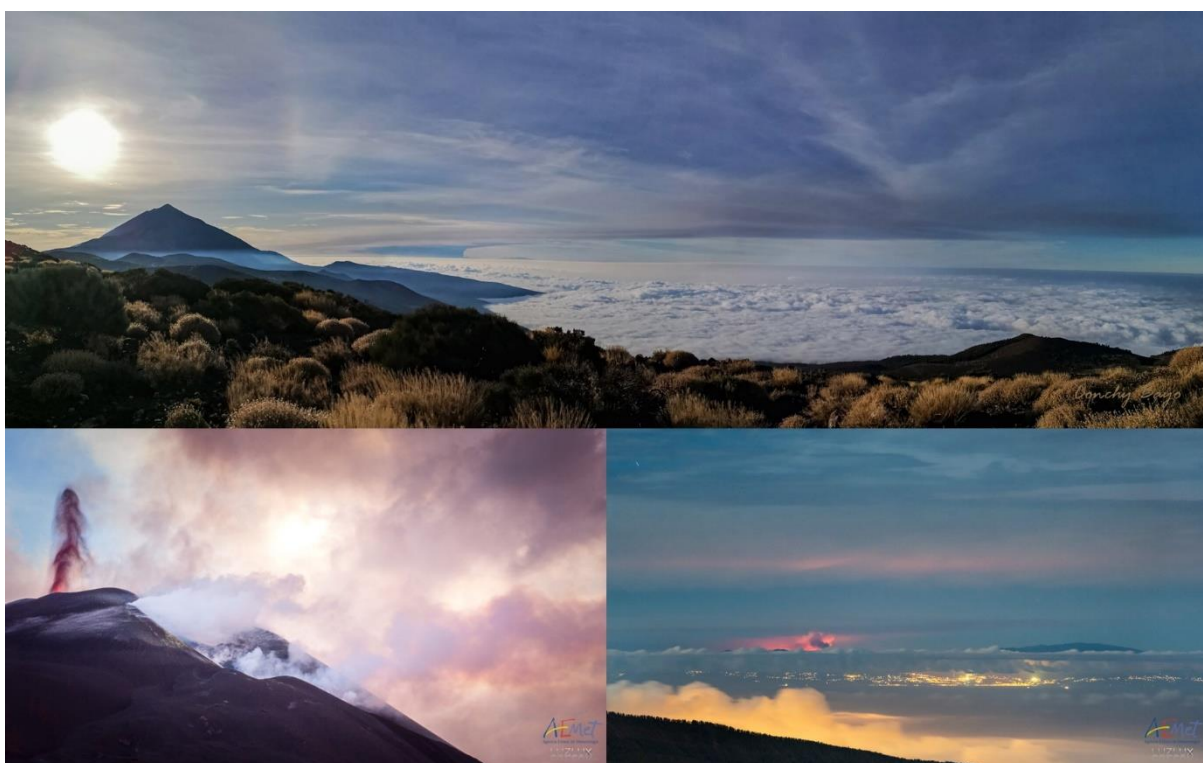


GUÍA DE ACTUACIÓN ANTE NIVELES ALTOS DE CONTAMINACIÓN VOLCÁNICA

Observatorio Atmosférico de Izaña



**Natalia Prats Porta
Carlos Torres García
Concepción Bayo Pérez
Ramón Ramos López
Emilio Cuevas Agulló**

GUÍA DE ACTUACIÓN ANTE NIVELES ALTOS DE CONTAMINACIÓN VOLCÁNICA

Observatorio Atmosférico de Izaña

Natalia PRATS PORTA, Carlos TORRES GARCÍA, Concepción BAYO PÉREZ, Ramón RAMOS LÓPEZ, Emilio CUEVAS AGULLÓ

Centro de Investigación Atmosférica de Izaña

npratasp@aemet.es, ctorresg@aemet.es, cbayop@aemet.es, rramosl@aemet.es, ecuevasa@aemet.es

RESUMEN

El propósito de esta guía es presentar las bases para el establecimiento de protocolos de control y prevención, para mitigar el impacto en la salud de la exposición a la contaminación del aire de origen volcánico, y su aplicación en el Observatorio Atmosférico de Izaña (OAI). La guía se ha desarrollado a partir del protocolo que se elaboró de urgencia en el OAI para dar una respuesta rápida a los posibles problemas asociados a los efectos de la erupción del volcán de La Palma en Septiembre de 2021 sobre el Observatorio, aportando una explicación motivada a los umbrales y acciones descritas en la misma, ya que no existía material en castellano que aglutinara dicha información. Para ello se han consultado guías internacionales publicadas principalmente por departamentos de salud de zonas habitualmente expuestas a este tipo de contaminación (Hawaii, Islandia, etc.), así como información de la “International Volcanic Health Hazard Network (IVHHN)” (Red Internacional de Riesgos Volcánicos para la Salud).

Palabras clave: contaminación volcánica, dióxido de azufre (SO₂), aerosoles, calidad del aire.



Santa Cruz de Tenerife, 2022

AUTORES

Natalia Prats Porta, Carlos Torres García, Concepción Bayo Pérez, Ramón Ramos López y Emilio Cuevas Agulló
Centro de Investigación Atmosférica de Izaña
AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA

PORTADA

Elaboración propia. Imagen superior: panorámica desde la azotea del Observatorio Atmosférico de Izaña cortesía de Concepción Bayo: pico del Teide a la izquierda, al fondo las cumbres de la isla de La Palma y la columna de humo del volcán, y en el horizonte la capa gris de dispersión de dicha columna. Inferior izquierda: primer plano de uno de los focos emisores, la emisión de gases alrededor de este y las manchas amarillas de los depósitos de azufre. Inferior derecha: vista de la isla de La Palma desde Tenerife, con las nubes rojizas iluminadas por las coladas activas y las luces de Santa Cruz de Palma, capital de la isla. Ambas cortesía de AEMET-LUZLUX S.L.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a todo el personal del CIAI por sus comentarios y sugerencias de mejora con respecto a esta guía. Además, agradecen especialmente la colaboración del personal de seguridad del OAI en cuanto a la aplicación de esta guía. Así mismo, gracias también al Gobierno de Canarias por la inclusión de la estación del OAI en la Red de Control y Vigilancia de la Calidad del Aire de Canarias, y a María Allué, jefa del Servicio de Modelización de Calidad del Aire de la AEMET, por su aportación en la redacción del apartado 2.5., así como a todo el personal del Área de Aplicaciones de AEMET por la operatividad ad hoc para la predicción de la dispersión de la pluma volcánica durante la erupción volcánica de la isla de La Palma.



Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización

Edita:

© Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
Agencia Estatal de Meteorología
Madrid, 2022

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 666-22-012-X
<https://doi.org/10.31978/666-22-012-X>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)
C/ Leonardo Prieto Castro, 8
28040 Madrid
<http://www.aemet.es/>



@Aemet_Esp



<https://www.facebook.com/AgenciaEstataldeMeteorologia>

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. IMPACTOS SOBRE LA SALUD ASOCIADOS A LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA.....	3
2.1. Efectos a corto plazo del SO ₂	4
2.2. Contaminación grave por concentraciones muy altas de SO ₂	7
2.3. Contaminación por sustancias distintas del SO ₂	7
2.4. Efectos indirectos de la contaminación atmosférica severa	8
2.5. La dispersión de la contaminación en la atmósfera.....	9
3. PROCEDIMIENTO DE ACTUACIÓN ANTE NIVELES ALTOS DE CONTAMINACIÓN EN EL OAI	11
3.1. Antecedentes: impacto del SO ₂ en el OAI debido al proceso eruptivo en la zona de Cumbre Vieja (La Palma).....	12
3.2. Medidas a adoptar con respecto al SO ₂	16
3.3. Medidas a adoptar con respecto al H ₂ S	19
3.4. Indicaciones con respecto a otros compuestos	19
3.5. Medidas a adoptar en el transporte del personal hacia y desde el OAI.....	20
3.6. Ejemplo de aplicación del código de colores	20
4. CONCLUSIONES.....	22
ANEXOS.....	23
ANEXO A: Cuadro resumen de los estándares y guías de calidad del aire	23
ANEXO B: Índice de Calidad del Aire (ICA) y recomendaciones del Gobierno de Canarias	23
ANEXO C: Glosario.....	24
ANEXO D: Conversión de unidades del SO ₂	25
BIBLIOGRAFÍA.....	26

1. INTRODUCCIÓN

El 19 de septiembre de 2021 se inició un proceso eruptivo en la zona de Cumbre Vieja de la isla de La Palma (Islas Canarias). La última erupción que se había producido en Canarias correspondía al volcán Teneguía (La Palma) en 1971, aunque posteriormente ocurrió un proceso eruptivo en la isla de El Hierro de carácter submarino en octubre de 2011. Ante este evento se movilizó un gran número de organismos e instituciones para la vigilancia y seguimiento del proceso eruptivo, buscando en todo momento minimizar los efectos que un suceso de este tipo tiene sobre la población. Los esfuerzos se centraron en la isla de La Palma y en las zonas cercanas a la erupción. El Centro de Investigación Atmosférica de Izaña de la Agencia Estatal de Meteorología (CIAI-AEMET) movilizó desde el primer momento instrumentación y personal para dar apoyo a la toma de decisiones desde el Comité Científico del PEVOLCA (Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias).

