

# La erupción volcánica de La Palma y el papel de la Agencia Estatal de Meteorología

OMAIRA GARCÍA<sup>1</sup>, DAVID SUÁREZ<sup>2</sup>, EMILIO CUEVAS<sup>1</sup>, RAMÓN RAMOS<sup>1</sup>, ÁFRICA BARRETO<sup>1</sup>, MIGUEL HERNÁNDEZ<sup>2</sup>, VÍCTOR QUINTERO<sup>2</sup>, CARLOS TOLEDANO<sup>2</sup>, MICHAËL SICARD<sup>4</sup>, CARMEN CÓRDOBA-JABONERO<sup>2</sup>, VICENZO RIZ<sup>6</sup>, REIJO ROININEN<sup>7</sup>, CÉSAR LÓPEZ<sup>8</sup>, JON VILCHES<sup>9</sup>, MAXIMILIAN WEISS<sup>10</sup>, VIRGILIO CARREÑO<sup>11</sup>, NOEMIE TAQUET<sup>11</sup>, THOMAS BOULESTEIX<sup>11</sup>, EUGENIO FRAILE<sup>12</sup>, CARLOS TORRES<sup>1</sup>, NATALIA PRATS<sup>1</sup>, ANTONIO ALCÁNTARA<sup>1</sup>, SERGIO LEÓN<sup>13</sup>, PEDRO P. RIVAS<sup>1</sup>, ÓSCAR ÁLVAREZ<sup>1</sup>, FRANCISCO PARRA<sup>1</sup>, JAVIER DE LUIS<sup>2</sup>, CÉSAR GONZÁLEZ<sup>2</sup>, CRISTINA ARMAS<sup>2</sup>, PEDRO M. ROMERO<sup>1</sup>, JUAN J. DE BUSTOS<sup>1</sup>, ALBERTO REDONDAS<sup>1</sup>, CARLOS MARRERO<sup>1</sup>, CELIA MILFORD<sup>1</sup>, ROBERTO ROMÁN<sup>4</sup>, RAMIRO GONZÁLEZ<sup>4</sup>, MARÍA Á. LÓPEZ-CAYUELA<sup>5</sup>, CLARA V. CARVAJAL-PÉREZ<sup>5</sup>, NAYRA CHINEA<sup>8,13</sup>, ROSA GARCÍA<sup>13</sup>, FERNANDO ALMANSA<sup>14</sup>, YENNY GONZÁLEZ<sup>14</sup>, FERNANDO BULLÓN<sup>2</sup>, MARTA POGGIO<sup>2</sup>, CLEMENTE RIVERA<sup>2</sup>, CONCEPCIÓN BAYO<sup>1</sup>, FERNANDO REY<sup>15</sup>

<sup>1</sup>CENTRO DE INVESTIGACIÓN ATMOSFÉRICA DE IZAÑA (CIAI), AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA (AEMET), SANTA CRUZ DE TENERIFE, ESPAÑA.

<sup>2</sup>DELEGACIÓN TERRITORIAL DE AEMET EN CANARIAS (DTCAN), AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA (AEMET), LAS PALMAS DE GRAN CANARIA/SANTA CRUZ DE TENERIFE, ESPAÑA.

<sup>3</sup>GRUPO DE ÓPTICA ATMOSFÉRICA (GOA-UVA), UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, VALLADOLID, ESPAÑA

<sup>4</sup>COMMSENSLAB, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, BARCELONA, ESPAÑA.

<sup>5</sup>INSTITUTO NACIONAL DE TÉCNICA AEROSPAZIAL (INTA), ÁREA DE INVESTIGACIÓN E INSTRUMENTACIÓN ATMOSFÉRICA, TORREJÓN DE ARDOZ, ESPAÑA.

<sup>6</sup>INFN-GSGC L'AQUILA AND CETEMPS-DSFC, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELL'AQUILA, L'AQUILA, ITALIA.

<sup>7</sup>VAISALA OYJ, HELSINKI, FINLANDIA.

<sup>8</sup>SELTEC CANARIAS, S.L., LA LAGUNA, ESPAÑA.

<sup>9</sup>VICECONSEJERÍA DE LUCHA CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO, GOBIERNO DE CANARIAS, TENERIFE, ESPAÑA.

<sup>10</sup>PALAS GMBH, KARLSRUHE, ALEMANIA.

