

ASPECTOS SISMOLÓGICOS DE LA ERUPCIÓN VOLCÁNICA EN CUMBRE VIEJA, LA PALMA, SEPTIEMBRE-DICIEMBRE 2021¹

SEISMOLOGICAL ASPECTS OF THE VOLCANO IN CUMBRE VIEJA, LA PALMA ERUPTION OF SEPTEMBER-DECEMBER 2021

Julio Mezcuca²

1. INTRODUCCIÓN

La erupción de un volcán, o la ocurrencia de un terremoto, constituyen uno de los desastres naturales más espectaculares, y a veces también de los más dañinos, que sufre la sociedad en la que ocurren. Estos fenómenos han fascinado, a lo largo del tiempo, a los habitantes de la tierra de tal forma que han quedado recuerdos de ellos en monumentos, escritos y tradiciones orales. Estos testigos nos han permitido tener información de ellos, muchos siglos después de ocurrir. En el caso de la isla de La Palma, en las islas Canarias, tenemos una tradición escrita sobre fenómenos volcánicos que se remonta a la época en que Cristóbal Colón pasó por las Canarias, en uno de sus viajes de camino al Nuevo Mundo. Así, nos ha llegado información de todas las erupciones ocurridas en la isla, desde su conquista en 1492 hasta nuestros días. En todas ellas hay una sincronización de terremotos sentidos y las erupciones,

¹ Este trabajo resume los resultados más importantes obtenidos por la Fundación García Sñeriz en colaboración estrecha, con el Instituto Geográfico Nacional, publicados en revistas internacionales de Geofísica.

² Presidente de la Fundación José García Sñeriz. julio.mezcuca@upm.es.

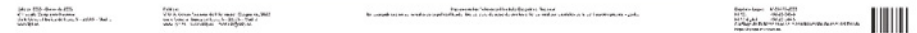
que nos pone de manifiesto la observación de esa estrecha relación, que tratamos de describir en este trabajo.

Es por tanto la sismología, como ciencia que estudia el origen, sus características y efectos de los terremotos, una de las ciencias más fuertemente ligadas al proceso de preparación y generación de una erupción volcánica. Esta unión ha permitido avanzar de forma científica hacia uno de los fines principales de la vigilancia volcánica. Esto es, el seguimiento continuo de la ocurrencia de terremotos, su sismicidad. En este caso que nos ocupa, en la isla de La Palma, durante la erupción del año 2021, nos ha permitido establecer la correspondencia entre ambos fenómenos. Existen al mismo tiempo otros fenómenos observados por otras técnicas geofísicas-químicas tales como deformaciones, emanaciones de gases, variaciones de gravedad, y un sin fin de otras variables físicas también relacionadas con la formación y el proceso eruptivo.

Incidiremos en este trabajo en dos aspectos de gran interés volcanológico. En primer lugar, intentaremos, a partir de la estadística de la actividad sísmica, observar como el flujo de magma se mueve en el interior de la tierra hasta llegar a la erupción y, por otra parte, presentamos un estudio reciente realizado en el que mediante métodos sismológicos se analiza la posibilidad de ocurrencia de una erupción, y de esta forma poder contrastar con otras técnicas geofísicas y geoquímicas a fin de asegurar una verdadera predicción volcánica.

2. SISMICIDAD DE LA ISLA DE LA PALMA

Como se ha dicho en la introducción, los registros históricos de la ocurrencia de terremotos comienzan en Canarias hace cinco siglos y han llegado hasta nosotros por una búsqueda de documentos, cartas y noticias que los investigadores, en diferentes archivos, han sacado a la luz. Además, una vez que se instalan sismógrafos con una alta capacidad de detección, la investigación sobre la sismicidad ha permitido localizar terremotos de muy baja magnitud que, al no ser sentidos por la población, constituyen un avance muy importante en relación a lo que denominamos sismicidad histórica. Como ya puso de manifiesto Bonelli (1950), en la erupción del Nambroque (La Palma) del periodo junio-agosto del 1949 y, recientemente en la erupción del 2021, todas las erupciones históricas, incluyendo esta última, han tenido una importante sismicidad previa y coetánea al momento eruptivo. Esta simultaneidad de ambos fenómenos de preparación y proceso eruptivo con la ocurrencia de terremotos en su proximidad nos permite estudiar simultáneamente ambos fenómenos.



(<https://www.ign.es/web/ign/portal/mapa-sismicidad-canarias-1585-2022>).

talmente a partir de la sismicidad histórica de la isla, que se encuentra totalmente ligada a los terremotos asociados a las erupciones ocurridas, representadas en la Figura 3, en la que también aparecen las distintas unidades geológicas que componen la isla. Puede observarse que las erupciones históricas están asociadas a la dorsal que discurre desde la parte meridional de la caldera de Taburiente hasta el límite sur de la isla. Esta dorsal se denomina dorsal de Cumbre Vieja.

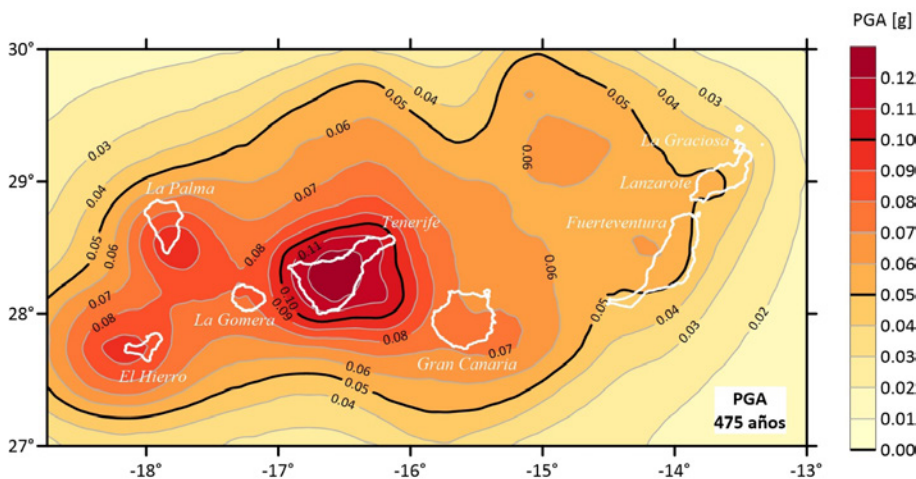


Figura 2. Mapa de peligrosidad sísmica de las islas Canarias expresado en % de la aceleración de la gravedad (g), calculado para un periodo de retorno de 475 años (90% de probabilidad de no superación en 50 años).

