal de la Consejería de Medio Ambiente del Cabildo de La Palma, de la empresa pública Gesplan y del Instituto de Productos Naturales y Agrobiología del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPNA-CSIC). A Thomas Boulesteix, Noemie Taquet y Robin Campion, volcanólogos que nos acompañaron en los primeros estadios de la erupción, señalándonos los riesgos y peligros a los que nos enfrentábamos y aconsejándonos sobre cómo actuar. Nieves Zurita y Manuel Arechavaleta colaboraron en los primeros muestreos de invertebrados. A Carl Beierkuhnlein, Anke Jentsch y Frank Weiser por sus comentarios relativos a las especies de flora presentes en la zona de influencia del volcán de Tajogaite previo a la erupción. José Carlos Miranda y Víctor Chano nos aportaron interesantes comentarios sobre el estado del pinar para comprender su afección y posterior recuperación. José Gabriel Barreto y Thomas Haack, de Ticom Soluciones, S.L., por ceder amablemente las imágenes de dron que ilustran parte de este artículo. El Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico del Gobierno de España y el Gobierno de Canarias han aportado los fondos necesarios para poder llevar a cabo parte de los seguimientos de la biodiversidad. Queremos hacer una mención especial para todos los habitantes de La Palma que se vieron afectados directa o indirectamente por este evento natural catastrófico y que han sabido sobreponerse a estos momentos tan difíciles. Finalmente, recordar con todo nuestro cariño y

admiración a nuestro querido amigo y compañero Aurelio Acevedo Rodríguez quien nos acompañó en algunos de los seguimientos que específicamente le hicimos a las poblaciones de las especies amenazadas que podían verse afectadas por la erupción.

Bibliografía

AFONSO-CARRILLO, J. (Ed.) (2023). *Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)*. XVIII Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, Puerto de la Cruz.

BARRIENTOS, J.A. (Ed.) (2004). *Curso Práctico de Entomología*. Manuals de la Universitat Autònoma de Barcelona. 41. Entomologia. Asociación Española de Entomología, CIBIO-Centro Iberoamericano de Biodiversidad & Universitat Autònoma de Barcelona.

BLEYHL, G. (2022). *Lava steinzeit. Edad de lava*. Konkursbuch Verlag Claudia Gehrke. Tübingen, Germany.

BLOMBERG, S. & R. SHINE (1996). Reptiles, pp: 218-226. En: Sutherland, W.J. (Ed.). *Ecological Census Techniques. A handbook*. Cambridge Univesity Press. Cambridge.

CARRACEDO, J.C. (2008). *Los volcanes de las islas Canarias, IV. La Palma, La Gomera y El Hierro*. Editorial Rueda. Madrid.

CARRACEDO, J.C., V.R. TROLL, J.M.D. DAY, H. GEIGER, M. AULINAS, V. SOLER, F.M. DEEGAN, F.J. PÉREZ-TORRADO, G. GISBERT, E. GAZEL, A. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ & H. ALBERT (2022). The 2021 eruption of the Cumbre Vieja volcanic ridge on La Palma, Canary Islands. *Geology Today* 38: 94-107.

CIVICO, R., T. RICCI, P. SCARLATO, J. TADDEUCCI, D. ANDRONICO, E. DEL BELLO, L. D´AURIA, P.A. HERNÁNDEZ & N.M. PÉREZ (2022). High-resolution digital Surface modelo f the 2021 eruption deposit of Cumbre Vieja volcano, La Palma, Spain. *Scientific Data* 9: 435.

DE LUCA, C., E. VALERIO, F. GIUDICEPIETRO, G. MACEDONIO, F. CASU & R. LANARI (2022). Pre- and Co-eruptive analysis of the September 2021 eruption at Cumbre Vieja volcano (La Palma, Canary Islands) through DInSAR measurements and analytical modeling. *Geophysical Research Letters* 49: e2021GL097293.

DEL ARCO, M. (Dir.) (2006). *Mapa de Vegetación de Canarias*. GRAFCAN Ediciones. Santa Cruz de Tenerife.

DEL MORAL, R., & S.Y. GRISHIN (1999). Volcanic disturbance and ecosystem recovery, pp: 137-160. En: Walker, L.R. (Ed.). *Ecosystems of Disturbed Ground*. Elsevier Science. Amsterdam.

FERNÁNDEZ, J., J. ESCAYO, Z. HU, A.G. CAMACHO, S.V, SAMSONOV, J.F. PRIETO, K.F. TIAMPO, M. PALANO, J.J. MALLORQUÍ & E. ANCOCHEA (2021). Detection of volcanic unrest onset in La Palma, Canary Islands, evolution and implications. *Scientific Reports* 11: 2540.

FREY, R.P. (2022). *Erupción volcánica La Palma*. BoD – Books on Demand. Germany.

GARCÍA BECERRA, R. & P. OROMÍ (1992). *Acrostira euphorbiae* sp. n. de Pamphagidae (Orthoptera) de La Palma (Islas Canarias). *Revista Española de Entomología* 68: 121-128.

GARCÍA BECERRA, R. & F.M. MEDINA (2023). El aviso del volcán de Tajogaite. *Cosmológica* 3: 31-42.

GARCÍA HERNÁNDEZ, A.M. (2021). Refugiados en tierra propia. A propósito de la situación de "duelo social" ocasionado por el volcán de la Cumbre Vieja en La Palma. *Revista Ene de Enfermería* 15(3). http://ene-enfermeria.org (consultado el 2 de febrero de 2023).

GIBBS, J.P. (2000). Monitoring populations, pp.: 213-252. En: Boitani, L. & T.K. Fuller (Eds.). *Research Techniques in Animal Ecology. Controversies and Consequences*. Columbia University Press. New York.

GIBBONS, D.W., D. HILL & W.J. SUTHERLAND (1996). Birds, pp: 227-259. En: Sutherland, W.J. (Ed.). *Ecological Census Techniques. A handbook*. Cambridge University Press. Cambridge.

GONZÁLEZ, L.R. (2022). *Diario de un volcán. Tagebuch eines Vulkans*. Konkursbuch Verlag Claudia Gehrke. Tübingen, Germany.

GONZÁLEZ, P.J. (2022) Volcano-tectonic control of Cumbre Vieja. *Science*. doi: 10.1126/science.abn5148.

GRISHIN, S.Y., R. DEL MORAL, P.V. KRESTOV & V.P. VERKHOLAT (1996). Succession following the catastrophic eruption of Ksudach volcano (Kamchatka, 1907). *Vegetatio* 127: 129-153.

GUIXÉ, D. & J. CAMPRODON (2018). *Manual de conservación y seguimiento de los quirópteros forestales*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid.

HORWELL, C., P. BAXTER & R. KAMANYIRE (2015). Health impacts of volcanic eruptions, pp. 289-294. En: Loughlin, S., S. Sparks, S. Brown, S. Jenkins & C. Vye-Brown (Eds.). *Global Volcanic Hazards and Risk* Cambridge University Press. Cambridge.

ICRP (International Commission on Radiological Protection) (2014). Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3). https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20126.

ILOVE THE WORLD (Ed.) (2022). *Las otras historias del volcán*. Gráficas Sabater. Santa Cruz de Tenerife.

JARABO LORENZO, A.M. (Coord.) (2022). Voces del volcán. 2º Bachillerato de Ciencias, Promoción 2020-2022, IES El Paso.

KENT, M. & P. COKER (1992). *Vegetation description and analysis. A practical approach*. John Wiley & Sons. Chichester. England.

KENT, M., N.W. OWEN, P. DALE, R.M. NEWHAM & T.M. GILES (2001). Studies of vegetation burial: a focus for biogeography and biogeomorphology? *Progress in Physical Geography* 25: 455-482.

KREBS, C.J. (1998). *Ecological methodology*. Addison-Wesley-Longman Inc. Menlo Park, California.

LÓPEZ, H., M. NOGALES, E. MORALES & P. OROMÍ (2007). Habitat use and phenology of the large insular endemic grasshopper *Acrostira euphorbiae* (Orthoptera: Pamphagidae). *Bulletin of Entomological Research* 97: 117-127.

MARTÍ MOLIST, J. (2011). *Los volcanes*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas & Catarata. Madrid.

MARTÍN-RAYA, N., J. DÍAZ-PACHECO, A. LÓPEZ-DÍEZ, P. DORTA, A. CABRERA. (2023). A lava flow simulation experience oriented to disaster risk reduction, early warning systems and response during the 2021 volcanic eruption in Cumbre Vieja, La Palma. *Natural Hazards*. https://doi.org/10.1007/s11069-023-05989-w.

MEDINA, F.M. (2018). Fauna vertebrada en la isla de La Palma: estado de conservación y gestión, pp. 165-193. En: Afonso-Carrillo (Ed.). *La Palma: agua, tierra, fuego y cielo*. Actas XIII Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, Puerto de la Cruz.

MEDINA, F.M., A. ACEVEDO-RODRÍGUEZ & M. NOGALES (2021). Notas preliminares sobre la afección del volcán a la flora y vegetación de La Palma (octubre 2021). *Conservación Vegetal* 25: 54-55.

MUELLER, W., H. COWIE, C.J. HORWELL, F. HURLEY & P.J. BAXTER (2020). Health impact assessment of volcanic ash inhalation: A comparison with outdoor air pollution methods. *GeoHealth* 4: e2020GH000256. https://doi.org/10.1029/2020GH000256.

NAVE, E. & L. FERRERO (2022). *Las cuatro estaciones del volcán Tajogaite en ochenta y cinco vistas*. Ediciones Remotas & La Fábrica.

NOGALES, M. & F.M. MEDINA (2021). Nuestra experiencia como biólogos en plena erupción de un volcán (La Palma, 2021). *Revista Hipótesis* 10: https://www.ull.es/portal/cienciaull/revistahipotesis/numeros/numero-10/.

NOGALES, M. & F.M. MEDINA (2022). Disaster Ecology: Our experience as biologists in the middle of a volcanic eruption (La Palma, Canary Islands, 2021). *Functional Ecologist* 18 Feb 2022. https://functionalecologists.com/2022/02/18/disaster-ecology-our-experience-as-biologists-in-the-middle-of-a-volcanic-eruption-la-palma-canary-islands-2021/.

NOGALES, M., M. GUERRERO-CAMPOS, T. BOULESTEIX, N. TAQUET, C. BEIERKUHNLEIN, R. CAMPION, S. FAJARDO, N. ZURITA, M. ARECHAVALETA, R. GARCÍA, F. WEISER & F.M. MEDINA (2022). The fate of terrestrial biodiversity during an oceanic island volcanic eruption. *Scientific Reports* 12: 19344.

NOGALES, M., M. GUERRERO-CAMPOS, T. BOULESTEIX, N. TAQUET & F.M. MEDINA (2023). La biodiversidad durante una erupción volcánica: cuaderno de bitácora en el volcán de Tajogaite (La Palma). *El Indiferente* 24: 42-65.

PADRÓN, E., N.M. PÉREZ, P.A. HERNÁNDEZ, H. SUMINO, G.V. MELIÁN, M. ALONSO, F. RODRÍGUEZ, M. ASENCIO-RAMOS & L. D´AURIA (2022). Early precursory changes in the 3He/4He ratio prior to the 2021 Tajogaite eruption at Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Geophysical Research Letters* 49: e2022GL099992.

PADRÓN, E., N.M. PÉREZ, F. RODRÍGUEZ, G. MELIÁN, P.A. HERNÁNDEZ, H. SUMINO, G. PADILLA, J. BARRANCOS, S. DIONIS, K. NOTSU & D. CALVO (2015).

Dynamics of diffuse carbon dioxide emissions from Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Bulletin of Volcanology* 77: 28.

PALANCO, S., R. PÉREZ-LÓPEZ, I. GALINDO-JIMÉNEZ, A. BERNAL, S. ARANDA, M.C. LÓPEZ-ESCALANTE, D. LEINEN, J.F. MEDIATO, J. LÓPEZ-GUTIÉRREZ, J.R. RAMOS-BARRADO (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: 106391.

PÉREZ, N.M., P.A. HERNÁNDEZ, G.V. MELIÁN, E. PADRÓN, M. ASENCIO-RAMOS, J. BARRANCOS, G.D. PADILLA, F. RODRÍGUEZ, L. D´AURIA, C. AMONTE, M. ALONSO, A. MARTÍN-LORENZO, D. CALVO, C. RODRÍGUEZ, W. HERNÁNDEZ, B. COLWELL, M.J. PANKHURST & THE INTERNATIONAL COLLABORATIVE RESEARCH TEAM (2022). The 2021 Cumbre Vieja eruption: an overview of the geochemical monitoring program. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23-27 May 2022, EGU22-12491, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12491.

PEVOLCA (2021). Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias. https://info.igme.es/eventos/Erupcion-volcanica-la-palma/pevolca.

PEVOLCA (2022a). Informe del Comité Científico de 4 de enero de 2022. https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/wp-content/uploads/2022/01/040122-INFORME-Comit%C3%A9-Cient%C3%ADfico-PDF.pdf. [Consulta: 24/04/2023].

PEVOLCA (2022b) Informe del Comité Científico de 18 de enero de 2022. https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/wp-content/uploads/2022/01/180122-INFORME-Comit%C3%A9-Cient%C3%ADfico-PDF.pdf [Consulta: 24/04/2023].

PLANK, S., A.V. SHEVCHENKO, P. ´ANGELO, V. GSTAIGER, P.J. GONZÁLEZ, S. CESCA, S. MARTINIS & T.R. WALTER (2023). Combining thermal, tri-stereo optical and bi-static InSAR satellite imagery for lava volume estimates: the 2021 Cumbre Vieja eruption, La Palma. *Scientific Reports* 13: 2057.

RIZZO, A.L., A. SANDOVAL-VELASQUEZ, F. CASSETA, T. NTAFLOS, A. AIUPPA, M. ALONSO, E. PADRÓN, M. PANKHURST & N.M. PÉREZ (2022). First insights into the noble gas signatura of the 2021 Cumbre Vieja eruption, La Palma (Canary Islands). EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23-27 May 2022, EGU22-12170, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12170.

ROMÁN, A., A. TOVAR-SÁNCHEZ, D. ROQUE-ATIENZA, I.E. HUERTAS, I. CABALLERO, E. FRAILE-NUEZ & G. NAVARRO (2022). Unmanned aerial vehicles (UAVs) as a tool for hazard assessment: The 2021 eruption of Cumbre Vieja volcano, La Palma Island (Spain). *Science of Total Environment* 843: 157092.

ROMERO, J.E., M. BURTON, F. CÁCERES, J. TADDEUCCI, R. CIVICO, T. RICCI, M.J. PANKHURST, P.A. HERNÁNDEZ, C. BONADONNA, E.W. LLEWELLIN, M. PISTOLESI, M. POLACCI, C. SOLANA, L. D´AURIA, F. ARZILLI, D. ANDRONICO, F. RODRÍGUEZ, M. ASENCIO-RAMOS, A. MARTÍN-LORENZO, C. HAYER, P. SCARLATO & N.M. PÉREZ (2022). The initial pase of the 2021 Cumbre Vieja ridge eruption (Canary Islands): Products and dynamics controlling edifice

growth and collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 431: 107642.

SICARD, M., C. CÓRDOBA-JABONERO, A. BARRETO, E.J. WELTON, C. GIL-DÍAZ, C.V. CARVAJAL-PÉREZ, A. COMERÓN, O. GARCÍA, R. GARCÍA, M-A. LÓPEZ-CAYUELA, C. MUÑOZ-PORCAR, N. PRATS, R. RAMOS, A RODRÍGUEZ-GÓMEZ, C. TOLEDANO & C. TORRES (2022). Volcanic eruption of Cumbre Vieja, La Palma, Spain: A first insight to the particulate matter injected in the troposphere. *Remote Sensing* 14: 2470.

STEWART, C., D.E. DAMBY, C.J. HORWELL, T. ELIAS, E. ILYINSKAYA, I. TOMASEK, B.M. LONGO, A. SCHMIDT, H.K. CARLSEN, E. MASON, P.J. BAXTER, S. CRONIN, & C. WITHAM (2022). Volcanic air pollution and human health: recent advances and future directions. *Bulletin of Volcanology* 84: 11. https://doi.org/10.1007/s00445-021-01513-9.

TELLERÍA, J.L. (1986). *Manual para el censo de los vertebrados terrestres*. Editorial Raíces. Madrid.

TOMAŠEK, I., D.E. DAMBY, D. ANDRONICO, P.J. BAXTER, I. BOONEN, P. CLAEYS, M.S. DENISON, C.J. HORWELL, M. KERVYN, U. KUEPPERS, M.N. ROMANIAS & M. ELSKENS. (2021). Assessing the biological reactivity of organic compounds on volcanic ash: implications for human health hazard. Bulletin of Volcanology 83: 30. https://doi.org/10.1007/s00445-021-01453-4.

TORRES GONZÁLEZ, P. A. (2020). *Caracterización de la emisión gaseosa en el subsuelo de las Islas Canarias a través de las infraestructuras de captación de aguas subterráneas. Aplicación a la vigilancia volcánica.* [Tesis Doctoral] Univ. La Laguna. 229 pp.

TRUJILLO, D. (1991). *Murciélagos de las islas Canarias*. Colección Técnica del ICONA. Madrid.

TSUYUZAKI, S. (1989). Analysis of revegetation dynamics on the volcano Usu, Northern Japan, deforested by 1977-1978 eruptions. *American Journal of Botany* 76: 1468-1477.

TSUYUZAKI, S. (1994). Fate of plants from buried seeds on Volcano Usu, Japan, after the 1977-1978 eruptions. *American Journal of Botany* 81: 395-399.

TSUYUZAKI, S. & A. HASE (2005). Plant community dynamics on the Volcano Mount Koma, Northern Japan, after the 1996 eruption. *Folia Geobotanica* 40: 319-330.

WALTER, T.R., E.U. ZORN, P.J. GONZÁLEZ, E SANSOSTI, V. MUÑOZ, A.V. SHEVCHENKO, S.M. PLANK, D. REALE & N. RICHTER (2023). Late complex tensile fracturing interacts with topography at Cumbre Vieja, La Palma. *Volcanica* 6: 1–17.

WEISER, F., E. BAUMANN, A. JENTSCH, F.M. MEDINA, M. LU, M. NOGALES & C. BEIERKUHNLEIN (2022). Impact of volcanic sulfur emissions on the pine forest of La Palma, Spain. Forest 13: 299. https://doi.org/10.3390/f13020299.

WHITTAKER, R.J., T. PARTOMIHARDJO & S.H. JONES (1999). Interesting times on Krakatau: stand dynamics in the 1990´s. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 354: 1857-1867.

WHO (World Health Organization) (2009). *Hand book on indoor radon: a public health perspective*. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673 [Consulta: 23/04/2023].

WHO (World Health Organization) (2013a). *Health risks of air pollution in Europe-HRAPIE project recommendations for concentration-response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide*. World Health Organization Regional Office for Europe. World Health Organization. Geneva, Switzerland. https://apps.who.int/iris/handle/10665/153692 [Consulta: 23/04/2023].

WHO (World Health Organization) (2013b). *Review of evidence on health aspects of air pollution–REVIHAAP project*.: World Health Organization. Copenhagen, Denmark. https://apps.who.int/iris/handle/10665/153692 [Consulta: 23/04/2023].

YELOFF, D., D. MAUQUOY, K. BARBER, S. WAY, B. VAN GEEL & C.S.M. TURNEY (2007). Volcanic ash deposition and long-term vegetation change on Subantarctic Marion Island. *Artic, Antarctic and Alpine Research* 39: 500-511.

ZOBEL, D.B. & J.A. ANTOS (1992). Survival of plants buried for eight growing seasons by volcanic tephra. *Ecology* 73: 698-701.

ZOBEL, D.B. & J.A. ANTOS (1997). A decade of recovery of understory vegetation buried by volcanic tephra from Mount St. Helens. *Ecological Monograph* 67: 317-344.

4. La vigilancia volcánica: una herramienta fundamental para la reducción del riesgo volcánico en Canarias

Luca D'Auria

Geofísico, director del Área de Vigilancia Volcánica,
Instituto Volcanológico de Canarias
(INVOLCAN)

En este artículo trataremos de una de las acciones recomendadas por los organismos internacionales para reducir el riesgo volcánico: la vigilancia volcánica. Y en concreto sobre las acciones que se desarrollaron durante la erupción, también. Hay que advertir que, hoy en día la descripción de todas las posibles actividades relacionadas con la vigilancia volcánica, y en lo específico, las que se llevaron a cabo antes, durante y después, de la erupción de Tajogaite necesitarían un libro entero. Por lo tanto, nos centraremos sólo sobre algunos aspectos fundamentales.

Primero se tratarán algunos aspectos fundamentales sobre el por qué se vigila un volcán y con qué herramientas se aborda esta tarea científica en la actualidad. Luego examinaremos con más detalles las técnicas utilizadas para la vigilancia de la erupción de Tajogaite, resaltando la utilidad de la información provisionada por los sistemas de vigilancia y su relevancia para la gestión de la emergencia volcánica.

Por último, daremos una visión general sobre los desarrollos futuros de las técnicas de vigilancia volcánica y su importancia sobre la reducción del riesgo volcánico en Canarias.

Volcanes y actividad volcánica

Nuestro planeta es el único que alberga vida en el Sistema Solar. De hecho, la misma Tierra tiene una vida propria dado que su superficie se renueva continuamente por efecto de la tectónica de placas. Eso hace que los elementos químicos, fundamentales para la vida, sean reciclados volviendo a la superficie desde las partes más profundas de la Tierra y permitan a las diferentes formas de vida alimentarse y prosperar.

En este proceso los volcanes juegan un papel importante: el magma y los gases que emiten contienen elementos químicos fundamentales para la existencia de un entorno favorable para la vida. De forma sencilla podemos definir un volcán como una «*fractura de la corteza a través de la cual sale magma, bajo diferentes formas*». Esta definición incluye toda la gran variedad de volcanes que constelan la superficie de la Tierra, desde los volcanes submarinos, que generan continuamente nueva corteza a través de erupciones muy tranquilas, a los gigantescos supervolcanes, como la caldera de Yellowstone en EEUU, cuyas erupciones podrían tener consecuencias catastróficas sobre toda la humanidad.

Para todos los volcanes el motor responsable de su actividad son los gases disueltos en el magma. De hecho, el magma se compone de un líquido constituido principalmente por óxidos de silicio, hierro, magnesio, calcio, sodio y potasio, en el cual están disueltos varios tipos de gases, principalmente agua y dióxido de carbono. La liberación de estos gases, por efecto de reducción de presión o por enfriamiento del magma, es lo que permite al magma abrirse un camino en el interior de la Tierra hasta alcanzar la superficie generando erupciones.

Recordemos que los volcanes, que no manifiestan ningún tipo de actividad desde hace más de 10.000 años se clasifican como «*extinguidos*», dado que la probabilidad de que puedan dar lugar a erupciones volcánicas en el futuro es muy baja, aunque no nula. Por el contrario, los volcanes que han manifestado algún tipo de actividad durante los últimos 10.000 años se clasifican como «*activos*» y constituyen el objetivo principal de la monitorización volcánica.

¿Qué es la vigilancia volcánica y para qué sirve?

Básicamente, la vigilancia volcánica implica medir tanto parámetros físicos como químicos. Un ejemplo desde el punto de vista didáctico podemos encontrarlo en una comparación entre el trabajo de los doctores que vigilan a un enfermo y los científicos que vigilan a un volcán. Los vulcanólogos vienen a ser los doctores que vigilan a un volcán. Cuando hay una enfermedad el médico realiza analíticas de la sangre, te escucha la respiración, los latidos del corazón, etc. Y los vulcanólogos, como médicos

de los volcanes, debemos escuchar y medir diferentes parámetros, que hacemos de diferentes maneras.

La primera cuestión que merece un comentario es el por qué se vigila un volcán. El motivo principal es sin duda la de prever una posible erupción. Pero esta no es la única razón. El trabajo de todos los vulcanólogos, sismólogos, geofísicos, etc., no termina cuando comienza una erupción. Al contrario, durante la erupción tenemos que desarrollar un segundo objetivo mediante el seguimiento muy minucioso para detectar cambios en la actividad volcánica que nos permitan obtener evidencias para intentar prever cambios en la actividad eruptiva y la posible fecha de finalización de la erupción.

Y el tercero, y no menos importante, la vigilancia volcánica también es una herramienta para obtener datos de cómo funciona un volcán. El coste de la instrumentación y los recursos humanos que se necesitan para entender el funcionamiento de un volcán son bastante importantes. En el INVOLCAN, como en otras instituciones científicas, recibimos esa financiación con el fin principal de vigilar el volcán. Los datos que recogimos tienen un interés científico intrínseco porque nos permiten entender mejor como está hecho el interior del volcán y cómo funcionan los volcanes. Pero también, como es lógico, fueron utilizados para fines de protección civil. A la pregunta de que hemos aprendido con la erupción de Tajogaite se puede responder que hemos aprendido muchísimo, no sólo el INVOLCAN, sino la comunidad científica internacional.

¿Cómo se vigila a un volcán?

Los primeros intentos de vigilar un volcán con el fin de prever la ocurrencia de una erupción se llevaron al cabo ya en el siglo XIX. Desde el 1854 por Luigi Palmieri, un vulcanólogo y meteorólogo napolitano, que fue director del primer observatorio volcanológico al mundo, el Observatorio Vesubiano. Durante su actividad científica, Palmieri desarrolló un nuevo instrumento, el sismoscopio, capaz de detectar la ocurrencia de terremotos. Gracias a sus estudios se demostró por primera vez que los terremotos eran precursores de las erupciones del famoso volcán Vesubio.

Durante el siglo XX y, aún más, durante las primeras dos décadas del siglo XXI, las técnicas de vigilancia volcánica han experimentado un vertiginoso desarrollo. En la actualidad hay decenas de técnicas diferentes, y cada año la comunidad científica internacional va proponiendo técnicas novedosas. Para tener un cuadro general de las técnicas de vigilancia volcánica (Fig. 1) podemos clasificarlas en tres categorías:

• **Redes instrumentales permanentes**. En lugares específicos seleccionados se dispone un sensor, que puede ser de diferente tipo, que

realiza una medición en continuo de un determinado parámetro físico o químico. Uno de los ejemplos más intuitivos son los sensores que forman parte de las estaciones sísmicas, los sismómetros, que miden la vibración del suelo para detectar terremotos y otros fenómenos naturales. También se incluyen aquí las estaciones geodésicas que miden la variación del nivel del terreno debido a diferentes tipos de actividad volcánica y las estaciones geoquímicas que miden la cantidad y la composición química de los gases que se escapan del suelo de un volcán activo.

• **Teledetección**. Mientras que las estaciones permanentes existen desde finales del siglo XIX, por el contrario, la teledetección es algo mucho más reciente que se ha desarrollado en las últimas décadas. En las últimas decenas de años la teledetección se ha convertido en una herramienta muy importante. La teledetección, literalmente detección desde lejos, supone situar el sensor no en el lugar que se quiere medir, sino que la toma de datos se realiza desde lejos. Puede implicar distancias de apenas metros o decenas de metros, por ejemplo, mediante cámaras que miden el infrarrojo y pueden calcular la temperatura superficial del volcán. Pero más a menudo, cuando se habla de teledetección se trata de la utilización de satélites. Hoy en día hay multitud de satélites que miden numerosos parámetros que varían entre la temperatura del suelo, la composición de los gases en la atmósfera o la deformación del terreno. En el presente no sería concebible la vigilancia volcánica sin el auxilio de las mediciones satelitales.

Durante la erupción de Tajogaite las mediciones satelitales fueron una herramienta fundamental. Además, en la actualidad cada vez se utiliza más un nuevo tipo de teledetección aportada por los drones. Tajogaite ha sido la erupción en la que se ha realizado, y se sigue haciendo, un intenso uso de los drones para diferentes fines. Principalmente, han sido muy importantes para mapear las coladas durante la erupción, y ahora mismo se están utilizando para medir la temperatura y la composición de los gases que el volcán sigue emitiendo. Por cierto, el uso de drones en vulcanología ha constituido una verdadera revolución y en las próximas décadas se convertirán en una herramienta aún más importante.

• **Campañas periódicas**. Este es un trabajo que merece ser destacado por el esfuerzo que supone. Consiste en ir al campo llevándose instrumentación para medir diferentes parámetros. Las campañas periódicas son importantes porque complementan la información de las estaciones permanentes que, aunque formen parte de una red densa, aportan información sólo sobre una serie de puntos determinados. Por ejemplo, en Tenerife el INVOLCAN cuenta con 18 estaciones sísmicas, pero en ocasiones es necesario medir parámetros que requieren cientos de puntos, y esto es imposible realizarlo desde el punto de vista económico y logístico. Y la única forma de realizarlo es tirar de paciencia, de los recursos humanos, la mochila e ir al campo, y medir punto por punto.

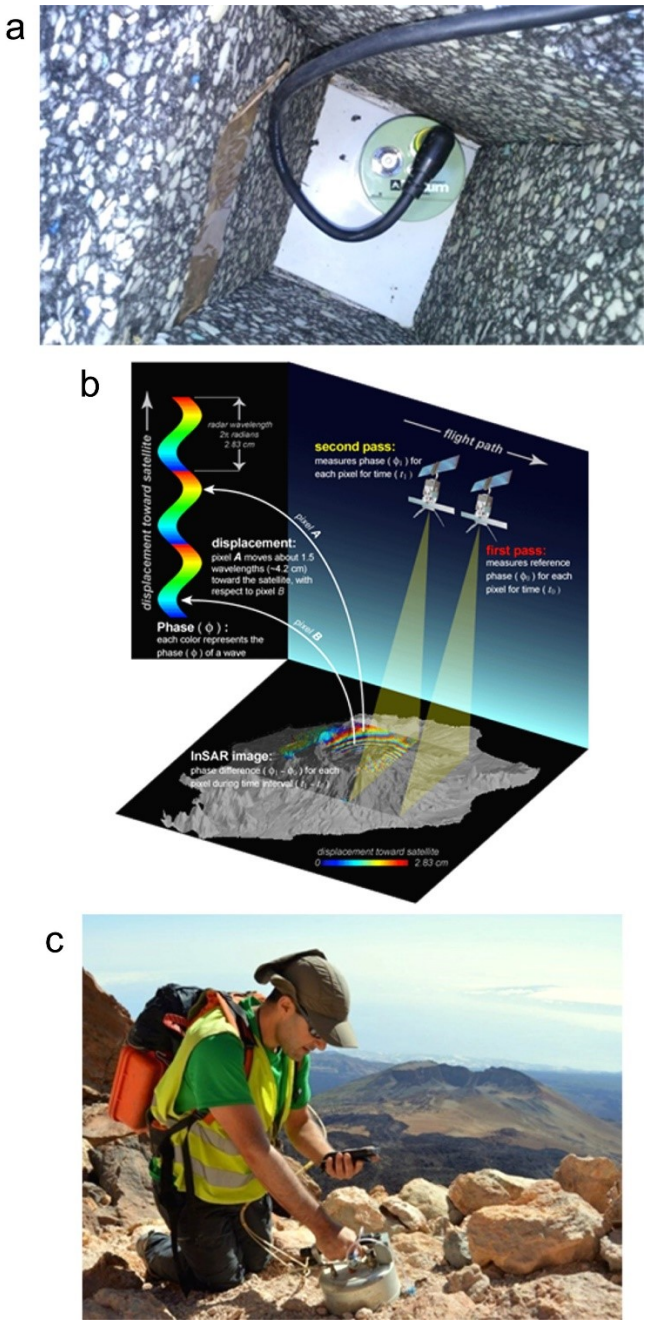


Fig. 1. Ejemplos de técnicas de vigilancia volcánica. (a) Estación sísmica permanente formante parte de la Red Sísmica Canaria (C7) operada por el INVOLCAN. (b) Representación esquemática de la técnica de interferometría satelital. (c) Científico del INVOLCAN realizando una campaña discreta para la medición del flujo difuso de dióxido de carbono en el Teide.