Durante este proceso eruptivo, se registraron varios episodios de niveles altos de contaminación, tanto de dióxido de azufre (SO_2) como de aerosoles, en el Observatorio Atmosférico de Izaña (OAI, 2370 m s.n.m.) en la isla de Tenerife, a unos 140 km del foco emisor (figura 1), debido al transporte del material inyectado en las capas medias de la atmósfera. Los niveles de SO_2 que se midieron en los primeros días en el OAI fueron muy superiores a los valores medidos en las estaciones de calidad del aire situadas en la isla de La Palma, alrededor del foco emisor principal. Esto fue debido a que la inyección del material volcánico en las capas medias de la atmósfera, por la situación sinóptica, fue transportada en “bloque” e impactó directamente en las cotas altas de la isla de Tenerife. Esto hizo que, en el OAI, caracterizado por unas condiciones atmosféricas muy limpias, se dieran niveles de contaminación natural superiores a los umbrales de contaminación antropogénica establecidos en las Directivas Europeas (EU, 2004, 2008). Ante esta situación, el CIAI tuvo que tomar medidas de prevención para minimizar los riesgos sobre la salud asociados a la presencia de estas masas de aire en el OAI.

Dada la poca frecuencia de estos procesos en Canarias, y por extensión en España, no existe mucha información previa sobre qué medidas concretas adoptar, encontrando solo información de lugares como Islandia o Hawái, con mayor actividad volcánica, que está redactada en inglés y dirigida a la población local y a los turistas. Esta situación fue la que nos llevó a establecer un procedimiento interno de actuación, y por extensión, esta guía, que podría ser la base para la elaboración de procedimientos o instrucciones de actuación similares en otros ámbitos/zonas que se vieran afectados por este tipo de contaminación.

La guía de actuación ante niveles altos de contaminación volcánica que aquí se presenta, está basada en las Directivas Europeas (EU, 2004, 2008), que establecen estándares de calidad del aire ambiente, y en la reciente guía actualizada de calidad del aire de la OMS (Organización Mundial de la Salud) (WHO, 2021), relativa al material particulado ($\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10}), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono, cuya información resumida se puede consultar en el Anexo A de esta guía. Dichos informes generalmente se basan en estudios sobre contaminación industrial y/o urbana, por lo que no son estrictamente aplicables a las emisiones volcánicas, que tienen una composición diferente. Por ejemplo, no dan cuenta de un efecto “cóctel” que puede ocurrir por la mezcla de contaminantes atmosféricos. Es por ello que el definir un indicador del nivel de peligrosidad en situaciones de contaminación asociada a la emisión volcánica, puede ser de considerable valor para planificar la respuesta a una posible emergencia en áreas expuestas a estos contaminantes.

Aunque los eventos volcánicos son esporádicos y poco frecuentes, a veces son lo suficientemente notables para ser citados por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EAA). En el informe anual de Calidad del Aire del 2016 (EEA, 2016), dentro del apartado 8 “Otros contaminantes: dióxido de azufre, monóxido de carbono, metales tóxicos y benceno”, se resaltaron las emisiones de SO₂ de la erupción del volcán Bárðarbunga en Holuhraun (Islandia): *“las mediciones de concentración de SO₂ a nivel del suelo excedió el valor límite por hora de 350 µg/m³ en gran parte de Islandia durante días o semanas en los seis meses de erupción. Antes de la erupción de Bárðarbunga, las estaciones de monitoreo en Islandia nunca habían registrado una superación del límite de 350 µg/m³ por hora. [...]”*. Así mismo, los eventos volcánicos también se citan por su fuerte impacto en la calidad del aire en regiones remotas, como se verá en el apartado 2.5.

Para entender la importancia de estos eventos, se describirán inicialmente en esta guía los contaminantes de mayor importancia presentes en el aire asociados a las erupciones volcánicas y su dispersión, así como los posibles efectos que tienen sobre la salud en base a la información recopilada de los trabajos citados en otras guías internacionales sobre este tema. Para cada uno de los contaminantes se destacan las propiedades de su emisión, impacto sobre la salud, directrices internacionales sobre su concentración y ejemplos de los efectos de sus concentraciones en contextos volcánicos. El procedimiento operativo se puso en funcionamiento en el OAI al principio del proceso eruptivo, tras la detección de los primeros eventos de niveles altos de SO₂. Es por ello que la guía hace referencia principalmente al periodo entre el 19 de septiembre y el 8 de noviembre, dejando el análisis del periodo completo para otros trabajos paralelos de carácter más científico, que se describen en el apartado 3. Al final del documento se incluye información suplementaria en varios anexos, como un resumen de la normativa en vigor con respecto a la calidad del aire o un glosario de términos que en el desarrollo del texto se citan.



Figura 1: Visión del penacho del volcán de La Palma desde la torre del Observatorio de Izaña (en el horizonte a la derecha del Teide), el día 3 de noviembre de 2021. En primer plano, la toma de aire para la medida de SO₂; en la base del Teide puede observarse la neblina contaminante procedente del volcán que alcanzó ese día el Observatorio (Foto: C. Bayo).

2. IMPACTOS SOBRE LA SALUD ASOCIADOS A LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA

Uno de los principales peligros asociados a la actividad volcánica es la emisión de gases y partículas, tanto en las emisiones difusas del suelo como desde la propia erupción, que puede inyectar gran cantidad de estos gases y partículas a diferentes alturas según el tipo de erupción.

Los gases y partículas (también conocido como material particulado PM o aerosoles), que se inyectan en la atmósfera, se dispersan en la dirección predominante del viento, siendo la concentración mayor en las inmediaciones del volcán. La contaminación del aire que se produce, asociada a estos procesos, puede ser peligrosa para los seres humanos, los animales, la vegetación y las infraestructuras (Islandic Government, 2021).

El gas más común emitido por los volcanes es el vapor de agua (H_2O) que es inofensivo. Otros gases que se emiten son: dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), así como cantidades menores de cloruro de hidrógeno (HCl), fluoruro de hidrógeno (HF), sulfato (SO_4^{2-}) y monóxido de carbono (CO) (Brown et al., 2015). La contaminación del aire también puede contener metales como plomo y mercurio. Y cuando la lava fluye hacia el mar, al contacto con el agua, esta puede crear grandes columnas de vapor (neblina), que contienen ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF) y partículas de vidrio volcánico (Islandic Government, 2021).

Los gases suelen ser incoloros pero tienen algunos olores característicos, tal como se indica en la Tabla 1.

SO_2	Olor similar a los fuegos artificiales
H_2S	Olor a aguas termales o comida podrida, por ejemplo, huevos podridos
HF y HCl	Olor irritante, fuerte, molesto, acre
CO_2 y CO	Inodoro y, por lo tanto, particularmente peligroso

Tabla 1: Olores característicos de algunos gases emitidos en erupciones volcánicas.

Fuente: Islandic Government, 2021.