3. SEGUIMIENTO DE LA SERIE DE ENJAMBRES DE SISMOS OBSERVADOS ANTES DE LA ERUPCIÓN

A partir de 2017, dentro del proceso de modernización de la Red Sísmica Nacional, el IGN ha instalado una serie de estaciones telemétricas de banda ancha que permiten desde esa fecha la localización precisa de terremotos de muy baja magnitud ($M_L \leq 1.0$) en el archipiélago canario. El importante aumento en la sensibilidad de la red sísmica ha permitido, en la erupción que nos ocupa, realizar multitud de estudios relacionados con la actividad sísmica del periodo de tiempo que precedió a la erupción del año 2021 (Torres-González et al., 2020) y con la sismicidad asociada a ella (D' Auria et al., 2022; Cabrera-Pérez et al. 2023; del Fresno et al., 2023; Mezcua y Rueda 2023, 2024; Suarez

et al. 2024). Según Mezcua y Rueda (2023), los enjambres de terremotos previos a la erupción pueden dividirse en dos grupos diferenciados: los ocurridos a largo plazo (marzo 2017-agosto 2021) con un total de 12 enjambres y los registrados a corto plazo (11-18 de septiembre 2021) en número de 6 enjambres (Figura 4). Esta producción de terremotos en enjambres, llamados así por producirse muy próximos en el espacio y en el tiempo, es una característica muy común en la sismicidad asociada a erupciones o en situaciones de desestabilización previa del medio, aunque no llegue a desencadenarse una erupción.

Los terremotos en enjambres, y los directamente relacionados con la erupción misma, tienen un mecanismo de producción diferente. Por una parte, tenemos las roturas del material sólido que rodea al ascenso del magma, con origen en el manto, abriéndose camino en su viaje a la superficie, debido a la diferencia de presiones. Otras veces, el aumento de temperatura, que el magma transmite al medio sólido que le rodea, puede interferir con la existencia del hidro-termalismo, lo cual modifica las condiciones del estado de esfuerzos de la zona y produce una fuerte ocurrencia de sismos por la presencia de ese fluido. En cualquier caso, los sismos están directamente relacionados con el movimiento del magma y pueden indicar los fallos del material sólido circundante a la trayectoria de su ascenso.

Si analizamos la distribución de los terremotos localizados en función de la profundidad dentro del proceso eruptivo (Figura 4), podremos observar una imagen relacionada con el ascenso del magma hasta la superficie. Dado que existen diferentes fases en el proceso de erupción, hemos considerado cuatro periodos fundamentales, atendiendo a los periodos en los que la detección de la red sísmica tiene niveles comparables, que vienen representados en la Figura 5. En el primer periodo, marzo 2017-agosto 2021 puede observarse que la sismicidad esta confinada en un rango de profundidades entre 20-40 km, el cual se ha interpretado como el proceso de rotura y escape hacia la superficie de material magmático procedente del manto superior. El segundo periodo comienza en septiembre hasta el día 19 a las 14:10 (GMT) y está formado por una serie de terremotos distribuidos en enjambres que cubren la distancia entre los 20 km y la superficie. Esta subida, según la distribución temporal, comienza con un ascenso hacia el oeste cambiando hacia el norte cuando se encuentra a una profundidad de unos 8-11 km. El tercer periodo, corresponde con el periodo eruptivo, en el que la sismicidad se extiende desde la profundidad de 40 km hasta la superficie y nos muestra como la mayor actividad sísmica se encuentra tanto en la zona profunda como en la muy superficial y limitada en el rango intermedio de 25-11 km.

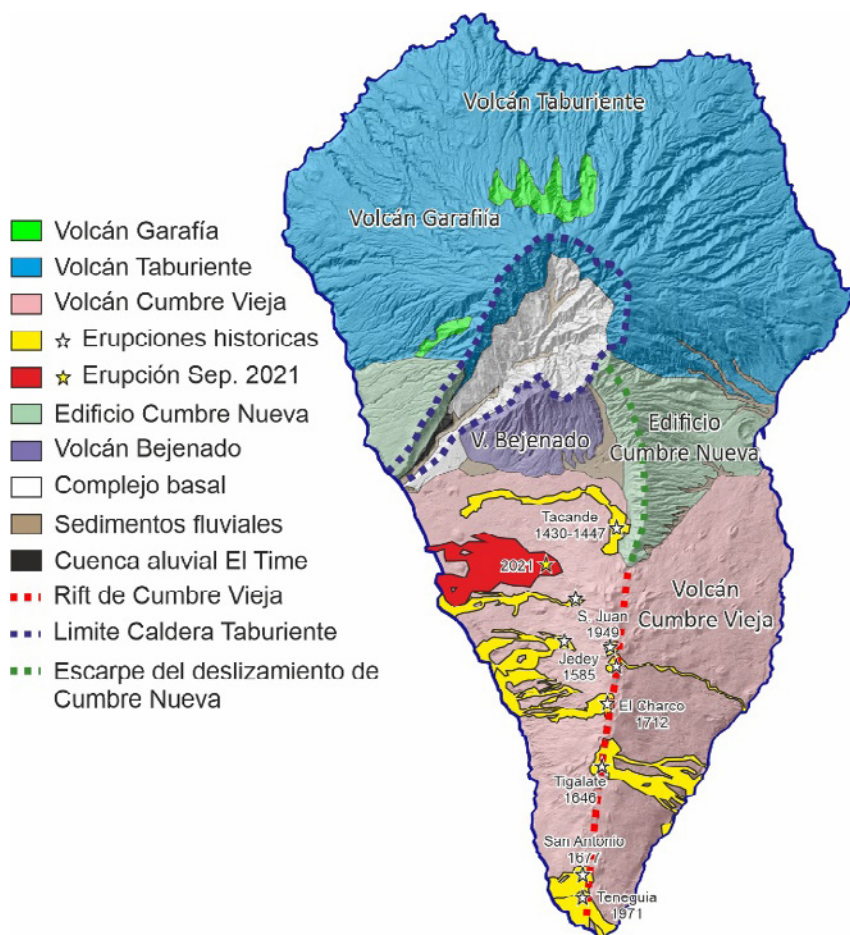


Figura 3. Mapa de las principales unidades geológicas incluyendo las áreas lávicas asociadas a las distintas erupciones del periodo histórico y la correspondiente a la erupción de Cumbre Vieja iniciada el 19 de septiembre de 2021.

La distribución en profundidad de la sismicidad se interpreta como una continua salida de material magmático del manto, rompiendo el material envolvente en su ascenso, para alimentar la cámara magmática en la discontinuidad corteza-manto, a una profundidad de unos 11 km aproximadamente. La subida desde la cámara magmática a la superficie se realiza por los conductos abiertos en la segunda fase y/o ya existentes y, por tanto, sin apenas sismicidad asociada. Por último, nos encontramos con el periodo post eruptivo, en el que cesa la alimentación profunda de los 40 km y por tanto también la alimentación de esa cámara magmática situada a unos 11 km de profundidad.