Estas tres categorías enumeradas anteriormente no son mutuamente excluyentes. Por lo contrario, son complementarias y su utilización conjunta forma parte de la sinergia de acciones científicas necesarias para la vigilancia volcánica.

Cabe destacar que en algunos volcanes poco conocidos o muy aislados, la teledetección es la única forma posible de vigilancia volcánica. Un caso emblemático es la reciente erupción del volcán Hunga Tonga, cuya erupción del 14 de enero de 2022, ha sido monitorizada sólo por teledetección, aun siendo una de las más poderosas del siglo XXI.

¿Qué parámetros se miden durante la vigilancia volcánica?

Como mencionamos anteriormente los parámetros que se pueden utilizar para vigilar un volcán activo son decenas y se siguen incrementando cada año. A continuación, resumimos los principales:

• **Terremotos y otros eventos sísmicos**. Los volcanes son muy ruidosos. Los terremotos pueden ocurrir sin vinculación con los volcanes, de hecho, la mayor parte de los terremotos no tienen nada que ver con los volcanes. Pero los volcanes producen diferentes tipos de señales que para nosotros son muy interesantes para entender lo que está ocurriendo en el interior de un volcán activo.

• **Deformación del terreno**. Una de las razones por la que los volcanes deforman el terreno es porque cuando el magma está empujando para llegar a la superficie, el volcán comienza a inflarse como un globo y produce una deformación de varios centímetros (no se imaginen una deformación de tipo macroscópico). Pero estas deformaciones se pueden detectar con diferentes tipos de sensores, tanto desde estaciones permanentes como también desde satélites.

• **Cantidad y composición de gases emitidos**. La cantidad y la geoquímica de los gases es una herramienta muy importante y en el INVOLCAN se cuenta con especialistas punteros a nivel mundial en la química de los gases volcánicos.

• **Química de las aguas subterráneas**. Los gases volcánicos, subiendo desde las profundidades de la Tierra, encuentran las aguas subterráneas y se disuelven parcialmente en ellas. Por lo tanto, la medición de la composición química de las aguas subterráneas es una forma indirecta para medir los gases que el volcán está emitiendo.

• **Temperatura en superficie**. Antes de la erupción la temperatura del suelo se va elevando. Eso se puede medir a través de sensores «*in situ*», es decir, sondas de temperatura, así como para sensores satelitales que pueden observar la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra.

• **Otros parámetros**. Cada año se van descubriendo otros parámetros físicos o químicos de interés para la vigilancia volcánica, a medida que el progreso tecnológico y científico lo permite. Así se van incrementando tanto los parámetros como la calidad de las mediciones que se logran realizar. Por ejemplo, hace apenas un año que instalamos en El Teide un sensor que permite medir la resistividad eléctrica del subsuelo a través de un radar, que es algo que no se había hecho nunca antes, y que ahora está dando los primeros resultados. Es decir, estamos desarrollando nuevas herramientas con las que ahora estamos experimentando, como una nueva forma de monitorizar los volcanes y por lo tanto mejorar nuestra capacidad de entender lo que ocurre en el interior de un volcán y en consecuencia mejorar nuestra capacidad de prever las erupciones volcánicas.

¿Cuándo se vigila un volcán?

Un volcán se debe vigilar siempre. Pero de una manera diferente en cada una de sus fases.

• **Fase inter-eruptiva**. Durante este periodo los volcanes se muestran tranquilos y no manifiestan ninguna anomalía. Pero durante esta fase es extremadamente importante y necesario vigilar al volcán. Nosotros vamos al médico no solo cuando tenemos alguna enfermedad, sino también para hacernos revisiones periódicas. Queremos conocer al volcán durante el periodo de tranquilidad, para conocer el estado de base de cada volcán. Por ejemplo, en Tenerife hay diariamente pequeños terremotos, y esto es considerado como normal. Sin embargo, en La Palma, antes de 2017 no había terremotos. De manera que cada volcán, como cada persona, tiene su estado de base diferente que es necesario conocer, y esto se consigue con una red de mediciones continuas. De hecho, entre los volcanes más peligrosos están los que no disponen de un sistema de vigilancia y que pueden entrar en erupción sin aviso.

• **Fase pre-eruptiva**. Es la fase en la cual se detectan anomalías que pueden indicar una mayor probabilidad de una erupción venidera. Durante esta fase el trabajo que se realiza de vigilancia principalmente pretende intentar determinar cuándo va a ocurrir la erupción. Además, en muchos volcanes, como los de Canarias, la erupción puede ocurrir en diferentes sitios, por lo tanto, una de las preguntas a las cuales la vigilancia volcánica tiene que contestar es: ¿dónde va a ocurrir? Otras informaciones que se pretende obtener a través de la vigilancia volcánica son: el tipo de actividad (explosiva o efusiva) y su magnitud (pequeña, grande). Sin embargo, esta es una tarea nada fácil y para ello se debe acudir a diferentes herramientas científicas que permiten realizar predicciones. Pero particularmente en lo relativo al tipo de erupción y a su magnitud, todavía queda mucha investigación por hacer para entender mejor el despertar de la actividad.

• **Fase sin-eruptiva**. Durante la erupción se tiene que realizar un seguimiento de la actividad eruptiva, por una parte, para dar información a las autoridades de protección civil que den soporte a las actuaciones a realizar, y por otra, conociendo el proceso, intentar prever si habrá cambios en la actividad, por ejemplo, en la dirección de las coladas de lava y, por último, para intentar prever la finalización de la erupción.

• **Fase post-eruptiva**. Cuando la erupción ha concluido, todavía no han finalizado los peligros volcánicos. Es bien conocido el problema que hay ahora mismo en La Palma, en la zona de La Bombilla y Puerto Naos, donde aún, habiendo terminado la erupción, sigue existiendo un peligro muy importante por la emisión de gases de dióxido de carbono, lo que desgraciadamente impide a la población que vive allí, el volver a sus casas. En este artículo nos detendremos principalmente en las primeras tres fases.

Hacer la previsión de una erupción no es una tarea fácil, porque los volcanes tienen comportamientos muy peculiares que pueden engañar. En la figura 2 se observan diferentes curvas que pueden representar diferentes parámetros (sismicidad, deformación del terreno, emisión de gases, etc.) y el paso más sencillo es el que finaliza en #1. Aquí el parámetro seguirá incrementando hasta que ocurra la erupción. En este caso para los vulcanólogos resulta fácil hacer una predicción, y podemos establecer una ventana que se vuelve más estrecha acercándose a la fecha de la erupción. No podemos establecer que la erupción va a ocurrir en un día y a una hora determinada. Lo que podemos aportar es un rango temporal con una probabilidad, acercándose la erupción cuando los precursores se vuelven más claros, y la probabilidad se va incrementando. Pero no siempre ocurre así. Hay muchas ocasiones en las cuales los volcanes hacen ruido y después todo vuelve a la normalidad, sin erupción como ocurre en #2. De hecho, el caso #2 representa el 80% de las situaciones. En la mayoría de los casos los volcanes dan un «falsa alarma» para luego volver a la normalidad. Por ejemplo, eso ocurrió en Tenerife en el 2004-2005 cuando, después de un incremento en la sismicidad, en la deformación del terreno y en la emisión de gases, el volcán volvió a su estado de quiescencia sin producir ninguna erupción.

Otro ejemplo, ocurrió simultáneamente con Tajogaite. Hubo un volcán italiano, Vulcano, que comenzó con terremotos y deformación, se creó una alarma, se evacuó a la población, y después no ocurrió nada, se volvió a la normalidad como si nunca hubiera pasado. En el caso #3 los precursores pueden seguir durante mucho tiempo, incluso años o hasta décadas, y después pueden desaparecer, o en el peor de los casos erupcionar de forma repentina como sucede en #4. Este último representa un caso típico de un volcán de Papúa Nueva Guinea, que comenzó a hacer mucho ruido y con deformación desde mediados de los años ochenta, de modo que la población se fue acostumbrado a los terremotos. Hasta que de repente un día hubo un

terremoto de mayor intensidad y comenzó la erupción. Este ejemplo, aclara que la tarea de realizar la previsión de una erupción no es nada fácil.

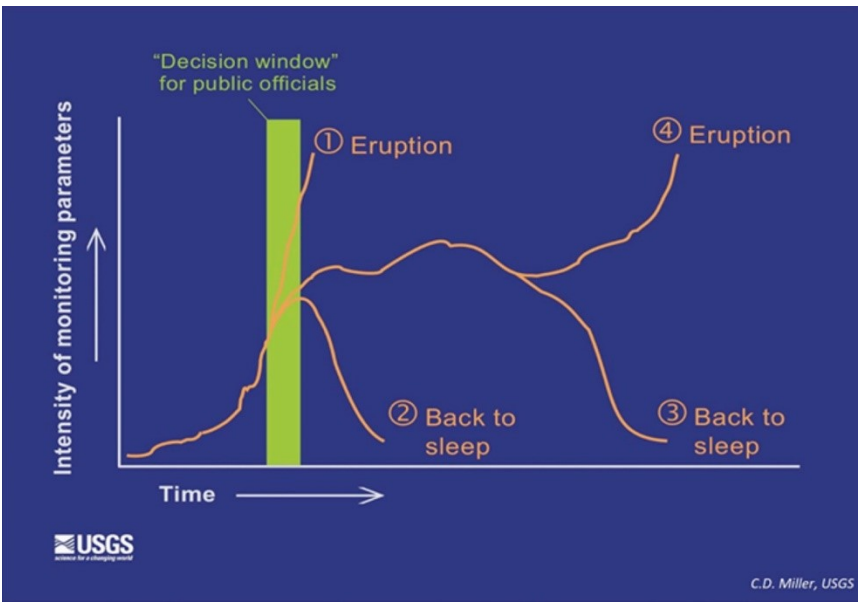


Fig. 2. La previsión de una erupción es muy compleja, y se asienta sobre el incremento en el tiempo de los valores de parámetros precursores. Se busca establecer una ventana para la toma de decisiones. Pero el comportamiento de los volcanes es variable entre la erupción y la vuelta al reposo (adaptado de USGS).

Tajogaite: una erupción de récords

Si revisamos la geología de la isla de La Palma se comprueba que se compone de dos diferentes partes, la norte, Cumbre Nueva, que es prácticamente inactiva, y la sur, Cumbre Vieja, que en realidad no es vieja sino al revés mucho más joven que la norte, y es donde se concentra toda la actividad volcánica reciente de la isla. En la figura 3 se observa la posición de todas las erupciones históricas, incluyendo la de Tajogaite. La erupción de Tajogaite en 2021 puede ser calificada como una erupción de récords, bajo diferentes puntos de vista.

Primero, la superficie cubierta por la lava ha sido totalmente inesperada en comparación con el resto de las erupciones históricas en La Palma. Con 10,5 km^2 de superficie de lavas, supera con creces a la segunda que sólo alcanzó 4,5 km^2.

La fase pre-eruptiva fue super rápida y duró sólo ocho días (D'Auria *et al*., 2022). En la erupción de El Hierro, por ejemplo, esta fase se extendió por unos dos meses y medio aproximadamente.

La emisión de lava fue durante algunos momentos de una gran intensidad. Hubieron oleadas de lava que descendían por el volcán con picos de flujo de lava superiores a 100 m^3/s, algo que es similar al flujo de agua de un río. Dichas tasas de emisión se observan comúnmente en los volcanes de Hawái, pero era algo inesperado para un volcán canario.

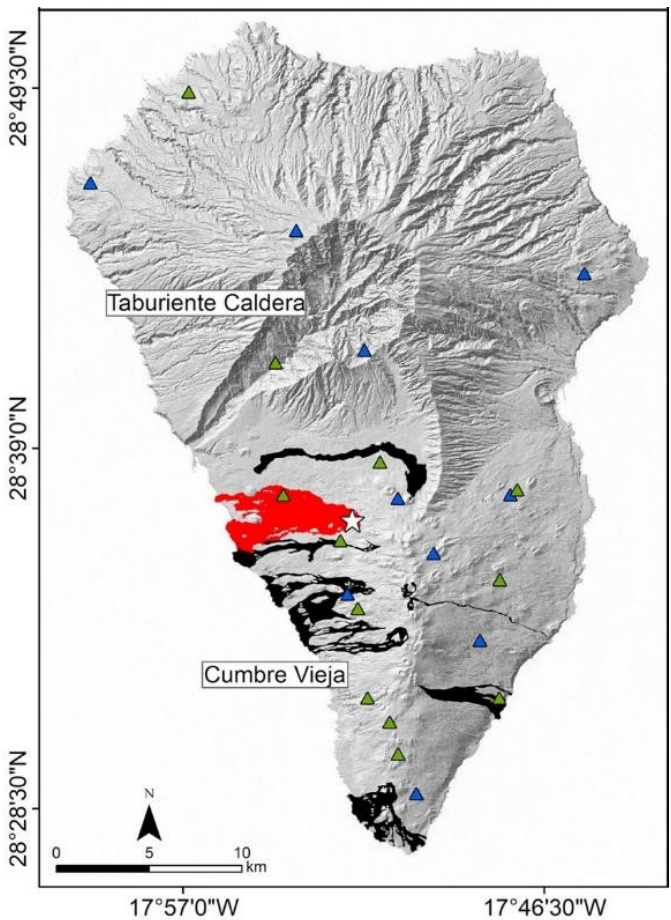


Fig. 3. Mapa de la isla de La Palma mostrando las coladas de lava de las erupciones históricas (gris) y las de Tajogaite (rojo), todas localizadas en el edificio volcánico de Cumbre Vieja (adaptado de D'Auria *et al*., 2022).

A pesar de tratarse de una erupción efusiva, hay que destacar la explosividad asociada a la actividad eruptiva que ha sido considerablemente superior a lo esperado (Romero *et al*., 2022). Tajogaite ha tenido una actividad explosiva estromboliana violenta, con una cantidad de tefra (partículas emitidas por el penacho volcánico: lapilli, cenizas) que ha sido

superior a 20 millones de m^3. Eso ha permitido calificar la explosividad de esta erupción con el nivel 3. Igual que para los terremotos hay una escala, para medir la explosividad de las erupciones volcánicas: el índice de explosividad volcánica (Volcanic Explosivity Index, VEI). Análogamente a la escala de magnitud para los terremotos, cada nivel es 10 veces superior al anterior. La mayor parte de las erupciones canarias han sido clasificadas de intensidad 2, de manera que esta erupción mostró una intensidad que no es usual en Canarias. Claro, en el registro geológico de Canarias han existido también erupciones de intensidad mucho mayor.

Con respecto a la duración, ha sido la más larga de las erupciones históricas de La Palma, y también es llamativa la elevada cantidad de gases emitida por esta erupción. El primer día que compañeros de Japón y de Reino Unido nos proporcionaron la cantidad de dióxido de azufre (SO_2) emitido por el volcán, medida a través de sensores satelitales, pensamos que había un error, puesto que para nosotros la cantidad era tan grande que no tenía sentido. Posteriormente comprobamos que los datos eran correctos. La emisión de SO_2 está íntimamente relacionada con la tasa de emisión de magma, puesto que habitualmente está disuelto junto con el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O) presente en el magma. Cuando el magma sube, este gas se libera en forma de burbujas que pasan a la atmósfera. Es algo parecido a lo que ocurre al abrir una botella de agua con gas en la que el CO_2 está disuelto, y se libera bajo forma de burbujas. En resumen, la tasa de emisión de SO_2 en la atmósfera está íntimamente relacionada con la cantidad de magma que está saliendo, y es así, otra peculiaridad de esta erupción.

Por otra parte, en Tajogaite hubo en algunos momentos 4-5 bocas activas al mismo tiempo. De manera que la forma que ha ido adquiriendo el volcán a lo largo del tiempo es muy complicada (Civico *et al*., 2022). Lo más interesante es que simultáneamente cada boca mostraba una actividad diferente, unas con actividad efusiva, otras explosiva, o emitiendo sólo gas. De manera que desde este punto de vista ha sido una erupción muy compleja y por lo tanto muy interesante desde el punto de vista científico.

Las coladas de lava formaron tres deltas lávicos. Aunque los periódicos utilizaban el término fajana, hemos establecido que delta lávico es lo correcto, puesto que en Canarias la fajana tiene otro sentido. La isla baja sin embargo si se puede utilizar en el mismo sentido que delta lávico.

Por último, vinculados a la erupción (a partir de 2017) ha sido detectado un número enorme de terremotos que casi alcanza los 250 mil, la mayor parte de los cuales ocurrieron durante la erupción. El 13 septiembre de 2021, por ejemplo, hemos detectado más de 16 mil terremotos sólo en un día. Se informan como detectados, porque muchos tienen una intensidad tan reducida que no es posible localizarlos. Pero con los sistemas automáticos que hemos desarrollado ha sido posible detectar esos casi 250 mil. De manera que el análisis de todos los datos medidos durante estas fases llevará años, y

ya tenemos resultados muy interesantes. Hubo terremotos bastante fuertes de magnitud superior a 4 (4,2-4,3). Fueron violentos y algunos de esos 17 terremotos con magnitud superior a 4 incluso se sintieron en Tenerife, en El Hierro y La Gomera. Pero ninguno fue suficientemente grande como para causar daños, salvo el terremoto precursor de la erupción que provocó daños en algunas casas próximas, las cuales posteriormente serían sepultadas por las coladas.

El INVOLCAN durante la erupción

Durante el proceso eruptivo el INVOLCAN intentó cubrir todo el espectro de actividades de vigilancia volcánica gracias a recursos propios y a colaboraciones nacionales e internacionales. Por ejemplo, para la geofísica y la geoquímica de los gases, el INVOLCAN cuenta con recursos técnicos y humanos suficientes, y contamos con una gran ayuda invitando a expertos internacionales en vulcanología (Fig. 4). Más de 170 investigadores de todo el mundo nos ayudaron tanto en el campo para tomar medidas, como posteriormente para interpretarlas. Entre las erupciones, la de Tajogaite ha sido reconocida a nivel internacional como la erupción en la que ha habido la más amplia colaboración internacional (D'Auria *et al*., 2022b). Ha sido una gran ocasión de crecimiento científico, no sólo para los vulcanólogos canarios y españoles, sino para vulcanólogos de todo el mundo.

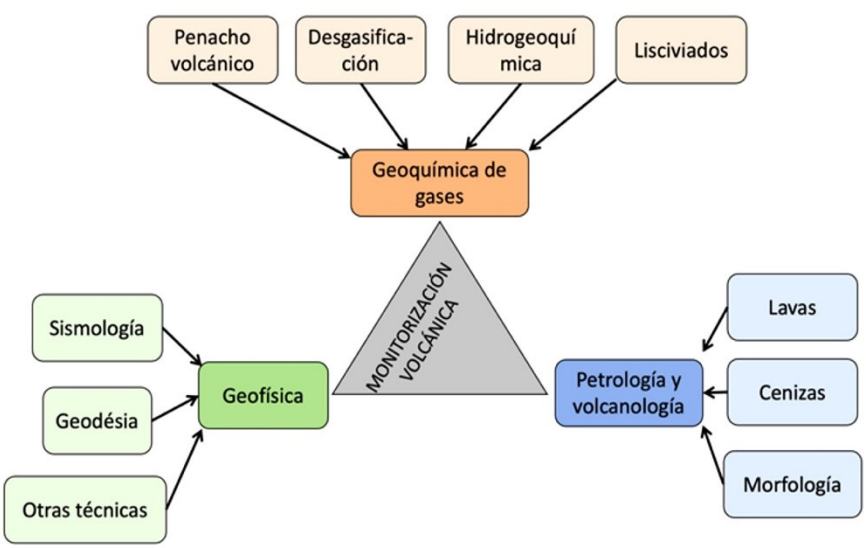


Fig. 4. Durante el proceso eruptivo, el INVOLCAN intentó cubrir todo el espectro de actividades de vigilancia volcánica gracias a los recursos propios y a las numerosas colaboraciones nacionales e internacionales.

Los terremotos.

Los terremotos se miden mediante estaciones sísmicas que se disponen en el suelo, en una red sísmica que emite datos en tiempo real (Fig. 5).

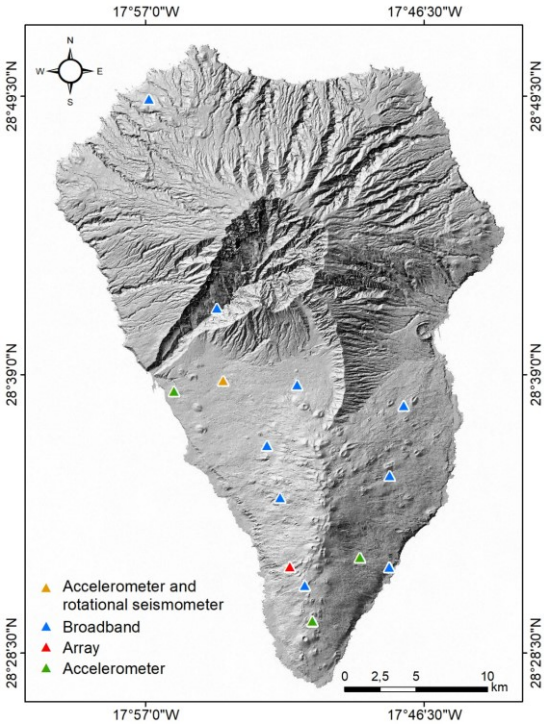


Fig. 5. Mapa de la Red Sísmica Canaria, operada por el INVOLCAN, operativa en La Palma durante la erupción de Tajogaite.

Durante la erupción de Tajogaite, por primera vez en el mundo el INVOLCAN ha utilizado en tiempo real un sistema muy novedoso para monitorizar la sismicidad generada por el volcán que se denomina «Sensores Acústicos Distribuidos». Esta tecnología se emplea en sismología desde hace unos 15 años, pero esta fue la primera erupción en la que se usó esta herramienta en tiempo real para la vigilancia volcánica. Es un sistema que utiliza las fibras ópticas que se emplean en telecomunicaciones como si fueran sensores de una red sísmica. Poniendo en la extremidad de este cable un sistema que envía poderosos pulsos de luz laser se pueden registrar las señales reflejadas por las pequeñas impuridades presentes en el cable. Repitiendo muchas veces al segundo esta medida es posible utilizar el cable de fibra óptica como si fuera una red sísmica compuesta por miles de sensores sísmicos. En este sentido utilizamos un cable de comunicación que conecta La Palma con Tenerife gestionado por Canalink que es una empresa del grupo

ITER. En la figura 6 se observa el mapa del cable utilizado y la representación de la llegada de las ondas sísmicas de dos terremotos localizados a diferentes profundidades. Esta ha sido una herramienta muy importante y novedosa desde el punto de vista científico. Hemos establecido convenios de colaboración científica con numerosas instituciones para analizar la gran cantidad y calidad de datos que hemos recogido durante esta erupción, que constan en la actualidad de más de 100 Tb de datos brutos.

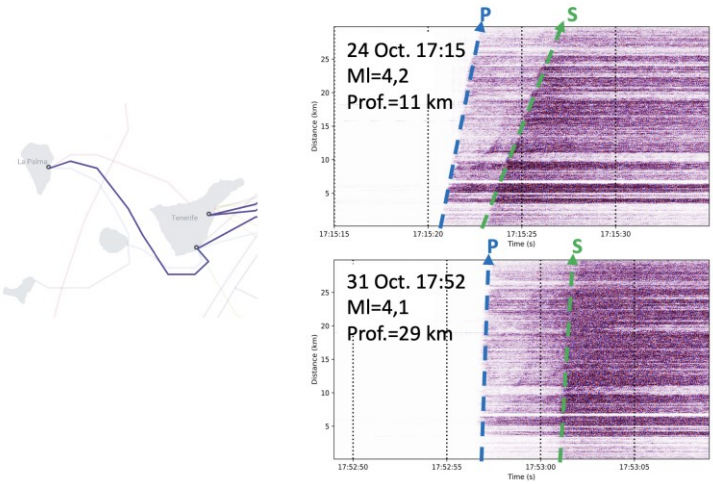


Fig. 6. Sensores Acústicos Distribuidos. A la izquierda se representa el mapa con la posición del cable. A la derecha se representan dos ejemplos de registros de los terremotos ocurridos el 24 y 31 octubre de 2021 a diferentes profundidades.

Después de 46 años de silencio, los terremotos volvieron a ser registrados en La Palma en el octubre de 2017. En el octubre de 2017 ocurrió el primer enjambre sísmico que hizo que saltaran las alarmas, puesto que era algo anómalo. Este primer enjambre fue localizado entre 10 y 20 km de profundidad, y fue un indicio de que algo estaba ocurriendo por debajo de la isla. Después hubo otro enjambre en febrero de 2018, y otros en 2020 y 2021 (D'Auria *et al*., 2022). Se trataba de terremotos muy pequeños de magnitud ligeramente superior a 1, y que se pudieron detectar gracias a la instrumentación muy sensible que tenemos en la isla. En ningún caso fueron sentidos por la población de la isla, pero ya nos indicaban que algo se estaba cocinando por debajo del volcán. Debido a su profundidad, no indicaban una erupción inminente. Pero estos terremotos no fueron los únicos precursores de la erupción.

Precursores geoquímicos.

En la fuente de Dos Aguas situada dentro de la Caldera de Taburiente, fuera de la zona activa Cumbre Vieja, hay un burbujeo de dióxido de carbono (Fig.

7). En este sitio el INVOLCAN lleva decenas de años monitorizando esta emisión de gas (Padrón *et al*., 2022), y estudiando la variación de un parámetro muy específico y muy importante como es la ratio entre helio-3 y helio-4. El helio es un gas noble que existe en el interior de la Tierra, que se presenta bajo la forma de dos isótopos. Uno es el helio-4 que se genera por decaimiento radioactivo de uranio y torio que normalmente se encuentran en el la corteza de la Tierra y que por lo tanto da una producción continua de helio-4 que escapa hacia la superficie. El helio, siendo un gas noble no interactúa con otros elementos químicos. Por otro lado, el helio-3 tiene una procedencia primariamente cosmogénica, es decir procede del Big Bang cuando se originó el universo. El helio-3 se escapa del interior de la Tierra, desde una zona muy profunda, el manto interior.

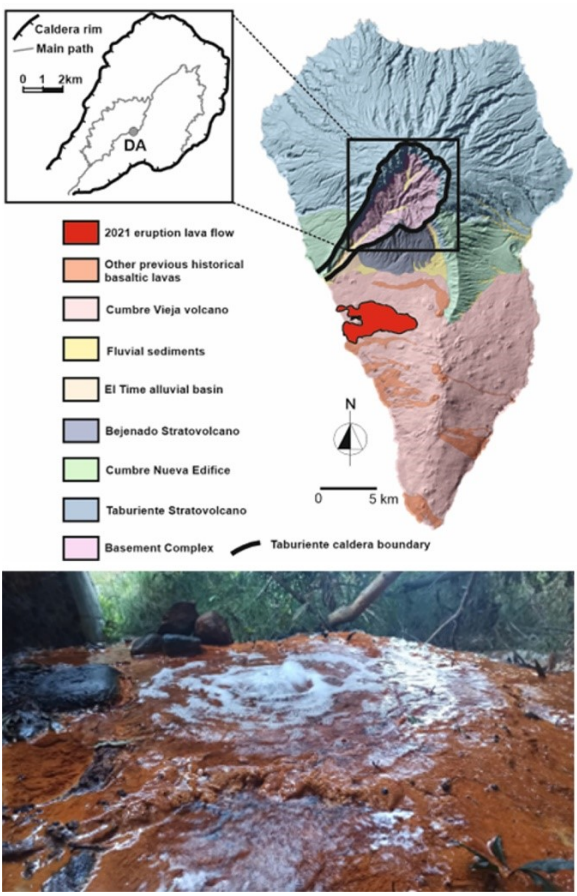


Fig. 7. Fuente de Dos Aguas en La Palma. Arriba: Mapa geológico simplificado de la isla de La Palma y ubicación del manantial de Dos Aguas (DA) en la Caldera de Taburiente. Abajo: Aspecto del manantial frío y burbujeante de Dos Aguas, rico en CO_2 (modificado de Padrón *et al*., 2022).

De manera que si hay un incremento del helio-3 con respecto al helio-4, es indicativo de que algo está subiendo desde la profundidad. Por esto es un indicador muy potente que nos muestra que algo está ocurriendo en la profundidad del volcán. En la figura 8 se muestra un gráfico con los datos de esta ratio para Dos Aguas, que se inicia por los años noventa y muestra un primer pico hacia 2013, otros en 2020, principalmente el de agosto (Rizzo *et al*., 2022; Padrón *et al*., 2022). Esta observación indicaba, de forma independiente de los terremotos, el movimiento de magma por debajo del volcán.

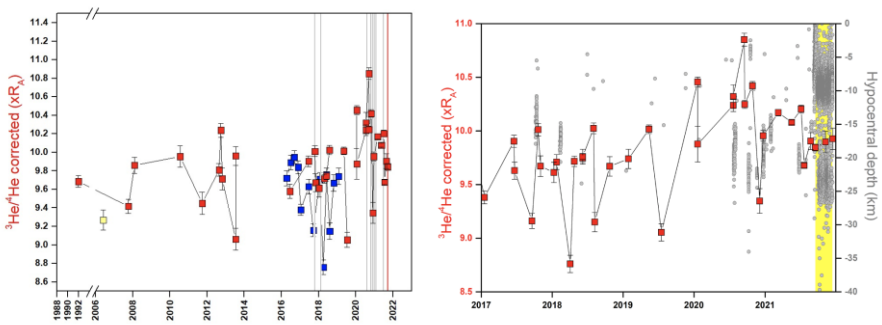


Fig. 8. Evolución temporal de los cambios observados en la relación $^3He/^4He$ en el manantial de Dos Aguas (cuadrados rojos y azules). A la izquierda, se muestra toda la serie temporal a partir del 1992. A la derecha, se muestra un detalle a partir desde el 2017, juntos con la profundidad de los hipocentros de la actividad sísmica (círculos grises). El área amarilla representa el período eruptivo (adaptado de Padrón *et al*., 2022).

Otro precursor importante fue la ratio entre el helio y el dióxido de carbono. Después del primer enjambre de 2017 hubo una emisión con un pico increíblemente elevado de helio en comparación con el dióxido de carbono. Detrás de este enjambre hubo un debate en la comunidad científica para explicar su origen (tectónico o volcánico), y este pico de helio dejó clarísimo que se trataba de un fenómeno de origen volcánico. Más adelante se registraría otro pico durante la erupción (Fig. 9).

La semana previa a la erupción (fase pre-eruptiva)

En los años posteriores a 2017 se siguieron registrando enjambres sísmicos, siempre a profundidades entre 10 y 20 km (Figs 10 y 11). Se trataba de una alarma, pero nada preocupante puesto que el magma todavía se quedaba en profundidad. Nosotros los científicos esperábamos que antes de la erupción se comenzara a observar un ascenso progresivo de estos terremotos hacia la superficie, hasta acercarse a profundidades de pocos kilómetros. Pero, desafortunadamente no fue así.

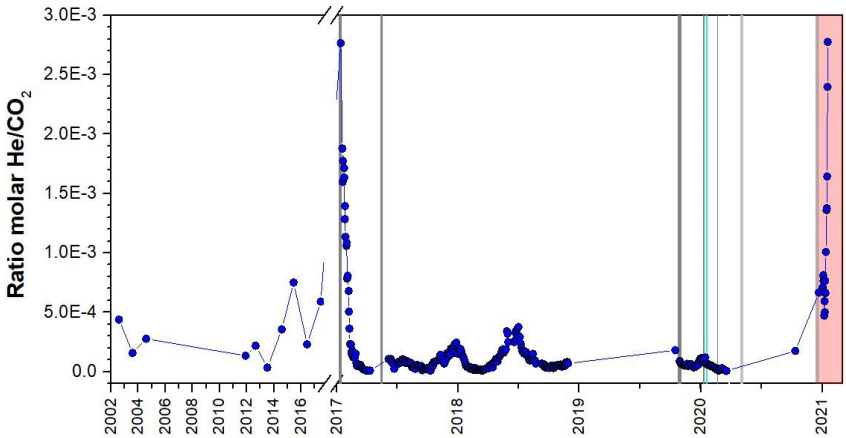


Fig. 9. La ratio entre helio (He) y dióxido de carbono (CO_2) mostró un significativo pico después del enjambre sísmico de 2017. Durante la erupción se registró otro importante pico.