De todos los gases mencionados, el dióxido de azufre constituye el contaminante volcánico más importante, por emisión directa, después del dióxido de carbono (Islandic Government, 2021). El SO_2 tiene un potencial efecto sobre la salud ya que provoca irritación e inflamación del sistema respiratorio, afecciones e insuficiencias pulmonares, alteración del metabolismo de las proteínas, dolor de cabeza o ansiedad, y sobre la biodiversidad ocasionando daños a la vegetación, degradación de la clorofila y reducción de la fotosíntesis, con la consiguiente pérdida de especies. Además, debido al transporte puede producir efectos adversos incluso a grandes distancias del foco emisor. Este compuesto se convierte en la atmósfera en partículas de sulfato (SO_4^{2-}) (Thordarson y Self, 2003; Brown et al., 2015), y al reaccionar con el vapor de agua y con otros elementos presentes en la atmósfera, se oxida dando lugar a la formación de ácido sulfúrico que puede afectar, a través de procesos de acidificación, al suelo, a los acuíferos e incluso a las edificaciones.

La clasificación de las erupciones se realiza en base a su evolución, que tiene en cuenta la magnitud de la erupción VEI (*Volcanic Explosivity Index* – Índice de Explosividad de Volcán, índice que va de 0 a 8), la altitud de la emisión y la duración del evento (Stewart, et al., 2022).

se dio por finalizada el 13 de diciembre de 2021 (PEVOLCA, 2021, Informe 25.12.2021), se puede clasificar como una erupción “pequeña”. El Comité Científico del PEVOLCA le asignó un VEI de 2, durante los dos primeros meses, pero fue elevado a 3 posteriormente, cuando a principios de noviembre la cantidad de material expulsado alcanzó los 10 millones de m³.

En general, los estudios epidemiológicos publicados sobre peligros volcánicos y riesgos para la salud, centrados principalmente en material particulado y dióxido de azufre, están realizados sobre casos de estudio de “grandes” erupciones volcánicas. Para más información sobre estudios epidemiológicos, dirigimos al lector al trabajo de Stewart et al., 2022, donde se hace una revisión extensa de estudios sobre contaminación del aire por actividad volcánica e impacto en la salud, haciendo referencia a decenas de estos.

2.1. Efectos a corto plazo del SO₂

Tal como ya se ha indicado, el principal gas asociado a los procesos eruptivos, que afecta directamente a la salud de las personas, es el SO₂. Su efecto va a depender tanto de la concentración como del tiempo de exposición y del estado previo de salud de cada individuo.

Algunos Departamentos de Salud de gobiernos afectados frecuentemente por erupciones volcánicas (como el de Hawaiki, <https://air.doh.hawaii.gov/home/text/120>, o el de Islandia, <https://www.hafnarfjordur.is/en/administration/news/guidelines-for-the-public-health-risks-due-to-air-pollution-from-volcanic-eruptions>) disponen de redes de monitorización del SO₂ y han publicado guías de actuación frente a contaminación volcánica, basadas principalmente en la información de la “*International Volcanic Health Hazard Network*”, IVHNN, Red Internacional de Peligros para la Salud Volcánica (<https://www.ivhnn.org/home>):

- Directrices para el público - Riesgos para la salud debido a la contaminación del aire por erupciones volcánicas (Islandia) (Islandic Government, 2021): https://www.landlaeknir.is/servlet/file/store93/item45005/Haetta%20a%20heilsutjoni%20vegna%20loftmengunar_EN%202.pdf
- Orientación del Departamento de Salud sobre los niveles de aviso de dióxido de azufre (SO₂) a corto plazo (Hawaiki): <http://www.hiso2index.info/assets/FinalSO2Exposurelevels.pdf>

El propósito de las citadas directrices es, entre otros, garantizar que la actividad diaria pueda continuar sin que la salud de las personas se vea dañada. Las pautas, en general, se basan en una exposición a la contaminación del aire de 10 a 15 minutos, por lo que, si la exposición es más prolongada, se podría esperar un mayor efecto sobre la salud.

A modo de ejemplo, en el documento (Islandic Government, 2021) se indica que “*si la concentración de SO₂ es de 700 µg/m³ (que es el doble del límite de protección de la salud, según las directivas europeas), después de 10-15 minutos de exposición al aire contaminado, se podrían esperar síntomas en personas sensibles. Por tanto, se recomienda que los niños y las personas sensibles o con enfermedades subyacentes, eviten el ejercicio al aire libre, aunque pueden viajar desde y hacia el trabajo o la escuela, y que la actividad escolar seguirá siendo normal en su mayor parte pero no se debe permitir que los niños jueguen al aire libre. O en situaciones de altísima contaminación, si el SO₂ supera los 14.000 µg/m³, en las que indican que nadie debería estar al aire libre y se deberían suspender las actividades escolares, apuntando que todas las operaciones no esenciales deben suspenderse temporalmente y que las unidades de respuesta a emergencias que trabajen al aire libre deben usar máscaras de gas*”.

El mejor ejemplo que hemos encontrado para mostrar los efectos a corto plazo del SO₂ es precisamente la tabla del Departamento de Salud del Gobierno de Hawaii (*DOH Guidance on Short-term Sulfur Dioxide (SO₂) Advisory Levels* - Guía del Departamento de Salud sobre los niveles de aviso de dióxido de azufre (SO₂) a corto plazo) donde se recoge el efecto que puede tener el SO₂ sobre las personas atendiendo a la concentración, al tiempo de exposición y al estado previo de salud de las personas expuestas. Además se indican las acciones recomendadas en función de estos 3 parámetros, por lo que ha sido tomada como base para el desarrollo de esta guía. Dicha tabla se elaboró como guía de salud basada en la calidad del aire en las zonas próximas al volcán Kilauea, donde los instrumentos proporcionan medidas de los niveles de SO₂ cada 15 min (en comparación con los promedios horarios para el resto de puntos de control del estado de Hawaii). Una traducción de la misma es incluida a continuación en la tabla 2.

Conc. SO ₂ (ppm) ¹	Código de Color y Estado de la Calidad del Aire	Descripción de la Calidad del Aire	Acciones/actividades recomendadas ²		
			Grupos sensibles ³	Personas que experimenten efectos sobre su salud ⁴	El resto de personas
0-0,10	Verde (Bueno)	Considerado satisfactorio y que plantea poco o ningún riesgo	Personas altamente sensibles pueden verse afectadas a estos niveles		No se esperan efectos potenciales sobre la salud
0,11-0,20	Amarillo (Moderado)	Aceptable, sin embargo, moderadamente preocupante para la salud de un pequeño número de personas	Sea consciente de que los niveles son ligeramente elevados	Si experimenta dificultades para respirar como opresión en el pecho o sibilancias, deje sus actividades, utilice un inhalador de rescate y encuentre un lugar para sentarse y descansar	No se esperan efectos potenciales sobre la salud, pero puede ser útil tomar medidas para reducir la exposición a la niebla tóxica

¹ Basado en una media de 15 min. Una parte por millón es igual a una parte por billón dividida entre 1000.

² **Hay personas susceptibles** que pueden desarrollar síntomas en los límites de aviso o por debajo de ellos.

³ **Grupos sensibles** son niños y personas con afecciones respiratorias preexistentes como asma, bronquitis, enfisema o enfermedades pulmonares o cardíacas. Nota: Algunas personas con asma leve pueden no ser conscientes de ello. Si tiene dificultades para respirar con niveles bajos de SO₂, consulte con su médico.

⁴ Las personas reaccionan de forma diferente al SO₂— algunas son más sensibles. Las fosas nasales pueden eliminar una gran cantidad de SO₂ antes de que llegue a los pulmones. Para muchas personas basta con reducir los niveles de actividad lo suficiente como para poder respirar solo por la nariz, lo que les permitirá estar al aire libre sin presentar síntomas.