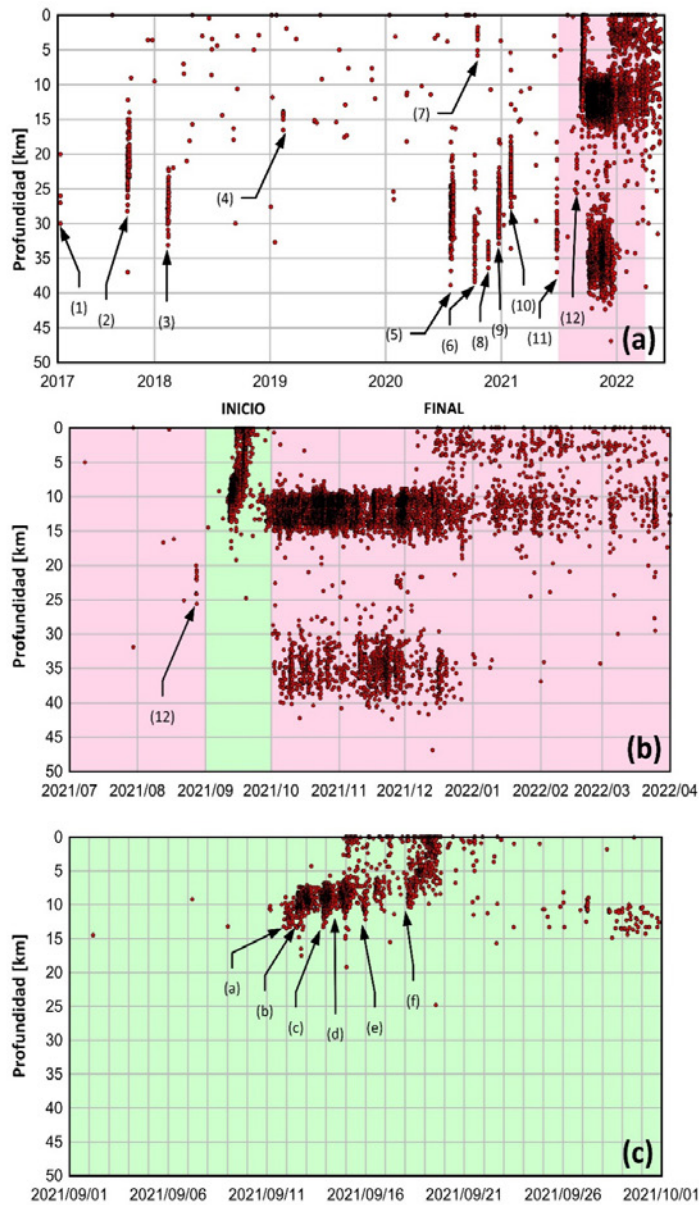


Figura 4. Representación temporal en función de la profundidad de la sismicidad registrada en La Palma desde el año 2017-2022. **a).** Doce enjambres (1-12) de largo plazo registrados hasta agosto 2021. **b).** Intervalo de la erupción y continuación hasta diciembre 2021. **c).** Seis enjambres (a-f) identificados en el periodo inmediato a la erupción.

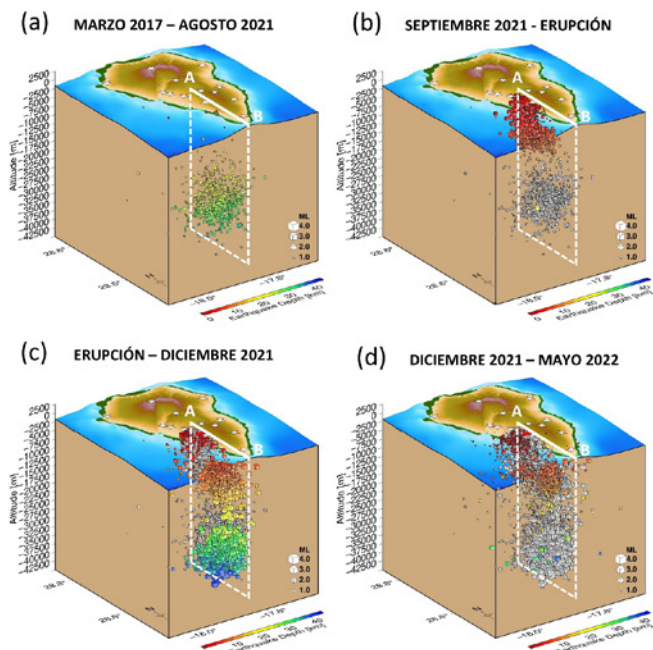


Figura 5. Desarrollo cronológico de los diferentes periodos seleccionados en la distribución espacial de terremotos, comprendidos en una franja de anchura E-O de 10 km, sobre el plano representado en dirección N-S (A-B).

4. SEGUIMIENTO DEL MOVIMIENTO DEL MAGMA. ESTADÍSTICA DE TERREMOTOS POR EL VALOR DE SU MAGNITUD. RELACIÓN GUTENBERG-RICHTER

Cabe preguntarse si la interpretación que hemos establecido, sobre la relación de la sismicidad con el flujo magmático, es debida a que los terremotos estudiados tienen características especiales que nos permitan deducir esa conexión. La respuesta es negativa, es decir, la morfología de los sismos registrados se corresponde a la denominación de sismos volcano-tectónicos (VT), que son producidos por roturas del material a lo largo de la superficie de la falla. Por tanto, podemos decir que la interpretación viene dada por la distribución de los sismos en función de su magnitud. Esta estadística se conoce en sismología con el nombre de Relación Gutenberg-Richter, y es el resultado de la observación de grandes series de terremotos localizados en diferentes ambientes tectónicos (Figura 6), se expresa por una simple relación: $\text{Log } N = a - bM$ (1)