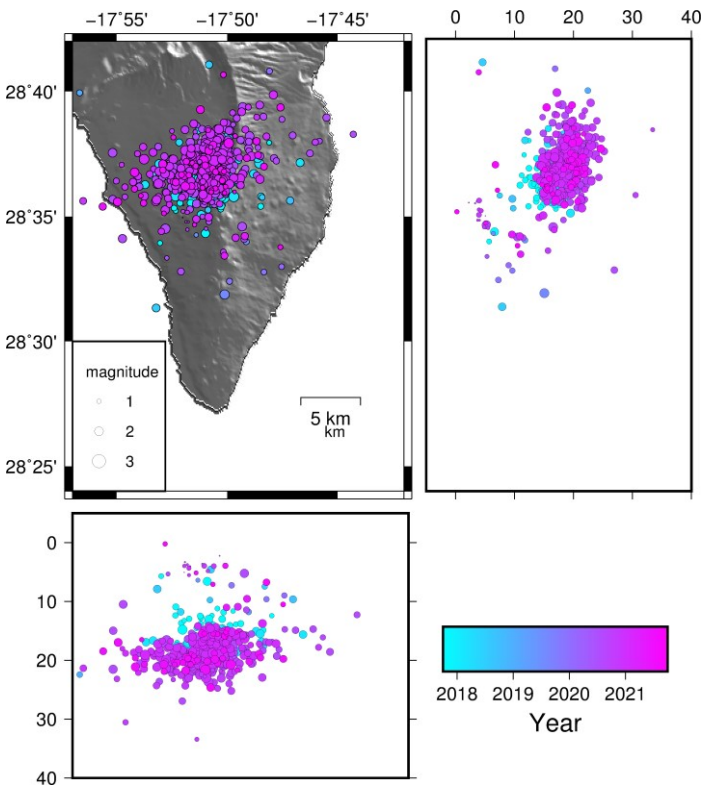


Fig. 10. Localización de los epicentros de los terremotos localizados en La Palma a partir de 2017 hasta el 11 de septiembre de 2021.

De forma repentina, el sábado 11 de septiembre de 2021 nos encontramos con terremotos a 8 km de profundidad (Fig. 11). Comenzamos a preocuparnos, porque este salto de casi 10 km, sin ninguna otra señal, indicaba que el magma se estaba acercando a la superficie. Luego entendimos que no se trató de ningún salto, sino que lo terremotos previos indicaban una recarga de un gran reservorio magmático localizado justo por debajo de la corteza de La Palma.

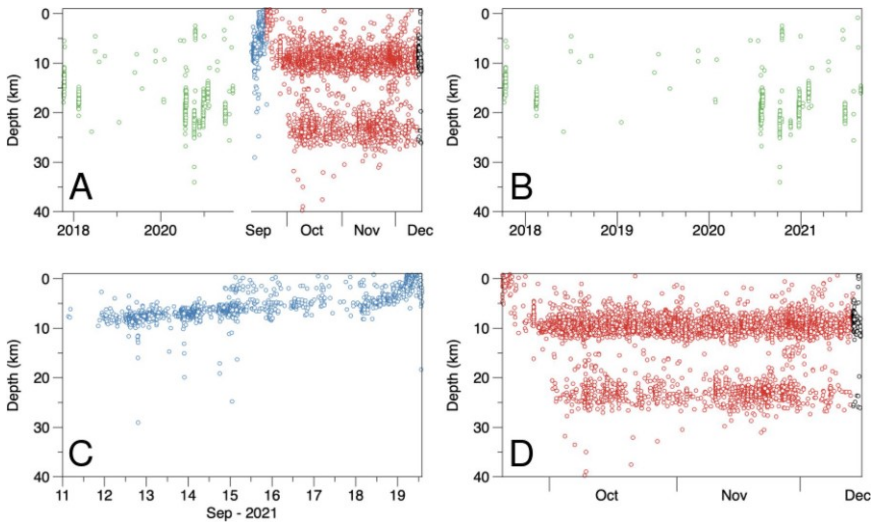


Fig. 11. Distribución temporal y en profundidad de la sismicidad separada en cuatro períodos: (a) Desde inicio en 2017 a final de erupción en diciembre 2021, ampliado más abajo. (b) Ampliación del periodo precursor, de 2017 a agosto de 2021 (verde). (c) Ampliación periodo pre-eruptivo, semana anterior al inicio de la erupción (azul). (d). Ampliación periodo sin-eruptivo (rojo), en negro la sismicidad después del cese de la actividad volcánica (D'Auria *et al*., 2022).

El lunes 13 de septiembre se reunió el PEVOLCA porque la situación ya comenzaba a ser preocupante, debido a la cantidad de terremotos sentidos por las poblaciones de La Palma durante la tarde y la noche. Durante estos días llegamos a detectar hasta casi cuatrocientos terremotos en una hora y a localizar casi treinta, muchos de ellos sentidos por la población. Había cierta incertidumbre, y cuando los periodistas comenzaron a preguntarnos si habría o no erupción, lo único que podíamos responder es que la probabilidad de que la hubiera cada vez era más alta. Así como comentamos anteriormente, en la mayoría de los casos (80 %) los volcanes manifiestan inquietud para luego volver a la normalidad.

A lo largo de la semana los terremotos comenzaron a desplazarse hacia el oeste y la migración de terremotos es una indicación clara de que hay una migración de magma (Fig. 12).

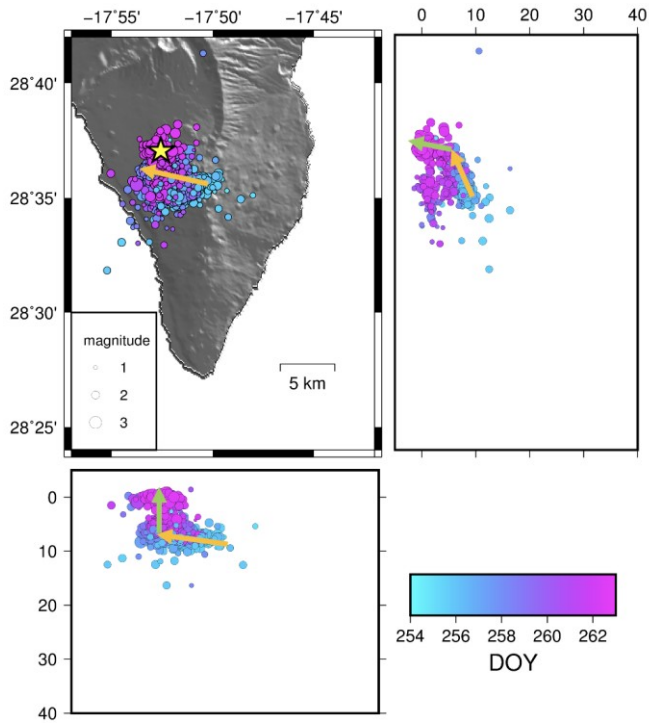


Fig. 12. Localización de los hipocentros de los terremotos registrados en La Palma durante la semana previa al inicio de la erupción. La flecha naranja indica la migración de los hipocentros hacia el oeste entre el 12 y el 18 de septiembre. La flecha verde indica la migración hacia arriba de los hipocentros que se observó pocas horas antes de la erupción que ocurrió el 19 de septiembre.

El magma estaba comenzando a desplazarse, moviéndose ligeramente hacia arriba. Fue algo que nos confundió en un principio, porque parecía que el ascenso del magma fuese lento. Y de hecho así fue hasta el sábado, puesto que el domingo el comportamiento cambió repentinamente y los terremotos comenzaron a desplazarse hacia la superficie de forma muy rápida. Y como es bien conocido la erupción comenzó el domingo por la tarde, justo pocas horas después de que la sismicidad alcanzara la superficie. Entre el primer terremoto localizado en superficie y el nacimiento del volcán, transcurrieron aproximadamente tres horas.

En los días anteriores a la erupción ya se había delimitado aproximadamente la zona en la cual la erupción podía tener lugar. La previsión que hicimos no fue mala, puesto que establecimos un radio de 2 km y el volcán surgió dentro de ese círculo. De manera que la previsión en ese sentido fue bastante exacta. En la gráfica de la profundidad de los terremotos (Fig. 11c) que se inicia a unos 8 km de profundidad y hasta el sábado hay un

ascenso claro pero muy lento. A partir del sábado comenzó a ascender y parece que el volcán tomó la decisión de erupcionar el domingo por la mañana. El domingo, después de un parón de unas horas, los terremotos subieron los últimos kilómetros en pocas horas. De manera que, a los científicos, así como, a las autoridades de protección civil, sorprendió la forma brusca en la que se originó la erupción.

El comienzo de la erupción (fase sin-eruptiva)

El comienzo de la erupción fue filmado por periodistas e investigadores del INVOLCAN que estaban tomando muestras de gases en la zona y se encontraron de repente con el penacho volcánico ascendiendo en la atmósfera. La erupción no empezó con una explosión, sino se abrió una fisura y comenzaron a salir gases, ceniza y lava de forma silenciosa. Desde el punto en el que se inició la erupción se formó una fractura de alrededor de unos 600 metros a lo largo de la cual comenzaron a abrirse diferentes bocas (Fig. 13). Esto es muy típico, es lo normal, en este tipo de erupciones. Comienzan así la mayoría de las erupciones históricas canarias documentadas. Se inician en un punto y luego se propaga una fractura a lo largo de la cual se pueden manifestar actividades eruptivas de tipo diferente. En la fase siguiente la erupción se va concentrando en un punto más específico, alrededor del cual se empieza a formar el cono volcánico. Este fue el escenario que se produjo en el inicio de la erupción de Tajogaite (Pankhurst *et al*., 2022; Romero *et al*., 2022).

Fig. 13. Desde el punto en el que se inició la erupción (izquierda) se formó una fractura de unos 600 metros de largo en la cual comenzaron a abrirse diferentes bocas (derecha).

En una topografía digital de alta resolución del volcán realizada por los compañeros del INGV (el principal instituto de geofísica italiano) que ha colaborado con el INVOLCAN y mediante el uso de drones se pudo mapear

la topografía del edificio volcánico (Civico *et al*., 2021) en dos momentos diferentes. En el primero, el aspecto del volcán el 27 de septiembre de 2021, apenas una semana después del inicio de la erupción durante un parón de alrededor de ocho horas en la erupción (puesto que el dron no puede volar sobre el volcán en erupción debido a la presencia en el aire de ceniza volcánica). Al principio, la morfología era bastante sencilla y se parecía a muchos de los conos volcánicos históricos de Canarias, con su característica forma asimétrica. Sin embargo, finalizada la erupción la morfología muestra una complejidad mucho mayor. La altura actual del volcán de Tajogaite con sus 200 m de alto y su morfología permite claramente identificar diferentes bocas eruptivas, alineadas a lo largo de la fractura principal, orientada WNW-ESE. En la fase final de la erupción, también hubo bocas que se abrieron a un lado de forma ortogonal a la fractura principal, e incluso bocas que se abrieron hasta a 1 km de distancia y sus coladas afectaron, por ejemplo, al cementerio de Las Manchas. De manera, que la forma bastante complicada del volcán Tajogaite refleja la complejidad de esta erupción.

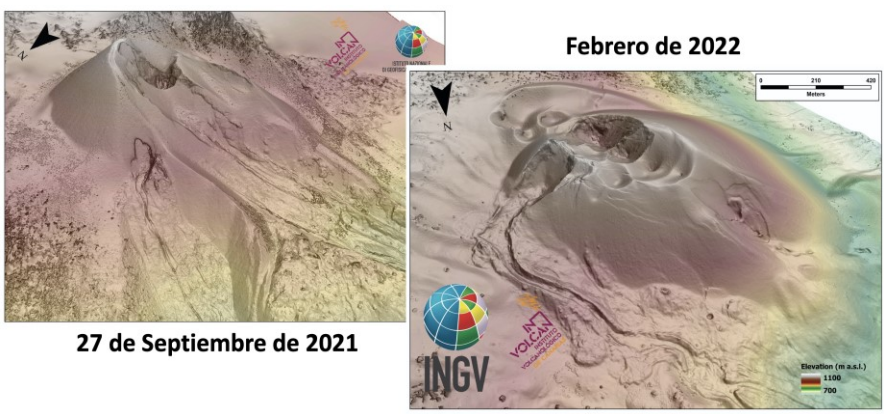


Fig. 14. Topografía digital de alta resolución del volcán Tajogaite. A izquierda, el aspecto inicial una semana después de iniciada la erupción. A derecha, la forma definitiva después de finalizada la erupción (Civico *et al*., 2022).

Durante una erupción de tipo estromboliana, se espera que la sismicidad descienda, y así fue al principio de la erupción de Tajogaite. Hubo algunos días de tranquilidad sísmica, pero a finales de septiembre comenzaron a sentirse nuevamente terremotos que incrementaron su magnitud, y algunos de ellos fueron de magnitud igual o superior a 4, y se sintieron en toda la isla, y también en La Gomera, El Hierro y Tenerife, generando preocupación. Pero a diferencia de la sismicidad de la semana anterior a la erupción, estos terremotos se quedaron siempre a la misma profundidad, en dos rangos muy específicos. Uno, alrededor de unos 10 km y otro alrededor de 25 km de

profundidad (Figs 11 y 15). Estos dos rangos son muy importantes para entender el cuadro general de la erupción, como se explicará en seguida.

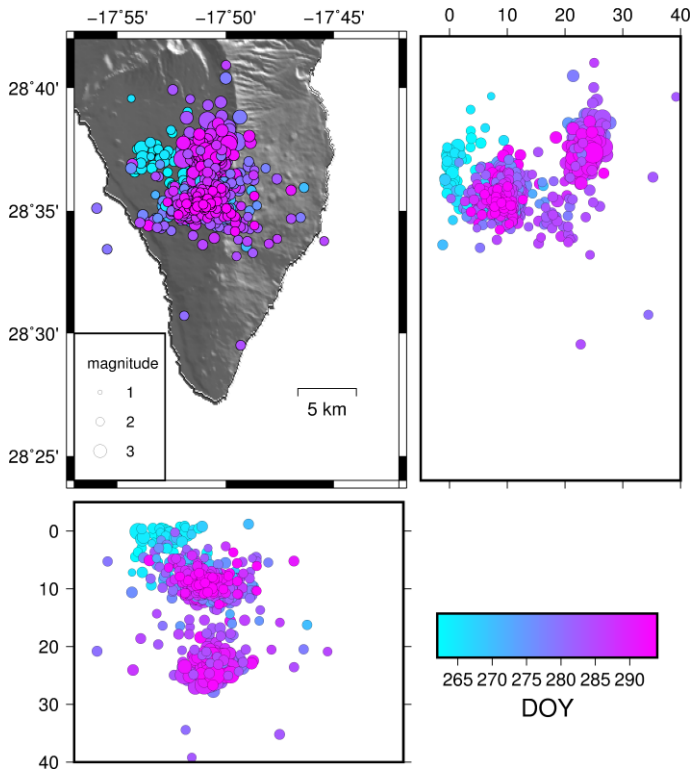


Fig. 15. Localización de los hipocentros de los terremotos registrados en La Palma durante toda la erupción.

Hasta la actualidad (noviembre 2022) se siguen registrando terremotos en La Palma, pero de magnitud muy baja, y no son percibidos por la población. La cantidad de sismos registrados durante la erupción fue tan elevada que al principio nos sorprendió. Pero ya tenemos una explicación, la sismicidad estuvo relacionada con el vaciamiento de dos reservorios magmático que alimentaron la erupción de Tajogaite. Finalizada la erupción, la sismicidad descendió de forma repentina y la sismicidad que ahora detectamos se localiza justo dentro del volcán, en el interior del edificio volcánico, y muy probablemente está relacionada con el enfriamiento del volcán. Hay zonas en las que todavía hay incandescencias con temperaturas que superan los 500º C. En muchos puntos de la superficie del volcán todavía se alcanzan los 200º C. El interior del volcán todavía sigue muy caliente y se irá enfriando a lo largo de decenas de años. Incluso, en los últimos meses se

han abierto grietas en la superficie del edificio volcánico como consecuencia del proceso de enfriamiento y contracción térmica de las rocas volcánicas. Todo ello es normal, en un proceso post-eruptivo.

Tomografía sísmica.
La sismicidad de La Palma nos brindó la oportunidad de estudiar la estructura interior del volcán. Lo hicimos a través de una técnica conocida como tomografía sísmica. Del mismo modo que con la tomografía médica empleamos los rayos X para analizar el interior del paciente, en nuestro caso lo que utilizamos son las ondas sísmicas para analizar el interior del volcán. Las ondas sísmicas detectaron una zona de anomalías, con velocidades mucho menores de lo normal, que identificamos con la cámara magmática que alimentó a la erupción (D'Auria *et al*., 2022) (Figs 16 y 17).

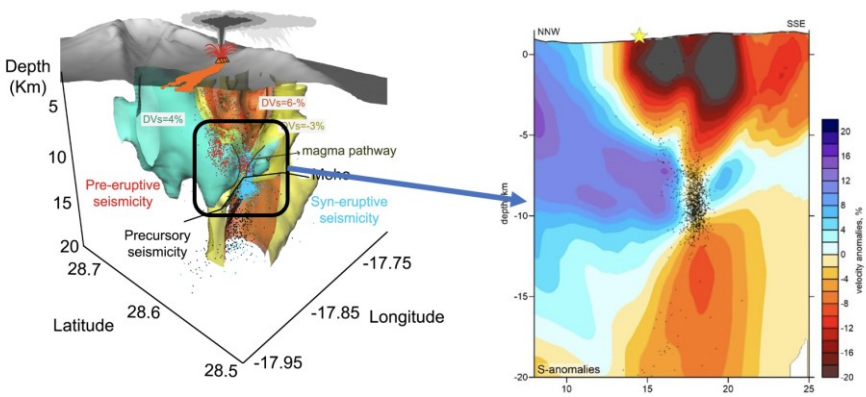


Fig. 16. Tomografía sísmica de La Palma desde 2017 hasta octubre 2021. La imagen tridimensional a la izquierda representa las principales estructuras basadas en anomalías de velocidad de las ondas sísmicas. Amarillo y naranja (cuerpos con menor velocidad) y verde (cuerpos con mayor velocidad). A la derecha se muestra un detalle en la zona donde el magma escapa de la cámara magmática para llegar en superficie. Los puntos negros la sismicidad pre-eruptiva (adaptado de D'Auria *et al*., 2022).

Se observa en las imágenes (Fig. 17) que los terremotos conectan la cámara magmática con la superficie, y ese es justo el camino que siguió el magma para inyectarse desde esa cámara (entre 10 y 15 km de profundidad) hacia la superficie. Desde los primeros datos, obtenidos a mediados de octubre de 2021, nos sorprendió, por inesperado, encontrar una cámara magmática tan grande por debajo de La Palma. Ahora está totalmente confirmada. Es algo que ha cambiado radicalmente nuestro punto de vista sobre la estructura de las islas Canarias. Hasta ahora se creía que por debajo de las islas se iban formando pequeñas cámaras magmáticas justo antes de la

erupción, y que se iban vaciando casi por completo con la erupción. Pero resulta que no es así. Esta cámara es la que ha alimentado a las erupciones anteriores, y es la que alimentará las erupciones futuras. Este hallazgo es muy importante porque nos ayudará a entender mejor los precursores de una futura erupción en La Palma. Ahora sabemos mejor cómo funciona el volcán Cumbre Vieja que, aunque siendo geológicamente «joven» ya posee una remarcable complejidad.

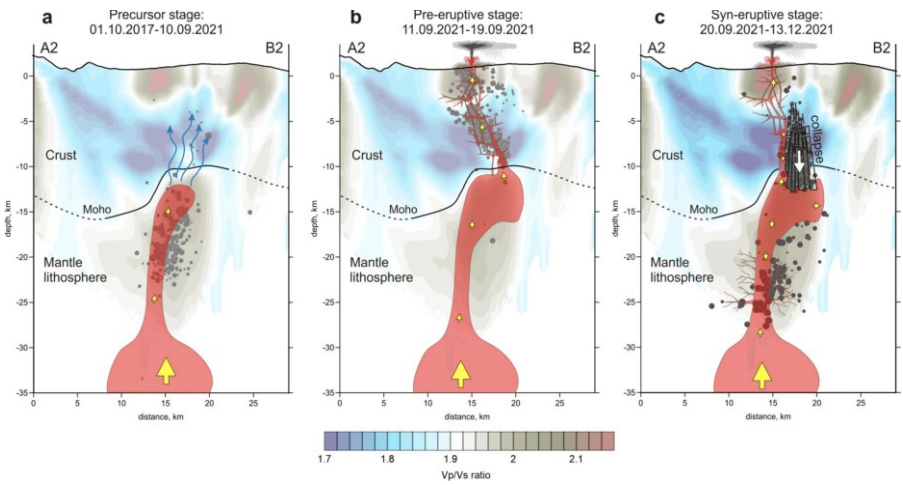


Fig. 17. Modelo esquemático del proceso eruptivo que precede y acompaña a la erupción de Tajogaite. a) Etapa pre-eruptiva. b) Etapa precursora. c) Etapa sin-eruptiva (adaptado de D'Auria *et al*., 2022).

El tremor volcánico

Además de los terremotos, también registramos una vibración continua del suelo, denominada tremor volcánico, que se inició justo con la erupción (Fig. 18). Es un valor relacionado con la actividad explosiva, de modo que es un parámetro que nos ayuda a cuantificar la intensidad de la misma.

Esta erupción, que fue muy peculiar en su comienzo, también lo fue en su finalización. En las erupciones de tipo estromboliano, generalmente se observa un decrecimiento gradual de la intensidad hasta que la erupción finaliza. Para la erupción del Tajogaite no fue así. Al revés, lo que se observó fue que, en las últimas horas de su vida, este volcán tuvo un comportamiento inesperado con una columna eruptiva que alcanzó hasta unos 8 km de altura, debido a una actividad explosiva muy intensa, y así de repente terminó. Fue algo que sorprendió a la comunidad científica. Así, por ejemplo, el tremor volcánico alcanzó uno de sus picos una hora antes de la finalización, y luego desapareció de forma repentina. En estos momentos llevamos a cabo varios

estudios para encontrar una explicación de este comportamiento extraño. Así como ha sido sorprendente la rapidez del inicio, lo ha sido también la rapidez del final.

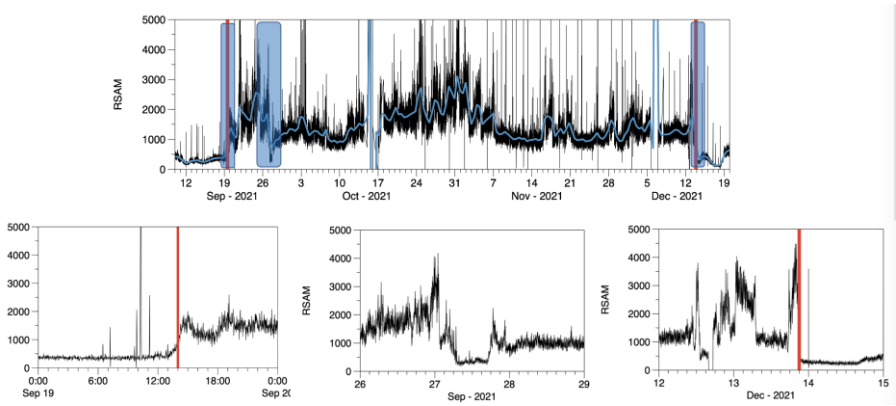


Fig. 18. Tremor volcánico durante la erupción de Tajogaite. Arriba: registro de las variaciones del tremor volcánico a lo largo de toda la erupción. En azul los periodos amplificados más abajo. Abajo a la izquierda, inicio del tremor pasado el mediodía del 19 de septiembre. Abajo al centro, descenso del tremor durante varias horas en la tarde del 27 de septiembre. Abajo a la derecha, pico de amplitud del tremor, justo antes de finalizar la erupción.

Deformación del terreno.

Así como en la mayoría de las erupciones volcánicas, en La Palma se detectó una deformación del terreno antes de la erupción. Esta deformación incrementó de forma muy rápida a lo largo de la semana anterior a la erupción y fue detectada claramente por la red se sensores GNSS (Global Navigation Satellite System, Sistema global de navegación por satélite) (Fig. 19).

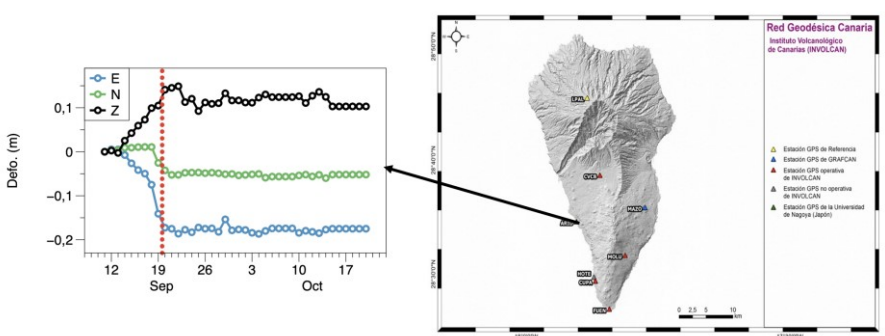


Fig. 19. Deformación del terreno detectada por la Red Geodésica Canaria operada por el INVOLCAN. A la izquierda, se muestra la deformación del terreno en la estación ARID desde el 8 de septiembre hasta el 23 de octubre.

La deformación fue detectada también a través de una técnica de monitorización, conocida como interferometría satelital. Para este fin el INVOLCAN y sus colaboradores utilizaron datos públicos del satélite Sentinel 1 perteneciente al programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea. La señal de deformación del terreno queda registrada, permitiendo la elaboración mapas y gráficas. En la figura 20 se observa como la franja roja representa la parte que se abombó por el empuje del magma.

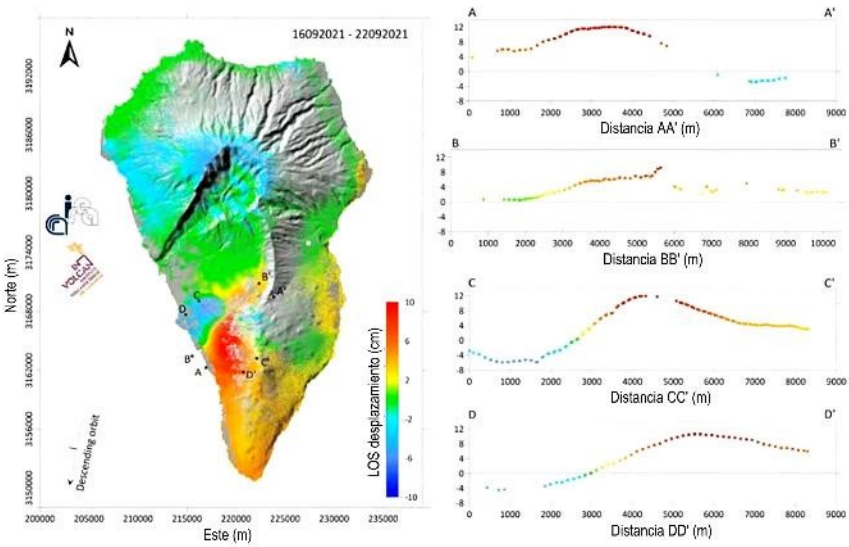


Fig. 20. La interferometría satelital permite detectar la deformación del terreno. (LOS= línea de visión: el signo positivo a desplazamientos hacia el satélite y el negativo a desplazamientos que se alejan de él).

Termografía.

La erupción se monitorizó también con cámaras térmicas que permitieron seguir el camino de las coladas lávicas. Durante la noche es fácil identificar las zona de mayor flujo lávico porque hay incandescencia y se observa claramente donde se está moviendo la lava. Sin embargo, durante el día, no es tan fácil. De día la única manera de detectar el movimiento es mediante las cámaras térmicas (Fig. 21). Una cámara térmica mide la radiación infrarroja del campo de visión, y a partir de ahí calcula la temperatura del objeto. El INVOLCAN realizó un seguimiento muy detallado de la evolución del campo de lava y de la actividad explosiva del volcán a través de esta herramienta.

También hay satélites capaces de medir la cantidad de infrarrojos emitidos por la superficie (termografía satelital). Nuestros compañeros del

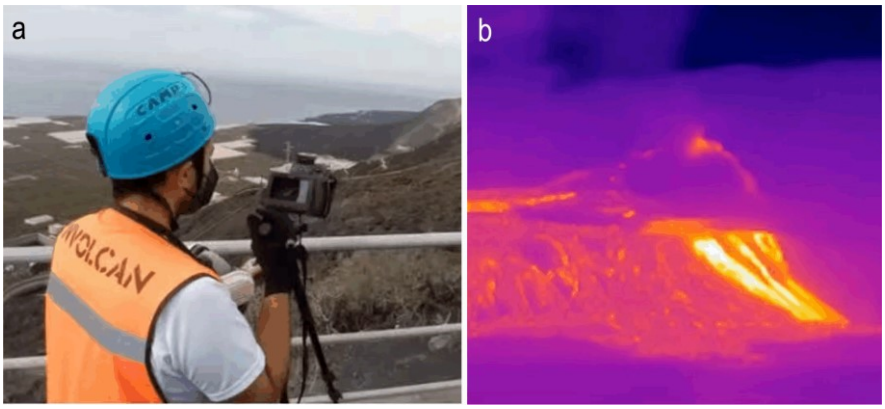


Fig. 21. Las cámaras térmicas permiten calcular la temperatura de las coladas y establecer su recorrido durante el día (a), mediante el análisis de las imágenes térmicas.

INGV (en Italia) utilizaron esta herramienta para estimar la cantidad de lava emitida cada día por el volcán (Fig. 22). De este modo se pudo precisar que al principio de la erupción la tasa de emisión de lava fue bastante alta con picos superiores a casi 350 m^3 por segundo. Esta cantidad de magma emitida recuerda a las de erupciones como el Kilauea en Hawái en las que las coladas de lava discurren muy rápidas. Las tasas de emisión efusivas del Tajogaite fueron sorprendentemente altas.

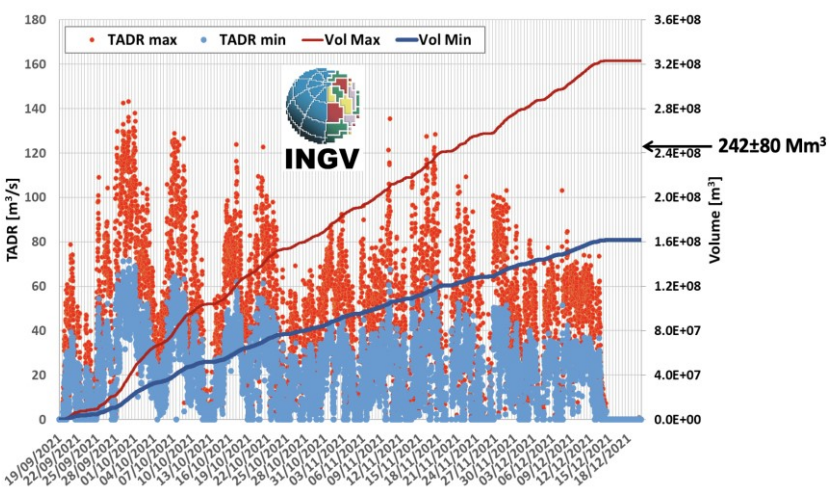


Fig. 22. Mediante la termografía satelital, los compañeros del INGV estimaron la cantidad de lava emitida cada día por el volcán. El rango final es compatible con el volumen final (242 Mm^3) estimado a través de otras metodologías.