0,21-1,00	Naranja (Insalubre para grupos sensibles)	Los grupos sensibles, incluyendo personas sanas con asma leve, pueden experimentar efectos sobre su salud. Pueden verse afectados en rangos más bajos que el público en general. Hacia el extremo superior de este rango, los asmáticos que realicen actividades al aire libre, pueden experimentar dificultades respiratorias. No se espera que el público en general se vea afectado en este rango	Evite las actividades al aire libre que provoquen respiración forzada o a través de la boca	Si experimenta dificultades para respirar como opresión en el pecho o sibilancias, deje sus actividades, utilice un inhalador de rescate y encuentre un lugar para sentarse y descansar	No se esperan efectos potenciales sobre la salud, pero puede ser útil tomar medidas para reducir la exposición a la niebla tóxica
1,01-3,00	Rojo (Insalubre)	Todo el mundo puede empezar a experimentar efectos en su salud. Los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos más graves	Evite las actividades al aire libre y permanezca en el interior	Considere la posibilidad de abandonar la zona	Evite las actividades al aire libre que provoquen respiración forzada o a través de la boca
3,01-5,00	Púrpura (muy insalubre)	Activa la alerta sanitaria, lo que significa que todo el mundo puede experimentar efectos más graves	Evite las actividades al aire libre y permanezca en el interior	Abandone la zona y busque ayuda médica	Evite las actividades al aire libre y permanezca en el interior

<p>> 5,01</p>	<p>Granate (Peligroso)</p>	<p>Activa los avisos sanitarios de condiciones de emergencia. Es más probable que toda la población se vea afectada.</p>	<p>Evite las actividades al aire libre y permanezca en el interior. Abandone la zona si se lo indica Defensa Civil</p>	<p>Abandone la zona y busque ayuda médica</p>	<p>Evite las actividades al aire libre y permanezca en el interior. Abandone la zona si se lo indica Defensa Civil</p>
<p>Observaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Asmáticos y personas con enfermedad respiratoria crónica: Tenga SIEMPRE a mano sus medicamentos. Reduciendo su nivel de esfuerzo para que pueda respirar por la nariz, reducirá la cantidad de SO₂ que llega a sus pulmones. • Personas que experimentan efectos sobre su salud: Póngase en contacto con su médico lo antes posible si desarrolla algún problema, ya que las afecciones respiratorias pueden empeorar rápidamente en condiciones de elevadas concentraciones de SO₂ o niebla tóxica. • Las personas tienen diferentes sensibilidades al SO₂. Utilice esta tabla para saber lo sensible que es usted al SO₂, de manera que pueda tomar las medidas adecuadas para proteger su salud y evitar reacciones graves. 					

Tabla 2: Traducción de la tabla de Orientación del Departamento de Salud sobre los niveles de aviso de dióxido de azufre (SO₂) a corto plazo del Gobierno de Hawaii.

Como se verá en el apartado 3, “Procedimiento de actuación ante niveles altos de contaminación en el OAI”, se han utilizado límites muy inferiores a estos, para salvaguardar la salud de las personas sin alterar innecesariamente la operatividad del Observatorio.

2.2. Contaminación grave por concentraciones muy altas de SO₂

La exposición a concentraciones elevadas de SO₂ (por encima de unas 40 ppm) puede provocar náuseas, vómitos, dolor de estómago y daños a las vías respiratorias y a los pulmones. Para concentraciones muy altas (más de 100 ppm), el SO₂ puede causar inconsciencia rápida, edema pulmonar y la muerte (según se indica en la web del IVHHN, “Los riesgos de los gases volcánicos y geotermales para la salud. Una guía para el público” <https://www.ivhhn.org/es/information/los-riesgos-de-los-gases-volcanicos-y-geotermales-para-la-salud>).

2.3. Contaminación por sustancias distintas del SO₂

El resto de gases que se emiten o se producen en una erupción volcánica también son peligrosos, pero cuando estos se dan en concentraciones muy altas. Es por tanto necesario vigilar las situaciones de estancamiento y/o acumulación de gases que pueden provocar un aumento en las concentraciones de estos compuestos. Igualmente, como ya se mencionó, el material

particulado (o aerosoles) también puede provocar el empobrecimiento de la calidad del aire y afectar a la salud humana en grandes concentraciones.

2.3.a. H₂S

Los niveles muy altos de este compuesto afectan el sentido del olfato, reduciendo fuertemente la capacidad olfativa (se dejará de sentir el olor a aguas termales, comida/huevos podridos). Niveles muy altos provocan fatiga, pérdida de apetito, irritación de las vías respiratorias y confusión mental. Los asmáticos pueden sufrir irritación del tracto respiratorio o dificultades para respirar, así como dolores de cabeza, náuseas e irritación de los ojos con una concentración de H₂S de 2 a 5 ppm. Niveles muy altos (más de 500 ppm) pueden causar pérdida del conocimiento rápida o muerte súbita (Islandic Government, 2021).

2.3.b. CO₂

En general, las concentraciones atmosféricas habituales de CO₂, lejos de los focos de emisión directa, ronda las 400 ppm; la exposición a unos 50.000 ppm (es decir, más de dos órdenes de magnitud) puede causar dolores de cabeza, sudoración y aumento del ritmo cardíaco. Si la concentración de CO₂ aumenta, pueden producirse mareos, dificultad para respirar, debilidad muscular, confusión mental, somnolencia, zumbidos en los oídos y náuseas o vómitos. En concentraciones muy elevadas (más de 100.000 ppm), el CO₂ puede provocar una rápida pérdida del conocimiento, asfixia y muerte aguda. Las máscaras de gas no protegen contra altas concentraciones de CO₂ a menos que estén conectadas a un tanque de oxígeno (Islandic Government, 2021).

2.3.c. HCl y HF

Los niveles altos de HCl (50-100 ppm) y HF pueden causar edema pulmonar, que es potencialmente mortal. Se debe tener especial cuidado donde la lava fluye hacia el mar. Las concentraciones de HF superiores a 50 ppm son peligrosas, incluso para una exposición breve (minutos) (Islandic Government, 2021).

2.3.d. Material Particulado (Aerosoles)

El aerosol sulfato tienen su origen en la conversión de gas a partícula a partir del SO₂ (González et al., 2011). Las altas concentraciones de SO₂ pueden llevar, por tanto, a un aumento de partículas ultrafinas (diámetro menor o igual a 0,1 µm) que por su tamaño pueden provocar problemas respiratorios ya que llegan a la región alveolar, pudiendo pasar al torrente sanguíneo (Tobías et al., 2018). Además, se verá reflejado en un aumento del PM_{2.5} principalmente, y por extensión del PM₁₀. Hay evidencias que relacionan el aumento en el PM_{2.5} de origen volcánico con una mayor morbilidad respiratoria (Thordarson y Self, 2003; Schmidt et al., 2011; Carlsen et al., 2021) pero generalmente relacionado con ambientes urbanos e industriales altamente contaminados.

2.4. Efectos indirectos de la contaminación atmosférica severa

Existen otros ámbitos que se pueden ver afectados por la presencia de altas tasas de contaminación asociada a la emisión volcánica, y aunque principalmente ocurren en zonas cercanas al volcán, tal como se desprende del trabajo del Gobierno Islandés (Islandic Government, 2021), es importante su conocimiento para, en el caso que fuera necesario, establecer medidas preventivas. Estos aspectos son:

- **Conducción:** la mayor contaminación del aire afecta a la capacidad de concentración y niveles muy altos de SO₂ pueden causar pérdida del conocimiento.

- Contaminación del agua: se aconseja dejar correr el agua antes de usar y seguir las recomendaciones de las autoridades. Así mismo, se indica no beber agua de una fuente de agua abierta cuando la contaminación del aire esté constantemente por encima de los límites de protección de la salud.
- Efectos sobre la flora y la fauna: los cultivos pueden estar en riesgo, así como los animales.
- Daños a la infraestructura: la lluvia ácida puede dañar las superficies, especialmente el hierro, y puede afectar las instalaciones eléctricas y los servicios públicos.

2.5. La dispersión de la contaminación en la atmósfera

La distribución espacial y temporal de los gases y cenizas emitidos por un volcán está controlada por cuatro tipos de procesos: la emisión, la química, el transporte y la deposición. Los modelos de dispersión atmosférica simulan estos procesos en la atmósfera y son una herramienta útil en estos casos para conocer cuál va a ser el movimiento de la pluma volcánica, qué zonas se van a ver afectadas y poder activar con antelación los sistemas de prevención. Estos modelos se alimentan de los datos que caracterizan la emisión (altura, tasa de emisión, parámetros relacionados con la especie emitida, etc.) y de datos meteorológicos previstos por un modelo meteorológico. Una variación en estas condiciones iniciales de estos parámetros puede generar escenarios muy distintos. Por ejemplo, a mayores alturas de emisión, mayor capacidad de afectar a zonas más lejanas, y si la emisión llega a niveles estratosféricos en grandes erupciones, se puede producir una permanencia de cenizas a largo plazo en la atmósfera.