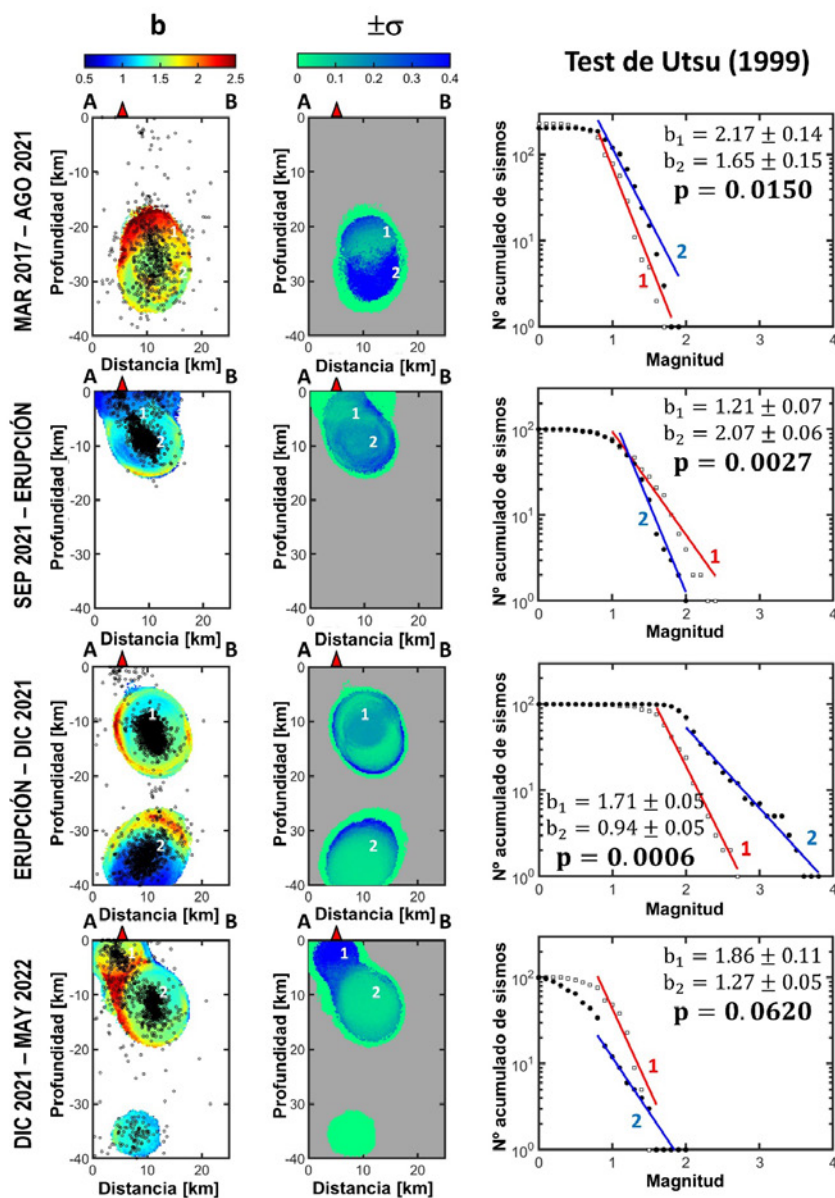


Figura 6. Distribución temporal de los valores espaciales de b , obtenidos para cada periodo, en el plano N-S (A-B de la Figura 5) y la proyección de los sismos localizados (izquierda) junto con la distribución de la desviación estándar de b (centro) en el que incluyen dos pequeños volúmenes (1 y 2), de radio 5 km, cuyos valores de b se muestran en el tercer panel (derecha) junto con la probabilidad (p) de que ambos sean pertenecientes a una misma serie.

En esta ecuación (1) N es el número de terremotos de una magnitud M , a es una constante que se denomina actividad sísmica y b es un valor que expresa la relación existente entre los terremotos de alta magnitud con los de baja magnitud. De esta forma, si representásemos esta expresión para la serie de terremotos ocurridos en todo el mundo, para un cierto periodo de años, el valor de la pendiente b sería cercano a 1. Si consideramos zonas con predominancia de fallas de desgarre, como puede ser la zona de contacto Azores-Gibraltar, el valor de b es alrededor de $b \approx 0,70$ y sin embargo en las islas Azores es $b \approx 1,4$. Es decir, en dos zonas tan próximas, como las precitadas, el valor de b varía sustancialmente.

Cuanto más pequeño es el valor de b , la proporción de sismos de gran magnitud en relación a los de menor magnitud es mayor para el periodo considerado, mientras que en zonas con valores de b superiores a 1 nos encontramos el efecto contrario: mayor proporción de terremotos de pequeña magnitud en relación con los de mayor magnitud. La razón física es simple, pues se considera que en zonas con un material en la corteza de baja resistencia se producirán gran cantidad de sismos si lo sometemos a esfuerzos, dado que el material se rompe con un pequeño esfuerzo aplicado y lo contrario, en zonas corticales con materiales rígidos, el esfuerzo necesario para producir roturas necesariamente tiene que ser mayor. Es así lógico que zonas de la corteza en contacto con material magmático a altas temperaturas, se pierda rigidez y ante esfuerzos pequeños se rompa fácilmente, siendo incapaz de resistir esfuerzos que produjesen grandes roturas con sismos de magnitud elevada. Es decir, que este parámetro b , en un ambiente volcánico, nos proporciona información sobre la evolución temporal del ascenso del magma.

Si volvemos a la Figura 4, observamos la secuencia de enjambres en el largo plazo (1-12) y los de plazo corto (a-f) y analizamos el valor de b en cada uno de ellos, obtenemos los valores de la Tabla 1.

Tabla 1

Enjambres de largo plazo (1-12) y corto plazo (a-f), identificados en la Figura 4, junto con el valor del parámetro b calculado, con su desviación estándar.

Enjambre	Inicio	N° Sismos	M _L	Duración [días]	Sismos/día	b	Profundidad media [km]
1	2017/03/09	3	1.3-0.8	0.16	18.7		25.8±4.1
2	2017/10/07	127	1.9-0.2	7	18.1	2.9±0.6	21.1±3.1
3	2018/02/10	84	1.8-0.7	5	16.8	2.1±0.2	26.4±2.2
4	2019/02/19	7	0.4-0.1	0.001			14.6±0.9
5	2020/07/24	162	1.7-0.3	17	9.5	1.9±0.1	28.4±3.6
6	2020/10/08	59	1.9-0.3	14.2	4.1	2.2±0.4	31.4±4.2
7	2020/10/18	12	0.5-0.1	0.83	14.4	1.1±0.1	3.1±1.2
8	2020/11/21	14	1.2-0.8	0.25	56.0	2.4±0.1	34.2±0.1
9	2020/12/23	131	1.5-0.0	3.3	39.4	2.1±0.6	27.9±2.6
10	2021/01/31	78	1.5-0.5	3	26.0	2.1±0.8	23.0±3.9
11	2021/06/25	37	1.4-0.3	2	18.5	2.2±0.4	30.2±4.1
12	2021/08/27	10	0.7-0.2	0.3	23.3		20.3±6.4
a	2021/09/11	40	1.2-0.1	0.7	58	1.6±0.5	11.3±1.2
b	2021/09/12	366	2.4-0.6	1.2	296	1.5±0.2	9.5±1.3
c	2021/09/13	269	2.6-0.6	0.9	297	1.0±0.1	9.0±1.2
d	2021/09/14	262	2.6-0.1	0.6	460	1.1±0.2	7.6±3.0
e	2021/09/15	132	2.3-0.0	2.2	60	1.3±0.4	6.5±3.5
f	2021/09/18	328	3.1-0.1	1.6	205	0.9±0.1	4.0±3.0

En los enjambres de largo plazo (1-12) se obtienen valores de b muy superiores a 1, aumentando su valor de forma continua desde noviembre de 2020. Esto indica la presencia de material cada vez más heterogéneo, por efecto del calor, al evolucionar el proceso de movimiento del magma a distintas profundidades, manteniéndose una correspondencia entre el valor de b y la profundidad del enjambre. Sin embargo, los valores correspondientes a plazo corto van disminuyendo desde el 11 de septiembre de 2021, según los enjambres van siendo son más superficiales y el magma empieza el proceso de enfriamiento.