Los satélites nos permitieron también detectar la formación de un fenómeno muy interesante, como son los túneles de lava. La comparación de dos imágenes correspondientes a días sucesivos, 3 y 4 de octubre (Fig. 23), permite seguir claramente el recorrido de la colada de lava, y como esta desaparece y vuelve a aparecer. El trazo de puntos indica la posición del túnel de lava. Esto es típico de las coladas que forman una cobertura sólida que impide la visión de la lava que discurre en su interior, pero permite que la lava tarde más tiempo en enfriarse y realice un recorrido más largo. Las lavas pueden alcanzar así distancias mayores. Inicialmente pensamos que estos túneles favorecerían que la colada de lava fuera a descargar directamente hacia el mar sin causar más problemas. Pero desafortunadamente no fue así. A mediados de octubre la lava cambió de camino y comenzó a moverse hacia el norte provocando los momentos más dramáticos de la erupción y la gran destrucción que todos conocemos.

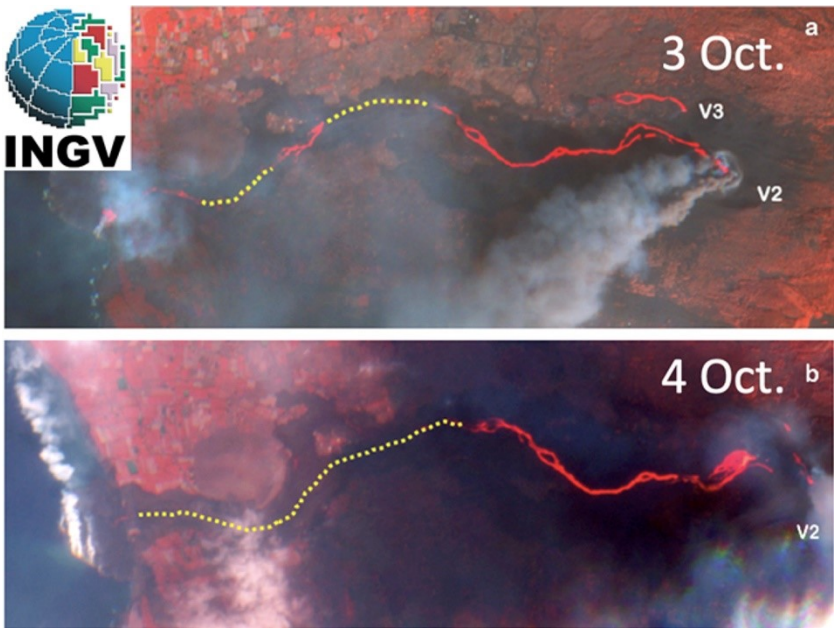


Fig. 23. La termografía satelital permite detectar las coladas y la formación de los túneles que la ocultan a la vista (INGV – INVOLCAN).

Gases.

El INVOLCAN, coordinado por Nemesio Pérez, es un centro de excelencia internacional con respecto al estudio de los gases volcánicos. Durante la erupción el volcán emite gases principalmente por el penacho volcánico (Fig. 24). El penacho no está integrado sólo por cenizas, sino también por gases constituidos principalmente agua, dióxido de carbono (CO_2) y dióxido de

azufre (SO_2). A éstos también hay que añadir cloro, bromo, y decenas de otros elementos químicos.

Además del penacho volcánico las emisiones de gases pueden presentarse también a través manifestaciones visibles como burbujeos (como vimos en Dos Aguas) o fumarolas o, más frecuentemente, a través de emisiones difusas invisibles. En Canarias las únicas fumarolas permanentes que hay son las del cráter del Teide.

Fig. 24. Tajogaite emitió gases principalmente por el penacho volcánico.

Cada volcán «respira» a través de emisiones difusas, a lo largo de toda su superficie. En numerosas ocasiones esta es la única forma que tiene el volcán de desprender los gases. Por ejemplo, en La Palma antes de la erupción la única manera de medir los gases era poniéndose la mochila y recorriendo, punto por punto, los cerca de 700 repartidos por todo el edificio de Cumbre Vieja.

La cantidad de **dióxido de azufre** emitido por el volcán durante y después de la erupción se muestra en la figura 25. El volcán emitió al principio hasta 2000 kg/s, cantidad que fue disminuyendo a lo largo de la erupción, y eso fue una señal para hacer un pronóstico sobre el final de la erupción. Terminada la erupción la emisión cayó de forma repentina, pero no ha desaparecido por completo hasta ahora. Es una emisión muy baja, del orden de 200 g/s, insignificante con respecto a la emitida al principio de la erupción (Albertos *et al*., 2022; Hayer *et al*., 2022). Todavía el volcán emite una pluma que se observa bastante bien, pero con una cantidad de gas muy baja.

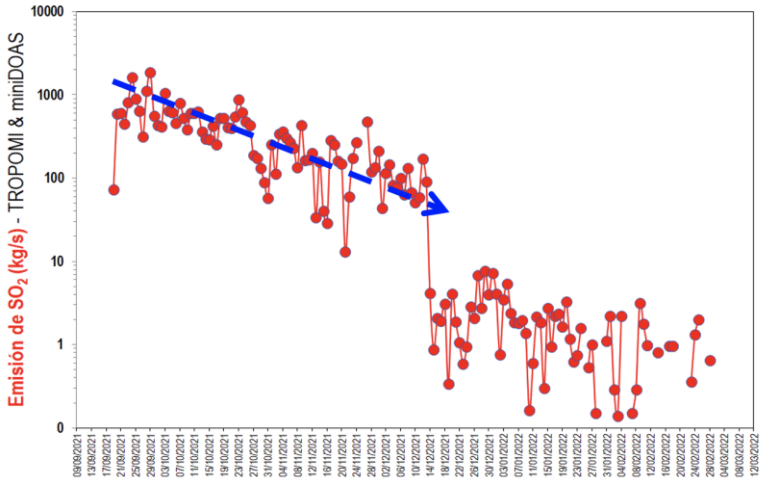


Fig. 25. Evolución temporal de la emisión de dióxido de azufre (SO_2). La emisión de SO_2 por Tajogaite fue muy elevada al principio, fue disminuyendo progresivamente, y cayó al finalizar la erupción (basado en Albertos *et al*., 2022 y Hayer *et al*., 2022).

Basándonos en el comportamiento de la emisión de SO_2, fue posible realizar un pronóstico del final de la erupción desde un punto de vista empirico, puesto que nunca antes se había hecho algo de este tipo. No se hizo público porque tenía una incertidumbre tan alta que no quisimos crear falsas expectativas a la población. Pero la verdad es que ahora podemos decir que el pronóstico fue bastante acertado. A finales de noviembre vimos una ventana entre el 2 y el 20 de diciembre con una probabilidad del 90% (Fig. 26).

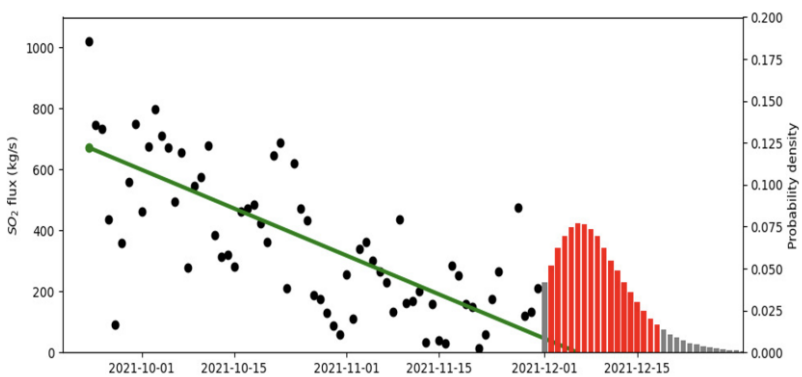


Fig. 26. La evolución temporal de la emisión de dióxido de azufre (SO_2) permitió pronosticar el final de la erupción, que no se hizo público por su alta incertidumbre. Las barras rojas indical el periódo más probable de finalización prognosticado a final de noviembre de 2021.

Por otra parte, la monitorización **geoquímica de las aguas subterráneas** permitió realizar un análisis indirecto de los gases (Amonte *et al*., 2022). Cuando el volcán comenzó a emitir gases durante la erupción, parte de esos gases se disolvieron en las aguas subterráneas. El estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de dos galerías y un pozo próximos al volcán ha permitido comprender mejor el impacto del aporte de fluidos magmáticos en el sistema volcánico antes y durante la erupción de Tajogaite. Afectaron el pH, la alcalinidad total y las concentraciones de aniones (F-, Cl-, Br- y SO_4^{2-}) (Fig. 27). Es importante monitorear la composición química e isotópica de las aguas subterráneas, ya que son sensibles a los cambios en la actividad volcánica y a menudo permiten dar una alerta temprana de cambios en un sistema volcánico, posiblemente relacionados con una venidera erupción.

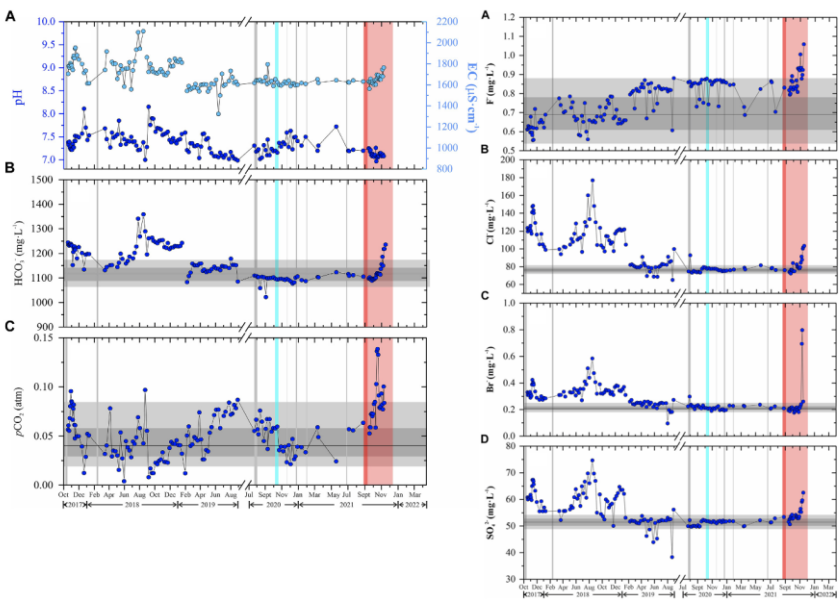


Fig. 27. A izquierda, se muestra la evolución temporal del pH, del carbonato y del CO_2 disuelto. A derecha, se muestra la evolución temporal de los contenidos de fluoruro (F^-) (A), cloruro (Cl^-) (B), bromuro (Br^-) (C) y sulfato (SO_4^{2-}) (D) de las aguas subterráneas. Los enjambres sísmicos se representan como líneas grises verticales; la sismicidad preeruptiva como una banda roja; y el período eruptivo por una banda roja clara (según Amonte *et al*., 2022).

La **emisión difusa de dióxido de carbono** (CO_2) ha sido monitorizada de forma continua a través de estaciones permanentes, así como a través de campañas discretas (Padrón *et al*., 2015). Cada 15-30 minutos, las estaciones permanentes miden los gases que se emiten en un punto fijo. Con los datos registrados en la estación de Fuencaliente (Fig. 28), se observa la existencia

de variaciones estacionales. Al mismo tiempo destaca que a partir de 2019 durante el invierno no se recuperan los valores bajos, los de base, detectando una clara tendencia ascendente (Rodríguez-Pérez *et al*., 2022; Santana de León *et al*., 2022).

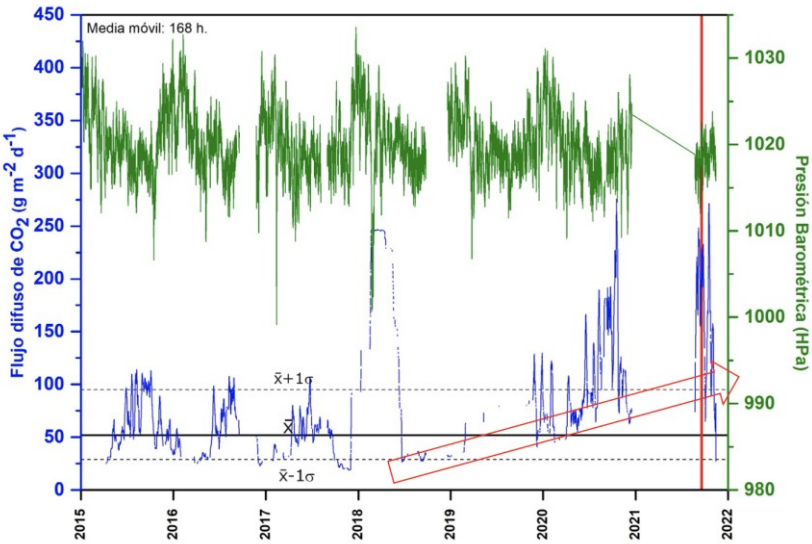


Fig. 28. Emisión difusa de dióxido de carbono (CO_2) en Fuencaliente. Hay una clara tendencia ascendente a partir de 2019 (basado en Rodríguez-Pérez *et al*., 2022).

Esta es una señal más de que en los años anteriores el volcán ya estaba cocinando algo. También con los registros de la **emisión difusa de radón**, un gas radioactivo (^{222}Rn) se observó una tendencia ascendente a partir de febrero de 2021 hasta el momento de la erupción y después, claramente descendente (Di Nardo *et al*., 2022). De ahí su interés como indicador relacionado con la actividad volcánica (Fig. 29).

La emisión difusa de CO_2, monitorizada en campañas discretas con datos procedentes de una amplia red de unos 700 puntos repartidos por todo el edificio de Cumbre Vieja, se fue incrementado y alcanzó un máximo al final de la erupción (Fig. 30). Finalizada la erupción, la emisión difusa de CO_2 ha vuelto a la normalidad, excepto en dos pequeñas zonas (La Bombilla y Puerto Naos) en las que desgraciadamente la emisión sigue siendo increíblemente alta. Cuando comentamos lo que ocurre en estas dos zonas con expertos internacionales, y les mostramos los datos, se muestran muy sorprendidos. Porque cantidades tan altas no se habían observado antes tan lejos del cráter. Es un fenómeno muy inquietante que no parece mostrar signos de disminución a corto y medio plazo (Hernández *et al*., 2022; Rodríguez *et al*., 2023).

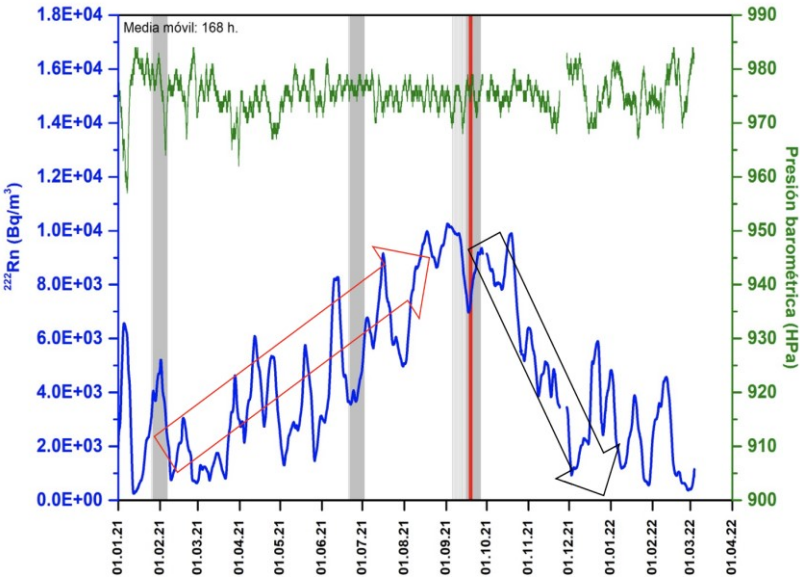


Fig. 29. Emisión difusa de Radón (^{222}Rn) mostró una tendencia ascendente desde febrero 2021 hasta la erupción (basado en Di Nardo *et al*., 2022).

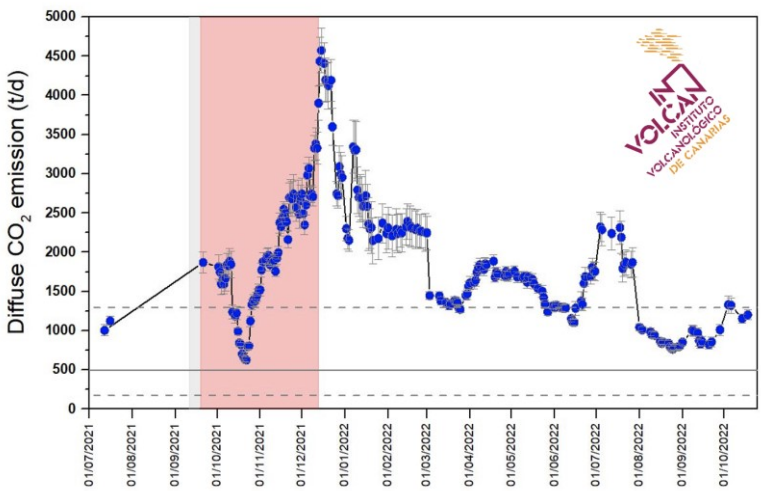


Fig. 30. Emisión difusa de dióxido de carbono (CO_2). Monitorizada en campañas discretas por todo el edificio de Cumbre Vieja, mostró un pico al final de la erupción.

La emisión difusa medida en las campañas discretas prestó particular atención al dióxido de carbono y al helio. Permitió establecer la ratio entre helio y dióxido de carbono que mostró un pico más o menos a mitad de

octubre (Fig. 31). Este pico es muy importante, porque nos permite señalar el aporte de nuevo magma desde profundidad en la cámara magmática.

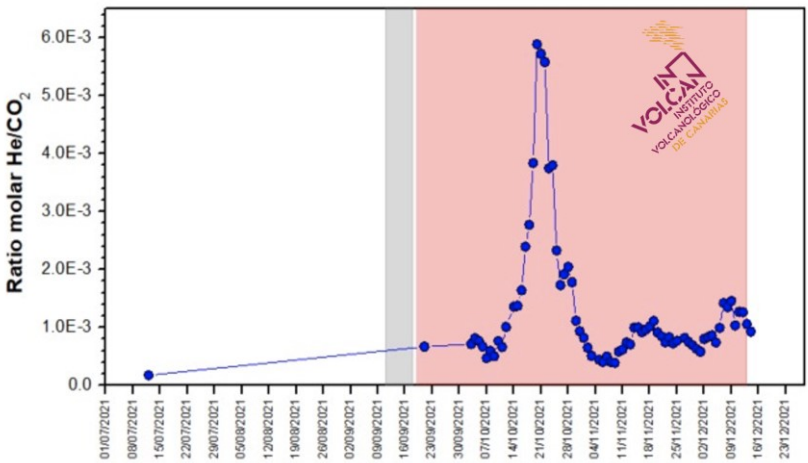


Fig. 31. La ratio entre helio (He) y dióxido de carbono (CO_2) monitorizado en campañas discretas mostró un significativo pico a mediados de octubre de 2021.

Eso ayuda a explicar el modelo que hemos desarrollado de la erupción (ver Fig. 17). Diferentes evidencias científicas apuntan a que esta erupción no ha sido alimentada por un único reservorio, sino por dos. Uno situado entre 10 y 15 km de profundidad, y otro, que todavía no conocemos bien, que está por debajo de 25 km de profundidad. La sismicidad en ambas profundidades durante la erupción fue evidente (ver Fig. 11). Los terremotos que detectamos entre 2017 y la erupción, están relacionados con la transferencia de magma desde el reservorio profundo hacia el más superficial. Cada enjambre fue un episodio de subida de magma de un reservorio al otro. Como el reservorio superior se había rellenado demasiado, comenzó a crecer y presurizarse hasta romper la corteza y permitir al magma llegar a la superficie el 19 de septiembre. Durante la erupción este reservorio superficial comenzó a vaciarse, y luego empezó a recuperar magma desde el reservorio profundo. Es en ese momento cuando comienza la sismicidad más profunda, y el pico en la relación He/CO_2, nos indica que estaba saliendo magma desde una profundidad mayor. A final de noviembre la sismicidad profunda finalizó, antes de que lo hiciera la erupción, indicando que el reservorio profundo se había agotado. En las últimas semanas solo se registraron terremotos a unos 10 km de profundidad. De manera que, desde finales de noviembre, aunque sin evidencias claras en la superficie, había signos que indicaban que la erupción se estaba agotando. Y de hecho terminó de forma repentina el 13 de diciembre de 2021.

Lecciones aprendidas

En resumen, las principales lecciones aprendidas de la erupción de Tajogaite, son las siguientes:

- Los precursores de una erupción pueden evolucionar mucho más rápido de lo esperado. Cuando comenzaron los terremotos y tuvimos la primera reunión nos planteamos diferentes escenarios. Pero eran escenarios que estimaban semanas o meses de precursores. Nadie se esperaba que en una semana iba a iniciarse la erupción.
- Cada volcán y cada erupción tiene sus propias características. De manera que las características de las erupciones pueden ser anómalas con respecto al registro histórico. Conociendo el patrón de las erupciones históricas se puede tener una orientación. Por ejemplo, en el caso del Teneguía los terremotos sentidos por la población se iniciaron unos días antes de la erupción. De igual manera se comportó Tajogaite. Sin embargo, los precursores de Tajogaite fueron totalmente diferentes a los de la erupción de El Hierro.
- Tenemos que cambiar nuestra visión de cómo funcionan los volcanes canarios. Los resultados que hemos obtenido con la tomografía sísmica han supuesto para nosotros un cambio radical en este paradigma. Es un tema que estamos debatiendo a nivel internacional con colegas de otras regiones porque posiblemente es algo que no afecta sólo a las Canarias, sino también a otras islas oceánicas parecidas. En volcanes de Azores, Canarias y Cabo Verde en los que no hay una actividad continua podría haber un reservorio magmático persistente en profundidad. Es muy importante para poder interpretar los procesos. Estamos realizando estudios para ver si ocurre igual en otras islas de Canarias, y esperamos sorpresas en los próximos años.
- Es necesario desarrollar lo más posible sistemas que mejoren la alerta temprana volcánica. Sistemas no sólo desde el punto de vista tecnológico, instalando más y nueva instrumentación, sino también desde el punto de vista científico desarrollando algoritmos que puedan dar la alerta de una venidera erupción volcánica con la máxima antelación posible. En los últimos años se está dando mucho peso a la inteligencia artificial, que podría interpretar de forma automática, sin intervención humana, los datos que se recaban de lo que está ocurriendo en el volcán. Ahora estamos trabajando con varias universidades con el propósito de desarrollar este tipo de sistemas para las islas Canarias, de manera que interprete de forma automática las señales precursoras.
- Una vez que finaliza la erupción no se puede asumir que todo vuelve a la normalidad. Aunque la población estaba deseosa de volver a sus casas hay que asumir que los peligros post-eruptivos pueden ser

relevantes, y el tiempo durante el cual pueden perdurar resulta totalmente incierto.

Otras enseñanzas de la erupción de Tajogaite fueron analizadas en el Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias en noviembre de 2022 desde la perspectiva de otras disciplinas científicas (Afonso-Carrillo, 2023).

AGRADECIMIENTOS.- Durante la erupción de Tajogaite, el INVOLCAN contó con una ayuda muy importante de 179 investigadores de 70 universidades e instituciones científicas extranjeras procedentes de 20 países. Esta colaboración, además de científica, ha permitido también dar en el seno del Comité Científico del PEVOLCA información práctica para que Protección Civil pudiera tomar decisiones día a día. Agradecemos a los Cabildos Insulares de Tenerife y La Palma y la Dirección General de Seguridad y Emergencia del Gobierno de Canaries por el soporte logístico y económico. También agradecemos el soporte del proyecto VOLRISKMAC II (MAC2/ 3.5b/328), cofinanciado por el Programa de Cooperación INTERREG V-A España-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canarias) 2014-2020 y el proyecto «Cumbre Vieja Emergencia», financiado por el Plan Nacional de I+D+i.

Bibliografía

AFONSO-CARRILLO, J. (Ed.) (2023). *Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)*. XVIII Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, Puerto de la Cruz.

ALBERTOS, V.T., G. RECIO, M. ALONSO, C. AMONTE, F. RODRÍGUEZ, C. RODRÍGUEZ, L. PITTI, V. LEAL, G. CERVIGÓN, J. GONZÁLEZ, M. PRZEOR, J.M. SANTANA-LEÓN, J. BARRANCOS, P.A. HERNÁNDEZ, G.D. PADILLA, G.V. MELIÁN, E. PADRÓN, M. ASENSIO-RAMOS & N.M. PÉREZ (2022). Sulphur dioxide (SO_2) emissions by means of miniDOAS measurements during the 2021 eruption of Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23-27 May 2022, EGU22-5603, https://doi.org/ 10.5194/egusphere-egu22-5603.

AMONTE, C., G.V. MELIÁN, M. ASENSIO-RAMOS, N.M. PÉREZ, E. PADRÓN, P.A. HERNÁNDEZ & L. D'AURIA (2022). Hydrogeochemical temporal variations related to the recent volcanic eruption at Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Frontiers in Earth Science* 10:1003890.

CABRERA-PÉREZ, I., L. D'AURIA, J. SOUBESTRE, M. PRZEOR, I. KOULAKOV, D. MARTÍNEZ VAN DORTH, J.M. IBÁÑEZ, V. ORTEGA, J. BARRANCOS, G.D. PADILLA, R. GARCÍA-HERNÁNDEZ & N. PÉREZ (2022). Spatio-temporal velocity variations observed during the pre-eruptive episode of La Palma eruption inferred from ambient noise interferometry. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-5133. https://doi.org/10.5194/ egusphere-egu22-5133.

CIVICO, R., T. RICCI, P. SCARLATO, J. TADDEUCCI, D. ANDRONICO, E. DEL BELLO, L. D´AURIA, P.A. HERNÁNDEZ & N.M. PÉREZ (2022). High-resolution digital Surface modelo f the 2021 eruption deposit of Cumbre Vieja volcano, La Palma, Spain. *Scientific Data* 9: 435.

D'AURIA, L., I. KOULAKOV, J. PRUDENCIO, I. CABRERA-PÉREZ, J. IBÁÑEZ, J. BARRANCOS, R. GARCÍA-HERNÁNDEZ, D. MARTÍNEZ VAN DORTH, G.D. PADILLA, M. PRZEOR, V. ORTEGA, P. HERNÁNDEZ & N.M. PERÉZ (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. *Scientific Reports* 12, 17654. doi:10.21203/rs.3.rs-1238072/v1

D'AURIA, L., N.M. PERÉZ, P.A. HERNÁNDEZ, M.J. PANKHURST & CUMBRE VIEJA ERUPTION INTERNATIONAL COLLABORATIVE RESEARCH TEAM INVOLCAN'S (2022b). Lessons learned from the 2021 Cumbre Vieja eruption: effective international scientific cooperation during a volcanic crisis. *Cities on Volcanoes 11,* Heraklion, Greece.

HAYER, C., J. BARRANCOS, M. BURTON, F. RODRÍGUEZ, B. ESSE, P. HERNÁNDEZ, G. MELIÁN, E. PADRÓN, M. ASENSIO-RAMOS & N. PÉREZ (2022). From up above to down below: Comparison of satellite- and ground-based observations of SO_2 emissions from the 2021 eruption of Cumbre Vieja, La Palma. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23-27 May 2022, EGU22-12201, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12201.

HERNÁNDEZ, P.A., E. PADRÓN, G.V. MELIÁN, N.M. PÉREZ, G. PADILLA, M. ASENSIO-RAMOS, D. DI NARDO, J. BARRANCOS, J.M. PACHECO & M. SMIT (2022). Gas hazard assessment at Puerto Naos and La Bombilla inhabited areas, Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-7705, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-7705.

NARDO, D., E. PADRÓN, C. RODRÍGUEZ-PÉREZ, G.D. PADILLA, J. BARRANCOS, P.A. HERNÁNDEZ, M. ASENSIO-RAMOS & N.M. PÉREZ (2022). Soil gas Rn monitoring at Cumbre Vieja prior and during the 2021 eruption, La Palma, Canary Islands. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-10290, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10290.

PADRÓN, E., N.M. PÉREZ, F. RODRÍGUEZ, G. MELIÁN, P.A. HERNÁNDEZ, H. SUMINO, G. PADILLA, J. BARRANCOS, S. DIONIS, K. NOTSU & D. CALVO (2015). Dynamics of diffuse carbon dioxide emissions from Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Bulletin of Volcanology* 77: 1-14.

PADRÓN, E., N.M. PÉREZ, P.A. HERNÁNDEZ, H. SUMINO, G.V. MELIÁN, M. ALONSO, F. RODRÍGUEZ, M. ASENCIO-RAMOS & L. D´AURIA (2022). Early precursory changes in the $^3He/^4He$ ratio prior to the 2021 Tajogaite eruption at Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Geophysical Research Letters* 49: e2022GL099992.

PANKHURST M.J., J.H. SCARROW, O.A. BARBEE, J. HICKEY, B.C. COLDWELL, G.K. ROLLINSON, J.A. RODRÍGUEZ-LOSADA, A. MARTÍN-LORENZO, F. RODRÍGUEZ, W. HERNÁNDEZ, D. CALVO FERNÁNDEZ, P.A. HERNÁNDEZ & N.M. PÉREZ (2022). Rapid response petrology for the opening eruptive phase of the 2021 Cumbre Vieja eruption, La Palma, Canary Islands. *Volcanica* 5: 1-10. doi: 10.30909/vol.05.01.0110

PÉREZ, N.M., P.A. HERNÁNDEZ, G.V. MELIÁN, E. PADRÓN, M. ASENCIO-RAMOS, J. BARRANCOS, G.D. PADILLA, F. RODRÍGUEZ, L. D´AURIA, C. AMONTE, M. ALONSO, A. MARTÍN-LORENZO, D. CALVO, C. RODRÍGUEZ, W. HERNÁNDEZ, B. COLWELL, M.J. PANKHURST & THE INTERNATIONAL COLLABORATIVE

RESEARCH TEAM (2022). The 2021 Cumbre Vieja eruption: an overview of the geochemical monitoring program. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23-27 May 2022, EGU22-12491, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12491.

RIZZO, A.L., A. SANDOVAL-VELASQUEZ, F. CASSETA, T. NTAFLOS, A. AIUPPA, M. ALONSO, E. PADRÓN, M. PANKHURST & N.M. PÉREZ (2022). First insights into the noble gas signatura of the 2021 Cumbre Vieja eruption, La Palma (Canary Islands). EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23-27 May 2022, EGU22-12170.

RODRÍGUEZ, N., M. ASENSIO-RAMOS, G.V. MELIÁN, C. AMONTE, A.J. ÁLVAREZ DÍAZ, A.M. GONZÁLEZ PÉREZ, F. RODRÍGUEZ, G.D. PADILLA, J. BARRANCOS, L. D'AURIA, P.A. HERNÁNDEZ & N.M PÉREZ (2023). CO_2 hazard mapping in the buildings of La Bombilla and Puerto Naos (La Palma, Canary Islands) using of alkaline traps. EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-3643, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-3643.

RODRÍGUEZ-PÉREZ, C., J. BARRANCOS, P.A. HERNÁNDEZ, N.M. PÉREZ, E. PADRÓN, G.V. MELIÁN, F. RODRÍGUEZ, M. ASENSIO-RAMOS & G.D. PADILLA (2022). Continuous monitoring of diffuse CO_2 emission from Cumbre Vieja volcano: early evidences of magmatic CO_2 surface arrival, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-9819, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-9819.

ROMERO, J.E., M. BURTON, F. CÁCERES, J. TADDEUCCI, R. CIVICO, T. RICCI, M.J. PANKHURST, P.A. HERNÁNDEZ, C. BONADONNA, E.W. LLEWELLIN, M. PISTOLESI, M. POLACCI, C. SOLANA, L. D´AURIA, F. ARZILLI, D. ANDRONICO, F. RODRÍGUEZ, M. ASENCIO-RAMOS, A. MARTÍN-LORENZO, C. HAYER, P. SCARLATO & N.M. PÉREZ (2022). The initial fase of the 2021 Cumbre Vieja ridge eruption (Canary Islands): Products and dynamics controlling edifice growth and collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 431: 107642.