El modelo de dispersión atmosférica a medias y largas distancias operativo en AEMET es el modelo MOCAGE en modo accidente y se utiliza en casos de emergencias medioambientales. MOCAGE es un modelo desarrollado por Météo-France (Josse et al., 2004) e implementado y configurado para su utilización en estos casos en el supercomputador *Cirrus* de AEMET por el Servicio de Modelización de la Calidad del Aire. Actualmente los procesos están mantenidos por el Servicio de Explotación y la operatividad se lleva a cabo desde el Sistema Nacional de Predicción. Son los jefes de turno los que se encargan de introducir los datos que caracterizan la emisión mediante una interfaz desarrollada por el Servicio de Explotación y lanzar la ejecución del modelo. A partir de ese momento se lanzan pasadas consecutivas con inicio a las 00H y a las 12H UTC. En cada pasada el Jefe de Turno se encarga también de elaborar un boletín especial con información meteorológica y los mapas horarios previstos de concentración por MOCAGE en modo accidente. La operativa completa se recoge en la “Instrucción para la elaboración de la predicción especial de accidentes químicos, volcánicos y radiológicos (SNP-INS-1046)” de AEMET.

En la figura 2 podemos ver, a modo de ejemplo, una simulación de la nube de cenizas generada por la erupción del volcán de La Palma con MOCAGE en modo accidente. Se muestra la concentración prevista de cenizas en el nivel de 700 hPa (aproximada a la altura del OAI) en términos porcentuales respecto a un cierto valor de referencia, utilizando una altura de emisión estimada y una tasa de emisión ficticia. La razón de utilizar este valor de emisión ficticio se debe a que normalmente este parámetro se desconoce y por eso los valores de concentración obtenidos también son ficticios y es preferible proporcionarlos en términos relativos. Normalmente el valor de referencia al que se refieren el resto de concentraciones es la máxima concentración encontrada al principio de la simulación. En este ejemplo se aprecia cómo la pluma de contaminación emitida por el volcán de La Palma puede afectar al OAI.

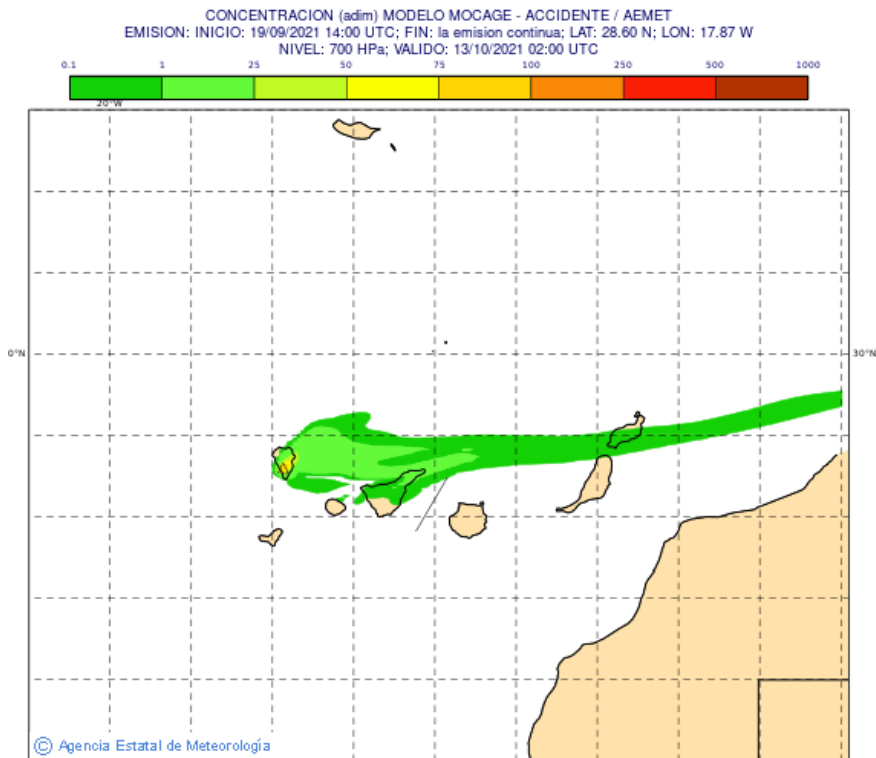


Figura 2: Salida del modelo operativo MOCAGE (en modo accidente) de la AEMET, que muestra la nube de cenizas prevista generada por el volcán de La Palma, para la madrugada del 13/10/2021 en el nivel de 700hPa (altitud aproximada del OAI).

La dispersión de la contaminación debido a un proceso eruptivo puede llegar a afectar áreas muy alejadas del foco emisor de forma muy significativa, como se muestra en los siguientes ejemplos referidos a erupciones volcánicas importantes (en comparación con la que nos ocupa, que expulsó un total de aprox. 1 Mt (megatoneladas) de SO_2 durante 3 meses (Weiser et al, 2022), con columnas eruptivas de entre 2 y 5 km):

- Según las estimaciones de Thordarson y Self, 2003, “*la erupción del volcán Laki de 1783-1784 en Islandia emitió 122 Mt de SO_2 a la atmósfera y mantuvo un velo de aerosol sulfato que se cernió sobre el hemisferio norte durante >5 meses. Las columnas eruptivas se extendieron de 9 a 13 km y liberaron 95 Mt de SO_2 en la troposfera superior/estratosfera inferior (corriente en chorro polar), lo que provocó una dispersión neta hacia el este de las columnas que reaccionaron con la humedad atmosférica para producir 200 Mt de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Lejos de la fuente, los aerosoles de Laki llegaron a la superficie al hundirse las masas de aire dentro de los anticiclones. Estimaron que unas 175 Mt de aerosol sulfato se eliminaron como precipitación ácida y causaron contaminación volcánica extrema (niebla seca) que afectó a Europa y otras regiones en 1783. Las 25 Mt restantes permanecieron en el nivel de la tropopausa durante >1 año*”.

- Según el informe de la calidad del aire en Europa del 2016, publicado por la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA, 2016) “*la erupción del volcán islandés Bárðarbunga, del 31 de agosto de 2014 a febrero de 2015, [...] fue la erupción más grande en Islandia de los últimos 200 años, emitiendo un total de 11 ± 5 Mt SO_2 , equivalente a más que las emisiones antropogénicas totales de SO_2 en Europa en 2011 (Gíslason et al., 2015). Schmidt et al. (2015)*

estimaron que, durante la erupción, las emisiones volcánicas diarias de SO₂ excedieron las emisiones antropogénicas europeas en al menos un factor de tres. [...] Las emisiones volcánicas de SO₂ fueron transportadas a largas distancias y detectadas por estaciones de monitoreo de la calidad del aire a una distancia de hasta 2.700 km de la fuente. Este fue, por ejemplo, el caso en cinco estaciones en Austria el 22 de septiembre, que midieron concentraciones por hora superiores a 200 µg/m³ en áreas de fondo tanto rurales como suburbanas. Se midieron concentraciones anormalmente altas de SO₂ en muchos países europeos en diferentes días de septiembre de 2014. Las concentraciones máximas medias horarias se midieron entre el 4 y el 11 de septiembre en Irlanda (hasta 500 µg/m³, incluidos los picos del 16 y 18 de septiembre) y Finlandia (hasta a 180 µg/m³, incluido el 30 de septiembre). Entre el 18 y el 30 de septiembre de 2014, se midieron concentraciones medias horarias altas de SO₂ en Noruega (hasta 1.200 µg/m³), Escocia (por encima de 300 µg/m³), la República Checa (hasta 300 µg/m³, así como picos del 10 al 15 de septiembre), Bélgica (hasta 246 µg/m³), Alemania (hasta 145 µg/m³), Países Bajos (hasta 114 µg/m³), Inglaterra (por encima de 80 µg/m³) y en menor medida Francia y Suecia”.

