

Figura 1. Fotografía tomada desde el Observatorio de Santa Cruz de Tenerife del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI-AEMET), frente al puerto de la misma ciudad, a las 17:22 h del 23 de febrero (la distancia a los barcos es de unos 200 metros).



Introducción

El pasado mes de febrero Canarias vivió uno de sus carnavales más curiosos meteorológicamente hablando. El escenario se tornó naranja, dándole un aspecto de ensoñación marciana (Figura 1). Del 22 al 25 de febrero el archipiélago canario sufrió el que probablemente sea el episodio de intrusión de polvo sahariano más importante desde que se tienen registros instrumentales en las islas.

En realidad, la presencia de la calima, como se viene mencionando a este fenómeno de llegada de masas de aire del continente africano cargadas de polvo mineral por la cercanía al Sahara, no es nada nuevo. Los episodios de intrusiones saharianas acaecidos en Canarias han sido documentados desde el siglo XIX, donde se puede leer en escritos de la época una muestra de *“lluvia de tierra en la noche de 22 de febrero de 1883 en Tenerife”*; por otro lado Darwin en 1832, a su llegada al puerto de Santa Cruz de Tenerife, describe una situación de intensa calima; otra referencia ampliamente descrita es la de febrero de 1898 y la presencia de grandes cantidades de polvo en suspensión que aparece reflejada también en multitud de textos antiguos. Este tipo de fenómenos atmosféricos son muy recurrentes en las Islas, aunque los eventos de mayor intensidad sólo se producen de una a tres veces anualmente, constituyendo una amenaza más en el clima canario (Dorta et al., 2005). Según un estudio que se está llevando a cabo entre el Centro de Investigación Atmosférica de Izaña y

la Delegación Territorial de Aemet en Canarias, los eventos más intensos suelen producirse en invierno y son de duración más corta que los de verano (con una duración media de entre 3 y 4 días, frente a los 6 a 8 días de verano).

Dichos episodios con altas concentraciones de polvo en suspensión, pueden presentar efectos en la salud de las personas, en la agricultura y en las condiciones de visibilidad. El mes de febrero nos trajo una extensa muestra de calimas de diferente intensidad y duración, no solo la que aquí nos ocupa, y nos permitió vivir de primera mano las consecuencias de dichas fenómenos.

En general, podemos describir dos tipos de escenarios en cuanto a calimas en el archipiélago se refiere (Barreto et al., 2019), y que ya hemos mencionado sucintamente:

–**“Escenarios de verano”** que afectan predominantemente a las altitudes más altas (de 2 a 6 km, por encima de la capa marina de mezcla), entre julio y agosto (Rodríguez et al., 2015). Este tipo de intrusiones dan un aspecto “turbio” al cielo y al sol, si miramos en la vertical, pero no suele llegar a afectar a la visibilidad en superficie ni a la calidad del aire de la misma.

–**“Escenarios de invierno”** que afectan predominantemente a altitudes más bajas (de 0 a 2 km, principalmente en la capa de mezcla marina), entre diciembre y marzo (Alonso-Pérez et al., 2011; Milford et al., 2020). En estos casos, la parte oriental del archipiélago es la más afectada, debido a la

advección directa de polvo del cercano desierto del Sáhara, y por tanto impactando más directamente sobre la población (que se concentra en zonas bajas de las islas) empobreciendo la calidad del aire y reduciendo la visibilidad en la horizontal, ya que se añade además la característica de ser calimas más intensas (Milford et al., 2020; Dorta et al., 2005).

Contexto sinóptico y modelos

Las tormentas de arena y polvo generalmente ocurren cuando fuertes vientos levantan grandes cantidades de arena y polvo de suelos desnudos y secos a la atmósfera. Son fenómenos meteorológicos adversos comunes en regiones áridas y semiáridas, y pueden llegar a afectar zonas muy alejadas de las fuentes de origen (Goudie and Middleton, 2006). Se han descrito una serie de patrones sinópticos que son los que modulan la entrada de calimas en Canarias, principalmente divididas en episodios de invierno y episodios de verano. Aquí vamos a mostrar de forma muy resumida cuál fue el entorno sinóptico observado en esos días.