<sup>11</sup>INSTITUTO DE PRODUCTOS NATURALES Y AGROBIOLOGÍA (IPNA), CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC), LA LAGUNA, ESPAÑA.

<sup>12</sup>INSTITUTO ESPAÑOL DE OCEANOGRAFÍA (IEO), CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC), SANTA CRUZ DE TENERIFE, ESPAÑA.

<sup>13</sup>TRAGSATEC, MADRID, ESPAÑA.

<sup>14</sup>CIMEL ELECTRONIQUE, PARÍS, FRANCIA.

<sup>15</sup>LUZLUX, S.L., VIGO, ESPAÑA.

Durante la erupción del volcán de Cumbre Vieja, en la isla de La Palma en 2021, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), en calidad de Servicio Nacional y Autoridad Meteorológica del Estado, prestó diferentes servicios de apoyo al Comité Científico y al Comité Asesor del Plan de Emergencias Volcánicas de Canarias (PEVOLCA). Parte de sus actividades abarcaron la vigilancia y predicción meteorológica, la monitorización y predicción del transporte del penacho volcánico, y la valoración del impacto de las emisiones de gases y cenizas de la erupción volcánica en la calidad del aire en la isla de La Palma y en la región de Canarias.

Una de las principales funciones de AEMET es la vigilancia continua de las condiciones meteorológicas, climáticas y de la composición físico-química de la atmósfera sobre el territorio nacional, especialmente de aquellos factores que puedan perturbar las mismas. En este sentido, AEMET participó activamente en el seguimiento de la crisis de emergencia volcánica en la isla de La Palma, tanto proveyendo productos meteorológicos operacionales como a nivel de investigación. Desde un punto de vista operacional, AEMET en su condición de Autoridad Meteorológica suministró predicciones específicas y realizó la vigilancia de la dispersión de las cenizas volcánicas en la atmósfera en coordinación con el Centro de Avisos de Cenizas Volcánicas (VAAC) de Toulouse, que es el centro u organismo que tiene competencias sobre la región de Canarias. Para ello, AEMET participó en las reuniones diarias del comité científico del PEVOLCA, realizando labores de asesoría meteorológica durante todo el proceso eruptivo, así como en las reuniones de la Célula de Coordinación y Seguimiento de Cenizas Volcánicas de La Palma, establecida por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, para el asesoramiento de los gestores de tráfico aéreo, gestores aeroportuarios y las autoridades militares. Por otra parte, a nivel de investigación, AEMET ha dedicado especial atención a aspectos claves como el transporte de la nube de dispersión volcánica en la región subtropical del Atlántico Norte, su composición físico-química y su impacto en la calidad del aire y el clima.

## Modelización de la nube de dispersión volcánica a través de MOCAGE

AEMET emplea operativamente el modelo de transporte químico MOCAGE para suministrar predicciones de la composición química de la atmósfera enfocadas a la calidad del aire [1]. No obstante, para la crisis de emergencia volcánica de La Palma, AEMET

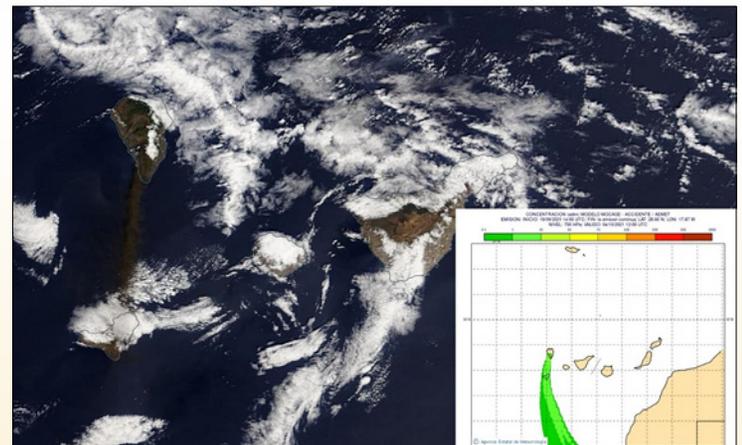


Figura 1: Imagen captada por el sensor MODIS a bordo del satélite Terra de la NASA en el canal visible el día 4/10/2021 a las 11:55 UTC. Se observa el penacho de cenizas como una banda marrón dispersándose en dirección sur sobre la isla de El Hierro (Fuente: NASA Worldview). En el recuadro inferior derecho, mapa de dispersión de cenizas previsto para el mismo día a las 12:00 UTC por el modelo MOCAGE. Figura tomada de [2].

proporcionó diariamente simulaciones especializadas de la dispersión de la nube de cenizas volcánicas en diferentes niveles de presión (desde 950 hasta 300 hPa), así como deposición en 12 horas y total en columna, con diferentes alcances temporales (hasta 72 horas). Para ello, se corrió MOCAGE en el superordenador Cirrus de AEMET en modo accidente, desactivando el módulo de química del modelo y funcionando como un modelo de dispersión. La figura 1 muestra un ejemplo de estas simulaciones y la imagen de satélite correspondiente.