Se calcula espacialmente el valor de b para todas las profundidades en los distintos periodos temporales y obtenemos la distribución espacial de b que se muestra en la Figura 6 (Mezcua y Rueda, 2023), en ella se muestran los cuatro periodos en que hemos dividido el tiempo de preparación y el de erupción. Este cálculo se ha realizado para un perfil N-S, de 10 km de anchura (E-W) y en círculos de 5 km de radio, centrados en puntos de una malla de 0.5×0.5 km. Durante el primer periodo (marzo 2017-agosto 2021) se observa una sismicidad en profundidad de 25-35 km, con valores de $1.6 \leq b \leq 2.4$, que es interpretado como el proceso de salida de material magmático a elevada temperatura, que se abre paso desde su origen en el manto hacia la superficie. El segundo periodo, que abarca desde septiembre 1-19 de 2021, muestra el último periodo antes de iniciarse la erupción. Puede apreciarse que además del foco de salida en el manto, a 30 km de profundidad aproximadamente, existe una cámara magmática en el límite de la corteza a 11 km aproximadamente que se abre camino hasta la superficie. Durante los últimos días, del 11-18 de septiembre se producen los enjambres a corto plazo descrito anteriormente, en los que el parámetro b comienza a disminuir conforme el magma se va enfriando, al acercarse a la superficie, pasando de 1.6 a 0.9 el valor de b . A continuación, tenemos el tercer periodo, que corresponde con la erupción propiamente dicha, desde el 19 de septiembre hasta el 13 de diciembre, fecha en que se declara el final de la erupción. Se añade en esta Figura 6 un último periodo que comprende desde el final de la erupción hasta mayo de 2022, observando que aunque la erupción se haya extinguido, sigue habiendo una actividad sísmica importante, que obedece por una parte a una salida de magma del manto a 35 km de profundidad, mucho más frío con valores de b próximo a 1 y una cierta actividad en la cámara magmática de la corteza, enfriándose, y con una actividad de b superior a 1, que indica todavía la presencia de material magmático que debido a su enfriamiento y la falta de carga del almacenamiento desde el manto no es capaz de salir a superficie. También se puede observar que los valores de b , distintos en cada periodo, corresponden a series distintas de terremotos, según el test de Utsu (1999), que proporciona la probabilidad (p) de que las dos

muestras 1 y 2 seleccionadas pertenezcan o no a una misma familia. Los valores de probabilidad que se muestran en cada fase son muy pequeños, lo que se interpreta como una pertenencia de eventos a distintas familias.

El parámetro b , cuyo comportamiento espacial y temporal en el caso de la erupción de Cumbre Vieja hemos descrito, es un ejemplo de cómo la sismología es capaz de visualizar la transición del magma durante una erupción, mostrando como una zona de b alta, es decir, muy caliente, se va propagando temporalmente hacia la superficie. Podríamos decir que esta representación temporal de b es como la radiografía del interior de la isla, mostrando, en diferentes instantes de tiempo, la imagen de un magma caliente ascendiendo hacia la superficie.

5. ¿EXISTEN RECURSOS SÍSMICOS DE UNA ERUPCIÓN VOLCÁNICA? VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL MEDIO ANTES DE UNA ERUPCIÓN

Esta pregunta ha sido una constante desde los inicios de la sismología, pues la totalidad de las erupciones volcánicas tienen asociada una sismicidad que normalmente se manifiesta con anterioridad a la erupción. Sin embargo, la búsqueda de precursores sísmicos ha de complementarse con otra serie de parámetros provenientes de otras ramas de la geofísica y geoquímica. De esa forma, cuando varios parámetros emiten precursores de una inminente erupción, se puede considerar que estamos en lo que se denominamos «predicción de una erupción volcánica». En este trabajo se presentan únicamente algunos precursores sísmicos de la erupción de Cumbre Vieja de septiembre del año 2021, con resultados positivos y que deberían tenerse en cuenta en un futuro plan de predicción de erupciones volcánicas en Canarias.

En primer lugar, examinando la serie sísmica descrita anteriormente en sus series de enjambres, hemos visto que, a partir del enjambre del 12 de agosto de 2021, el número de sismos se incrementa rápidamente en relación con la actividad anteriormente observada. A partir del 9 de septiembre, se inician unos enjambres de sismos (Tabla 1) catalogados como enjambres en el corto plazo, que constituyen, por su duración, por su parámetro b y sobre todo por su continua disminución de la profundidad, un precursor de una actividad emergente hacia la superficie. Este precursor, si se considera como tal, tiene que ir acompañado de otros, que puedan manifestar cambios en otras variables físicas que sean compatibles con la erupción. Hemos investigado con posterioridad en este sentido, intentado comprender que variable física, detectable por métodos sísmicos, fuese compatible con la preparación de la erupción.

Consideremos, de forma genérica, que en una erupción volcánica existe un material, de textura más o menos viscosa, a alta temperatura, alojado en el manto terrestre, que por el exceso de presión con respecto al material circundante inicia su ascenso hacia la superficie. Este material circundante, que no es homogéneo, contiene pequeñas fisuras y heterogeneidades. El empuje del material magmático origina en el medio que le rodea una variación en las fisuras internas que posee, modifica las heterogeneidades y por tanto sus propiedades elásticas. Por otra parte, agentes externos naturales, tales como el viento y el choque de las olas en las costas, generan unas perturbaciones en la superficie que se transmiten por el medio en forma de ondas elásticas y que reciben el nombre de ruido sísmico. De esta forma, si registramos el ruido en una estación sísmica antes de esa perturbación magmática y después, podremos observar, por correlación de ambas señales, una diferencia en el tiempo de viaje en relación con un instante determinado. Este valor es equivalente al cambio de velocidad para cada velocidad registrada del ruido sísmico). Por tanto, midiendo la diferencia de tiempos de llegada de una onda de ruido sísmico a una estación, o entre dos estaciones, para cada instante de tiempo, estamos determinando las variaciones de la velocidad de transmisión de las ondas por el medio. Este resultado es importante, puesto que las variaciones experimentadas por el material circundante, a la entrada de material magmático hacia la superficie, generan una variación de la velocidad de transmisión que va aumentando conforme la erupción sea inminente. Este proceso de estudio se denomina *Interferometría de Ruido Sísmico* y ha sido utilizada en diferentes estudios, no solo en los volcánicos.