Como muestra el análisis para el día 22 de febrero 2020 a las 12 UT del modelo HRES-IFS del ECMWF, varias estructuras meteorológicas estuvieron implicadas en el evento. En niveles bajos (Figura 2 izq) la configuración sinóptica muestra un marcado dipolo latitudinal, con anticiclón de 1034 hPa al oeste de la península ibérica y bajas presiones al sur de Canarias. Además, el dipolo orográfico del Atlas incrementa el gradiente de presión al sur de esta cordillera, con lo que Canarias se veía afectada por un flujo intenso de componente este. La entrada de la masa de aire africana es modulada por la presencia de la dorsal cálida en 850 hPa (Figura 2 izq; en color las temperaturas en 850 hPa). La implicación de una onda V-invertida en el proceso de la “inyección de polvo”, fue considerable. Al este del eje de dicha onda se forma una zona de convergencias, pudiendo estas constituir un mecanismo amplificador en la congregación del polvo mineral. Además, el ascenso de la masa de aire provocado por las convergencias de niveles bajos asociadas al patrón de V-invertida generó nubosidad (principalmente media) al final del día 22, y esta nubosidad sería embebida por el núcleo frío de la DANA (Figura 2 dcha), situada al oeste del archipiélago canario. El polvo saliente del continente africano interactuó con la DANA que permaneció prácticamente estacionaria has-

ta el final del día 25. La inestabilidad de la DANA hizo que la capa de polvo se extendiese desde superficie hasta 5 km de altitud. Además, el estado estacionario de la DANA provocó la recirculación del polvo y que se registrasen sobre las islas tres picos de polvo, como se mostrará en la siguiente sección. Las irrupciones intensas que tienen efecto sobre las islas Canarias en invierno están normalmente asociadas a la presencia de DANA o bajas profundas en el entorno del archipiélago. El mapa de anomalías de geopotencial en 500 hPa (Figura 3) obtenidas del reanálisis del modelo NCEP/NCAR, ponen de manifiesto una marcada anomalía negativa en la altura geopotencial durante el evento aquí analizado, respecto a la climatología 1981-2010 del modelo.

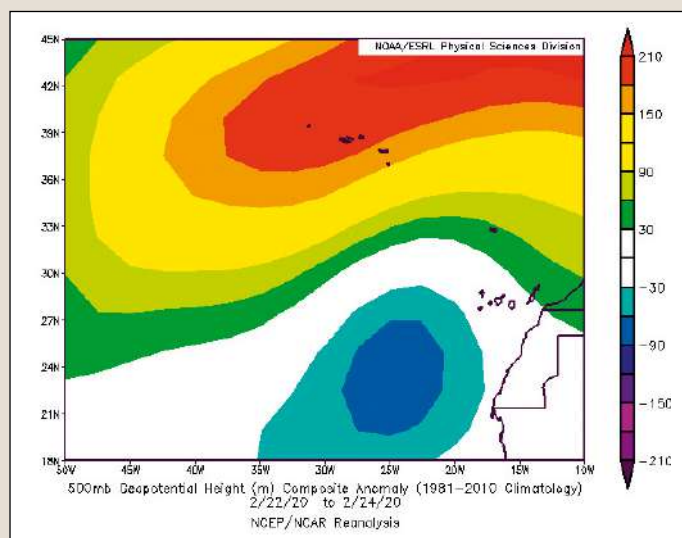


Figura 3 Anomalías de geopotencial en 500 hPa durante el evento, respecto a la climatología 1981-2010 del modelo NCEP/NCAR. (Imagen suministrada por NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>)

El modelo operativo de predicción de polvo utilizado en AEMET, el NMMB MONARCH (<https://dust.aemet.es/>), del “WMO Regional Specialized Meteorological Center with activity specialization on Atmospheric Sand and Dust Forecast (RSMC-ASDF)”, que se corre en el Barcelona Supercomputing Centre-Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS), predijo a 30 horas vista dicha intrusión con muy buen acierto, tanto en tiempo como en intensidad (Figura 4).

