D'Auria, L. (2023). La vigilancia volcánica: una herramienta fundamental para la reducción del riesgo volcánico en Canarias. En Afonso-Carrillo, J. (Ed.), *Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)*, pp. 153-190. XVIII Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz. 234 pp. ISBN 978-84-09-45782-1

# 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<sup>2</sup> de superficie de lavas, supera con creces a la segunda que sólo alcanzó 4,5 km<sup>2</sup>.

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<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>. 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<sub>2</sub>) 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<sub>2</sub> está íntimamente relacionada con la tasa de emisión de magma, puesto que habitualmente está disuelto junto con el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el agua (H<sub>2</sub>O) 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<sub>2</sub> está disuelto, y se libera bajo forma de burbujas. En resumen, la tasa de emisión de SO<sub>2</sub> 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 (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<sub>2</sub> (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 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 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<sub>2</sub>) 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 500° C. En muchos puntos de la superficie del volcán todavía se alcanzan los 200° 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 sineruptiva (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<sup>3</sup> 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<sup>3</sup>) 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<sub>2</sub>) y dióxido de

azufre (SO<sub>2</sub>). 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<sub>2</sub>). La emisión de SO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>) 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<sub>4</sub><sup>2-</sup>) (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<sup>-</sup>) (A), cloruro (Cl<sup>-</sup>) (B), bromuro (Br<sup>-</sup>) (C) y sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) (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<sub>2</sub>) 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<sub>2</sub>) 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 (<sup>222</sup>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 (<sup>222</sup>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<sub>2</sub>). 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<sub>2</sub>) 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<sub>2</sub>, 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<sub>2</sub>) 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<sub>2</sub> 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 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> emission from Cumbre Vieja volcano: early evidences of magmatic CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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.