En el caso de la isla de La Palma, Mezcua y Rueda (2024) utilizan los datos sísmicos de las estaciones que se muestran en la Figura 7, donde se han incluido las trayectorias estudiadas entre estaciones, además de considerar una estación meteorológica y dos estaciones GNSS que han suministrado datos de la deformación del terreno en función del tiempo. Los datos de la estación meteorológica han servido para poder relacionar la precipitación que haya existido durante la prueba, pues a veces los fenómenos de cambio de velocidad del medio pueden deberse a la modificación de las características del suelo por la penetración del agua.

El cambio de velocidad obtenido con esta técnica es un cambio de velocidad aparente, que representa la velocidad media entre las dos estaciones consideradas. Del tren de ondas analizado deben considerarse la parte final o coda, puesto que estas ondas internas han sido reflejadas y refractadas en las grietas y elementos dispersivos incluidos en un medio de una gran heterogeneidad, muestreando un cierto volumen. Para este estudio, Mezcua y Rueda (2024) han utilizado la técnica de Lecocq *et al.* (2014), ampliamente aplicada en diferentes erupciones volcánicas.

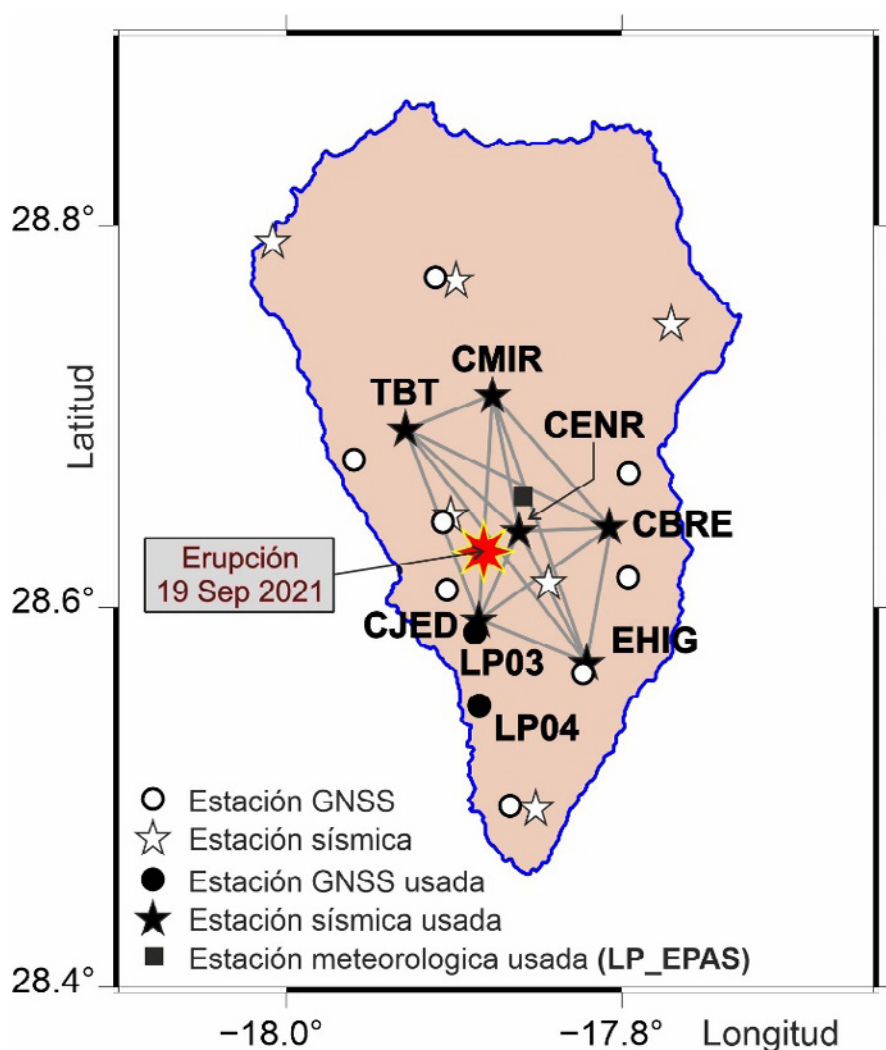


Figura 7. Distribución de estaciones de banda ancha del IGN en la isla de La Palma (estrellas blancas) y las utilizadas en este estudio (estrellas negras). Asimismo, se representan las estaciones GNSS LP_03 y LP_04, cuyos datos de deformación se utilizan en el trabajo y la estación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología LP_EPAS.

La selección de estaciones se ha realizado teniendo en cuenta que estuviesen en operación durante un periodo largo de tiempo (al menos 1 año), tiempo necesario para poder determinar un nivel base de comparación. Este periodo de referencia ha sido elegido del 1 de marzo de 2018 hasta el 30 de junio de

2020, periodo que se supone sin influencia del proceso que desencadeno la erupción del 19 de septiembre de 2021. Las señales sísmicas, en sus componentes vertical Z y horizontales N-S y E-O, han sido filtradas previamente con un filtro entre (0.1-15) Hz, a continuación, se realiza un análisis de correlación, comenzando el 1 de enero de 2021, con ventanas móviles de 1, 5, 10 y 15 días, entre la referencia y el periodo considerado, obteniéndose la variación temporal para cada instante t y así el cambio de velocidad para cada velocidad v .

En la Figura 8 se presentan el valor medio de la variación de la velocidad de la media obtenida, con su desviación estándar, para el conjunto de estaciones seleccionadas y también el resultado de la media ponderada de pares individuales, considerando en ambos casos diferentes ventanas móviles temporales, para el periodo desde el 1 de enero de 2021 hasta el 1 de enero de 2022, cubriendo la totalidad del periodo eruptivo.

También se ha incluido la actividad sísmica diaria durante el mismo periodo de estudio, así como la precipitación diaria asociada a la estación más cercana LP_EPAS perteneciente a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). La consideración de estas informaciones adicionales tiene por objeto el analizar si existe alguna relación entre las variaciones de velocidad obtenidas y estos agentes externos, inexistente en el caso que nos ocupa. Por último, se han representado las variaciones de la deformación vertical recogidas en las estaciones GNSS LP03 y LP04, correspondientes a la red de estaciones instalada por el Instituto Geográfico Nacional.