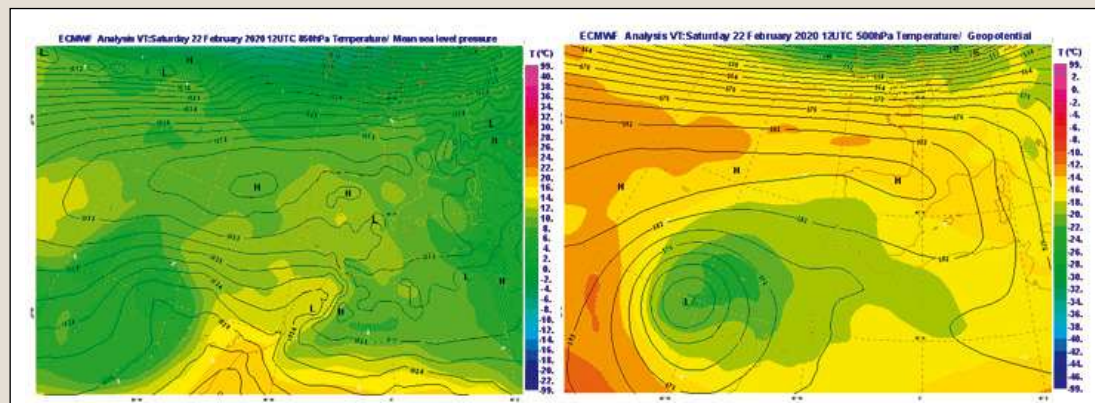


Figura 2. Análisis del modelo HRES-IFS del ECMWF, para el 22 de febrero 2020 a las 12 UTC. Izquierda: Presión a nivel del mar en hPa (contornos negros) y temperatura (en °C) en el nivel de 850hPa en colores. Derecha: Altura del geopotencial y temperatura en el nivel de 500 hPa.

Trazas de la tempe

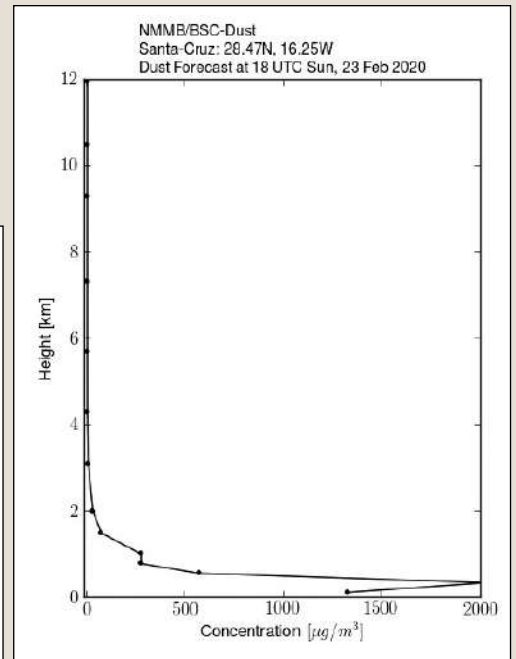
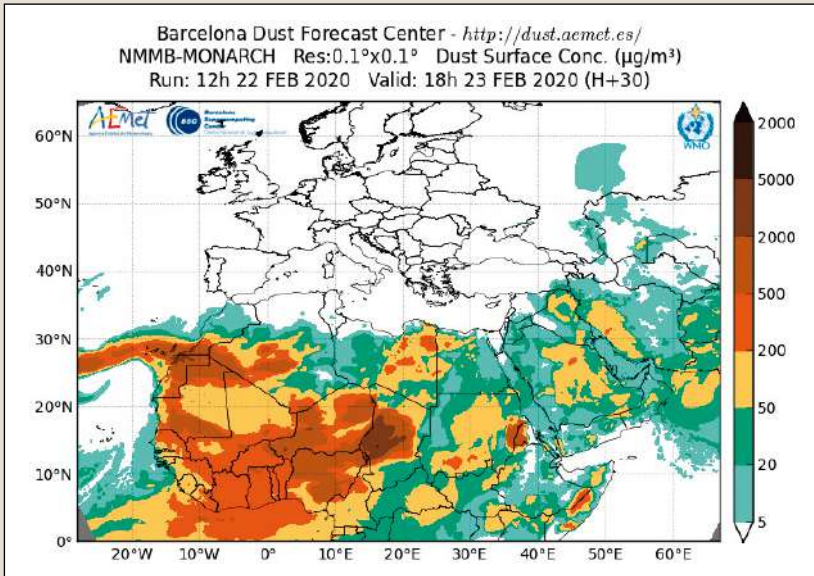
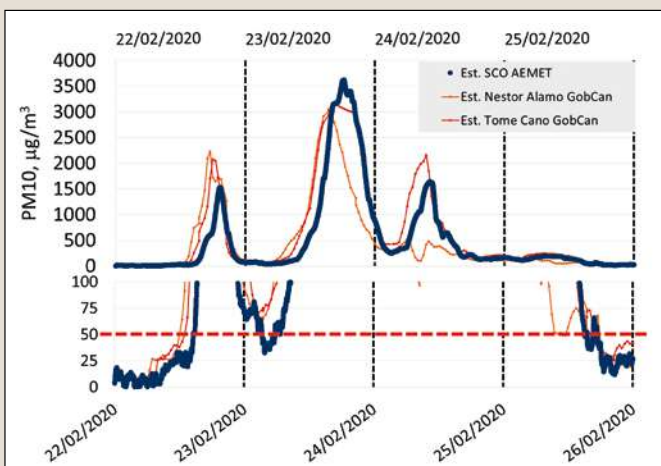