3. PROCEDIMIENTO DE ACTUACIÓN ANTE NIVELES ALTOS DE CONTAMINACIÓN EN EL OAI

El Observatorio Atmosférico de Izaña no dispone de una estación de calidad del aire estándar como las que conforman la Red de Control y Vigilancia de la Calidad del Aire de Canarias (<https://www3.gobiernodecanarias.org/medioambiente/calidaddel aire/inicio.do>), establecida para dar respuesta a la legislación vigente en esta materia, dictadas por la Comisión Europea, traspuesta al ordenamiento jurídico español y transferidas las competencias a las Comunidades Autónomas. Sin embargo, como estación del Programa de Vigilancia Atmosférica Global de la Organización Meteorológica Mundial (VAG-OMM) (<https://community.wmo.int/activity-areas/gaw>), mantiene series de medidas continuas dentro del programa de gases reactivos (NO_x, SO₂, O₃, CO, entre otros) y del programa de aerosoles (PM₁₀ y PM_{2.5}), cuyos controles de calidad y tratamiento de datos están al mismo nivel que las normas para la monitorización de aire ambiente en redes de calidad del aire, y por tanto, son referencia válida para ser la base de esta guía (para más información, consultar el informe de actividades bianual del CIAI publicado por la OMM, Cuevas et al., 2019). De hecho, los analizadores de SO₂ del OAI utilizan las mismas técnicas de medida que los equipos de calidad del aire, y siguen protocolos similares a los establecidos en las normas correspondientes para la monitorización de la calidad del aire. Tanto es así que a raíz de esta crisis volcánica, dichas medidas fueron incluidas provisionalmente en la Red de Control y Vigilancia de la Calidad del Aire de Canarias, y se pueden consultar en tiempo real en la misma web <https://www3.gobiernodecanarias.org/medioambiente/calidaddel aire/inicio.do> (figura 3).

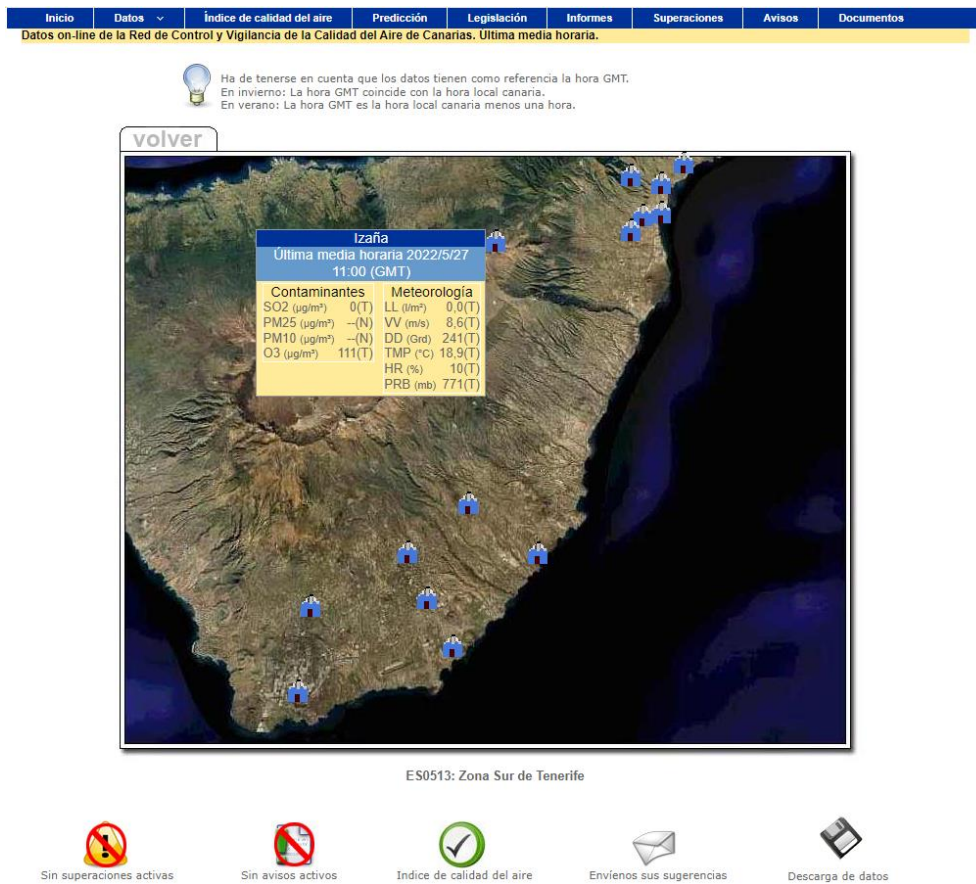


Figura 3: Estación de Izaña incluida provisionalmente en la Red de Control y Vigilancia de la Calidad del Aire de Canarias, con las medidas superficiales de SO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} y parámetros meteorológicos.

3.1. Antecedentes: impacto del SO₂ en el OAI debido al proceso eruptivo en la zona de Cumbre Vieja (La Palma)

El 19 de septiembre de 2021 entró en erupción una zona volcánica de la vertiente oeste de Cumbre Vieja (dorsal ubicada en la mitad sur de la isla de La Palma, con orientación norte-sur). Debido a dicha actividad volcánica y a la dinámica atmosférica, la noche del 21 al 22 de septiembre de 2021 se registraron en el OAI, a 140 km, en la isla de Tenerife, dos picos de SO₂ que en promedio horario superaron los 350 µg/m³ (figura 4a), que es el valor límite horario (VLH) establecido por la CE (anexo A). Posteriormente, la noche del 12 al 13 de octubre de 2021, se volvieron a registrar valores de SO₂ que rebasaron dicho límite, contando con un pico horario superior a 7.500 µg/m³ (figura 4b). En este evento se superaron las 3 horas de umbral de alerta, durante las cuales los valores de SO₂ no descendieron de 500 µg/m³, que es el valor marcado por las guías de la OMS (anexo A). Concretamente, entre las 21h del día 12 de octubre y las 4h del día siguiente (referencia temporal de los datos en hora UTC), los valores horarios de SO₂ no bajaron de los 500 µg/m³; periodo “nocturno” en el que el número de personas en el Observatorio es mínimo (solo el personal de seguridad).