Puede observarse que la variación de la velocidad del medio comienza el día 12 de septiembre de 2021, es decir, 7 días antes del comienzo de la erupción, coincidiendo en el tiempo con el momento del inicio del incremento de la deformación en las estaciones GNSS más cercanas al lugar donde se produjo finalmente la erupción.

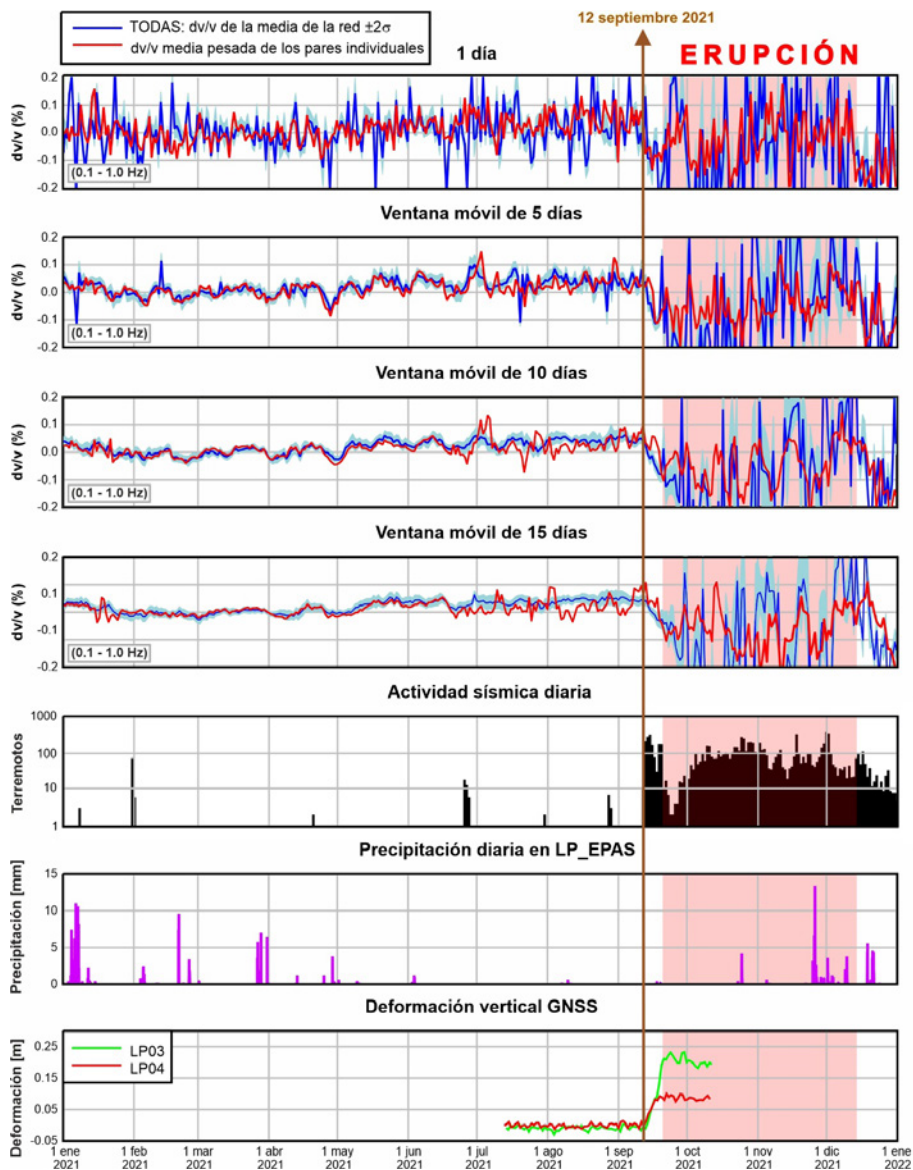


Figura 8. Valor medio de variación de velocidad obtenida para el conjunto de estaciones en función del tiempo (curva azul) y la media pesada de los diferentes pares de estaciones (curva roja) y sus correspondientes desviaciones estándar, para ventanas móviles de 1,5,10 y 15 días de duración. Asimismo, se han representado la información de precipitación diaria y de deformación de las estaciones GNSS. Se señala la fecha de inicio de la erupción de 19 de septiembre en Cumbre Vieja.

6. CONCLUSIONES

Entre los desastres naturales, son los terremotos destructores junto con las erupciones volcánicas los fenómenos que más han fascinado a los humanos, cuyos rastros pueden seguirse a través de la historia. Así ha acontecido con las erupciones volcánicas en las Islas Canarias y, en particular, en la isla de La Palma, donde todas las descripciones que nos han llegado hasta nuestros días relatan una íntima relación de ambos fenómenos.

Una erupción volcánica como la ocurrida en Cumbre Vieja el 19 de septiembre de 2021, ha puesto de manifiesto no solo la estrecha relación con la sismología, sino también con otras variables físicas como es la deformación, variaciones en el campo magnético, etcétera, y químicas. Todas ellas suponen un conjunto de diferentes métodos utilizados para comprender la gestación y el mecanismo de la erupción.

Desde el punto de vista sismológico, hemos estudiado y relocalizado la sismicidad asociada a los diferentes volcanes de Canarias, ajustando una nueva fórmula de magnitud local de Richter, que nos ha permitido confeccionar un nuevo estudio de peligrosidad sísmica para el archipiélago. Esta nueva visión de la sismicidad permitirá cuantificar nuevos parámetros de diseño antisísmico.

Utilizando la sismicidad asociada a la reciente erupción, se ha investigado y cuantificado los diferentes enjambres de sismos, lo que nos ha permitido describir el movimiento del magma en el interior de la tierra mediante el análisis del comportamiento del parámetro b . Este parámetro indica la proporción de terremotos grandes y pequeños y está relacionado con las propiedades del medio donde se producen, como son la heterogeneidad, la fragilidad y por tanto la temperatura. Este estudio puntual, previo a la erupción, se ha complementado con un estudio espacio-temporal de variación de b , obteniéndose una imagen del ascenso magmático desde el manto, a unos 40 km de profundidad, hasta una cámara magmática situada en el contacto manto-corteza, sobre los 11 km, que ha servido de depósito del magma. Debido a la gran presión a la que el magma está sometido, los caminos hacia la superficie son delimitados por el conocimiento preciso de la sismicidad asociada, deduciéndose de ella una velocidad de ascenso.