Figura 4. Salidas del modelo NMMB-MONARCH del Barcelona Dust Forecast Center para el día 23 a las 18h (alcance H+30), izquierda concentración de polvo en superficie, y derecha perfil vertical de concentración de polvo sobre Santa Cruz de Tenerife.

Observaciones

La evolución temporal del parámetro PM10 (concentración de material particulado con diámetro menor a 10 micrómetros), utilizado para la medida de la calidad del aire, se muestra en la figura 5. En la misma se han graficado los valores de la estación experimental que el Centro de Investigación Atmosférica de Izaña tiene en su estación VAG (Vigilancia Atmosférica Global)-Local en Santa Cruz de Tenerife (desde donde se tomó la fotografía de la figura 1). Junto con los datos de esta estación se han graficado los valores de dos estaciones pertenecientes a la red de calidad del aire del Gobierno de Canarias, una en la misma ciudad de Santa Cruz de Tenerife, pero ubicada en el interior de la misma, más alejada de la costa (Tomé Cano) y otra en la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria, en la isla vecina de Gran Canaria (Néstor Álamo, también urbana). Nos vamos a fijar en los valores de la primera estación, pero se muestran las estaciones del Gobierno de Canarias como indicativo del impacto regional de dicho evento (afectando a la isla vecina así como al resto del archipiélago, aunque no se muestran valores del resto de islas por brevedad).



Si tenemos en cuenta que la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Unión Europea (EU) establecen como valor límite máximo para la media diaria de PM10 en 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, observamos que durante el periodo que nos ocupa, los valores medidos estuvieron en todo momento por encima de este límite (zoom inferior figura 5).

Si examinamos la gráfica, vemos los tres picos de intensidad extraordinaria, con un fondo de material particulado elevado. Es decir, el aporte de material particulado del continente africano fue importante y continuo, pero con diferente intensidad a lo largo de estos tres días, debido a la dinámica de la DANA y su comportamiento estacionario, como se mencionó en el apartado anterior. Los valores de los picos de los días 22 en torno a las 19 h y del 24 en torno a las 10 h fueron de unos 1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con promedios diarios de 219 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 514 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores ya de por sí históricamente altos. En la introducción de este artículo apuntábamos al estudio de caracterización de las intrusiones de polvo en Canarias que se está desarrollando actualmente, en el que se clasifican las intrusiones desérticas intensas como aquellas con PM10 diario por encima de los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, las cuales suelen tener lugar en invierno con una frecuencia de 2 a 3 por año. Pero también cabe citar aquí el trabajo de Dorta et al., 2005, donde hablaban de valores extremos que superan los 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en cinco ocasiones a lo largo de dos periodos de dos años de medidas de PM10 diario en una estación a 1900 m de altura en Gran Canaria, y de eventos intensos en general en el archipiélago con PM10 > 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con una frecuencia aproximada de 2 al año. Es decir, ya de por sí el mes de febrero fue extraordinario solo con esos dos pulsos, y si a los valores anteriores le sumamos el pico del día 23, en torno a las 18 h, que llegó a alcanzar los 3500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con el promedio diario de 1187 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ podemos estar ante la intrusión