SANTANA DE LEÓN, J.M., G.V. MELIÁN, C. RODRÍGUEZ, G. CERVIGÓN-TOMICO, V. ORTEGA, D. MARTÍNEZ VAN DORTH, I. CABRERA-PÉREZ, M. CORDERO, M. PRZEOR, R.F.F. SILVA, S.B.D. MATOS, E. BALDONI, M.M.P. RAMALHO, F. VIVEIROS, D. CALVO & N.M. PÉREZ (2022). Long-term variations of diffuse CO_2 at Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-8773, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-8773.

TADDEUCCI, J., P. SCARLATO, D. ANDRONICO, T. RICCI, R. CIVICO, E. DEL BELLO, L. SPINA, L. D'AURIA, M. ASENSIO-RAMOS, D. CALVO, E. PADRÓN, P.A. HERNÁNDEZ & N.M. PÉREZ (2023). The explosive activity of the 2021 Tajogaite eruption (La Palma, Canary Islands, Spain). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 24, 6 e2023GC010946.

5. Estrategia Canaria para la Reducción del Riesgo Volcánico: una necesidad

Nemesio M. Pérez

Coordinador Científico del Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN)
nperez@iter.es

En este artículo se realiza una breve descripción sobre algunas características genéricas del fenómeno volcánico en el archipiélago (zonas de mayor probabilidad de futuros eventos eruptivos, erupciones históricas, probabilidades de futuras erupciones, peligros y riesgo volcánico, etc.) y la gestión del riesgo volcánico en Canarias desde el siglo XX, con la finalidad de contribuir a mejorar nuestra compresión sobre la situación actual de la gestión del riesgo volcánico en España como resultado de una combinación de esfuerzo, dejadez y la acción de lobbies dentro de la administración pública que claramente no persiguen el interés general por la reducción del riesgo volcánico en Canarias; la única zona del territorio nacional expuesta a este riesgo natural.

La reciente erupción de Tajogaite (2021) en Cumbre Vieja tiene que marcar un punto de inflexión sobre la gestión del riesgo volcánico en el archipiélago a pesar de los avances realizados durante los últimos 25 años por la reducción del riesgo volcánico en Canarias. Este nuevo rumbo debiera adoptarse a través de una «Estrategia Canaria para la Reducción del Riesgo Volcánico»; una herramienta operativa que sirva de marco para afrontar y dar respuesta a los retos a que se enfrenta Canarias como consecuencia del riesgo volcánico, sirviendo de elemento dinamizador y coordinador de las distintas políticas sectoriales, así como para el

fomento de la concienciación ciudadana, empresarial y administrativa.

Durante el último encuentro de los presidentes Pedro Sánchez y Ángel Víctor Torres con el Comité Científico del PEVOLCA en la isla de La Palma el pasado 26 de diciembre de 2021, el Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN) propuso a la administración pública la necesidad urgente e inaplazable de elaborar este importante documento bajo tres principios o pilares fundamentales: conocimiento científico, participación ciudadana y consenso.

Introducción

El origen del fenómeno volcánico en Canarias ha generado un intenso debate durante los últimos 50 años, pero la teoría más ampliamente aceptada por la comunidad científica es que la actividad volcánica en Canarias se encuentra ligada a la presencia de una anomalía térmica profunda en el interior de la Tierra (manto inferior) capaz de haber construido y continuar construyendo estos sistemas volcánicos insulares. Un simple análisis espacial de la edad de las rocas subáreas más viejas de cada uno de los sistemas volcánicos insulares refleja una tendencia descendente de la edad de estas rocas desde las islas orientales a las occidentales dando lugar a que las rocas subáreas relativamente más jóvenes, entre las viejas, se localizan en las islas de La Palma y El Hierro (Carracedo *et al*., 1998). Por otro lado, los actuales niveles de emisión de helio-3, la mejor huella dactilar que los vulcanólogos disponen para detectar actividad magmática en el subsuelo, reflejan también una clara progresión espacial, con una tendencia ascendente desde las islas orientales a las occidentales, registrándose los mayores niveles de emisión de helio-3 en las islas de La Palma y El Hierro (Pérez *et al.*, 1994). La combinación de estas dos tendencias o progresiones, una descendente (edad de las rocas) y otra ascendente (emisión de helio-3) desde las islas orientales a las occidentales, sugiere que la zona de Canarias que se encuentra con una mayor conexión con la anomalía térmica profunda es la parte occidental del archipiélago (Fig. 1); por lo tanto, es la zona más probable de experimentar futuras erupciones volcánicas en Canarias.

A pesar de que el fenómeno volcánico en España no sólo se encuentra presente en Canarias, la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico en España, aprobada por el Consejo de Ministros el 19 de enero de 1996 (BOE, 1996), describe y delimita que la única zona del territorio nacional con volcanismo activo expuesta al riesgo volcánico es la Comunidad Autónoma de Canarias.

Fig. 1. Distribución espacial de las edades de las rocas subáreas más viejas y de los niveles de emisión de helio-3 en los sistemas volcánicos insulares de Canarias.

Está afirmación está claramente refrendada por las 18 erupciones históricas ocurridas en Canarias desde el s. XV (Tabla I), las cuales han tenido lugar en 4 de los 7 principales sistemas volcánicos insulares de Canarias (Fig. 2), siendo la más reciente la que tuvo lugar en la isla de La Palma en 2021: la erupción de Tajogaite (Romero, 1990; Romero, 2000; Romero *et al*., 2009; Pérez, 2015; Pankhurst *et al*., 2022; Wadsworth *et al*., 2022; Afonso-Carrillo, 2023; Romero, com. pers.). Por lo tanto, y a pesar de que las islas Canarias se encuentran expuestas a diversos riesgos naturales, el riesgo volcánico es el riesgo natural bandera de esta Comunidad Autónoma; el que la diferencia del resto del territorio nacional (Sansón Cerrato, 1995).

Las erupciones históricas en Canarias se han caracterizado principalmente por tratarse de erupciones basálticas fisurales con bajos índices de explosividad volcánica: VEI ≤ 3 (VEI, siglas en inglés de Volcanic Explosity Index), una escala que va de 0 a 8 con la que los vulcanólogos calculan la magnitud de una erupción volcánica (Newhall & Self, 1982). Por lo tanto, los peligros volcánicos asociados a este tipo de erupciones basálticas fisurales en Canarias han sido principalmente coladas de lava, piroclastos de caída, tanto de proyección balística como de dispersión de cenizas, gases volcánicos, terremotos volcánicos y lahares o flujos de lodo (Romero, 1990, 2000).

Tabla I. Listado de las 18 erupciones históricas de Canarias (algunas de las más recientes ilustradas en las figuras 3-6).

#	Erupción	Isla	Fecha	Días
1	Tacande	La Palma	1430-1447	?
2	Cristóbal Colón*	Tenerife	1492	?
3	Boca Cangrejo	Tenerife	S. XVI	?
4	Tehuya	La Palma	1585	84
5	Tigalate	La Palma	1646	82
6	San Antonio	La Palma	1677/78	66
7	Siete Fuentes-Fasnia-Arafo	Tenerife	1704/05	71
8	Arenas Negras	Tenerife	1706	40
9	Charco	La Palma	1712	56
10	Timanfaya	Lanzarote	1730/36	2055
11	Erupción submarina	El Hierro	1777	?
12	Chahorra o Narices del Teide	Tenerife	1798	99
13	Tao-Nuevo del Fuego-Tinguatón	Lanzarote	1824	86
14	Chinyero	Tenerife	1909	10
15	San Juan	La Palma	1949	47
16	Teneguía	La Palma	1971	24
17	Tagoro (erupción submarina)	El Hierro	2011/12	145
18	Tajogaite	La Palma	2021	85

* La erupción volcánica de la isla de Tenerife descrita por Cristóbal Colón (localización específica desconocida).

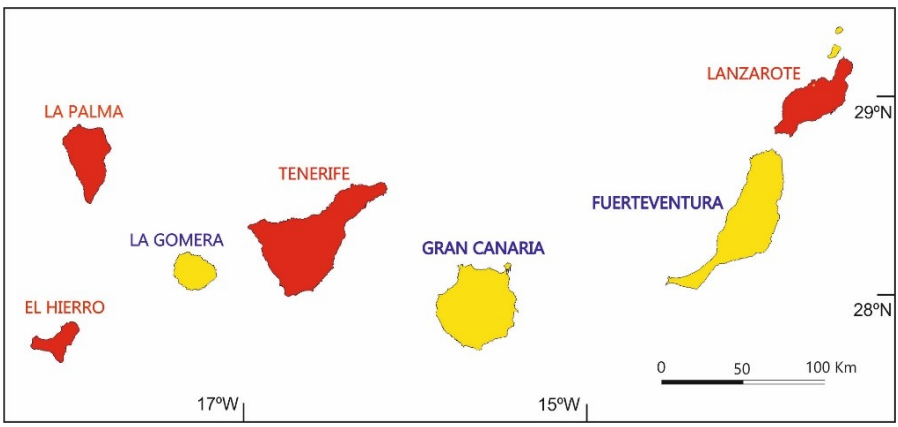


Fig. 2. Las erupciones históricas de Canarias se han registrado en los sistemas volcánicos insulares de La Palma, Tenerife, Lanzarote y El Hierro.

Fig. 3. La erupción histórica de Chinyero (1909), Tenerife.

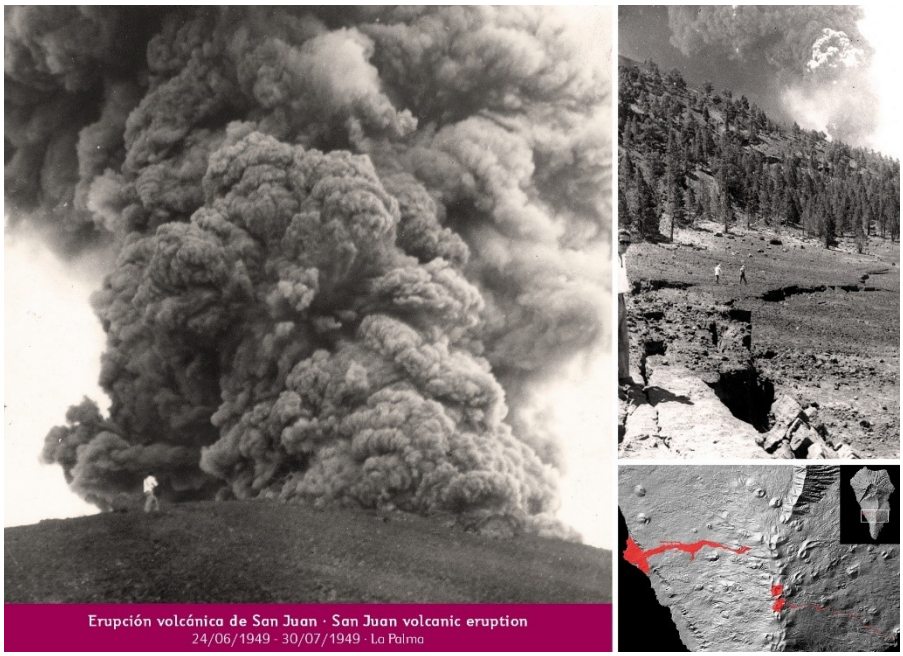


Fig. 4. La erupción histórica de San Juan (1949), La Palma.

Fig. 5. La erupción histórica de Teneguía (1971), La Palma.

Fig. 6. La erupción histórica submarina de Tagoro (2011-2012), El Hierro.

Por otro lado, el pasado geológico de Canarias ha sido también escenario de erupciones de mayor índice de explosividad volcánica y procesos volcánicos catastróficos que han dejado en el territorio «huellas» de peligros volcánicos de mayor calado como son los flujos piroclásticos, piroclastos de caída asociados a erupciones con VEI ≥ 5, grandes deslizamientos gravitacionales y tsunamis volcanogenéticos (Ferrer *et al*., 2021). Resaltar que estos procesos de mayor magnitud y catastróficos tienen un periodo de recurrencia mayor que aquellos de menor magnitud como se puede describir en el caso de los grandes deslizamientos gravitacionales relacionados con derrumbes > 100 km^3 (Fig. 7).

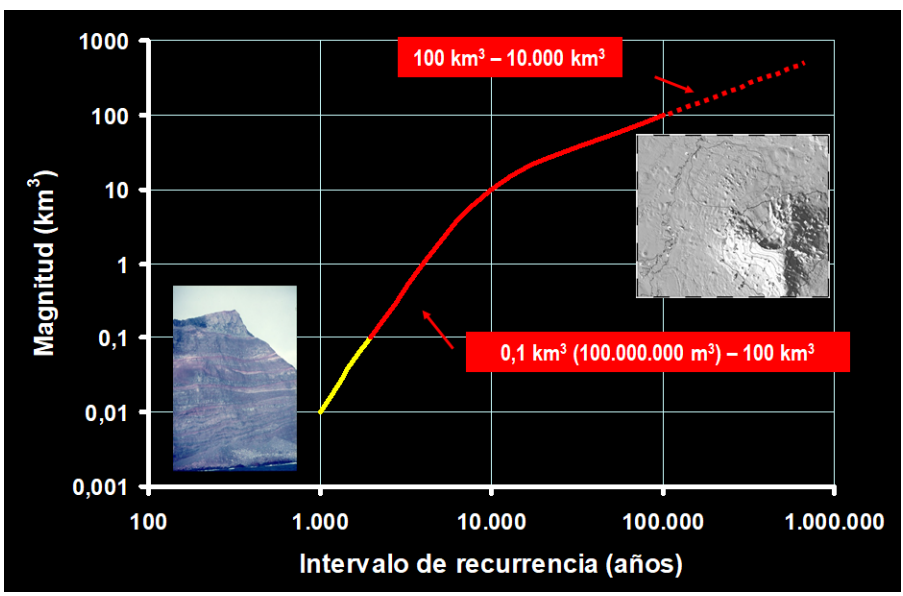


Fig. 7. Magnitud y periodo de recurrencia del peligro volcánico asociado a deslizamientos (Imagen: Juan Jesús Coello Bravo).

Probabilidad de futuras erupciones volcánicas en Canarias

El fenómeno volcánico posee una complejidad intrínseca debido a la naturaleza geológica del planeta Tierra. Los procesos de generación del magma en profundidad, su ascenso hacia la superficie, su acumulación en cámaras magmáticas y su erupción se concatenan de forma muy compleja. Una manifestación evidente de esta complejidad es la gran variedad de fenómenos volcánicos en nuestro planeta, y en lo especifico, la extrema variabilidad de la frecuencia con la que ocurren las erupciones volcánicas.

Por un lado, existen volcanes que se encuentran en un proceso eruptivo prácticamente continuo, como el volcán Stromboli en Italia y, en el extremo opuesto, volcanes que pueden quedarse dormidos durante siglos antes de volver a experimentar un proceso eruptivo, como ocurrió en el volcán Pinatubo en Filipinas, que despertó en 1991, después de siglos de tranquilidad, causando una de las erupciones más catastróficas del siglo XX.

Dicha complejidad hace imposible, en la actualidad, la previsión determinística a largo plazo de las erupciones volcánicas. Por esta razón, la única herramienta científicamente valida es el análisis estadístico. Desde un punto de vista físico-matemático, la complejidad del fenómeno volcánico se expresa bajo la forma de una marcada no-linealidad. En otras palabras, pequeñas variaciones en el interior de la Tierra pueden causar cambios relevantes sobre la actividad volcánica en superficie. Eso hace que en la mayoría de los volcanes las erupciones no ocurran con regularidad sino todo lo contrario. Es posible que en un volcán sucedan varias erupciones a lo largo de pocos años seguidas por decenas de años de reposo. Para algunos volcanes específicos ha sido posible desarrollar una estadística ajustada a sus características peculiares. Sin embargo, para la mayoría de los volcanes no es posible realizar un análisis estadístico detallado, debido al escaso número de erupciones cuya datación sea suficientemente precisa.

En este caso, los estudios realizados a escala global, han evidenciado que, en promedio, para los aproximadamente 1500 volcanes activos del planeta Tierra, los intervalos entre una erupción y la siguiente en el mismo volcán, se distribuyan siguiendo la ley de Poisson. En otras palabras, según este modelo, después de una erupción el volcán no guarda ninguna memoria de su historial y el intervalo con la erupción siguiente depende sólo de un parámetro específico: el promedio del intervalo entre una erupción y la siguiente. Dicho parámetro se puede valorar de forma inmediata para los volcanes que posean un registro histórico como en Canarias. Si denominamos T a dicho intervalo promedio, la probabilidad de ocurrencia de por lo menos una erupción para un intervalo ΔT se puede calcular a través de la fórmula:

$$P(\Delta \mathrm{T}) = 1 - e^{-\frac{\Delta T}{T}}$$

Por ejemplo, según el registro histórico, en el volcán de Cumbre Vieja (La Palma) se han registrado 8 erupciones históricas durante los últimos 600 años, por lo tanto, el intervalo promedio entre erupciones es de 75 años. Según la formula anterior, la probabilidad de ocurrir una erupción en el volcán Cumbre Vieja para una ventana temporal de 50 años es del 48,7 %. En la Tabla II se describen las probabilidades de ocurrencia de una erupción en Canarias, en su conjunto, y en algunas de las islas para diferentes intervalos temporales. Además de mostrar las probabilidades de los sistemas

volcánicos insulares de La Palma y Tenerife que han experimentado un significativo número de erupciones históricas, se refleja también la probabilidad para sistemas como Gran Canaria que no ha experimentado erupción histórica alguna, pero que ha sido escenario de una veintena de erupciones durante los últimos 10.000 años.

Con la finalidad de comparar estas probabilidades con otros sistemas volcánicos insulares similares, se refleja también las probabilidades de una futura erupción en el volcán Pico do Fogo (Cabo Verde), un sistema volcánico insular geológicamente muy parecido a los de las islas Canarias, pero con erupciones más frecuentes.

Tabla II. Probabilidades de futuras erupciones en Canarias y Fogo (Cabo Verde) para diferentes ventanas temporales.

	5 años	10 años	50 años	100 años	200 años
Canarias	13,9 %	25,9 %	77,7 %	95,0 %	99,7 %
La Palma	5,7 %	11,0 %	48,7 %	73,6 %	93,0 %
Tenerife	4,9 %	9,5 %	39,3 %	63,2 %	86,5 %
Gran Canaria	1,1 %	2,2 %	10,3 %	19,6 %	35,4 %
Fogo	25,1 %	43,8 %	94,4 %	99,7 %	100,0 %

¿Está aumentando el riesgo volcánico en Canarias?

El riesgo volcánico es un ámbito sensible de la protección civil que compromete o puede comprometer gravemente la vida e integridad física de las personas, así como la indemnidad de sus bienes y del patrimonio colectivo. Respecto a dicho riesgo, la reciente historia geológica de Canarias pone de manifiesto que este archipiélago ha sido escenario no sólo de erupciones volcánicas con bajos índices de explosividad, sino también de erupciones con índices de explosividad moderados-altos.

Es de significar en este sentido que teniendo en cuenta la diferencia conceptual entre peligrosidad y riesgo volcánico, este último en Canarias es en la actualidad mayor que hace varias décadas, como consecuencia de la existencia ahora de mayores índices poblacionales y de desarrollo económico expuestos al fenómeno volcánico (Fig. 8). Por lo tanto, es muy probable que el riesgo volcánico en Canarias dentro de 50 años sea mayor que en el presente.

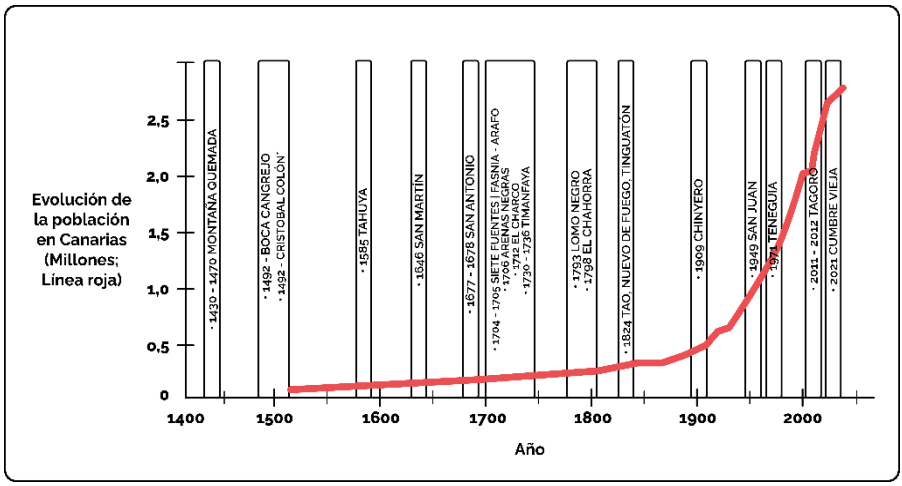


Fig. 8. Evolución temporal del número de habitantes en Canarias y erupciones históricas ocurridas desde el s. XV.

Los daños materiales generados por las erupciones históricas de Canarias han ocasionado (i) destrucción de viviendas, infraestructuras y zonas de cultivo como consecuencia de las coladas de lava, (ii) daños en la cobertera vegetal, zonas agrícolas y colapsos de tejados como consecuencia de los piroclastos de caída, y (iii) desprendimientos de tierra, disminución del caudal de las aguas y desplomes de viviendas como consecuencia de la sismicidad ligada a los procesos eruptivos.

En el caso concreto de la reciente erupción de Tajogaite en 2021 (Fig. 9) los daños materiales generados por este proceso eruptivo se han estimado en aproximadamente 1.000 millones de euros, según la última evaluación elaborada por el Gobierno Autónomo de Canarias el pasado mes de marzo de 2022 que fue remitida al Gobierno de España con la finalidad de actualizar la solicitud para la activación del Fondo de Solidaridad de la Unión Europea. Esta estimación de aproximadamente 1.000 millones de euros se encuentra infravalorada porque no incluye el lucro cesante; una forma de daño patrimonial que consiste en la pérdida de una ganancia legítima o de una utilidad económica por parte de los damnificados como consecuencia del daño ocasionado por la erupción de Tajogaite. Resaltar que los daños de este proceso eruptivo han sido muy importantes: más de 7.000 personas evacuadas, 1.676 edificaciones derribadas, 73,8 km de carreteras destruidas y 370 hectáreas de cultivos arrasadas según datos del Cabildo Insular de La Palma.

Fig. 9. La erupción histórica de Tajogaite (2021), La Palma.

En lo que respecta a los daños relacionados con la vida de las personas, las erupciones históricas en Canarias han ocasionado la pérdida de 25 vidas humanas como mínimo, puesto que en algunos de los documentos históricos se habla de pérdida de vidas humanas sin precisar el número (Tabla III). Resulta muy llamativo que 16 de las 24 pérdidas de vidas humanas se encuentren asociadas a los terremotos volcánicos ligados a la erupción de Siete Fuentes-Fasnia-Arafo de 1704-1705. El resto de los decesos estuvieron relacionados con los gases volcánicos, lahares post-eruptivos e incluso por la caída de cenizas volcánicas.

Tabla III. Número de víctimas (pérdidas de vidas humanas) ocasionadas por las erupciones históricas de Canarias.

Erupción	Nº de victimas	Causas
Tehuya	Varias	Intoxicación por gases
	Sin precisar número	Caídas de ceniza
San Antonio	3	Sin precisar causa
	1	Intoxicación por gases
Siete Fuentes-Fasnia-Arafo	16	Terremotos volcánicos
Timanfaya	1	Sin precisar causa
San Juan	1	Desaparecido
	Sin precisar número	Lahares post-eruptivos
Teneguía	2	Intoxicación por gases
Tajogaite	1	Intoxicación por gases
Total	**+25**	

Reducir el riesgo volcánico en Canarias: una perspectiva histórica

Antes de realizar una perspectiva histórica sobre la reducción del riesgo volcánico en Canarias, sería conveniente diferenciar los conceptos de peligrosidad y riesgo volcánico. La peligrosidad volcánica se define como la probabilidad de que un lugar, durante un intervalo de tiempo concreto, sea afectado por un determinado evento o proceso volcánico. Por el contrario, el riesgo volcánico es la expectativa de que se produzcan pérdidas, bien en forma de vidas humanas, bienes materiales y capacidad productiva como consecuencia de un futuro y probable fenómeno volcanológico adverso (crisis sismo-volcánicas o erupciones volcánicas). Por lo tanto, la sociedad en su conjunto no puede hacer nada para mitigar la peligrosidad volcánica, pero si puede materializar diversas acciones que contribuyen a reducir el riesgo volcánico.

La comunidad científica y las directrices políticas a nivel internacional, a través de instituciones como la Organización de Naciones Unidas para el desarrollo de la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y la Asociación Internacional de Volcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI), recomiendan la materialización de tres acciones específicas para contribuir a la reducción del riesgo volcánico en cualquier región volcánicamente activa: (i) zonificación del territorio en función de la peligrosidad volcánica con la finalidad de realizar un uso más racional del territorio expuesto a diversos tipo de amenazas volcánicas, (ii) realización de un programa de vigilancia volcánica multidisciplinar, que implique la aplicación de técnicas geofísicas, geoquímicas y geodésicas, con la finalidad de mejorar y optimizar la detección de señales de alerta temprana de futuras y posibles crisis volcánicas, y (iii) desarrollo de planes de emergencia que permitan a la población saber qué hacer y a dónde ir en caso de una crisis volcánica.

Las dos primeras son acciones que competen al ámbito científico, mientras que la tercera es una acción más ligada al ámbito civil dado que compromete a toda la ciudadanía. Los planes de emergencia ante el riesgo volcánico debieran elaborarse teniendo en cuenta tres criterios fundamentales: (i) disponer de un sistema de comunicaciones de alerta inequívoco e infalible, (ii) informar y educar regularmente al conjunto de la sociedad sobre los peligros volcánicos y la gestión del riesgo volcánico en su territorio, y (iii) realizar periódicamente simulacros del plan de emergencia.

La finalidad principal de la zonificación del territorio en función del nivel de amenaza volcánica es evitar que infraestructuras de largo periodo de vida o críticas (puertos, aeropuertos, hospitales, centrales eléctricas, etc.) se construyan en zonas que presenten relativamente altos niveles de amenaza o peligrosidad volcánica (Fig. 10). Por otro lado, cuando el uso del territorio es

el que es por razones históricas, económicas, culturales y políticas, además de reflejar cuotas muy altas de ocupación del mismo, la zonificación del territorio en función de la amenaza volcánica es una acción científico-técnica que presenta muchas limitaciones para contribuir a la reducción del riesgo volcánico. Por lo tanto, esta realidad hace que la vigilancia volcánica multidisciplinar sea la más efectiva de las dos acciones científico-técnicas para contribuir a la reducción del riesgo volcánico.

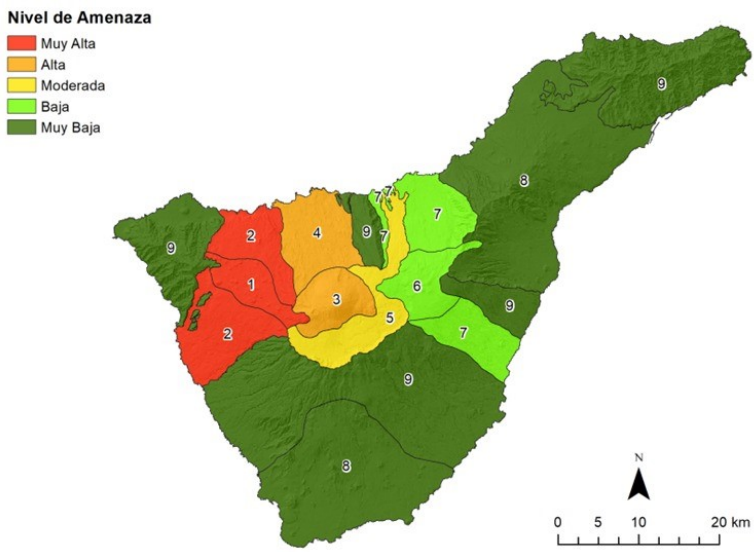


Fig. 10. Zonificación de Tenerife en función de los diferentes niveles de amenazas volcánicas (fuente: PAIV Tenerife).

La finalidad de la vigilancia volcánica es mejorar y optimizar la sistemática para la detección de señales de alerta temprana sobre un proceso de reactivación del sistema volcánico. Ello resulta ser de una gran importancia para los sistemas de Protección Civil, que son los usuarios finales de los resultados que derivan de la vigilancia y los únicos responsables de transmitir a la ciudadanía el nivel de alerta en el que se encuentra el sistema volcánico, así como ejecutar el plan de emergencia ante el riesgo volcánico.

Dada la naturaleza del fenómeno volcánico, la vigilancia volcánica no sólo comprende la operación y mantenimiento de redes instrumentales permanentes (Fig. 11), que nos permita el registro en modo continuo de parámetros potencialmente precursores de la actividad volcánica (Fig. 12).

Además, esta conlleva también la realización de campañas científicas de observación periódicas (Fig. 13), que podrán ejecutarse a través del análisis de datos satelitales o recogidos sobre el terreno, ya que igualmente pueden proporcionar señales de alerta temprana de la actividad volcánica que no nos pueden proporcionar las redes instrumentales permanentes (Fig. 14).

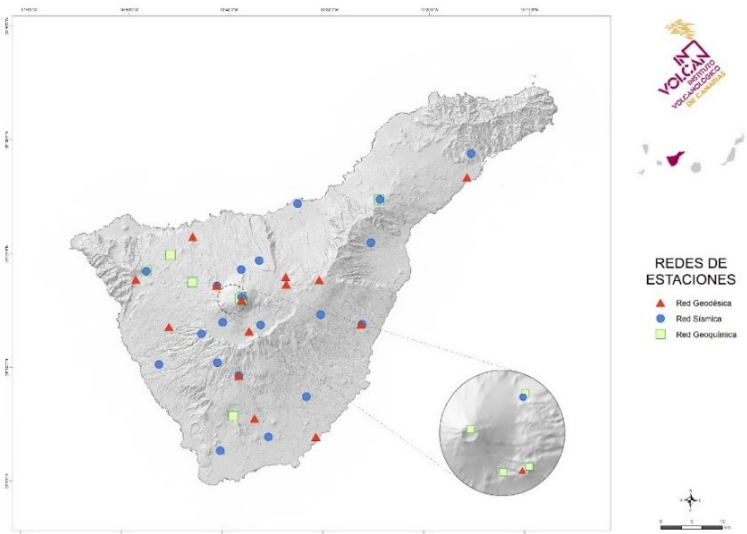


Fig. 11. Redes instrumentales permanentes multidisciplinares para la monitorización de la actividad volcánica en la Isla de Tenerife.

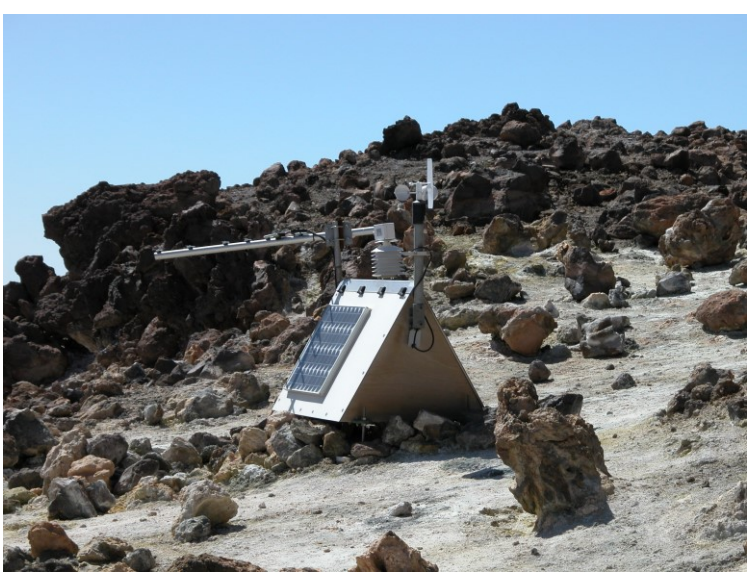


Fig. 12. Estación geoquímica para la vigilancia volcánica de Tenerife instalada en la zona sumital del volcán Teide en 1999.