Otro tema que hemos investigado ha sido la posible relación de la erupción en Cumbre Vieja con el cambio de velocidad de propagación del medio, fenómeno también observado de forma previa a la ocurrencia de grandes terremotos. Es decir, abrir vías hacia la posibilidad del pronóstico de una erupción. Utilizando la técnica sismológica de interferometría de ruido sísmico, se ha estudiado la comparación del ruido en un periodo considerado de tranquilidad volcánica y el periodo de actividad antes, durante y después de la erupción. Los resultados son

prometedores, puesto que 7 días antes de la erupción, se han detectado variaciones significativas de la velocidad de propagación en el medio en el que se ha producido la erupción. Este pronóstico, junto con la observación de otros cambios detectados como son la deformación del terreno, permite asegurar que la técnica probada es exitosa y que podría, en un futuro inmediato, implementarse de forma rutinaria en las labores de vigilancia volcánica.

AGRADECIMIENTOS

Queremos reconocer en estas líneas el gran trabajo desarrollado antes y durante el proceso eruptivo del volcán de La Palma del 2021, por todo el personal del Instituto Geográfico Nacional con la responsabilidad en la vigilancia volcánica. Su eficacia en la instalación y mantenimiento de la instrumentación y en el tratamiento de los datos ha permitido disponer, por primera vez, de unos datos completos y de alta calidad de una erupción en la isla de La Palma. Esta información ha sido fundamental para la mitigación del daño y las labores de la protección civil durante el proceso eruptivo, además, desde el punto de vista científico, supone un impulso definitivo en la investigación volcanológica en España.

RECONOCIMIENTO

Al Dr. Rodolfo Núñez de las Cuevas, el primer Director General del Instituto Geográfico Nacional que, como ingeniero geógrafo, conocí. A él le debo la posibilidad de haber trabajado siempre, a lo largo de mi trayectoria profesional, en aquello para lo cual me formé. Siempre nos animó a todos los que bajo su dirección trabajamos a realizar con esfuerzo e ilusión todas las tareas encomendadas al Instituto Geográfico Nacional. Su visión de futuro y su entusiasmo preparó a nuestro instituto para su paso al siglo XXI, partiendo de un centro que se rehacía del largo invierno que supuso la guerra civil y el periodo de posguerra.

BIBLIOGRAFÍA

- BONELLI, J. M. (1950): *Erupción del volcán del Nambroque o San Juan (isla de La Palma). 24 de Junio-4 de Agosto de 1949*. Madrid, Instituto Geográfico y Catastral, 23 pags.
- CABRERA-PÉREZ, I., *et al.* (2023), «Geothermal and structural features of La Palma island (Canary Islands) imaged by ambient noise tomography», *Scientific Reports* 13, 12892. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39910-z>.

- D'AURIA, L., *et al.* (2022): «Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography», *Scientific Reports* 12:17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>.
- DEL FRESNO, C., *et al.* (2023): «Magmatic plumbing and Dynamic evolution of the 2021 La Palma eruption», *Nature Communications* 14, 358. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35953-y>.
- LECOCQ, T., *et al.* (2014): «MSNoise, a python package for monitoring seismic velocity changes using ambient seismic noise», *Seismological Research Letters*, 85, 715-726, <https://doi.org/10.1785/0220130073>.
- MEZCUA, J., y RUEDA, J. (2021): «A seismicity revision and a probabilistic seismic hazard assessment using the Monte Carlo approach for the Canary Islands (Spain)», *Natural Hazards* 108, 1609-1628. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04747-0>.
- (2023): «Seismic swarms and earthquake activity b-value related to the September 19, 2021, La Palma volcano eruption in Cumbre Vieja, Canary Islands (Spain)», *Bulletin of Volcanology* 85, 32 pp., <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01646-z>.
- (2024): «Seismic Velocity Variations Observed Prior to the La Palma Volcano Eruption on 19 September 2021, in Cumbre Vieja, Canary Islands (Spain)», *The Seismic Record* 4, 11-20, <https://doi.org/10.1785/0320230048>.
- RUEDA, J., *et al.* (2020): *Revisión del Catálogo sísmico de las Islas Canarias (1341-2000)*, Madrid, Centro Nacional de Información Geográfica, 230 pags. <https://doi.org/10.7419/162.34.2020>.
- RUEDA, J., y MEZCUA, J. (2022): «A local magnitude scale for a volcanic region: the Canary Islands, Spain», *Bulletin of Volcanology*, 84. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01553-9>.
- SUAREZ, E. D., *et al.* (2023): «Unveiling the pre-eruptive seismic series of the La Palma 2021 eruption: Insights through a fully automated analysis», *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 444, 107946. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107946>.
- TORRES-GONZÁLEZ, P. A., *et al.* (2020): «Unrest signals after 46 years of quiescence at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands», *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 392. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106757>.
- UTSU, T. (1999): «Representation and analysis of the earthquake size distribution: a historical review and some new approaches», *Pure and Applied Geophysics* 155, 509-535. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8677-2_15.

RESUMEN

ASPECTOS SISMOLÓGICOS DE LA ERUPCIÓN DE CUMBRE VIEJA,
LA PALMA, SEPTIEMBRE-DICIEMBRE 2021

Se presentan los últimos resultados sobre revisión de la sismicidad y su influencia en el último estudio de peligrosidad sísmica en Canarias. La estrecha relación entre sismos y erupciones puestas de manifiesto en las erupciones históricas de La Palma nos permite estudiar los distintos parámetros sismológicos y su relación con los procesos eruptivos. Así, presentamos algunos resultados deducidos de enjambres sísmicos, su distribución con la profundidad y parámetro b que indican como el magma emerge desde la litosfera a la superficie. Finalmente, se presentan los resultados de variación de la velocidad del medio alrededor de la erupción de Cumbre Vieja en La Palma algunos días antes de comenzar la erupción, mostrando la posibilidad de realizar un pronóstico de una futura erupción en el archipiélago canario.

Palabras clave: La Palma, sismicidad, peligrosidad sísmica, parámetro b , enjambres, variación de velocidad, pronóstico.

ABSTRACT

SEISMOLOGICAL ASPECTS OF THE CUMBRE VIEJA, LA PALMA
ERUPTION OF SEPTEMBER-DECEMBER 2021

A revision of the latest seismicity studies is presented together with the resulting seismic hazard map for the Canary Islands. The clear relation between earthquakes and volcanic eruptions, particularly in the historic eruptions recorded in La Palma permits us to study seismological parameters and its relationship with the eruption process. Then, we present some results about seismic swarms, their depth distribution and associated b parameters that indicate how magma from the lithosphere is emerging to the surface. Finally, we present results of velocity variation of the media around the Cumbre Vieja, La Palma eruption several days before it started, showing that it is possible to forecast a future eruption in the Canary archipelago.

Key words: La Palma, seismicity, seismic hazard, b parameter, swarms, velocity variation, eruption forecast.