Figura 5. Evolución temporal del PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la isla de Tenerife (estaciones SCO AEMET y Tomé Cano) y Gran Canaria (estación Néstor Álamo). Zona inferior de la figura, ampliación del eje de concentraciones donde la línea horizontal roja muestra el valor límite máximo diario de PM10 reconocido por la OMS y por la UE (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

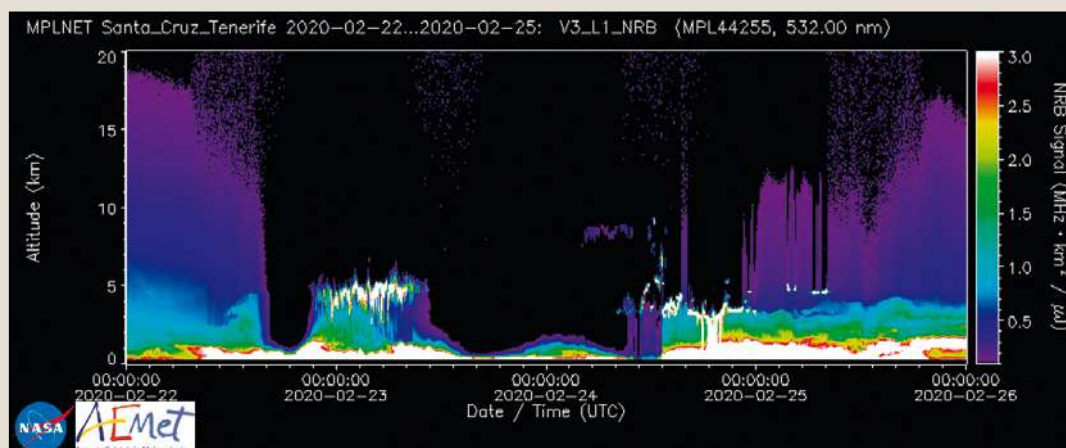


Figura 6. Perfil vertical de aerosol a partir de las medidas del sistema lidar micropulsado de la red MPLNET-NASA ubicado en el observatorio de Santa Cruz de Tenerife del CIAI-AEMET.

de polvo más intensa que haya vivido el archipiélago desde que se tienen registros instrumentales. Además, puntualizar que dichos valores extremos se concentraron en la segunda mitad del día 23, en cuyo periodo las concentraciones del PM10 horario no bajaron de los $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Otro hecho singular de este episodio fue el enorme espesor de la capa de polvo (desde el nivel del mar hasta unos 5 km de altura), lo que no suele ser habitual en las intrusiones de polvo de invierno, ya que suelen estar confinadas en los primeros 2 km. Esto se puede observar en la figura 6 a partir de las medidas del sistema lidar micropulsado ubicado en la misma estación de Santa Cruz del CIAI-AEMET, perteneciente a la red MPLNET de la NASA. Este tipo de instrumentación trabaja emitiendo un pulso láser a la atmósfera, que es retrodispersado por los componentes de ésta (aerosol y vapor de agua) y retorna al mismo, recogiendo dicha señal retrodispersada mediante un telescopio. Al inicio del día 22 la señal podía llegar a las capas más altas del límite de detección del sistema, pero ya se observa la presencia de polvo en las capas más bajas. Al final de la tarde del 22 la capa desértica era ya tan densa, que atenuaba por completo la señal del láser y no permitía que ésta fuera más allá del kilómetro. Pasado el pico intenso del día 22, la señal es capaz de llegar a alturas mayores sin llegar a completar el perfil, para de nuevo, a partir del 23 por la tarde, quedar apantallada por la densidad de la calima. Esto vuelve a repetirse la mañana del día 24, y ya en menor intensidad en la atenuación el resto del episodio (del mediodía del 24 hacia adelante).