## Despliegue de instrumentación científica en la isla de La Palma

Para complementar las labores de observación y seguimiento de la evolución de la nube de cenizas volcánicas, AEMET realizó, a través del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI), de la Delegación Territorial de AEMET en Canarias (DTCAN) y en colaboración con numerosas instituciones nacionales e internacionales, un despliegue de instrumentación científica en La Palma con un doble objetivo (figura 2). El primero es caracterizar la estructura vertical del penacho eruptivo, y monitorizar en tiempo real los cambios que se produzcan en dicha estructura, así como perimetrar la salida de la nube de dispersión. El segundo objetivo es el de contribuir en la implantación de una red de calidad del aire de emergencia que permita conocer el impacto de las emisiones volcánicas en la salud de la población de La Palma. Esta red destina-

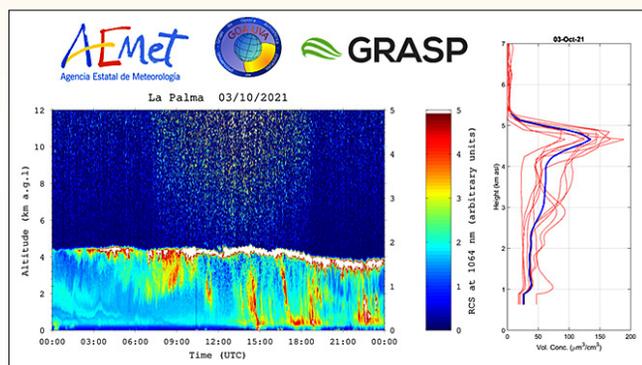


Figura 3 Imagen superior: instrumentación instalada en la estación de Fuencaliente (de izquierda a derecha): ceilómetro Lufft CHM15k, cámara de todo cielo y fotómetro solar/lunar perteneciente a la red AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Imagen inferior: evolución diaria del perfil de retrodispersión atenuado de aerosoles obtenido del ceilómetro Lufft CHM15k y correspondientes perfiles de concentraciones volumétricas de aerosoles obtenidas con el código de inversión GRASP ([www.grasp-open.com](http://www.grasp-open.com)). Figura tomada de [3].

- Roque de los Muchachos (2400 m): Lidar Raman ARCADE, fotómetro solar (AERONET)
- El Paso (700 m): Ceilómetro CL61
- Tazacorte (140 m): SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y material particulado superficial, cámara todo cielo, radiómetro ZEN, lidar MPL (MPLNet + e-profile), deposición cenizas
- Aeropuerto (60 m): Ceilómetro CL51 (e-profile)
- Fuencaliente (680 m): Fotómetro solar/lunar (AERONET), cámara todo cielo, CHM15k Luff (e-profile), EM27 FTS
- Los Llanos (295 m): sondeos meteorológicos
- Angeles-Alvaríño (Barco): AQT420 (SO<sub>2</sub>, CO y O<sub>3</sub>)



Figura 2: Localización e instrumentación instalada en las siete estaciones (estrellas) desplegadas en La Palma para seguir el proceso volcánico por diferentes organizaciones en colaboración con AEMET. El punto azul representa la ubicación del centro emisor, el área roja la zona afectada por el flujo de lava, y los círculos representan la ubicación aproximada de los diferentes sismos asociados al proceso eruptivo (Fuente: Instituto Geográfico Nacional, [www.ign.es](http://www.ign.es)). Figura tomada de [3].

da a las autoridades de Emergencias y Protección Civil está básicamente soportada por la Unidad Militar de Emergencias (UME), el Gobierno de Canarias y el Cabildo Insular de La Palma.