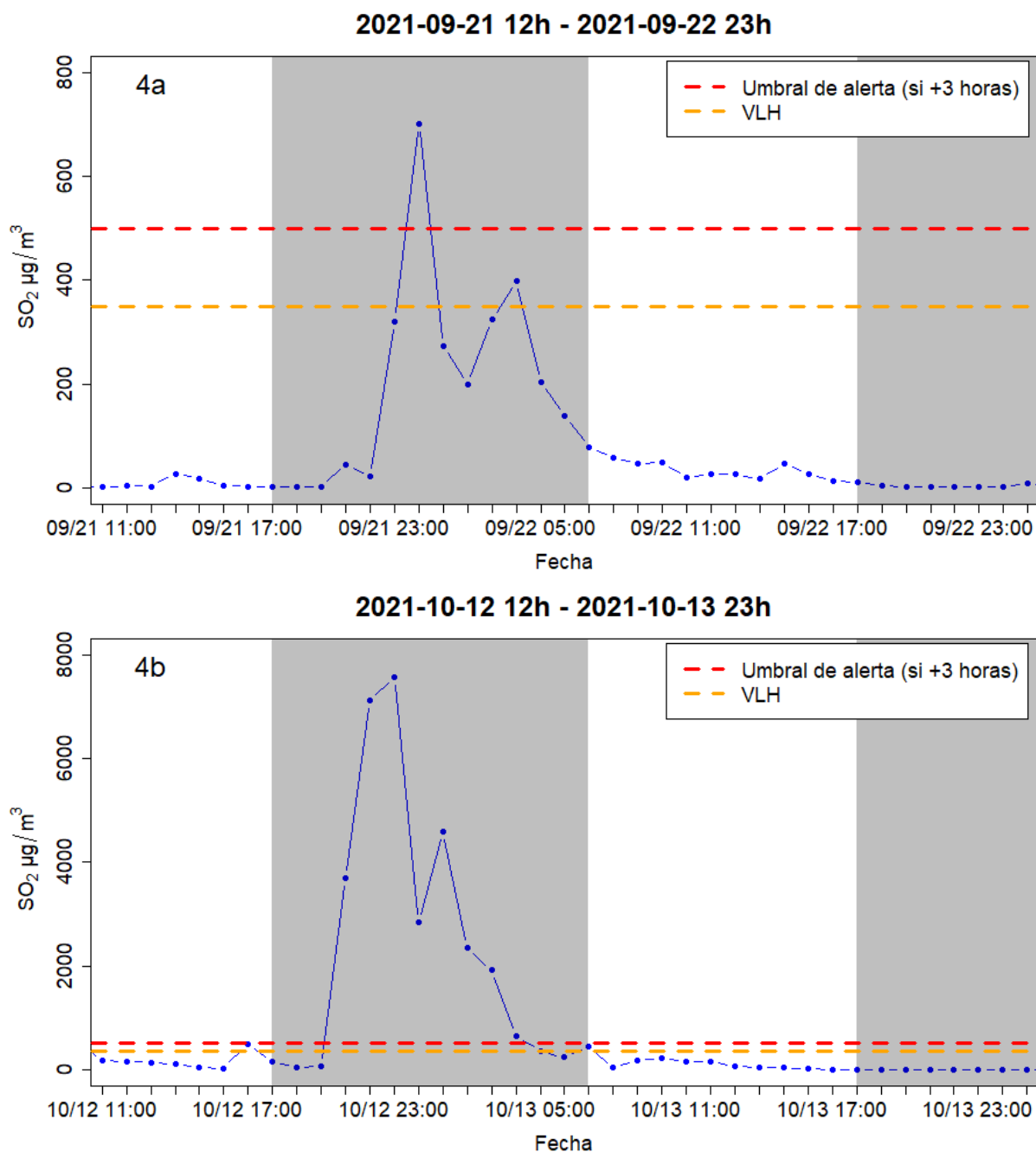


Figura 4: Valores horarios de SO₂ en el OAI, entre las 10h del 21/09/2021 y las 00h del 23/09/2021, figura superior/4a; entre las 10h del 12/10/2021 y las 00h del 14/10/2021, figura inferior/4b (línea punteada roja: umbral de alerta (si +3 horas) según la guía de la OMS (2021) establecido en 500 µg/m³; línea punteada naranja: VLH (350 µg/m³) de las directrices de calidad del aire de la EU (2008); sombreado: periodo “nocturno” con menor presencia de personal en el OAI).

Este evento de alta contaminación que superó el VLH de 500 µg/m³ de la OMS, umbral de alerta si se registra durante más de 3 horas, ocurrió solo una vez en el OAI pero fue el más alto medido durante el proceso eruptivo, superando incluso a los valores horarios registrados en estaciones de calidad del aire de la isla de La Palma cercanas al volcán (trabajo del CIAI en curso). Por ejemplo, en la estación de Tazacorte (TAZ), desplegada por CIAI para dar apoyo al

Comité Científico del PEVOLCA, y situada a unos 7 km del foco emisor y a escasos 2 km del frente de lava en su camino hacia la costa, se registró también un único evento de estas características pero de menor duración y menor intensidad (tabla 3). Los datos históricos de dichas estaciones se pueden consultar en la web del Gobierno de Canarias: <https://www3.gobiernodecanarias.org/medioambiente/calidaddelaire/datosHistoricosForm.do>.

Estación	VLH-OMS > 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ más de 3h seguidas	Periodo (hora UTC)	Máx. horario ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
OAI	1 superación (8h)	21h 12/10/2021 - 04h 13/10/2021	>7.500
TAZ	1 superación (4h)	07h - 10h 13/12/2021	>1.500

Tabla 3: Eventos de alta contaminación en base a los valores de la OMS.

Debido al elevado pico de SO_2 durante la noche del 12 al 13 de octubre de 2021, ambos días registraron valores en promedio diario que también superarían el VLD (Valor Límite Diario) para las guías de la CE ($125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no más de 3 veces al año; Anexo A) (figura 5 y tabla 4), y superándose en alguna ocasión los $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de VLD establecidos por la OMS (Anexo A). Estos promedios diarios están fuertemente marcados por altos valores horarios nocturnos, tal como ocurrió entre el 12 al 13 de octubre (figura 4b) o en la madrugada del 22 de septiembre (figura 4a); periodo nocturno donde, como ya se indicó, la presencia del personal del OAI se reduce solo al personal de seguridad. En la tabla 4 se han presentado las superaciones, según los umbrales de la OMS y CE de los valores promedio diarios de SO_2 junto con su desviación estándar para dar cuenta de la alta dispersión en las medidas y los altos picos puntuales registrados en OAI.

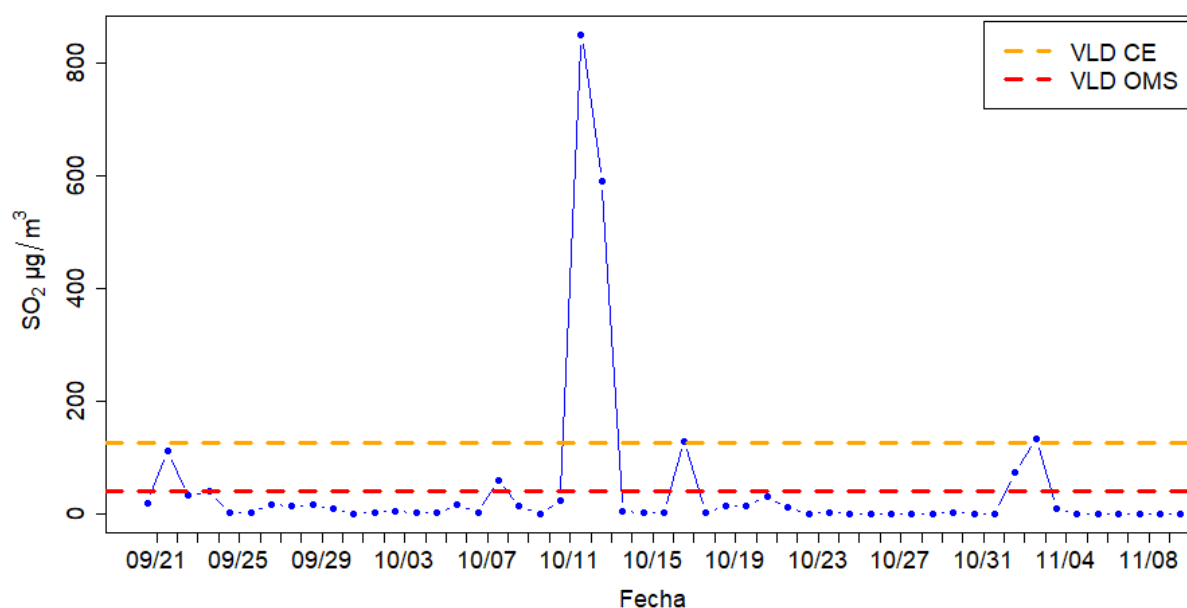


Figura 5: Valores diarios de SO_2 en OAI, periodo 19/09/2021 - 08/11/2021 (línea punteada roja: VLD igual a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ según la guía de la OMS, 2021; línea punteada naranja: VLD igual a $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de las directrices de calidad del aire de la EU, 2004).

Fecha	SO ₂ (µg/m ³)
22/09/2021	110 ± 183
24/09/2021	40 ± 99
08/10/2021	62 ± 154
12/10/2021	856 ± 2231
13/10/2021	584 ± 1445
17/10/2021	134 ± 358
21/10/2021	50 ± 242
02/11/2021	75 ± 107
03/11/2021	136 ± 287
19/11/2021	200 ± 185
24/11/2021	184 ± 311

Tabla 4: Valores diarios de SO₂ en OAI del periodo 19/09/2021 – 13/12/2021 que superan los VLD de la OMS (en gris superan los VLD de la CE). Desviación estándar del promedio, indicativo de la alta dispersión en las medidas.

Es de reseñar que además, durante los picos de SO₂ de los días 21-22 de septiembre y 12-13 de octubre, el personal de seguridad del OAI advirtió olores característicos de la presencia de gases volcánicos (olores indicados en la tabla 1).

Por otro lado, para el periodo analizado, del 19 de septiembre al 8 de noviembre, también se detectó en el OAI un aumento en la concentración de aerosoles (PM₁₀ y PM_{2.5}, figura 6), aunque en este caso hay que tener en cuenta que las condiciones sinópticas favorecieron la llegada de masas de aire cargadas de aerosol desértico (26-28 sept., 1-4 oct., 7-8 oct., 19-20 oct., bajo estudio en otros trabajos del CIAI). Por lo que no todo el aumento de material particulado registrado en el OAI para esos días corresponde con la presencia de ceniza volcánica o aerosol sulfato producto de la conversión del SO₂. Sin embargo, al comparar estas medidas con las del SO₂ (figura 6), vemos como los máximos registrados de SO₂ en OAI corresponden además con un aumento en el material particulado debido prácticamente en su totalidad a la influencia volcánica, tal como se constata del análisis del perfil vertical de aerosoles y de las retrotrayectorias (trabajo en preparación del CIAI; los perfiles verticales de aerosoles se pueden consultar en la red MPL (Micro-Pulse Lidar) de la NASA https://mplnet.gsfc.nasa.gov/data?v=V3&s=Santa_Cruz_Tenerife&t=20211013). Destacar los eventos ocurridos los días 12-13 de octubre y 2-3 de noviembre (figure 6), donde las concentraciones diarias de PM_{2.5} superan el VLD establecido por la OMS (15 µg/m³).