Si observamos las imágenes de satélite de los días 22 y 23 (Figura 7) vemos la intensa pluma de polvo, directamente inyectada al archipiélago y originada cerca de la costa africana. Ya en la imagen del día 23 se observa la presencia de nubosidad, que fue en aumento en los días posteriores, y que ha impedido poder obtener

el producto de espesor óptico de aerosol (turbiedad en la columna atmosférica total) a partir de las medidas de la red AERONET.

El siguiente gráfico de barras (Figura 8) muestra la visibilidad mínima reportada en los METAR de los diferentes aeropuertos durante el evento. La visibilidad mínima registrada osciló entre 400 metros, en el aeropuerto de Gran Canaria (GCLP) y 1000 metros, registrada en el aeropuerto de El Hierro (GCHI). Los mínimos de visibilidad acaecieron en instantes temporales diferentes para cada aeródromo. Destaca que el mínimo del episodio tuvo lugar el día 22 a las 17:30 UTC en GCLP. Para el resto de aeropuertos, los mínimos acontecieron el día 23 entre las 13 y 20:30 UTC, excepto en las islas más occidentales (La Palma y El Hierro), donde los mínimos fueron registrados durante la mañana de día 24. Además destaca la persistencia del mínimo de visibilidad para Tenerife Sur, que permaneció dos horas y media con visibilidades por debajo de 500 metros. Esta variabilidad espacio-temporal, así como en los valores de visibilidad se explican perfectamente a la vista de las imágenes de satélite anteriormente mostradas, donde se observa la inhomogeneidad de la pluma de polvo barriendo el archipiélago.

Consecuencias socioeconómicas

Según la información recogida y publicada por ENAIRE, existen unos mínimos de operatividad establecidos en los Procedimientos de Paralización de Operaciones en el Área de Movimiento (PPOAM). Estos procedimientos se plasman en los AIP de cada aeropuerto, las Publicaciones de Información Aeronáutica, que son el manual básico de información aeronáutica y que contienen la información de carácter permanente y cambios temporales de larga duración, y cuya utilización es esencial para la navegación aérea y las operaciones aeroportuarias. Para los aeropuertos



Figura 7. Imágenes de satélite del día 22 (izquierda, inicio de la intrusión) y del día 23 (derecha, el de mayor intensidad), obtenidas de la aplicación NASA Worldview (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

Trazas de la temperie

Figura 8. Visibilidad mínima reportada en los METAR de los diferentes aeropuertos del archipiélago a lo largo de todo el evento (GCHI: El Hierro, GCLA: La Palma, GCGM: La Gomera, GCXO: Tenerife Norte, GCTS: Tenerife Sur, GCFV: Fuerteventura, GCLP: Gran Canaria)



de las islas Canarias, y en referencia al caso que nos ocupa, estos mínimos de operatividad oscilan entre visibilidades de 400 a 800 metros según el aeropuerto. Es por ello que durante los días 22 a 24 de febrero, los aeropuertos canarios experimentaron restricciones del tráfico aéreo llevando al cierre temporal del espacio aéreo. Según datos de AENA, durante ese fin de semana se vieron afectados 1 000 vuelos y cerca de 120 000 pasajeros se vieron confinados en el archipiélago, siendo el domingo 23 el que sufrió un mayor impacto con 745 cancelaciones y 84 desvíos. Esto tuvo también un impacto en días posteriores, hasta que la reubicación de los pasajeros afectados se dio por finalizada.

Por otro lado, y unido al fuerte viento que azotó el archipiélago en los días de carnaval, se vieron suspendidas parte de las actividades festivas del mismo, y la hostelería se vio fuertemente afectada, por ser el Carnaval una de las mayores fuentes de ingreso. La decisión de la suspensión o continuidad de actividades no estuvo exenta de críticas y controversias, como suele ocurrir en estos casos, pues no todos los ayuntamientos actuaron de igual forma.

Así mismo, aunque la mayoría de centros educativos de Canarias carecían de actividad lectiva el lunes 24 como consecuencia de la celebración de las fiestas del Carnaval, la Consejería de Educación, Universidades, Cultura y Deportes del Gobierno de Canarias declaró la suspensión de las clases en la enseñanza no universitaria en todas las islas.

A raíz de esta decisión, parte de las universidades canarias se unieron a dicho cierre, y numerosos colectivos deportivos también suspendieron su actividad.