## Red de Perfiladores Verticales

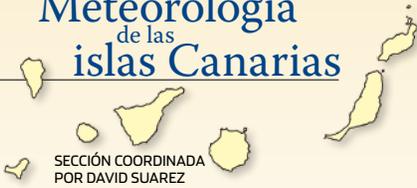
La red de perfiladores verticales instalada ex profeso en La Palma para el seguimiento del proceso eruptivo tenía como objetivo la medida en tiempo real de la altura de la nube de dispersión volcánica, así como la caracterización de los aerosoles volcánicos emitidos, y fue desplegada en el contexto de la infraestructura europea ACTRIS (Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure) [3]. Esta red constaba de cinco instru-

mentos (tres ceilómetros y dos sistemas lidar), que fueron instalados perimetrando el centro emisor (ver detalles en figura 2). Los datos de esta nueva red de emergencia se proporcionaron en tiempo real al PEVOLCA y se han incorporado en la red EUMETNET e-Profile ([www.eumetnet.eu/activities/observations-programme/current-activities/e-profile/](http://www.eumetnet.eu/activities/observations-programme/current-activities/e-profile/)), que apoya al VAAC de Toulouse y al programa de observación de Copernicus. Un ejemplo detallado de

la evolución vertical de la pluma volcánica se presenta en la figura 3. En este caso, los aerosoles volcánicos alcanzaron los 5 km de altura, afectando al nivel de superficie debido a procesos de deposición de la capa de ceniza.

## Calidad del Aire

La monitorización continua y en tiempo real de la calidad del aire en toda la isla de La Palma fue una de las prioridades del PEVOLCA, del Gobierno de Canarias y del Cabildo Insular de La Palma. Por ello, desde el comienzo del proceso eruptivo se desplegó ex profeso una red de estaciones de calidad del aire, que monitorizó las concentraciones superficiales de los principales contaminantes esperados durante el mismo (material particulado y compuestos de azufre, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S). La figura 4 muestra las concentraciones superficiales de SO<sub>2</sub> de la red de calidad del aire de La Palma para un evento donde el penacho volcánico se desplazó hacia el oeste de la isla, afectando a los municipios de El Paso, Los Llanos de Aridane y



Tazacorte, principalmente. Durante este episodio no se superaron los valores límite horarios (VLH) o diarios (VLD) de  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , establecidos por la legislación vigente en calidad del aire (Directiva 2008/50/EC, [4]). No obstante, durante el proceso eruptivo, sí se detectaron eventos puntuales excediendo estos umbrales (e.g. el VLH excedió el 4.2 %, 1.2 % y 1.9 % de los promedios horarios para Los Llanos, El Paso y Tazacorte, respectivamente).

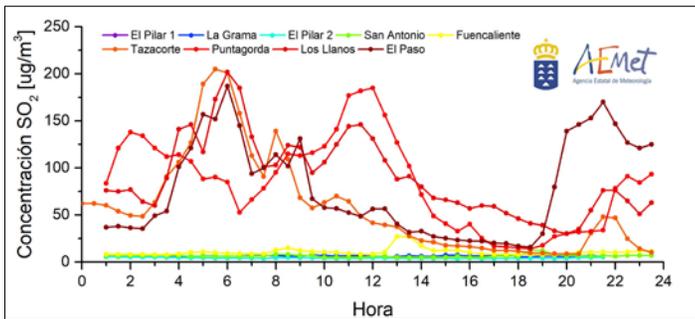


Figura 4: Imagen del penacho volcánico, tomada desde el Pico Fuente Nueva (30/11/2021), donde se observa su desplazamiento hacia el oeste de la isla (imagen superior). Evolución temporal de las concentraciones superficiales de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) registradas en la red de estaciones de calidad del aire del Gobierno de Canarias y AEMET para ese mismo día (imagen inferior).

## Sondeos meteorológicos

Con el objetivo de reforzar la observación y monitorización de la estructura vertical de la atmósfera en la principal zona de afectación de la erupción volcánica, AEMET instaló y operó, en colaboración con la UME, una base de radiosondeos en las cercanías del volcán (estación de Los Llanos en la figura 2). Desde esta base se realizó un sondeo diario, a las 12 UTC, que permitió la determinación y detección temprana de inversiones térmicas en niveles bajos, lo cual es de suma importancia desde el punto de vista de la calidad del aire, ya que favorecen la acumulación de gases y aerosoles emitidos por el proceso volcánico o por otras fuentes, como la quema de biomasa o episodios de polvo sahariano. Los radiosondeos

permiten además obtener una caracterización detallada de la distribución vertical del viento, crítico para conocer el desplazamiento de la nube de dispersión volcánica y sus posibles impactos en la navegación aérea.