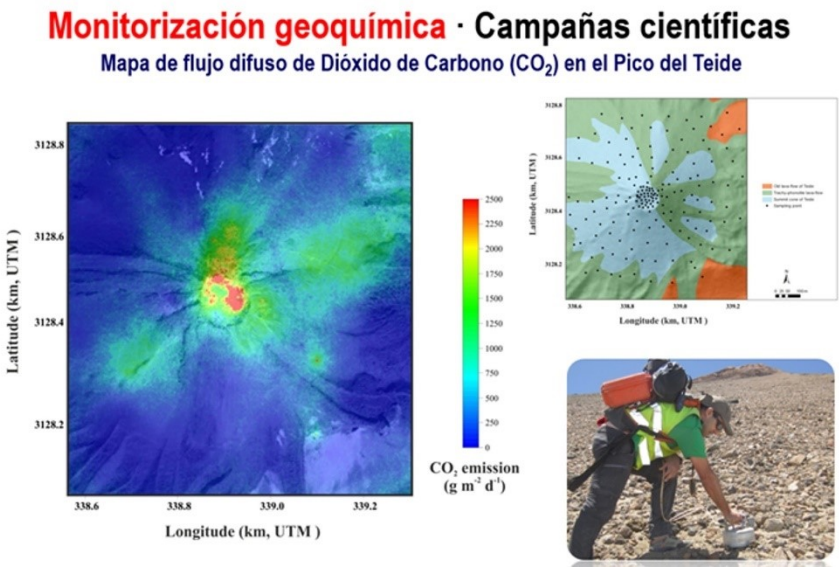


Fig. 13. Campañas científicas periódicas de flujo difuso de dióxido de carbono (CO_2) en la zona sumital del volcán Teide para la vigilancia volcánica de Tenerife.

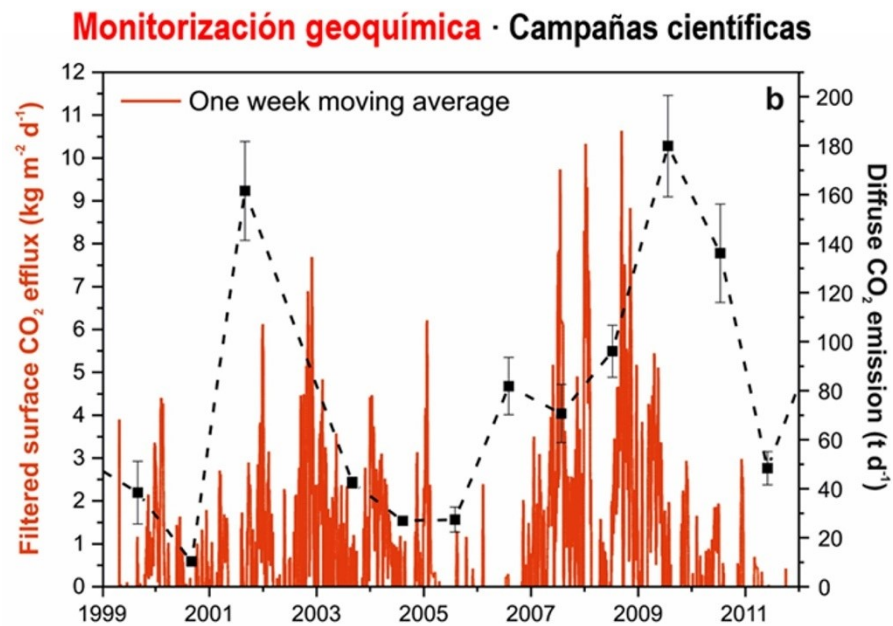


Fig. 14. Evolución temporal de la emisión difusa de dióxido de carbono (CO_2) en la zona sumital del volcán Teide a través de la estación geoquímica TF01 (línea roja) y estimada para el Pico del Teide (cuadrados negros).

Una perspectiva histórica sobre la gestión científica del riesgo volcánico en Canarias

En este apartado se describen algunos hechos relevantes, desde principios del siglo XX, que permiten proporcionar una perspectiva histórica sobre la gestión del riesgo volcánico en España; dígase Canarias, la única zona del territorio nacional expuesta a este riesgo natural. Muchos de estos antecedentes se encuentran estrechamente ligados a la necesidad de contar en Canarias con un Observatorio o Instituto Volcanológico cuya finalidad fuera la de promover el conocimiento de la volcanología y ejecutar todas las acciones científico-técnicas necesarias para contribuir a la reducción del riesgo volcánico en Canarias.

Los primeros antecedentes públicos que se conocen sobre la necesidad de un Observatorio Volcanológico en Canarias aparecen a raíz de la erupción del Chinyero en Tenerife en 1909, y más concretamente, en una publicación de Lucas Fernández Navarro, considerado como el primer vulcanólogo español, sobre la erupción del Chinyero en la revista Anales de la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas en 1911. En dicho documento, Lucas Fernández Navarro manifestaba que la no existencia de un Observatorio Volcanológico en Canarias era una deuda de honor nacional, un crimen de lesa ciencia y un sonrojo para el país. Declaraciones realizadas por una persona consciente de la puesta en marcha de los Observatorios Volcanológicos del Vesubio y Hawái en 1847 y 1909, respectivamente.

La monitorización de la actividad volcánica es una de las principales funciones de un observatorio volcanológico. Con la finalidad de analizar los hechos descritos desde principios del siglo XX hasta la actualidad, en relación a la vigilancia volcánica en Canarias, se utilizará la erupción del Chinyero (1909) como elemento de referencia temporal dado que a raíz de esta erupción se dispone de la primera referencia documental sobre la necesidad de un observatorio volcanológico en Canarias. Enfatizar que la monitorización de la actividad volcánica es una de las principales funciones de un observatorio volcanológico.

En 1949, *transcurridos 40 años desde la erupción del Chinyero,* y tras la erupción del San Juan en La Palma, los medios de comunicación de Canarias fueron los que reflejaron en esta ocasión la necesidad de un centro de esta naturaleza en Canarias para contribuir al avance de la volcanología y transmitir seguridad a la ciudadanía ante este tipo de fenómenos volcanológicos adversos.

En 1971, *transcurridos 62 años desde la erupción del Chinyero,* y a raíz de la erupción del Teneguía en La Palma, los medios de comunicación volvieron hacerse eco de la necesidad de un Observatorio Volcanológico en Canarias, proyecto que periódicamente se disuelve y reaparece coincidiendo con las erupciones del siglo XX en Canarias.

En 1973, *transcurridos 64 años desde la erupción del Chinyero,* la Sección de Volcanología de la Comisión Española de Geodesia y Geofísica propuso al Pleno de esta Comisión la creación de un «Centro de Estudios Volcanológicos en Canarias». Esta propuesta culminó con la creación de una ponencia «ad hoc» nombrada por la Presidencia del Gobierno que, tras distintas peripecias, presenta en 1975 el informe final con un detallado plan que recogía estructura, objetivos, sede y subsedes, presupuesto, etc. Los Cabildos Insulares apoyaron el citado proyecto y se comprometieron a facilitar suelo y el 50% de los gastos (Araña, 2010).

En 1981, *transcurridos 72 años desde la erupción del Chinyero*, el Cabildo Insular de Tenerife impulsa la creación y puesta en marcha de la Estación Volcanológica de Canarias (EVC), como una apuesta conjunta del propio Cabildo Insular y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), para trabajar por la reducción del riesgo volcánico en Canarias. En 1985 la Estación Volcanológica de Canarias (EVC) entra a formar parte del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Canarias (IRNA- CSIC), ahora conocido como Instituto de Productos Naturales y Agrobiología (IPNA-CSIC).

En 1985, *transcurridos 76 años desde la erupción del Chinyero*, a raíz de la catastrófica erupción del Nevado del Ruiz (Colombia), un equipo científico-técnico español, liderado por el vulcanólogo José María Fuster, se desplazó a Colombia para colaborar con la emergencia volcánica y a su regreso elaboraron un informe a través del cual recomendaban a las autoridades españolas la puesta en marcha de un Instituto Volcanológico en Canarias como una apuesta conjunta del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Universidad de La Laguna (ULL), Universidad Complutense de Madrid (UCM), Universidad de Santander y el Instituto Geográfico Nacional (IGN), auspiciado por el Gobierno de Canarias y la Administración General del Estado (Fuster *et al*., 1985).

A finales de los años 80, el Gobierno de Canarias tomó la decisión de financiar al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) la puesta en marcha de una red sísmica instrumental permanente con fines de vigilancia volcánica en Canarias puesto que la Red Sísmica Nacional del IGN en Canarias no contaba con los requisitos técnicos y recursos humanos necesarios para realizar una monitorización sísmica con fines de vigilancia volcánica. Esta apuesta del Gobierno de Canarias, a través de la Estación Volcanológica de Canarias (EVC-CSIC), hacía posible el funcionamiento de una red sísmica instrumental permanente en Canarias compuesta por 9 estaciones sísmicas (1 en La Palma, 1 en El Hierro, 1 en Gran Canaria, 1 en Lanzarote y 5 en Tenerife), y el apoyo de 4 estaciones sísmicas portátiles (Carracedo *et al*., 1992).

En 1996, *transcurridos 87 años desde la erupción del Chinyero*, se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el

Riesgo Volcánico en España y en la misma se describe que el «sistema de vigilancia volcánica en España lo constituyen la Red Sísmica Nacional (IGN) con la colaboración de las redes y estaciones de medición de otros organismos que estén permanentemente ubicadas en el ámbito territorial de Canarias y puedan proporcionar informaciones útiles para la consecución de los objetivos anteriormente expresados, así como las que puedan instalarse en dicho ámbito, por diferentes entidades públicas y privadas».

Desde finales de los 80 hasta 1997, Canarias carece de un programa multidisciplinar para la vigilancia volcánica como así ha recomendado claramente la comunidad científica internacional desde mediados de los 80. Solamente se realizaba una monitorización sísmica, que además no era la adecuada dado el pobre número de estaciones sísmicas, y además no existía un programa regular para monitorización geoquímica (gases) y geodésica (deformación) con fines de vigilancia volcánica.

En 1997, *transcurridos 88 años desde la erupción del Chinyero*, y ante la inexistencia de un programa multidisciplinar para la vigilancia volcánica en Canarias, el Cabildo Insular de Tenerife constituye un grupo volcanológico en el Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER). El objetivo de este grupo fue establecer un programa de monitorización geoquímica (gases) para proporcionar esa necesaria multidisciplinaridad para la vigilancia volcánica en las islas, máxime cuando es ampliamente asumido por la comunidad científica internacional que los gases son la fuerza motriz de las erupciones volcánicas, y de esta forma fortalecer la vigilancia volcánica del archipiélago.

A pesar de los pobres resultados generados durante los primeros 10 años de la red sísmica instrumental permanente del CSIC, financiada por el Gobierno de Canarias para la monitorización sísmica con fines de vigilancia volcánica (Villalba Moreno, 2000; Pérez & Hernández, 2008), la Administración Autonómica firma un nuevo acuerdo con el CSIC en el 2000 por el cual le encarga al CSIC la vigilancia volcánica de Canarias (Araña *et al*., 2001).

En 2004, *transcurridos 95 años desde la erupción del Chinyero*, y con el firme propósito de ir fortaleciendo un programa de vigilancia volcánica multidisciplinar en las islas, el ITER instala las primeras antenas GPS diferenciales en Canarias para poner en marcha una red GPS instrumental permanente en las islas para la monitorización geodésica con fines de vigilancia volcánica en colaboración con la Universidad de Nagoya, Japón (Pérez & Hernández, 2008).

En marzo de 2004 se producen los primeros frutos de la existencia de un programa de vigilancia volcánica multidisciplinar que combinaba el registro de la sismicidad y los gases volcánicos. El análisis realizado por el grupo volcanológico del ITER al evaluar conjuntamente los datos procedentes de la monitorización geoquímica y geofísica registrados desde 1997 reflejaba

que era muy probable que Tenerife pudiera estar experimentando un proceso de reactivación volcánica. Esta observación fue comunicada tanto a las autoridades del Cabildo Insular de Tenerife como a algunos miembros del Comité Científico de Evaluación y Seguimiento de Fenómenos Volcánicos establecido por la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico en España.

A finales de abril de 2004 Tenerife experimentaba un incremento de la actividad sísmica que provocó la convocatoria de una reunión extraordinaria del Comité Científico de Evaluación y Seguimiento de Fenómenos Volcánicos en la sede central de la Protección Civil del Estado en Madrid. El representante del IGN en dicha reunión expresó su creencia de que el incremento de sismicidad registrado en Tenerife y sus alrededores desde mediados de 2001 pudiera estar relacionado con una mejora de la instrumentación sísmica de la red en Canarias al incorporar estaciones sísmicas de banda ancha. Por el contrario, al analizar conjuntamente por primera vez datos procedentes de la monitorización geoquímica y geofísica, los cambios observados en la sismicidad no podían estar relacionados con una mejora de la red sísmica nacional sino con un proceso natural como así expresó el representante del ITER en dicho comité. Observación coherente con un proceso de reactivación volcánica en Tenerife que se postuló durante con un mes de antelación Pérez & Hernández, 2007).

En medio de la crisis sismo-volcánica de Tenerife, que se inició a finales de abril de 2004, la Administración General del Estado (AGE) publica en el Boletín Oficial del Estado (BOE) el 18 de junio de 2004 un Real Decreto (1476/2004), no específico sobre el riesgo volcánico en España, a través del cual el IGN tiene como nueva competencia la «Observación, vigilancia y comunicación de la actividad volcánica y determinación de riesgos asociados». Esta nueva competencia se da a conocer sin consultar ni consensuar con la Comunidad Autónoma de Canarias, además de no ser coherente con el sistema de vigilancia volcánica establecido por la propia Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico en España. Es de resaltar que la gestión del riesgo volcánico en España es una competencia compartida entre la AGE y la Comunidad Autónoma de Canarias; por lo tanto, resulta sorprendente que la AGE tomará una decisión tan importante de forma unilateral.

A raíz del RD 1476/2004, el IGN designa como responsables de la vigilancia volcánica de Canarias a recursos humanos de su plantilla con muy poca o ninguna experiencia sobre el fenómeno volcánico y cuyo lugar de trabajo no sería Canarias sino la sede del IGN en Madrid. Resaltar que por esas fechas en muchos países en vías de desarrollo las personas responsables de los programas de vigilancia volcánica no sólo tenían experiencia en tareas de vigilancia volcánica, sino que además disponían de la titulación adecuada para ejercer este tipo de funciones.

En julio de 2004, a raíz del RD 1476/2004 y entendiendo que ese no era el camino, José Segura Clavell, siendo delegado del Gobierno en Canarias, solicita a un colectivo de científicos del ITER y CSIC la elaboración de un informe sobre la necesidad de un Observatorio Volcanológico en Canarias con la finalidad de ser presentado a quien fuera vicepresidenta primera del Gobierno de España, María Teresa Fernández de la Vega. Dicho documento le fue entregado el 3 de noviembre de 2004 por el delegado del Gobierno en Canarias en presencia de Adán Martín Menis, quien fuera presidente del Gobierno de Canarias, y de Ricardo Melchior Navarro, quien fuera presidente del Cabildo Insular de Tenerife. Finalmente, esta propuesta nunca llegó a ser considerada por la AGE.

Casi 8 meses después de publicarse el RD 1476/2004, el IGN presenta en Madrid, y no en Canarias, en febrero de 2005 su programa para mejora de la vigilancia volcánica de Tenerife (Boletín Informativo-IGN, 2055) ninguneando los esfuerzos realizados por el Cabildo Insular de Tenerife a través del ITER por la vigilancia volcánica, y sin haber invitado a dicha presentación a ningún científico trabajando en vigilancia volcánica de Tenerife que estuviera ligado a instituciones científicas Canarias. Por el contrario, a dicha presentación si fueron invitados investigadores extranjeros de reconocido prestigio internacional. Tras la presentación uno de ellos preguntó que cómo era posible que el nuevo programa del IGN para la vigilancia volcánica no contara con una monitorización geoquímica de los gases volcánicos.

Ante estos tres primeros pasos, no muy afortunados por parte de la AGE a través del IGN, un colectivo de científicos nacionales manifestó a Ricardo Melchior Navarro, quien fuera senador por la isla de Tenerife, su preocupación por las decisiones que se estaban tomando sobre la gestión científica del riesgo volcánico. Este colectivo le presentó una propuesta sobre cómo debiera materializarse esta tarea con criterios de sentido común y responsabilidad pública. Esta propuesta se tradujo en la presentación en el 2005 de una moción al Senado por parte de Ricardo Melchior Navarro para su debate.

En 2005, *transcurridos 96 años desde la erupción del Chinyero*, el Senado aprueba por unanimidad el 2 de noviembre la citada moción instando a la AGE, Comunidad Autónoma de Canarias y los Cabildos Insulares a la creación y puesta en marcha urgente e inaplazable del Instituto Volcanológico de Canarias, como una entidad donde confluyeran todos los recursos humanos y técnicos de las distintas administraciones y entidades que trabajan por la gestión del riesgo volcánico sin perder la titularidad de sus recursos. Esta decisión unánime expresa igualmente la implicación de las dos universidades públicas Canarias con la mencionada entidad (BOCG, 2005). En resumen, la creación de una entidad que sumara todos los esfuerzos públicos para optimizar todos los recursos destinados a la gestión del riesgo

volcánico. A raíz de esta decisión unánime del Senado, más de un centenar de científicos nacionales e internacionales publican, en la prensa de Canarias el 1 de diciembre de 2005 (Fig. 15), un manifiesto aplaudiendo la decisión unánime del Senado sobre la puesta en marcha urgente e inaplazable del Instituto Volcanológico de Canarias (Allard y 115 firmas adicionales, 2005).

El Instituto Volcanológico de Canarias (IVC): una tarea inaplazable

MUCHOS DE LOS ABAJO firmantes asistimos al Symposium Internacional "Reduciendo el Riesgo Volcánico en Islas", celebrado en Granadilla de Abona en junio de 2004. Una de las principales conclusiones de esta reunión científica internacional, cofinanciada por la iniciativa comunitaria INTERREG III B Azores-Madeira-Canarias y organizada por el Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER) y el Centro Volcanológico de Azores (CVARG); fue la necesidad de la puesta en marcha del Instituto Volcanológico de Canarias (IVC) como un organismo autónomo que aglutinara todos los esfuerzos de la sociedad española para la reducción del riesgo volcánico en Canarias.

Por lo tanto, los abajo firmantes queremos expresar nuestra más sincera felicitación al senador por Tenerife, Ricardo Melchior Navarro, por recoger este mensaje de la comunidad científica nacional e internacional y presentar una moción en la Cámara Alta relacionada con esta necesidad. Esta felicitación se extiende a todos los miembros del Senado del Estado español por la reciente aprobación de una enmienda transaccional acordada por todas las fuerzas políticas con representación en la Cámara Alta en la que se insta al Gobierno de España a crear lo antes posible el Instituto Volcanológico de Canarias (IVC).

Esta es una necesidad ya expresada con anterioridad por numerosos científicos y técnicos, tanto españoles como extranjeros, y por ello nos congratulamos que se inicie cuanto antes el proceso para materializar la puesta en marcha de este organismo, que, con toda seguridad, no sólo contribuirá a maximizar los esfuerzos que la sociedad española destina y debe destinar a la reducción del riesgo volcánico en Canarias, sino que, además, contribuirá al desarrollo de la investigación volcanológica, tanto a nivel nacional como internacional.

Suscriben este artículo:

Allard, Patrick (CNRS, Francia); Alonso, Daniel (Univ. La Laguna); Alvarado, Guillermo (ICE, Costa Rica); Aspinall, Willy (Aspinall & Associates, Reino Unido); Bachelery, Patrick (Univ. de la Reunión, Francia); Balcells, Ricardo (Consejo Insular de Aguas de Tenerife); Barahona, Francisco (Univ. de El Salvador, El Salvador);Bellido, Félix (IGME, Madrid); Borges, Teresa (Univ. de La Laguna); Briz, Susana (Univ. Europea de Madrid); Calvache, Marta (INGEOMINAS, Colombia); Calvari, Sonia (INGV-Catania, Italia); Camacho, Antonio (Científico Titular, CSIC); Carrasco, Daniel (INDRA, Madrid); Caprai, Antonio (CNR, Italia); Chiodini, Giovanni (Observatorio Vesuviano, IGNV, Italia); Cioni, Roberto (CNR, Italia); Coello Bravo, Juan J. (Consejo Insular de Aguas de Tenerife); Corretgé, Guillermo (Univ. de Oviedo); Dean, Ken (Geophysical Institute, Univ. Alaska, USA); Dmowska, Renata (Harvard Univ., USA); Doniz, Javier (Univ. La Laguna); Díez, Andrés (IGME, Madrid); Ef-Darwich, Antonio (Univ. La Laguna); Einarsson, Páll (Universidad de Islandia); Evans, Williams (USGS, USA); Fernández, José (Científico Titular, CSIC); Fernández, Mario (Univ. de Costa Rica); Ferreira, Teresa (Centro Vulcanológico de Azores, Portugal); Ferrer, Mercedes (IGME, Madrid) Fujii, Naoyuki (Univ. de Nagoya, Japón); Galindo, Luis (Univ. La Laguna); Galindo, Inés (ITER, Tenerife); García Cortes, Angel (IGME, Madrid); García, Cecilia (Consejo Insular de Aguas de Tenerife); Gaspar, Joao Luis (Centro Vulcanológico de Azores, Portugal); Giordano, Guido (Univ. Roma, Italia); Guidi, Massimo (CNR, Italia); Gómez, Francisca (COTESA, Madrid); González Elena (Univ. de Castilla-La Mancha); González de Vallejo, Luis (Univ. Complutense de Madrid); González, Pablo (ITER, Tenerife); Gurrieri, Sergio (INGV-Palermo, Italia); Hashimoto, Takeshi (Hokkaido University, Japón); Hernández, Luis (Consejería de Infraestructuras, Transportes y Vivienda, GOBCAN); Hernández, Pedro A. (ITER, Tenerife); Italiano, Franco (INGV-Palermo, Italia); Itikari, Ima (Rabaul Volcano Observatory, Papua Nueva Guinea); Kevin, Fleming (GeoForschungsZentrum Potsdam, Alemania); King, Chi-Yu (Earhquake Prediction Research, California, USA); Lain, Luis (IGME, Madrid); López, Dina (Ohio University, USA); Lopez, M. Candelaria (Estudios del Terreno, S.L., Tenerife); Magaña, María Inés (LAGEO, El Salvador); Martínez, Ana (REPSOLYPF, Madrid); Marrero, Rayco (ITER, Tenerife); McGee, Kenneth (USGS, USA); McKee, Chris (Servicio Geológico de Papua Nueva Guina); Melián, Gladys (ITER, Tenerife); Middleton, Jill (Monash University, Australia); Millán Millán, Muñoz (Fundación, CEAM, Valencia); Mori, Toshiya (Univ. de Tokio, Japón); Mota Gomes, A. (ISE, Cabo Verde); Neuberg, Jurgen (The University of Leeds, Reino Unido); Nogami, Kenji (Kusatsu-Shirane Volcano Observatory, Japón); Nolasco, Dácil (ITER, Tenerife); Notsu, Kenji (Universidad de Tokio, Japón); Nuccio, Mario (Univ. de Palermo, Italia); Ohno, Masao (Kyushu Univ., Japón); Okada, Hiromu (Universidad de Hokkaido, Japón); Olmos, Rodolfo (Univ. El Salvador, El Salvador); Oppenheimer, Clive (Cambridge University, Reino Unido); Oramas, Delioma (The University of Coventry, Reino Unido); Padrón, Eleazar (ITER, Tenerife); Palacios, David (Univ. Complutense de Madrid); Palomo, Carlos (Instituto Español de Oceanografía); Pérez , Nemesio M. (ITER, Tenerife); Prieto, Juan (Univ. Politécnica de Madrid, Madrid); Puglisi, Giuseppe (INGV-Catania, Italia); Reischmann, Thomas (Univ. Mainz, Alemania); Rodríguez, José A. (Univ. La Laguna); Rodríguez Pláceres, Cesar (Univ. La Laguna); Rodríguez, Antonio (Univ. La Laguna); Rodríguez, Miguel Angel (Univ. La Laguna); Romero, Carmen (Univ. La Laguna); Roselló, José Ignacio (Fundación CEAM, Valencia); Rymer, Hazel (Open University, Reino Unido); Sala, Rafael (Univ. La Laguna); Sanchez, Mª Jesús (Univ. de La Laguna); Sato, Motoaki (USGS, USA); Sato, Tsutomu (Servicio Geológico Japonés, Japón); Sagiya, Takeshi (Univ. de Nagoya, Japón); Santana, Antonio (Univ. Las Palmas de Gran Canaria); Simizu, Hiroshi (Instituto de Sismología y Volcanología, Universidad de Kyushu, Japón); Solana, Maica (University of Portsmouth, Reino Unido); Sortino, Francesco (INGV-Palermo, Italia); Staudacher, Thomas (Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise, Reunión, Francia); Streil, Thomas (SARAD, Alemania); Tanaka, Yoshikazu (Univ. de Kyoto, Japón); Tarán, Yuri (Univ. Autónoma de México); Tedesco, Dario (Univ. de Nápoles, Italia); Teschner, Manfred (Instituto Federal de Geociencia y Recursos Naturales, Alemania); Tiede, Carola (Darmstadt Tech. Univ., Alemania); Toutain, Jean-Paul (Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise, Reunión, Francia); Trota, Antonio (Univ. de Azores, Portugal); Ukawa, Motoo (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japón); Vajda, Meter (Instituto Geofísico de Eslovaquia); van Bergen, Manfred (Univ. de Utrech, Holanda); Valenza, Mariano (Univ. de Palermo, Italia); Vega, Juan Carlos (Univ. La Laguna); Villalba, Eustaquio (Geógrafo, Tenerife); Virgili, Giorgio (Westsystems, Italia); Wakita, Hiroshi (Univ. de Tokio, Japón); Wallenstein, N. (Univ. de Azores, Portugal); Weber, Konradin (Univ. of Applied Sciences, Dusseldorf, Alemania); Wolfgang, Jacoby (Univ. de Mainz, Alemania); Writter, Jeff (Univ. de Hawai, USA).

Fig. 15. Manifiesto de la comunidad científica nacional e internacional aplaudiendo la decisión unánime del Senado sobre la puesta en marcha urgente e inaplazable del Instituto Volcanológico de Canarias

En 2006, *transcurridos 97 años desde la erupción del Chinyero*, el Parlamento de Canarias sigue la línea del Senado y toma por unanimidad la decisión de instar a la AGE, a la Comunidad Autónoma de Canarias y a los Cabildos Insulares la creación y puesta en marcha urgente e inaplazable del Instituto Volcanológico de Canarias (BOPC, 2006). La propuesta fue presentada a la mesa del Parlamento de Canarias por Francisco Hernández Spínola, quién fuera diputado de la Cámara Legislativa de la Comunidad Autónoma de Canarias. Esta propuesta también fue elaborada por el colectivo de científicos que preparó la propuesta de la moción aprobada en el Senado por unanimidad.

Con motivo de las decisiones unánimes del Senado (2005) y el Parlamento de Canarias (2006), Ramón Miranda Adán, quien fuera

presidente de la Federación Canaria de Municipios (FECAM) remite un escrito al presidente del Gobierno de Canarias y al delegado del Gobierno de Canarias con fecha de 20 de diciembre de 2006 manifestando el apoyo de la FECAM a estas decisiones unánimes e instando a la creación y puesta en marcha urgente e inaplazable del Instituto Volcanológico de Canarias.

El 7 de noviembre de 2007, Mercedes Cabrera, quien fuera ministra de Educación y Ciencia del Gobierno de España, expresó en el pleno del Senado su compromiso y el de la AGE para la puesta en marcha y creación del Instituto Volcanológico de Canarias en coordinación con el Gobierno de la Comunidad Autónoma de Canarias.

Ante la inexistencia de avance alguno por parte de la AGE, José Luis Perestelo Rodríguez, quien fuera diputado en las Cortes Generales, presenta a la Mesa del Congreso de los Diputados en mayo de 2008 una moción para la puesta en marcha urgente e inaplazable del Instituto Volcanológico de Canarias, siguiendo el ejemplo de las declaraciones unánimes del Senado y el Parlamento de Canarias sobre este asunto. Dicha moción fue también elaborada por el colectivo de científicos que preparó las propuestas presentadas y aprobadas por unanimidad en el Senado y el Parlamento de Canarias.

Ante estas iniciativas de las Cámaras Legislativas, Rafael Rodrigo, quien fuera presidente del CSIC, propone la elaboración de un convenio ITER-CSIC-IGN que firman sus respectivos representantes legales en noviembre de 2008. La finalidad de este protocolo era coordinar las tareas de vigilancia volcánica en Canarias e impulsar la decisión unánime del Senado para la creación del Instituto Volcanológico de Canarias, como así se refleja en el citado documento. Protocolo que finalmente no cristalizó puesto que Alberto Sereno y Rafael Rodrigo, quienes fueran representantes legales del IGN y CSIC, respectivamente, no compartían la decisión adoptada unánimemente por el Senado sobre la necesidad de crear el Instituto Volcanológico de Canarias.

Ante la presentación de una moción en el Congreso de los Diputados sobre la necesidad del Instituto Volcanológico de Canarias y a raíz de un Consejo de Ministros celebrado en Las Palmas de Gran Canaria en octubre de 2009, el presidente José Luis Rodríguez Zapatero anuncia públicamente en rueda de prensa que el Instituto Volcánico de Canarias será una realidad en el primer semestre de 2010.

En 2009, *transcurridos 100 años desde la erupción del Chinyero*, se debate el 2 de diciembre la moción presentada en el Congreso de los Diputados y la misma arranca una manifestación unánime del Congreso de los Diputados instando a la AGE, a la Comunidad Autónoma de Canarias y a los Cabildos Insulares la creación y puesta en marcha urgente e inaplazable del Instituto Volcanológico de Canarias (BOCG, 2009).

En 2010, *transcurridos 101 años desde la erupción del Chinyero,* ante el incumplimiento de las declaraciones públicas realizadas en Canarias por el presidente José Luis Rodríguez Zapatero en octubre de 2009 y tras haber pasado casi 5 años de la declaración unánime del Senado del 2 noviembre de 2005, Ricardo Melchior Navarro, en calidad de representante de una de las administraciones llamadas a dar un paso al frente, anuncia públicamente que el Cabildo Insular de Tenerife pondrá en marcha el Instituto Volcanológico de Canarias esperando que se sumen el resto de las administraciones públicas con la finalidad de materializar las decisiones unánimes de las cámaras legislativas. Esta declaración fue realizada durante la ceremonia de apertura de la sexta edición de la mayor conferencia internacional sobre gestión del riesgo volcánico (Cities on Volcanoes 6) que se celebraba en España, más concretamente en el Puerto de la Cruz (Tenerife) del 31 de mayo al 4 de junio de 2010 y en la que participaron 835 congresistas procedentes de 53 países.