Por último, durante ese fin de semana se produjeron varios incendios forestales, que además de agravarse por el fuerte viento, tuvieron la dificultad en su control y extinción debida a la baja visibilidad producida por la calima que dificultó las tareas de los medios aéreos.

¿Prevención o mitigación?

Las calimas en Canarias son fenómenos naturales, por tanto no son controlables, ni es posible su reducción. Lo que sí es posible a día de hoy es predecir la llegada de las mismas, tanto en tiempo como en intensidad. El conocer estos factores puede ayudar a mitigar los efectos de la misma sobre la población, ya que como muestra el estudio de Milford et al., 2020, las intrusiones desérticas, a través del efecto de la reducción en la altura de la capa límite marina pueden aumentar la contaminación antropogénica del aire en áreas urbanas, y según estudios recientes de salud, el cóctel resultante de polvo del desierto y contaminantes antropogénicos locales tiene un efecto mayor al que se esperaría con únicamente la contaminación local o el polvo (Domínguez Rodríguez, et al., 2019). Por tanto, conociendo previamente la lle-

gada del fenómeno, se pueden tomar medidas de reducción de la actividad antropogénica contaminante (por ejemplo, restricciones en el tráfico rodado), limitación de la población más vulnerable a la exposición con avisos de permanecer en casa, suspensión de actividades al aire libre, etc.

Agradecimientos:

Reconocemos el uso de imágenes de la aplicación Worldview de la NASA (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>), parte del Sistema de Datos e Información del Sistema de Observación de la Tierra de la NASA (EOSDIS).

Agradecemos al personal del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (AEMET) y a la Consejería de Transición Ecológica, Lucha contra el Cambio Climático y Planificación Territorial del Gobierno de Canarias por el mantenimiento de la instrumentación e infraestructuras y la obtención de los datos.

Agradecimientos a NOAA/ESRL Physical Sciences Division por el uso de datos que han hecho los autores.

Bibliografía

- Alonso-Pérez, S., Cuevas, E., Querol, X.: Objective identification of synoptic meteorological patterns favouring African dust intrusions into the marine boundary layer of the subtropical eastern north Atlantic region, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 113, 109-124, 2011.
- Barreto, A., E. Cuevas, J. Carrillo, A. Berjón, C. Guirado-Fuentes, Y. Hernández, J. C. Guerra, M. Yela, N. Prats. Vertical characterization of the Saharan Air Layer using MPL and radiosondes at a subtropical site, *Geophysical Research Abstracts Vol. 21, EGU2019-16592, EGU General Assembly, Vienna (Austria), 7-12 April, 2019.*
- Domínguez Rodríguez, A., Baez-Ferrer, N., Rodríguez, S., Abreu-González, P., González-Colaço Harmand, M., Amarnani-Amarnani, V., Cuevas, E., Consuegra-Sánchez, L., Alonso-Pérez, S., Avanzas, P., Burillo Putze, G.. Impacto de la exposición a la calima del polvo del Sáhara en los pacientes con insuficiencia cardíaca aguda atendidos en un servicio de urgencias, *Emergencias*, 31, 161-166, 2019.
- Dorta, P., Gelado, M^a.D., Hernández, J.J., Cardona, P., Collado, C., Mendoza, S., Rodríguez, M^a.J., Siruela, V., Torres, M^aE. Frecuencia, estacionalidad y tendencias de las advecciones de aire sahariano en Canarias (1976-2003). *Investigaciones Geográficas*, n^o38, p.23-45, 2005.
- Goudie, A.S., Middleton, N.J. *Desert dust in the Global Systema*, Ed. Springer, ISBN-10 3-540-32354-6, 2006.
- Milford, C., Cuevas, E., Marrero, C.L., Bustos, J., Gallo, V., Rodríguez, S., Romero-Campos, P.M., Torres, C. Impacts of Desert Dust Outbreaks on Air Quality in Urban Areas. *Atmosphere*, 11, 23, 2020.
- Rodríguez, S., Cuevas, E., Prospero, J.M., Alastuey, A., Querol, X., López-Solano, J., García, M.I., Alonso-Pérez, S. Modulation of Saharan dust export by the North African dipole. *Atmos. Chem. Phys.* 15, 7471-7486, 2015.