## Observatorio Atmosférico de Izaña

La circulación en las capas bajas y medias de la atmósfera favoreció que las nubes de cenizas y gases volcánicos se dispersaran sobre el Atlántico subtropical, permitiendo que el Observatorio Atmosférico de Izaña (IZO, AEMET), situado en la isla de Tenerife a 2.4 km s.n.m. y a una distancia de 140 km del volcán, registrara numerosos impactos directos de la nube de dispersión volcánica durante todo el proceso eruptivo. Dado el complejo programa para la monitorización e investigación de la composición atmosférica que dispone esta estación de Vigilancia Atmosférica Global (VAG, Organización Meteorológica Mundial, [6]), la composición físico-química de los aerosoles y gases presentes en la nube de dispersión pudo ser caracterizada detalladamente.

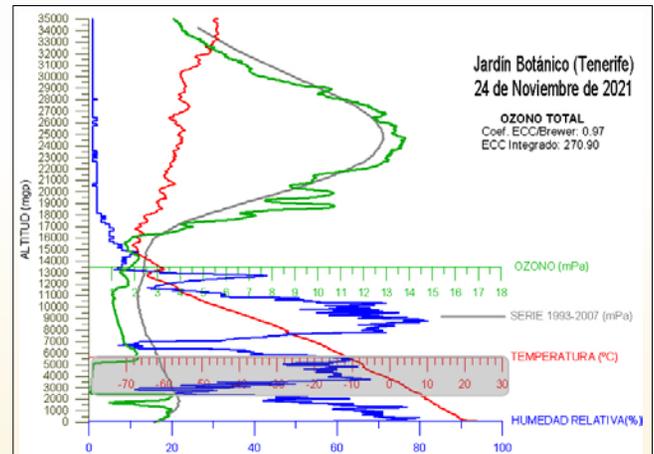
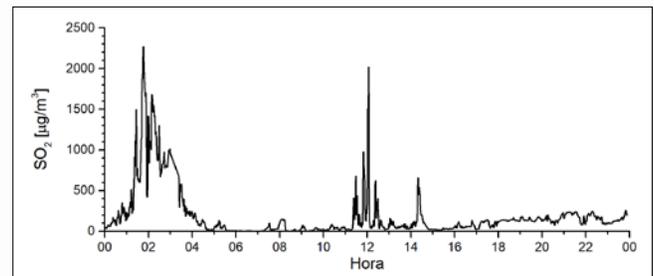


Figura 5: Imagen desde el Observatorio Atmosférico de Izaña, donde se observa el impacto del penacho volcánico en tonos blanquecinos junto al Teide (imagen superior). Evolución temporal de las concentraciones superficiales de  $\text{SO}_2$  registradas en el Observatorio Atmosférico de Izaña durante el 24/11/2021 (imagen central). Perfil vertical de ozono, temperatura y humedad relativa obtenida del ozonosondeo lanzado el mismo día a las 12 UTC desde la estación del Botánico del Puerto de la Cruz a 12 km al norte del observatorio. La zona sombreada en gris indica la capa que abarca la pluma volcánica.

En la figura 5 se muestra, a modo de ejemplo, un evento donde las concentraciones superficiales de  $\text{SO}_2$ , uno de los principales trazadores de las emisiones volcánicas, superaron en varios órdenes de magnitud los valores de condiciones de fondo habituales de este observatorio (inferiores a  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) [6]. Se muestra, asimismo, para ese mismo evento los perfiles verticales de ozono, temperatura y humedad relativa obtenidos del programa de ozonsondeos del observatorio, perteneciente a la red NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change), donde se observa claramente que la nube volcánica se sitúa entre los 2.5-5 km de altitud y viene acompañada de una reducción drástica de las concentraciones de ozono y un aumento significativo de la humedad relativa de la capa (zona sombreada en gris en figura 5).

**El proceso eruptivo del volcán de Cumbre Vieja supuso un desafío para la sociedad palmera, pero también para todas las instituciones y organizaciones que prestaron su apoyo en diferentes aspectos de esta crisis. La colaboración y coordinación entre todas fue clave para la gestión de esta crisis y es un ejemplo claro del servicio de la Ciencia para la Sociedad.**

## Referencias

[1] Josse B., Simon P. and V.-H. Peuch, Rn-222 global simulations with the multiscale CTM MOCAGE, Tellus, 56B, 339-356, 2004.