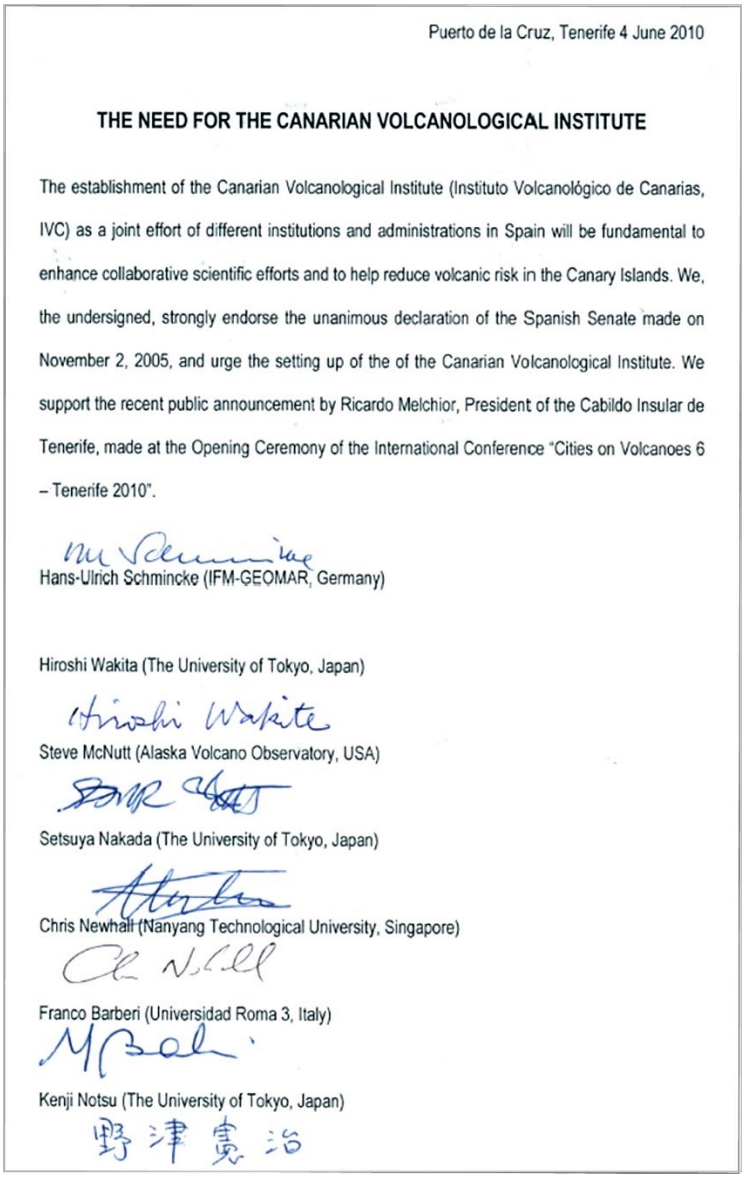
Durante la ceremonia de clausura de esta conferencia internacional destacados miembros de la Asociación Internacional de Volcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI), entre ellos presidentes y secretarios generales de la IAVCEI, manifestaron su apoyo al anuncio de la puesta en marcha del Instituto Volcanológico de Canarias por parte de Ricardo Melchior, en calidad de presidente del Cabildo Insular de Tenerife (Fig. 16).

Ante esta declaración, Alberto Sereno Álvarez, quien fuera director general del IGN envía el 30 de julio de 2010 un escrito al presidente del Cabildo de Tenerife en el que manifiesta literalmente «*En cuanto a nuestra colaboración con el recién creado Instituto Volcanológico de Canarias, y como es norma del IGN y hemos venido haciendo durante estos últimos años, toda la información generada o a disposición de nuestro Instituto que tenga alguna relación con el riesgo volcánico en Canarias continuará estando a disposición del Institución Volcanológico de Canarias por los cauces o procedimientos que considere oportunos el propio Instituto Volcanológico de Canarias y se establezcan al efecto*». Al igual que ocurrió con el protocolo de colaboración entre ITER-IGN-CSIC firmado en noviembre de 2008, el representante legal del IGN volvía a incumplir sus compromisos firmados.

En julio de 2011 comenzaba la crisis sismo-volcánica de El Hierro y los recursos técnicos que el IGN disponía en esos momentos para la vigilancia volcánica en la isla eran los mismos que tenían en 2004, siete años después de asumir funciones de vigilancia volcánica. Solo contaba en El Hierro con dos estaciones sísmicas y carecía de un programa de vigilancia volcánica multidisciplinar.

En 2014, *transcurridos 105 años desde la erupción del Chinyero,* la Asamblea General de la Federación Canaria de Islas (FECAI) a propuesta de Anselmo Pestana, quién fuera presidente del Cabildo Insular de La Palma, solicita por unanimidad el cumplimiento de las decisiones unánimes del

Senado, Parlamento de Canarias y Congreso de los Diputados sobre el Instituto Volcanológico de Canarias (FECAI, 2014).



Puerto de la Cruz, Tenerife 4 June 2010

THE NEED FOR THE CANARIAN VOLCANOLOGICAL INSTITUTE

The establishment of the Canarian Volcanological Institute (Instituto Volcanológico de Canarias, IVC) as a joint effort of different institutions and administrations in Spain will be fundamental to enhance collaborative scientific efforts and to help reduce volcanic risk in the Canary Islands. We, the undersigned, strongly endorse the unanimous declaration of the Spanish Senate made on November 2, 2005, and urge the setting up of the of the Canarian Volcanological Institute. We support the recent public announcement by Ricardo Melchior, President of the Cabildo Insular de Tenerife, made at the Opening Ceremony of the International Conference "Cities on Volcanoes 6 – Tenerife 2010".

Hans-Ulrich Schmincke (IFM-GEOMAR, Germany)

Hiroshi Wakita (The University of Tokyo, Japan)

Steve McNutt (Alaska Volcano Observatory, USA)

Setsuya Nakada (The University of Tokyo, Japan)

Chris Newhall (Nanyang Technological University, Singapore)

Franco Barberi (Universidad Roma 3, Italy)

Kenji Notsu (The University of Tokyo, Japan)

Fig. 16. Manifiesto de destacados miembros de la comunidad científica, mayoritariamente científicos que han ostentado cargos de presidente y secretarios generales de la IAVCEI, apoyando el anuncio de la puesta en marcha del Instituto Volcanológico de Canarias, durante la ceremonia de apertura de la conferencia internacional «Cities on Volcanoes 6-Tenerife 2010».

En mayo de 2015 se descubre la existencia de una supuesta «contabilidad B» del IGN sobre la actividad sísmica registrada en Tenerife. El número de eventos sísmicos registrados en Tenerife y sus alrededores en el 2010 según el catálogo sísmico nacional, que es público, era de aproximadamente 60 eventos por aquel entonces, mientras que otra contabilidad de eventos sísmicos no público del IGN para Tenerife y sus alrededores era de 1.176 eventos sísmicos registrados en el 2010 (Pérez & Schmincke, 2016).

En el 2016, transcurridos 12 años después del RD 1476/2004 a través del cual se encarga al IGN la vigilancia volcánica, la vigilancia volcánica de Tenerife sólo contaba con 8 estaciones sísmicas, un número de estaciones insuficiente para realizar una monitorización sísmica Muchos expertos en sismicidad volcánica consultados habían manifestado que Tenerife debería contar como mínimo con una red de 15 estaciones sísmicas. Ante esta realidad y la denuncia de la existencia de dos diferentes registros de eventos sísmicos para Tenerife, el Instituto Volcanológico de Canarias pone en marcha la Red Sísmica Canaria (C7) en el 2016 compuesta por 15 estaciones sísmicas permanentes para la monitorización sísmica con fines de vigilancia volcánica de la isla de Tenerife.

En el 2017, transcurridos 13 años después del RD 1476/2004, es cuando el IGN mejora la monitorización sísmica para la vigilancia volcánica de Tenerife, pasando su red sísmica instrumental permanente de 8 a 16 estaciones, y su programa para la vigilancia volcánica en La Palma que contaba prácticamente con los mismos recursos que en 2004.

En 2021, transcurridos 17 años después del RD 1476/2004, el IGN no disponía de recursos humanos ni técnicos para realizar la monitorización de la emisión de dióxido de azufre (SO_2) a la atmósfera a través del penacho volcánico generado por la erupción de Tajogaite; un parámetro de importancia para la evaluación de un proceso eruptivo como así se pudo observar para pronosticar el final de la erupción de Tajogaite.

En 2021, *transcurridos 112 años desde la erupción del Chinyero,* el Gobierno de Canarias anuncia su compromiso de entrar a formar parte del Instituto Volcanológico de Canarias en el ejercicio del 2022 reconociendo públicamente uno de sus consejeros, José Antonio Valbuena, que con esta decisión el ejecutivo autonómico de la X Legislatura estaba enmendando un error de anteriores ejecutivos regionales. La realidad es que el ejecutivo del presidente Ángel Víctor Torres tampoco cumplió lo anunciado públicamente por su gobierno.

En 2022, *transcurridos 113 años desde la erupción del Chinyero,* la AGE anuncia públicamente la puesta en marcha de un Centro Nacional de Volcanología en Canarias, como una entidad que aglutinaría todos los recursos humanos y técnicos destinados por la gestión científica del riesgo volcánico, y que dicho centro estaría en Canarias. Con este anuncio la AGE

reconoce que el modelo del RD 1476/2004 a través del cual se le daban competencias exclusivas al IGN no era el camino a seguir. Lo sorprendente de este anunció es que la AGE no termina de ser consciente que ya existe un centro de esta naturaleza en Canarias y que además dispone del apoyo unánime de las Cámaras Legislativas de nuestro país; las declaraciones políticas-científicas más sólidas realizadas durante los últimos 100 años; unánimes, sin color político y con una carga inconmensurable de sentido común y responsabilidad pública. Por lo tanto, lo que debiera de hacer la AGE es entrar a formar parte del Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan) y de esta forma cumplimentar las decisiones unánimes de las Cámaras Legislativas.

Ante este anuncio de la AGE, los medios de comunicación divulgaron un manifiesto firmado por 218 investigadores vinculados a 102 instituciones científico/académicas de 37 países apoyando las declaraciones unánimes de las Cámaras Legislativas y solicitando a todas las administraciones públicas el compromiso con las mismas (Barker y 220 firmas adicionales de la comunidad científica nacional e internacional, 2022). Entre los firmantes destacar a los científicos Salvador Ordóñez, quien fuera secretario de Estado de Universidades e Investigación del Gobierno de España, y Franco Barberi, quien fuera ministro de Coordinación de la Protección Civil en el Gobierno de Italia. El contenido íntegro de dicho manifiesto, publicado en toda la prensa de Canarias el pasado 18 de septiembre de 2022, se muestra a continuación.

Una apuesta de presente y futuro para la gestión científica del riesgo volcánico en España

La gestión científica del riesgo volcánico en España durante los últimos 18 años ha dejado claramente de manifiesto que el modelo derivado del Real Decreto 1476/2004 no era el idóneo. A diferencia de este modelo, el que debería seguirse es el que ha marcado las decisiones unánimes del Senado (2005), Parlamento de Canarias (2006) y Congreso de los Diputados (2009). Este modelo inclusivo, nacido en las Cámaras Legislativas, refleja que todos los recursos humanos y técnicos que se dedican a la gestión científica del riesgo volcánico en España, desde las diferentes administraciones y entidades asociadas, deben trabajar bajo una misma estructura que sería el Centro Nacional de Volcanología y que se denomina Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan) porque el mismo está y debe seguir situado en Canarias. Un modelo inclusivo que además ha sido previamente solicitado desde la década de los 80 por destacados miembros de la comunidad científica española ligados a la volcanología (Fuster J.M. *et al*. 1985).

Estas declaraciones unánimes de las Cámaras Legislativas recibieron el apoyo de un centenar de investigadores nacionales y foráneos en el 2005, a raíz de la primera declaración unánime en el Senado, de destacados científicos e importantes cargos de la Asociación Internacional de Volcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI) a través de un manifiesto presentado en la sexta edición de la mayor conferencia internacional sobre gestión del riesgo

volcánico en el mundo que se celebró en la Isla de Tenerife en el 2010, así como de las Asambleas Generales de la Federación Canaria de Municipios (FECAM) en el 2008 y Federación Canaria de Islas (FECAI) en el 2014.

Estas declaraciones unánimes reflejan igualmente que deben existir sedes del Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan) en La Palma, El Hierro y Lanzarote, al tratarse de islas que han experimentado erupciones históricas en Canarias, pero incluso en Gran Canaria, una isla volcánicamente activa al haber sido escenario de una veintena de erupciones durante los últimos 10.000 años. Ello sin dejar de mencionar y enfatizar que la sede principal de esta entidad debe estar en Tenerife al tratarse de la zona del territorio nacional con mayor riesgo volcánico en España y por la presencia del volcán Teide, uno de los 16 Volcanes de la Década catalogado así por la IAVCEI y la UNESCO a raíz del Decenio para la Reducción de Desastres Naturales establecido por la Asamblea General de las Naciones Unidas (1990-99).

El Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan) está creado desde el año 2011 gracias al compromiso del Cabildo Insular de Tenerife con las declaraciones unánimes de las Cámaras Legislativas, y a la espera que se fueran sumando el resto de administraciones públicas (AGE, Gobierno Autónomo de Canarias y demás Cabildos Insulares). Después de 10 años de su creación y puesta en marcha, el Gobierno Autónomo de Canarias anunciaba públicamente su participación en el Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan) y su Consejero de Transición Ecológica, Lucha contra el Cambio Climático y Planificación Territorial se expresaba públicamente así en diciembre de 2021; «el actual ejecutivo regional está enmendando un error de anteriores ejecutivos del Gobierno de Canarias entrando a formar parte del Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan) como así se solicita en las declaraciones unánimes de las Cámaras Legislativas». Recientemente y después de 18 años, la Administración General del Estado (AGE) ha reconocido igualmente que el organismo público responsable de la gestión científica del riesgo volcánico en España deba tener su residencia en Canarias; por lo tanto, esperamos y deseamos que la AGE siga los mismos pasos del Gobierno de Canarias y entre a formar parte del Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan) como así solicitan las declaraciones unánimes de las Cámaras Legislativas.

El fortalecimiento del Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan) o Centro Nacional de Volcanología, como un organismo autónomo co-financiado por la Administración General del Estado (AGE), Gobierno de Canarias y Cabildos Insulares, y con la participación de las dos Universidades Públicas Canarias promoviendo que el INVOLCAN pueda adquirir la figura de Instituto Universitario de Investigación adscrito a la ULPGC y ULL, debe ser la herramienta básica y fundamental para coordinar todas las acciones científico-técnicas destinadas a la reducción del riesgo volcánico en Canaria y minimizar todos los problemas y amenazas que en la actualidad ocurren como consecuencia de la descoordinación existente en esta materia.

El valor del progreso científico es el parámetro fundamental que determina la resiliencia futura de las comunidades. Durante la reciente erupción ocurrida en La Palma, el papel desempeñado por Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan) fue un claro ejemplo de aplicación de un modelo inclusivo al coordinar a 241 investigadores (nacionales y foráneos) que desarrollan su labor científica en 79 instituciones de 21 países. Una apuesta que resultó muy beneficiosa para la gestión científica de la emergencia y el progreso científico.

En Canarias ha existido, existe y existirá talento y compromiso por el progreso científico para contribuir al desarrollo de la sociedad. El Instituto

Astrofísico de Canarias (IAC), una entidad científica de referencia a nivel internacional, nació como una apuesta del Cabildo Insular de Tenerife y la Universidad de La Laguna (ULL), a la que posteriormente se sumaron la AGE y el Gobierno de Canarias. El Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan), una entidad científica que ha tenido un papel relevante durante la reciente erupción de Tajogaite, nació igualmente como una apuesta del Cabildo Insular de Tenerife y el Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER) en el 2011, y desde su puesta en marcha ha estado esperando a que la AGE, el Gobierno de Canarias y el resto de Cabildos Insulares se sumen a este proyecto científico, engendrado por unanimidad en las Cámaras Legislativas, y cuya proyección de futuro será emular el éxito que ha supuesto el IAC para el progreso científico y el desarrollo de la sociedad.

El colectivo de científicos abajo firmantes, compuesto por investigadores en diferentes etapas de su carrera profesional, quiere expresar que es ahora el momento de apelar a la sensibilidad y la responsabilidad de todas las administraciones públicas españolas con competencias sobre el desarrollo y el futuro del archipiélago canario y materializar sin reservas las decisiones unánimes de las Cámaras Legislativas sobre la necesidad del Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan) como una apuesta conjunta de todas las administraciones sin más aplazamientos y con todas sus consecuencias. Al fin y al cabo, de lo que se trata es de contribuir a la seguridad ciudadana y al bienestar social de Canarias, promoviendo de paso el desarrollo sostenible, justo y equitativo de las comunidades que residen en zonas volcánicamente activas como la nuestra.

Referencia: Fuster J.M., Cendrero A., Carracedo J.C., et al. (1985). Cuadernos de Protección Civil, Noviembre-Diciembre, 9-12.

Firmantes: 1. Abigail Barker (Uppsala University, Suecia) 2. Ailsa Naismith (Bristol University, Reino Unido) 3. Alba Martín Lorenzo (ITER, España) 4. Alessandro La Spina (INGV-Catania, Italia) 5. Alexander Stewart (University of Manchester, Reino Unido) 6. Amalia Jiménez Bautista (Universidad de Oviedo, España) 7. Ana Miranda Hardisson (Involcan, España) 8. Andrea L. Rizzo (INGV-Milano, Italia) 9. Andreas Klügel (University of Bremen, Alemania) 10. Andrés Libardo Sandoval Velasquez (INGV-Palermo, Italia) 11. Ángel Rodríguez (ULPGC, España) 12. Antonio Cendrero (Real Academia de Ciencias de España) 13. Antonio Delgado (IACT-CSIC, España) 14. Antonio Eff-Darwich (ULL, España) 15. Antonio González Ramos (ULPGC, España) 16. Araceli García Yeguas (Universidad de Granada, España) 17. Arià Palau Erena (Involcan, España) 18. Aridane González (ULPGC, España) 19. Arndt Schimmelmann (Indiana University, USA) 20. Bárbara Socas Rodríguez (ULL, España) 21. Benjamín J. González Díaz (ULL, España) 22. Beverley Claire Coldwell (ITER, España) 23. Blanca Bauluz Lázaro (Universidad de Zaragoza, España) 24. Bruno Massa (Università degli Studi del Sannio, Italia) 25. Calin Baciu (Babes-Bolyai University, Rumanía) 26. Carlo Doglioni (presidente INGV, Italia) 27. Carmen Dolores Arbelo Rodríguez (ULL, España) 28. Carmen Romero Ruíz (ULL, España) 29. Carmen Solana (The University of Portsmouth, Reino Unido) 30. Catarina da Silva (Universidade dos Açores, Portugal) 31. Cayetano Guillén (EUTUR-ULL, España) 32. Cecilia Amonte (ITER, España) 33. Charline Lormand (Durham University, Reino Unido) 34. Ching-Chou Fu (Academia Sinica, Taiwan) 35. Cinzia G. Caruso (INGV-Palermo, Italia) 36. Claudia Rodríguez (ITER, España) 37. Costanza Bonadonna (University of Geneva, Suiza) 38. Cristina de Ignacio (Univ. Complutense de Madrid, España) 39. Christopher Kilburn (University College London, Reino Unido) 40. Daniele Andronico (INGV-Catania, Italia) 41. Daniele Giordano (University of Turin, Italia) 42. Daphne Katherine Sagel Aguilar (Universidad de Granada, España) 43. David Afonso Falcón (Involcan, España) 44. David Calvo (Involcan, España) 45. David Martínez van Dorth (ITER, España) 46. Deanne Bird (University of Iceland, Islandia) 47. Denise Le Maitre Noda (Involcan, España) 48. Dina L. López (Ohio University, USA) 49. Domingo Gimeno (Universitat de Barcelona, España) 50. Doro Niagn (University of Dakar, Senegal) 51. Einat Lev (Columbia University, USA) 52. Eleazar Padrón González (ITER, España) 53. Elías Sánchez Cañadillas (ULPGC/ULL, España) 54. Emma Liu (University College London, Reino Unido) 55. Estela Escobar Lahoz (Universidad de Castilla La

Mancha, España) 56. Esther Beltrán Yanes (ULL, España) 57. Eveling Espinoza Jaime (INETER, Nicaragua) 58. Fátima Rodríguez García (INVOLCAN, España) 59. Fátima Viveiros (Universidade dos Açores, Portugal) 60. Federico Casetta (University of Vienna, Austria) 61. Fernando Sabaté Bel (ULL, España) 62. Flora Giudicepietro (INGV-Napoli, Italia) 63. Floriane Chouraqui (Université de Tours, France) 64. Francesca Bianco (INGV-Napoli, Italia) 65. Francesco Italiano (INGV-Palermo, Italia) 66. Francesco Sortino (INGV-Palermo, Italia) 67. Franco Barberi (exministro de Coordinación de la Protección Civil, Gobierno de Italia) 68. Francisco García-Talavera (Geólogo, ex-director MUNA, España) 69. Francisco J. Pérez Torrado (ULPGC, España) 70. Gaetana Ganci (INGV-Catania, Italia) 71. Galip Yuce (Hacettepe University, Turquía) 72. George Papatheodorou (University of Patras, Grecia) 73. Germán D. Padilla Hernández (ITER, España) 74. Giovanni Chiodini (INGV-Bolognia, Italia) 75. Giovanni Martinelli (INGV-Palermo, Italia) 76. Giuseppe Solaro (IREA-CNR, Italia) 77. Gladys V. Melián Rodríguez (ITER, España) 78. Glyn Williams-Jones (Simon Fraser University, Canada) 79. Guido Giordano (Università degli Studi Roma Tre, Italia) 80. Guillermo Caravantes (Austin Bridgeporth Ltd., Reino Unido) 81. Guodong Zheng (China University of Geosciences at Wuhan, China) 82. Hans-Ulrich Schimincke (GEOMAR, Alemania) 83. Heinrich Brasse (Free University of Berlin, Alemania) 84. Hirochika Sumino (The University of Tokyo, Japón) 85. Hiromu OKADA (Hokkaido University, Japón) 86. Hiroshi Shimizu (Kyushu University, Japón) 87. Hiroshi Wakita (The University of Tokyo, Japón) 88. Hugo Delgado Granados (UNAM, México) 89. Iván Cabrera Pérez (Involcan, España) 90. Ivan Kulakov (Novosibirsk State University, Rusia) 91. Jacopo Taddeucci (INGV-Roma 1, Italia) 92. Jaime Cuevas Rodríguez (Univ. Autónoma de Madrid, España) 93. Jaime Salvador Díaz Pacheco (ULL, España) 94. James Hickey (University of Exeter, Reino Unido) 95. Jane Hannah Scarrow (Universidad de Granada, España) 96. Janire Prudencio (Universidad de Granada, España) 97. Javier Dóniz (ULL, España) 98. Jean Soubestre (Institut des Sciences de la Terre, Francia) 99. Jens Heinicke (TU Bergakademie Freiberg, Alemania) 100. Jersy Mariño (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Perú) 101. Jesús Ibáñez (Universidad de Granada, España) 102. Jesús Martínez Frías (IGEO-UCM/CSIC, España) 103. Jesús Rivera Martínez (IEO-CSIC, España) 104. Joaquín Brito (PLOCAN, España) 105. Johan Knapen (Instituto de Astrofísica de Canarias, España) 106. Johan C. Varekamp (Wesleyan University, USA) 107. John P. Lockwood (University of Hawaii at Hilo, USA) 108. Jorge Arturo Brenes Marín (OVSICORI, Costa Rica) 109. José Barrancos Martínez (ITER, España) 110. José S. Gómez Soliño (Ex-Rector de la ULL, España) 111. José C. Hernández Pérez (ULL, España) 112. José M. Pereira (Universidade de Cabo Verde) 113. José A. Rodríguez Losada (ULL, España) 114. José M. Rodrigues Pacheco (Universidade dos Açores, Portugal) 115. José L. Sánchez de la Rosa (ULL, España) 116. José Pablo Sibaja Brenes (Universidad Nacional, Costa Rica) 117. Jose G. Viramonte (CONICET, Argentina) 118.Juan J. Coello Bravo (Fundación Telesforo Bravo-Juan Coello) 119. Juan Gómez Barreiro (Universidad de Salamanca, España) 120. Juan Ledo (Universidad Complutense de Madrid, España) 121. Juan Lorenzo (Louisiana State University, USA) 122. Juan Morales Sánchez-Migallón (Univ. Salamanca, España) 123. Juan Ruiz Arzola (Ex–director de la ACIISI-GOBCAN, España) 124. Judit González Santana (Penn State University, USA) 125. Judite Medina Nascimento (Ex-Rectora Univ. de Cabo Verde) 126. Jun Okada (Japan Meteorological Agency, Japón) 127. Karoly Nemeth (Massey University, Nueva Zelanda) 128. Katarzyna Ślęzak (Geophysics, Chile) 129. Kenji Nogami (Tokyo Institute of Technology, Japón) 130. Klaudia Cyrzan (Universidade dos Açores, Portugal) 131. Konradin Weber (Düsseldorf Univ. Applied Sciences, Alemania) 132. Lennart de Groot (Utrecht University, Países Bajos) 133. Ligdamis Gutiérrez Espinoza (Universidad de Granada, España) 134. Lizzette Rodríguez (Universidad de Puerto Rico, Puerto Rico) 135. Luca Caricchi (University of Geneva, Suiza) 136. Luca D'Auria (ITER, España) 137. Lucía Domínguez Barragán (University of Geneva, Suiza) 138. Luciano Zuccarello (INGV-Pisa, Italia) 139. Luis Enrique Hernández (GOBCAN, España) 140. Luis Galindo Martín (ULL, España) 141. Luis González de Vallejo (Univ. Complutense de Madrid, España) 142. Luisa Macedo Franco (Obs. Vulcanológico del Sur-IGP, Perú) 143. Magdalena Santana Casiano (ULPGC, España) 144. Manuel Regueiro González-Barros (CSIC, España) 145. Marco Pistolesi (Università di Pisa, Italia) 146. Margherita Polacci (University of Manchester, Reino Unido) 147. Maria Carmencita Arpa (Mapua University, Filipinas) 148. María Asensio Ramos (INVOLCAN, España) 149. Maria Luisa Carapezza (INGV-Roma, Italia) 150. María E. González Cárdenas (Univ. Castilla La Mancha, España) 151. María Martínez Cruz (OVSICORI, Costa Rica) 152. Maria Asunción Riaza García (IGME-CSIC, España) 153. María Isabel Sánchez Bonilla (ULL, España) 154. Mary-Ann del Marmol (Ghent University, Bélgica) 155. Matthew James Linton (Lancaster University, Reino Unido) 156. Matthew James Pankhurst (ITER, España) 157. Mauricio Bretón

(Universidad de Colima, México) 158. Mauro Antonio Di Vito (INGV-Napoli, Italia) 159. Melchor González Dávila (ULPGC, España) 160. Mercedes Ferrer (IGME-CSIC, España) 161. Mercedes Suárez Barrios (Universidad de Salamanca, España) 162. Micol Todesco (INGV-Bologna, Italia) 163. Miguel Ángel Rodríguez Delgado (ULL, España) 164. Millán M. Millán (Designer of the COSPEC, España) 165. Mitchell Kirshner (University of Arizona, USA) 166. Mónica Arencibia Hernández (Involcan, España) 167. Monika Przeor (ITER, España) 168. Nemesio M. Pérez (ITER, España) 169. Olivia Ashton Barbee (Whitman College, USA) 170. Pablo Rey Devesa (Universidad de Granada, España) 171.Páll Einarsson (University of Iceland, Islandia) 172. Patricia Erfurt (Geoturismo Australia) 173. Pedro A. Hernández (GOBCAN, España) 174. Perla Piña-Varas (Universitat de Barcelona, España) 175. Piergiorgio Scarlato (INGV-Roma 1, Italia) 176. Pierre Delmelle (UCLouvain, Bélgica) 177. Pietro Tizzani (IREA-CNR, Italia) 178. Rafael Becerra Ramírez (Univ. Castilla La Mancha, España) 179. Rafael Ubaldo Gosálvez Rey (Univ. Castilla La Mancha, España) 180. Rafael Robaina (Ex-Rector de la ULPGC, España) 181. Raffele Castaldo (IREA-CNR, Italia) 182. Rakip Hysenaj (Geological Survey of Albania) 183. Ricardo Guerrero Lemus (ULL, España) 184. Riccardo Civico (INGV-Roma 1, Italia) 185. Riky Gustavo Centeno Quico (Instituto Geofísico del Perú) 186. Rita Carmo (Universidade dos Açores, Portugal) 187. Rita Melo da Silva (Universidade dos Açores, Portugal) 188. Rosario Peluso (INGV-Napoli, Italia) 189. Rosella Nave (INGV-Napoli, Italia) 190. Rubén García Hernández (Involcan, España) 191. Ryunosuke Kazahaya (Geological Survey of Japan, AIST, Japón) 192. Salvador Ordoñez (Ex–secretario de Estado de Universidades y Ciencia, Gobierno de España) 193. Salvatore Giammanco (INGV-Catania, Italia) 194. Samara Dionis (ITC, España) 195. Santiago Arellano (Chalmers University of Technology, Suecia) 196. Santos Barrios Sánchez (Universidad de Salamanca, España) 197. Sergio Rodríguez González (IPNA/CSIC, España) 198. Sonia Calvari (INGV-Catania, Italia) 199. Sónia Silva Victória (Universidade de Cabo Verde) 200. Sttefany Cartaya Arteaga (INVOLCAN, España) 201. Susi Pepe (IREA-CNR, Italia) 202. Szabolcs Harangi (Eötvös University Budapest, Hungría) 203. Takeshi Sagiya (Nagoya University, Japón) 204. Taryn Lopez (Alaska Volcano Observatory, USA) 205. Tehnuka Ilanko (University of Waikato, Nueva Zelanda) 206. Theofilos Toulkeridis (ESPE, Ecuador) 207. Tobias Fischer (University of New Mexico, USA) 208. Tomás Soriano (Universidad de El Salvador, El Salvador) 209. Toshiya Mori (University of Tokyo, Japón) 210. Tracey Coates (Kingston University, Reino Unido) 211. Tullio Ricci (INGV-Roma 1, Italia) 212. Ulrich Kueppers (Ludwig-Maximilians-Universität, Alemania) 213. Urumu Tsunogai (Nagoya University, Japón) 214. Vera Isabel Barros Alfama (Universidade de Cabo Verde) 215. Víctor Ortega Ramos (Involcan, España) 216. Vincenzo Convertito (INGV-Napoli, Italia) 217. Vittorio Zanon (Universidade dos Açores, Portugal) 218. William Hernández Ramos (Involcan, España) 219. Xavier Querol Carceller (IDAEA-CSIC, España) 220. Yuji Sano (Koichi University, Japón) 221. Yuri Taran (UNAM, México)

El análisis cronológico de los antecedentes descritos con anterioridad pone de manifiesto las diversas dificultades que han existido para la materialización de una demanda histórica y necesaria por la reducción del riesgo volcánico en Canarias. Resaltar que muchos de los antecedentes descritos con anterioridad sobre la vigilancia volcánica en Canarias fueron censurados por la revista digital del Consorcio de Compensación de Seguros cuando se me solicitó escribir un artículo para la misma sobre el Riesgo Volcánico en España (Pérez, 2021). Por lo tanto, es el momento de apelar a la sensibilidad y la responsabilidad de todas las administraciones públicas españolas con competencias sobre el desarrollo y el futuro del archipiélago canario y materializar sin reservas las decisiones unánimes de las Cámaras Legislativas sobre la necesidad del Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan), como una apuesta conjunta de todas las administraciones sin más aplazamientos y con todas sus consecuencias.

Una perspectiva histórica sobre la gestión civil del riesgo volcánico en Canarias

La gestión del riesgo volcánico no conlleva sólo la puesta en marcha de una entidad bajo la cual se aglutinen todos los recursos humanos y técnicos para la materialización de las acciones científicas destinadas a la reducción del riesgo volcánico en Canarias. También conlleva la gestión de la materialización de acciones de «Protección Civil» que constituyen los planes de emergencia ante el riesgo volcánico. Por lo tanto, en este apartado se describen antecedentes relevantes sobre esta temática que nos ayudarán a evaluar el grado de compromiso que nuestra sociedad en su conjunto (administradores y administrados), ha tenido y tiene por la gestión del riesgo volcánico en España. El término «Protección Civil» no aparece en nuestro país hasta 1960, momento en el que se crea la Dirección General de Protección Civil mediante el Decreto 827/1960, de 4 de mayo. Este decreto reconoce que, si bien el objetivo de la protección civil era organizar y proteger a la población en situaciones de conflicto bélico, también habría que proteger a las poblaciones y bienes en cualquier otra circunstancia que pudiera causar daños y calamidades públicas. Fruto de las primeras acciones de la entonces incipiente Dirección General de Protección fue la Ley 2/1985, de 21 de enero de Protección Civil, la que integra por primera vez la legislación en materia de protección civil en el marco de la Constitución Española (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2013).