[2] Informe técnico de AEMET sobre el "Servicio meteorológico a la navegación aérea durante la erupción volcánica en La Palma", Comunicación interna, 2022.

[3] <https://www.actris.eu/news-events/news/actris-spain-coordinating-unprecedented-actions-cumbre-vieja-volcanic-emergency>, 2021

[4] Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0050#l1e89-30-1>, 2008

[5] <https://aemetblog.es/2022/03/22/sinergia-entre-medidas-superficiales-y-en-columna-en-la-estacion-de-vigilancia-atmosferica-global-de-izana-aplicacion-a-la-erupcion-volcanica-de-la-palma/>

[6] Cuevas, E., Milford, C., Bustos, J. J., R., García, O. E., García, R. D., Gómez-Peláez, A. J., Guirado-Fuentes, C., Marrero, C., Prats, N., Ramos, R., Redondas, A., Reyes, E., Rivas-Soriano, P. P., Rodríguez, S., Romero-Campos, P. M., Torres, C. J., Schneider, M., Yela, M., Belmonte, J., del Campo-Hernández, R., Almansa, F., Barreto, A., López-Solano, C., Basart, S., Terradellas, E., Werner, E., Afonso, S., Bayo, C., Berjón, A., Carreño, V., Castro, N. J., China, N., Cruz, A. M., Damas, M., De Ory-Ajamil, F., García, M.I., Gómez-Trueba, V., Hernández, C., Hernández, Y., Hernández-Cruz, B., León-Luís, S. F., López-Fernández, R., López-Solano, J., Parra, F., Rodríguez, E., Rodríguez-Valido, M., Sálamo, C., Sanromá, E., Santana, D., Santo Tomás, F., Sepúlveda, E., and Sosa, E.: Izaña Atmospheric Research Center Activity Report 2017-2018. (Eds. Cuevas, E., Milford, C. and Tarasova, O.), State Meteorological Agency (AEMET), Madrid, Spain and World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, WMO/GAW Report No. 247, 2019.

# La erupción volcánica de la Palma y sus meteoros

OMAIRA GARCÍA<sup>1</sup>, FERNANDO REY<sup>2</sup>, FERNANDO BULLÓN<sup>3</sup>, DAVID SUÁREZ<sup>3</sup>, EMILIO CUEVAS<sup>1</sup>, Y RAMÓN RAMOS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CENTRO DE INVESTIGACIÓN ATMOSFÉRICA DE IZAÑA (CIAI), AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA (AEMET), SANTA CRUZ DE TENERIFE, ESPAÑA.

<sup>2</sup>LUZLUX, S.L., VIGO, ESPAÑA.

<sup>3</sup>DELEGACIÓN TERRITORIAL DE AEMET EN CANARIAS, AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA (AEMET), LAS PALMAS DE GRAN CANARIA/SANTA CRUZ DE TENERIFE, ESPAÑA.

Después de una semana de intensa actividad tanto sísmica como de deformación del terreno, el día 19 septiembre de 2021 se inició una erupción volcánica en Cumbre Vieja, en la zona de Cabeza de Vaca en la isla de La Palma (Islas Canarias). Esta erupción volcánica, que finalizó oficialmente el 25 de diciembre de 2021, se ha caracterizado por combinar fases explosivas, durante las cuales se emitieron fundamentalmente cenizas y piroclastos, con fases efusivas, cuando se expulsaron grandes volúmenes de gases que fueron inyectados directamente en capas bajas y medias de la troposfera [1, 2] (figura 1).

Estas emisiones continuas de grandes cantidades de partículas y vapor de agua a altas temperaturas ocasionó que la erupción estuviera acompañada por la formación de nubes tipo cúmulos (*cumulus*) y estratocúmulos (*stratocumulus*) en línea asociados a la pluma volcánica en niveles bajos, así como frecuentemente por la generación de pirocúmulos (*flammagenitus*) con cimas a 6 km de altitud aproximadamente (figura 2). Dada la alta concentración de partículas, actuando como núcleos



Figura 1. Imagen de las emisiones de piroclastos, cenizas, gases (vapor de agua principalmente) y depósitos de azufre elemental sobre el cono volcánico tomada desde el barrio de Tacande (El Paso, 13/11/2021).