Con la finalidad de analizar los hechos descritos por orden cronológico en materia de Protección Civil frente al riesgo volcánico desde finales del siglo XX hasta la actualidad se utilizará principalmente la fecha de la última erupción volcánica subárea ocurrida en Canarias en el siglo XX, la erupción del Teneguía (1971) como elemento de referencia en el tiempo Esta erupción histórica se ha escogido al ocurrir entre los años 1960 y 1985, cuando se promovieron la Dirección General de Protección Civil y la Ley 2/1985 de Protección Civil.

En el año 1996 y *después de 25 años de la erupción del Teneguía (1971)* se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico en España. Esta directriz instaba a la Administración General del Estado (AGE) y a la Comunidad Autónoma de Canarias a elaborar el Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico y el Plan Especial de la Comunidad Autónoma ante el Riesgo Volcánico, respectivamente. La finalidad de estos planes es establecer la organización y procedimientos que permitan asegurar una respuesta eficaz del conjunto de las administraciones públicas en caso de una crisis volcánica.

En el año 2004, *después de 33 años de la erupción del Teneguía (1971) y 8 años después de aprobarse la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico en España*, ni la Administración

General del Estado (AGE) ni la Comunidad Autónoma de Canarias habían elaborado sus respectivos planes de emergencia ante el riesgo volcánico. Ante esta desidia por parte de la AGE y la Administración de la Comunidad Autónoma de Canarias y a raíz de la crisis sismo-volcánica de Tenerife de 2004, las administraciones se ponen a elaborar con urgencia un «Plan de Actuación Coordinada de Protección Civil ante una posible erupción volcánica en la Isla de Tenerife» que es firmado por José Segura Clavell, en representación de la Administración General del Estado, Adán Martín Menis, en representación de la Comunidad Autónoma de Canarias y Ricardo Melchior Navarro, en representación del Cabildo Insular de Tenerife.

En el año 2008, y a raíz del caos mediático ocasionado por la crisis sismo-volcánica de Tenerife 2004-2005, el grupo volcanológico del Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER) pone en marcha el programa educativo «Canarias, una ventana volcánica en el Atlántico» que visita periódicamente los 88 municipios de Canarias. El objetivo final de este programa educativo es contribuir a que Canarias sea una comunidad mejor informada y organizada ante el riesgo volcánico para llegar a ser mucho menos vulnerables. Materializar regularmente un programa educativo para la ciudadanía con la finalidad de contribuir al desarrollo de una sociedad menos vulnerable es uno de los tres pilares básicos de un Plan de Emergencia ante el Riesgo Volcánico.

En el año 2010, *después de 39 años de la erupción del Teneguía (1971) y 14 años después de aprobarse la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico en España*, se aprueba el Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias, PEVOLCA (BOC, 2010).

En el año 2011, *después de 40 años de la erupción del Teneguía (1971) y 15 años después de aprobarse la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico en España*, tiene lugar la erupción submarina de El Hierro (2011-2012; erupción de Tagoro) y continuaba sin existir un Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico demandado desde el año 1996.

En el año 2013, *después de 42 años de la erupción del Teneguía (1971) y 17 años después de publicarse la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico en España*, se aprueba el Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico (BOE, 2013). A diferencia con la Directriz Básica, en el Plan Estatal no se refleja con claridad que el riesgo volcánico en España se delimite a Canarias.

En el año 2018, *después de 47 años de la erupción del Teneguía (1971) y 8 años después de aprobarse la primera edición del PEVOLCA*, se aprueba una nueva versión del Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias,

PEVOLCA (BOC, 2018) a raíz de la erupción submarina de El Hierro en el 2011.

En el año 2019, *después de 48 años de la erupción del Teneguía (1971) y 9 años después de aprobarse la primera edición del PEVOLCA*, no se habían aprobado aún los Planes de Actuación Insular frente al Riesgo Volcánico (PAIVs) de las islas de El Hierro, La Palma, Lanzarote y Tenerife requeridos por el Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA).

En el año 2020, *después de 49 años después de la erupción del Teneguía (1971) y 10 años después de aprobarse la primera edición del PEVOLCA*, se aprueba el Plan de Actuación Insular de Tenerife frente al Riesgo Volcánico (PAIV-Tenerife).

En el año 2021, *después de 50 años de la erupción del Teneguía (1971) y 11 años después de aprobarse la primera edición del PEVOLCA*, tiene lugar la erupción de Tajogaite en la isla de La Palma y no se había aprobado el Plan de Actuación Insular de La Palma frente al Riesgo Volcánico (PAIV-La Palma).

En el año 2023, *después de 52 años de la erupción del Teneguía (1971), 11 años después de aprobarse la primera edición del PEVOLCA y 2 años después de la erupción de Tajogaite (2021),* no se han aprobado aún los Planes de Actuación Insular frente al Riesgo Volcánico (PAIVs) de las islas de El Hierro, La Palma, Lanzarote requeridos por el Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA).

Resulta muy ilustrativo observar que los diferentes planes de emergencia ante el riesgo volcánico, que deben elaborar todas las administraciones públicas con competencias en la gestión de este riesgo natural, se hayan aprobado casi 40 años después de la erupción del Teneguía (1971), y algunos están aún pendientes de aprobación. Un periodo de tiempo muy similar al periodo de recurrencia de las erupciones volcánicas en Canarias reflejando la fortaleza del famoso dicho popular «Sólo nos acordamos de Santa Bárbara cuando truena».

Estrategia Canaria para la Reducción del Riesgo Volcánico

Canarias es la única zona volcánicamente activa del territorio nacional expuesto al riesgo volcánico, una observación que queda claramente reflejada en la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico en España, aprobada por el Consejo de Ministros en su reunión del día 19 de enero de 1996, como consecuencia de las erupciones

históricas ocurridas en este archipiélago durante los últimos 600 años; un total de 18 erupciones históricas hasta la fecha. Por lo tanto, y a pesar de que Canarias se encuentra expuesta a diversos riesgos naturales, el volcánico es el riesgo natural bandera de esta Comunidad, marcando la diferencia con el resto del territorio nacional.

La reciente erupción ocurrida en la isla de La Palma ha puesto de manifiesto la exposición y la vulnerabilidad de nuestra sociedad ante el peligro volcánico. Por lo tanto, la erupción de Tajogaite (2021) -la más importante ocurrida en Europa durante los últimos 75 años- debe marcar un antes y un después respecto a nuestra gestión del riesgo volcánico en Canarias, a pesar de los avances realizados durante los últimos 25 años por la reducción del riesgo volcánico en nuestro archipiélago.

Este nuevo rumbo debiera ser adoptado a través de una «Estrategia Canaria para la Reducción del Riesgo Volcánico»; una herramienta operativa que sirva de marco para afrontar y dar respuesta a los retos a que se enfrenta Canarias como consecuencia del riesgo volcánico, sirviendo de elemento dinamizador y coordinador de las distintas políticas sectoriales, así como para el fomento de la concienciación ciudadana, empresarial y administrativa. De lo contrario, no se habría aprendido nada de lo ocurrido recientemente en la Isla Bonita (Pérez, Hernández & D'Auria, 2022)

Algunos de los problemas actuales relacionados con la gestión del riesgo volcánico en Canarias son los siguientes: (i) una pobre percepción de nuestra sociedad (administrados y administradores) sobre el riesgo volcánico en España; dígase Canarias, (ii) falta de compromiso de algunas de las administraciones públicas españolas para materializar decisiones unánimes de las cámaras legislativas españolas que claramente contribuyen al fortalecimiento de los trabajos a desarrollar para la reducción del riesgo volcánico en Canarias, (iii) carencia de apoyo continuo de las administraciones públicas españolas para establecer un programa educativo sobre el riesgo volcánico para la población, (iv) ausencia de compromiso del sistema de Protección Civil para llevar a cabo con regularidad ejercicios o simulacros de los planes de emergencia volcánica en Canarias, (v) presiones del sector turístico empresarial para evitar hablar de riesgo volcánico en Canarias, etc.

El Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan) ha apremiado a la administración acerca de la necesidad urgente e inaplazable de elaboración de este importante documento, y cuenta con la metodología para confeccionar la Estrategia Canaria para la Reducción del Riesgo Volcánico, bajo tres principios o pilares fundamentales, que son el conocimiento científico, la participación ciudadana y el consenso.

El conocimiento científico aportará luz a la sociedad sobre el fenómeno volcánico en Canarias fomentando el conocimiento sobre (i) los peligros volcánicos más comunes y probables de Canarias, (ii) la probabilidad de una

futura erupción en Canarias para diferentes ventanas temporales, (iii) como una sociedad (administrados y administradores) puede y debe materializar las diferentes acciones de naturaleza científico-técnica y civil para la reducción del riesgo volcánico, etc.

La participación ciudadana para la elaboración de este documento se materializaría invitando a todos los sectores de la sociedad que pueden y deben jugar un papel en la gestión del riesgo volcánico dado que protección civil somos todos, a pesar que algunos sectores de la misma tengan una mayor cuota de responsabilidad que otros. Entre estos colectivos resaltaría, el sector de las autoridades de las administraciones públicas, políticos y partidos políticos, expertos de seguridad y emergencias, planificadores del territorio, periodistas y medios de comunicación, agentes del sistema de salud, agentes sociales, comunidad educativa no universitaria, empresarios del sector turístico, otras organizaciones empresariales, economistas y abogados, representantes del sector de la energía y el agua, representantes del sector de la comunicación y el transporte, así como representantes vecinales.

La idea detrás de una amplia participación ciudadana, a través de diferentes sectores de la misma, es que cada uno de los diferentes colectivos pudieran aportar desde su óptica su visión sobre la gestión del riesgo volcánico. Para ello se promovería el debate abierto de una forma ordenada -en pequeños grupos de un mismo sector- con la finalidad que estos grupos pudieran identificar las debilidades y fortalezas (análisis interno) de su sector frente a la gestión del riesgo volcánico, así como reconocer las amenazas y oportunidades (análisis externo) del medio en que se encuentran ante la gestión del riesgo volcánico. La robustez de este debate, a través de un análisis DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades), radica que sólo se pueden describir o anotar todas aquellas observaciones que nacen del consenso; por lo tanto, de esta forma se cumplimentarían los tres pilares anteriormente descritos para la elaboración de la Estrategia Canaria para la Reducción del Riesgo Volcánico.

Entre los numerosos desafíos que debiera afrontar esta estrategia se podrían identificar (i) materializar las demandas unánimes de las Cámaras Legislativas sobre la necesidad del Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN), una apuesta de sumar todos los esfuerzos públicos para optimizar la gestión científica del riesgo volcánico; (ii) establecer los mecanismos legislativos necesarios que garanticen la mejora continua de las tres acciones fundamentales recomendadas por la comunidad científica y las directrices políticas a nivel internacional, a través de instituciones como la Asociación Internacional de Volcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI) y la Organización de Naciones Unidas para el desarrollo de la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), para la reducción del riesgo volcánico en Canarias a través del avance del conocimiento científico; (iii) mejorar el análisis y la evaluación del coste económico que representa el

riesgo volcánico en Canarias para los próximos 50 años: (iv) enfatizar la importancia de la educación, formación y sensibilización sobre la gestión del riesgo volcánico como elementos esenciales para el cambio de actitudes y hábitos sociales colectivos e individuales que, a medio y largo plazo, serán los verdaderos garantes del éxito de los planes de emergencia ante el riesgo volcánico; (v) diseñar un buen programa de comunicación sobre la gestión del riesgo volcánico dado que una comunicación apropiada entre todas las organizaciones, instituciones y particulares con intereses en la gestión del riesgo volcánico es vital para la reducción del riesgo de desastres (Solana *et al.*, 2017), etc.

En resumen, nuestra sociedad precisa de una Estrategia Canaria para la Reducción del Riesgo Volcánico revisable cada 5 años porque el riesgo volcánico está aumentando en nuestro archipiélago. No porque en la actualidad los volcanes estén cocinando más en el subsuelo de Canarias, sino porque el desarrollo socioeconómico de nuestra región es ahora mayor que hace 50 años y muy probablemente será mayor dentro de 50 años que en la actualidad.

AGRADECIMIENTOS.- En primer lugar, quisiera expresar mis más sincero apoyo y agradecimiento a todos los damnificados por la erupción de Tajogaite (2021) porque sus experiencias, de cómo la erupción ha afectado a sus vidas, ha sido la fuerza motriz para que yo promoviera la necesidad de elaborar una «Estrategia Canaria para la Reducción del Riesgo Volcánico». En segundo lugar, agradecer al Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias (IEHC) y a Julio Afonso, vicepresidente de Asuntos Científicos del IEHC, que me hayan invitado a participar, por segunda vez, en una «Semana Científica Telesforo Bravo». En esta ocasión para exponer la necesidad de una Estrategia Canaria para la Reducción del Riesgo Volcánico, máxime después de lo que ha supuesto para Canarias la reciente erupción de Tajogaite (2021). En tercer lugar, quisiera agradecer a Matilde Fleitas Martín, quien fuera diputada del Parlamento de Canarias en la X Legislatura, su acogida a la propuesta de elaborar dicha estrategia y buscara la financiación del Gobierno de Canarias para su materialización. Por último, a los proyectos VOLRISKMAC II (MAC2/3.5b/328), cofinanciado por el Programa de Cooperación INTERREG V-A España-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canarias) 2014-2020, «Cumbre Vieja Emergencia», financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación como respuesta a la erupción de Tajogaite; «LPvolcano», financiado por el Cabildo Insular de La Palma; y «TFassisstance» y «TFvolcano», financiados por el Cabildo Insular de Tenerife a través del Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER).

Bibliografía

AFONSO-CARRILLO, J. (Ed.) (2023). *Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)*. XVIII Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, Puerto de la Cruz.

ALLARD, P. Y 115 FIRMAS ADICIONALES DE LA COMUNIDAD CIENTÍFICA NACIONAL E INTERNACIONAL (2005). El Instituto Volcanológico de Canarias (IVC): una tarea inaplazable. *El Día*, 1 de diciembre, p. 34.

ARAÑA, V., J.C. CARRACEDO, R. ORTIZ & R. VIERA (2001). Canary Islands: volcanic surveillance network. *I Asamblea Hispano Lusa de Geodesia y Geofísica* 1-6.

ARAÑA, V. (2010). La volcanología española una perspectiva histórica. *Aportaciones Recientes en Volcanología 2005-2008*, 17-28 pp.

BARKER, A. Y 220 FIRMAS ADICIONALES DE LA COMUNIDAD CIENTÍFICA NACIONAL E INTERNACIONAL (2022). Una apuesta de presente y futuro para la gestión científica del riesgo volcánico en España. *La Provincia*, 18 de septiembre https://www.laprovincia.es/canarias/2022/09/18/apuesta-presente-futuro-gestion-cientifica-75578943.html

BOC (2010). Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA). *Boletín Oficial de Canarias nº 140*. Lunes 19 de julio de 2010 – 4147

BOC (2018). Nuevo Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA). *Boletín Oficial de Canarias nº 154*. Jueves 9 de agosto de 2018 - 3785

BOCG (2005). Sobre el Instituto Volcanológico de Canarias. *Boletín Oficial de Las Cortes Generales, Senado, VIII Legislatura, nº 59*, pp. 3275-3279.

BOCG (2009). Sobre el Instituto Volcanológico de Canarias. *Boletín Oficial de Las Cortes Generales, Congreso de los Diputados, IX Legislatura, nº 443*, pp. 2-5.

BOE (1996). Directiva Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico. *Boletín Oficial del Estado, nº55,* 4 de marzo de 1996.

BOE (2013). Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico. *Boletín Oficial del Estado, nº 36*, 11 de febrero de 2013.

BOLETÍN INFORMATIVO-IGN (2005). El sistema de vigilancia volcánica del IGN. Boletín Informativo del Instituto Geográfico Nacional, Año VI, Enero-Marzo 2005, nº 21, 1-2.

BOPC (2006). Sobre la creación del Instituto Volcanológico de Canarias. *Boletín Oficial del Parlamento de Canarias, VI Legislatura, nº 65*: 8-9.

CARRACEDO, J.C., M. GARCÍA, M.J. JIMÉNEZ & N.M. PÉREZ (1992). El riesgo volcánico en España. *1º Congreso Iberoamericano sobre Técnicas Aplicadas a la Gestión de Emergencias sobre Riesgos Naturales*. Valencia, pp. 4 http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/spa/doc5007/doc5007-contenido.pdf

CARRACEDO, J.C., S.J. DAY, H. GUILLOU, E. RODRÍGUEZ BADIOLA, J.A. CANAS & F.J. PÉREZ TORRADO (1998). Hotspot volcanism close to a passive continental margin: the Canary Islands. *Geol. Mag.* 135: 591-441.

DIRECCIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL Y EMERGENCIAS (2013). Sistema Nacional de Protección Civil, 43 pp. https://www.interior.gob.es/opencms/pdf/archivos-y- documentacion/ documentacion-y-publicaciones/publicaciones-descargables/proteccion-civil/Introduccion_al_Sistema_espanol_de_proteccion_civil_12613101X.pdf

FECAI (2014). La FECAI solicita la creación del Instituto Volcanológico de Canarias. https://www.eldiario.es/canariasahora/lapalmaahora/canarias/fecai-instituto-volcanologico-creacion-riesgo_1_4932127.html

FERNÁNDEZ NAVARRO, L. (1911). Erupción volcánica del Chinyero (Tenerife), en noviembre de 1909. *Anales de la Junta para la Ampliación de Estudios e Investigaciones*. Tomo V. Memoria 1ª. Madrid. 99 pp.

FERRER, M., L. GONZÁLEZ DE VALLEJO, J. MADEIRA, C. ANDRADE, J.C. GARCÍA-DAVALILLO, M.D.C. FREITAS, J. MECO, J.F. BETANCORT, T. TORRES & J.E. ORTIZ (2021). Megatsunamis induced by volcanic landslides in the Canary Islands: Age of the tsunami deposits and source landslides. *GeoHazards* 2: 228-256. https://doi.org/10.3390/geohazards2030013

FUSTER, J.M., A. CENDRERO A., J.C. CARRACEDO, M. HERRAIZ, O. GARCÍA, M. SÁNCHEZ, F. BENITO & T. SERRANO (1985). La catástrofe de Colombia. *Cuadernos de Protección Civil*, noviembre-diciembre, 9-12.

HERNÁNDEZ-PACHECO, A. (1982). Sobre una posible erupción en 1793 en la isla de El Hierro (Canarias). *Estudios Geológicos* 38: 15-25

LLORENTE, I.M. (2015). GeoMEP: Modelo de evaluación de pérdidas por peligros geológicos. Aplicación al caso de las Islas Canarias. *Consorcio de Compensación de Seguros* (ed.) e Instituto Geológico y Minero de España. 151 figuras, 44 tablas. NIPO: 720-15-133-1; Depósito Legal: M-34018-2015.

NEWHALL, C.G. & S. SELF (1982). The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C2): 1231-1238.

PÉREZ, N.M. (2010). Cities on Volcanoes 6-Tenerife 2010 Report. *IAVCEI NEWS 2010,* 2: 4-5.

PÉREZ, N.M. (2015). The 2011-2012 El Hierro submarine volcanic activity: a challenge of geochemical, thermal and acoustic imaging for volcano monitoring. *Surtsey Research* 13: 55-69.

PÉREZ, N.M. (2021). La gestión del riesgo volcánico en España. *Consorseguro nº14,* Revista Digital del Consorcio de Compensación de Seguros (CCS), Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, Gobierno de España https://www.consorsegurosdigital.com/es/numero-14/portada/la-gestion-del-riesgo-volcanico-en-espana

PÉREZ, N.M. & P.A. HERNÁNDEZ (2007). Comment on the recent unrest at Canary Islands' Teide Volcano? EOS, *American Geophysical Union Transactions*, 88, p. 46.

PÉREZ, N.M. & P.A. HERNÁNDEZ (2008). La vigilancia volcánica en España: una apuesta crucial para la reducción del riesgo volcánico. En Galindo Jiménez I., L. Lain Huerta & I. Llorente (Eds.): *El estudio y la gestión de los riesgos geológicos.* Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie. Medio Ambiente. Riesgos Geológicos 12: 159-174.

PÉREZ, N.M., P.A. HERNÁNDEZ AND L. D'AURIA (2022). Lessons learned from the 2021 Cumbre Vieja eruption: the need for a Canary Islands Strategy to Reduce Volcanic Risk. International Conference «Cities on Volcanoes 11» Heraklion, Crete, Greece / 12-17 June 2022PAIV-TENERIFE (2020). Plan de Actuación Insular frente al Riesgo Volcánico de la isla de Tenerife;

https://www.tenerife.es/portalcabtfe/es/site_content/52-proteccion-civil/12194-plan-de-actuacion-insular-frente-al-riesgo-volcanico-de-la-isla-de-tenerife-paiv

PÉREZ, N.M. & H.-U. SCHMINCKE (2016). Science development on volcanology flawed by the Spanish IGN. *Geophysical Research Abstracts* 18, EGU2016-10379

PÉREZ, N.M., H. WAKITA, S. NAKAI, Y. SANO & S.N. WILLIAMS (1994). $^{3}He/^{4}He$ isotopic ratios in volcanic-hydrothermal discharges from the Canary Islands, Spain: Implications on the origin of the volcanic activity. *Mineral. Mag.* 58: 709-710.

ROMERO, C. (1990). *Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario*. Universidad de La Laguna. ISBN: 84-7756-219-9

ROMERO, C. (2000). Actividad volcánica histórica en las islas Canarias. En Astiz M. & A. García (Eds.): *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica.* pp. 115-128. Serie Casa de Los Volcanes. Servicio publicaciones del Cabildo Insular de Lanzarote. Madrid.

ROMERO, C., E. COELLO, J. DÓNIZ & N. SÁNCHEZ (2009). New data about historic volcanism on Tenerife Island. *250th anniversary of Volcán Jorullo´s birth*, pp. 46-47.

SANSÓN CERRATO, J. (1995). La protección civil ante el riesgo de erupciones volcánicas. En: Ortiz R. (Ed.): *Riesgo Volcánico*, Serie Casa de los Volcanes, Cabildo Insular de Lanzarote 5: 197-216.

SOLANA, M.C., S. CALVARI, C.R.J. KILBURN, H. GUTIÉRREZ, D. CHESTER & A. DUNCAN (2017). Supporting the development of procedures for communications during volcanic emergencies: Lessons learnt from the Canary Islands (Spain) and Etna and Stromboli (Italy). In Fearnley, C.J., D.K. Bird, K. Haynes, W.J. McGuire & Jolly G. (Eds.): Observing the Volcano World. *Advances in Volcanology*. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/11157_2016_48

VILLALBA MORENO, E. (2000). Catástrofes naturales en Canarias, riesgo y prevención. *Diario de Avisos*, 25 de noviembre, p. 4.

WADSWORTH, F.B., E.W. LLEWELLIN, J.I. FARQUHARSON, J.K. GILLIES, A. LOISEL, L. FREY, E. ILYINSKAYA, T. THORDARSON, S. TRAMONTANO, E. LEV, M.J. PANKHURST, A.G. RULL, M. ASENSIO-RAMOS, N.M. PÉREZ, P.H. HERNÁNDEZ, D. CALVO, M.C. SOLANA, U. KUEPPERS & A.P POLO SANTABÁRBARA, (2022). Crowd-sourcing observations of volcanic eruptions during the 2021 Fagradalsfjall and Cumbre Vieja events. *Nature Communications* 13, 2611, https://doi.org/10.1038/s41467-022-30333-4.

La colección «Semanas Científicas Telesforo Bravo» del Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias

J. Afonso
Vicepresidente de Asuntos Científicos
Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias

Desde la celebración en 2005 de la primera Semana Científica Telesforo Bravo y hasta la actualidad, cada año el Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias ha publicado el correspondiente libro incluyendo las contribuciones de los diferentes participantes en cada ciclo. En cada uno de estos ciclos se han tratado diferentes temáticas relacionadas con el medio ambiente, con el propósito de hacer accesible a la población información científica relevante, mediante un lenguaje claro y comprensible (Figs 1 y 2). Las temáticas tratadas han sido variadas, pero todas ellas relacionadas con la naturaleza y el medio ambiente, con especial hincapié en aquellos aspectos relacionados con las islas Canarias.

Dos ciclos fueron dedicados a la figura de Telesforo Bravo, uno con el propósito de rendirle homenaje (Coello Bravo *et al*., 2006), y otro para conmemorar el centenario de su nacimiento (Arnay de La Rosa *et al*., 2014). El patrimonio natural de diferentes islas del archipiélago canario fue la temática sobre la que trataron jornadas monográficas dedicadas a El Hierro (Pérez de Paz *et al*., 2013), Lanzarote (Perera Betancort *et al*., 2015), La Gomera (Navarro Mederos *et al*., 2016), La Palma (Pais Pais *et al*., 2018) o Gran Canaria (Alberto-Barroso *et al*., 2020). Otras temáticas, como la evolución, el cambio climático, la geología o la biodiversidad, fueron protagonistas de otros tantos ciclos (Espinosa García *et al*., 2007; González Reimers *et al*., 2008; Anguita *et al*., 2009; Landeira *et al*., 2011; Sánchez García *et al*., 2021). La agricultura canaria (Ríos Mesa *et al*., 2012), el medio marino (Galindo *et al*., 2017), la problemática del agua (Marzol Jaén *et al*., 2019) o el papel de las mujeres en el avance científico (Perdomo Reyes *et al*., 2022), también fueron materias de análisis y reflexión. Por último, las erupciones volcánicas han tenido un particular protagonismo en varios ciclos, tal como se refleja en la presente publicación (Beltrán Yanes *et al*., 2010; Pérez de Paz *et al*., 2013; Ancochea Soto *et al*., 2023).

Hasta el presente, esta colección la integran 18 libros (Figs 1 y 2), que incluyen un total de 91 artículos redactados por los propios ponentes, con el propósito de divulgar la ciencia, manteniendo siempre el imprescindible rigor científico. Este ha sido desde un principio el criterio de estas jornadas, inspiradas en el buen hacer divulgador del profesor Bravo. Además de la versión en papel, cada uno de los documentos de esta colección (tanto los libros, como cada uno de los artículos) están disponibles en versión digital en el repositorio del Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias.

https://www.iehcan.com/publicaciones/semana-cultural-telesforo-bravo/

Fig. 1. Portadas de los libros correspondientes a las primeras Semanas Científicas Telesforo Bravo (I-IX; 2006-2014).

Fig. 2. Portadas de los libros correspondientes a las Semanas Científicas Telesforo Bravo X-XVIII (2015-2023).

Referencias

ALBERTO-BARROSO, V.; J.F. BETANCORT LOZANO; J. MANGAS VIÑUELA; M. SALAS PASCUAL; M.Á. PEÑA ESTÉVEZ; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2020. *Gran Canaria. Las huellas del tiempo*. Actas XV Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

ANCOCHEA SOTO, E.; C. SANGIL; F.M. MEDINA; L. D'AURIA; N.M. PÉREZ; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2023. *Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)*. XVIII Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

ANGUITA, F.; E. LUIS BRITO; A. EFF-DARWICH; E. MARTÍN GONZÁLEZ; N.M. PÉREZ; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2009. *Misterios de la Gea: descifrando los enigmas ocultos en rocas, gases, agua y fuego.* Actas IV Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

ARNAY DE LA ROSA, M.; A. GALINDO BRITO; M. BÁEZ FUMERO; I. SÁNCHEZ GARCÍA; F.J. COELLO BRAVO; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2014. *Cien Años de Don Tele. Celebrando y recordando al sabio y la persona*. Actas IX Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

BELTRÁN YANES, E.; S. SOCORRO; P. OROMÍ; C.E. HERNÁNDEZ PADRÓN; S. ORDÓÑEZ DELGADO; M.C. SOLANA; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2010. *Volcanes: mensajeros del fuego, creadores de vida, forjadores del paisaje.* Actas V Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

COELLO BRAVO, J.; J. AFONSO-CARRILLO; A. MARTÍN; L. SÁNCHEZ-PINTO; J.J. COELLO BRAVO; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2006. *Actas de la Semana Homenaje a Telesforo Bravo.* Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

ESPINOSA GARCÍA, L.; J. ARAUJO; O. RODRÍGUEZ DELGADO; G. DELGADO; E. VILLALBA; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2007. *Reflexiones sobre una naturaleza en constante evolución.* Actas II Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

GALINDO, I.; E. SANTAELLA ÁLVAREZ; P. MARTÍN-SOSA; R. MARTEL REYES; F. PÉREZ; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2017. *Investigando el mar. Viaje al planeta agua*. Actas XII Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

GONZÁLEZ REIMERS, E.; A. MACHADO CARRILLO; M. SANSÓN; M. DEL ARCO AGUILAR; A. BRITO; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2008. *Naturaleza amenazada por los cambios en el clima.* Actas III Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

LANDEIRA, J.M.; E. BELTRÁN TEJERA; L. MORO; W. WILDPRET DE LA TORRE; J. REYES; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2011. *Biodiversidad: explorando la red vital de la que formamos parte.* Actas VI Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

MARZOL JAÉN, M.V.; M.P. GARCÍA ALONSO; J.J. GONZÁLEZ GONZÁLVEZ; Ó. MONTERROSO-HOYOS; L. VEGA; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2019. *Agua.*

Reflexiones para una gestión eficaz. Actas XIV Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

NAVARRO MEDEROS, J.F.; J. MONTESINO BARRERA; E. ANCOCHEA SOTO; J. GARCÍA CASANOVA; Á.B. FERNÁNDEZ; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2016. *La Gomera. Entre bosques y taparuchas*. Actas XI Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

PAIS PAIS, J.F.; J. DE LA NUEZ PESTANA; R.T. GÉNOVA SANTOS; A. SANTOS GUERRA; F.M. MEDINA; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2018. *La Palma. Agua, tierra, fuego y cielo.* Actas XIII Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

PERDOMO REYES, I.; S. CLEMENTE; Á. GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ; C. RODRÍGUEZ; C. MARTÍNEZ PULIDO; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2022. *Mujeres de la Ciencia*. XVII Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

PERERA BETANCORT, M.A.; J.A. REYES BETANCORT; E. MATEO MEDEROS; A. CARRASCO MARTÍN; S. GONZÁLEZ RUIZ; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2015. *Lanzarote. Naturaleza entre volcanes*. Actas X Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

PÉREZ DE PAZ, P.L.; C. SANGIL; N. AGUILAR SOTO; J.C. HERNÁNDEZ; P.A. HERNÁNDEZ; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2013. *El Hierro: nacimiento de un volcán*. Actas de la VIII Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

RÍOS MESA, D.; I. RODRÍGUEZ TORRES; R. CABRERA PÉREZ; F. SABATÉ BEL; M.C. JAIZME-VEGA; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2012. *Agricultura en Canarias: conciliando tradición y ciencia.* Actas VII Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz. 205

SÁNCHEZ GARCÍA, I.; J. AFONSO-CARRILLO; J. COELLO BRAVO; J.J. COELLO BRAVO; J. GONZÁLEZ; J. AFONSO-CARRILLO (Ed.). 2021. *Reflexiones medioambientales en tiempos de un coronavirus*. Actas XVI Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.

INSTITUTO DE ESTUDIOS HISPÁNICOS DE CANARIAS

Gobierno
de Canarias

CABILDO DE TENERIFE

PUERTO
DE LA CRUZ
AYUNTAMIENTO

CajaCanarias
FUNDACIÓN