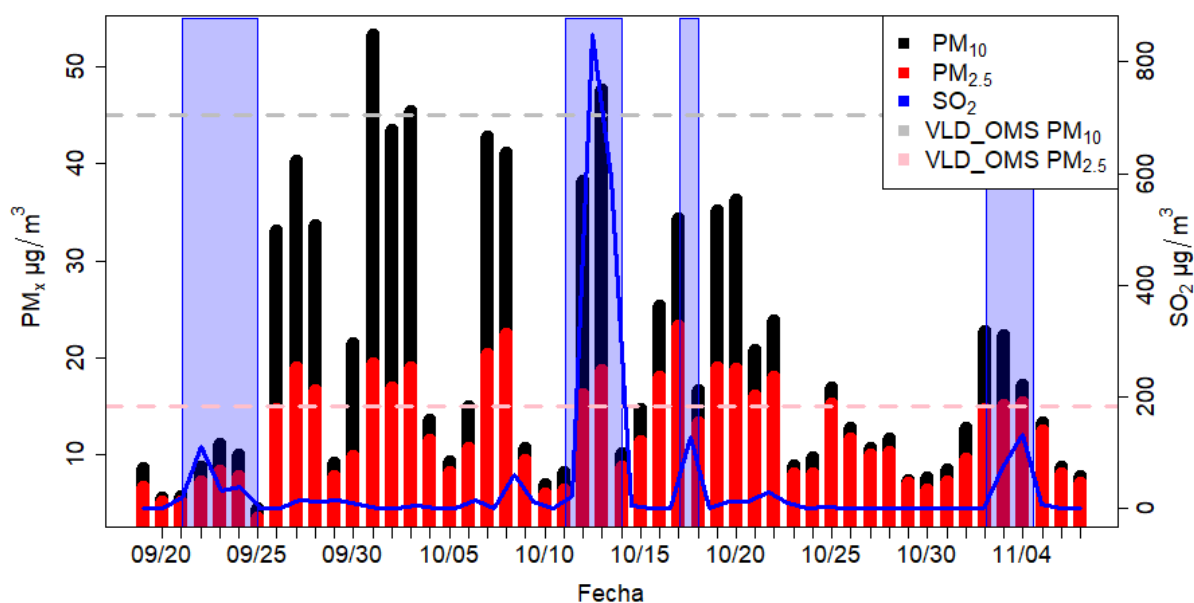


Figura 6: Valores diarios de PM₁₀ (negro), PM_{2.5} (rojo) y SO₂ (línea azul), periodo 19/09/2021 - 08/11/2021 (línea punteada negra: VLD para el PM₁₀ igual a 45 µg/m³, guía OMS (2021); línea punteada rosa: VLD para el PM_{2.5} igual a 15 µg/m³, guía OMS (2021); recuadros azules: presencia de contaminación volcánica en el OAI).

Ante estos eventos tan intensos registrados en el OAI, y con el fin de tomar medidas de protección de la salud del personal del OAI, el CIAI se vio en la necesidad de desarrollar un procedimiento de actuación para niveles altos de contaminación volcánica, que se describe a continuación, y que motivó la redacción de esta guía.

3.2. Medidas a adoptar con respecto al SO₂

Para poder hacer una vigilancia en tiempo real del impacto del SO₂ sobre el OAI, se diseñó un sistema de alerta vía web (que veremos con un ejemplo de aplicación en el apartado 3.6.), en donde a partir de las concentraciones del SO₂ que se miden en el Observatorio se establecen unos intervalos, a los que se le asigna un código de colores que nos indicará en qué situación nos encontramos y qué medidas habría que tomar.

Una aclaración importante sobre las guías consultadas y descritas en los apartados anteriores es que son, en general, menos restrictivas que la que aquí se presenta. En su caso, los códigos de color se basan generalmente en actividades al aire libre prolongadas, hasta que no se alcanza el código rojo, es decir, hasta que la calidad del aire no se vea gravemente comprometida, no emiten recomendaciones para que los grupos sensibles eviten las actividades al aire libre. Por ejemplo, la contaminación por SO₂ cambia a naranja cuando la concentración del mismo está entre 200–350 µg/m³. En este rango de concentraciones, no se imponen restricciones a las actividades al aire libre pero se informa a las personas sensibles que pueden experimentar síntomas. Remarcar también que los códigos de colores no distinguen entre la contaminación del aire que está justo por encima del límite de protección de la salud y la que está muy por encima. Por tanto, el código de color no influye en las recomendaciones sobre si la concentración de SO₂ es 350, 3.500 ó 35.000 µg/m³.

En la guía que aquí presentamos, el código de colores se basa en el valor que toma la concentración diezminutal y horaria del SO₂, siguiendo los umbrales legislados en las Directivas Europeas y la OMS (ver Anexo A), las recomendaciones de informes de actividad volcánica de otros países, así como recomendaciones a la población establecidas por el Gobierno de Canarias (ver Anexo B). Los valores instantáneos del SO₂ se usan de forma orientativa, para vigilar la evolución de este compuesto, pero no para la activación/desactivación de este procedimiento de actuación.

Los valores de SO₂ se miden con un analizador por fluorescencia UV (modelo Thermo 43C-TL, figura 7) y tanto el protocolo de toma de datos como de depuración de los mismos sigue la normativa VAG-OMM, sujeto a verificaciones y controles de calidad regulares (Cuevas et al., 2019). Si bien los umbrales de SO₂ recogidos en la normativa de calidad del aire se dan en µg/m³, en el sistema de alerta diseñado se dan en ppb (partes por billón, 1 ppm = 10³ ppb) ya que es la unidad en la que miden los analizadores de gases reactivos del programa VAG-OMM del OAI, y por tanto, es la unidad con la que trabaja el personal del Observatorio. En condiciones normales, 1 ppb equivale 2,66 µg/m³ (sobre la conversión entre unidades, consultar Anexo C).



Figura 7: Analizador de SO₂ Thermo 43C-TL del programa VAG-OMM del OAI.

Los datos diezminutales de SO₂ se calculan, cada diez minutos, como la media de los datos de los últimos diez minutos. Estos datos diezminutales son los que se utilizan para activar las fases de alerta, de forma que se puedan tomar medidas con antelación a alcanzarse los umbrales establecidos ya que los umbrales legislados, en general, son horarios.

Los datos horarios también se calculan cada diez minutos como media móvil de los últimos sesenta minutos. Estos datos son los que se utilizan para desactivar las fases de alarma, con el fin de asegurarnos un retorno seguro a las actividades, con concentraciones estables bajas de SO₂.

Las fases que se han establecido en este sistema de alerta de SO₂, en ppb y µg/m³, son:

Baja	Normal	Alta	Muy alta
0-10 ppb	10-130 ppb	130-190 ppb	>190 ppb
0-25 µg/m ³	25-350 µg/m ³	350-500 µg/m ³	>500 µg/m ³

Tabla 5: Código de colores establecido para el sistema de alerta de SO₂ en el OAI.

En el procedimiento, se ha establecido que la vigilancia de este compuesto la realiza de forma continua el personal de seguridad del Observatorio a través de una web interna habilitada para tal efecto, que podrá ser consultada, y servir de guía, a todo el personal que realice sus funciones en el Observatorio.

A continuación, en la tabla 6 se presenta el procedimiento de actuación del OAI ante situaciones de empeoramiento y mejora de la calidad del aire en base a las concentraciones de SO₂, el código de colores asignado y las acciones según la situación.

EMPEORAMIENTO DE LA SITUACIÓN				
ppb	µg/m ³	Acciones	Umbrales	Responsable**
>130	>350	Vigilancia intensiva de la concentración, para posible activación de alarma. Se hace uso de mascarillas FFP2 con filtro de carbono activo*	Pre-Alarma: Cuando promedio diezminutal >130 ppb	SSBB Seguridad
>190	>500	Se cierran todas las puertas. Se anulan las actividades de exterior, en la sala de máquinas y garajes* Se hace uso de mascarillas FFP2 con filtro de carbono activo*	Alarma: Cuando promedio diezminutal >190 ppb	SSBB Seguridad
MEJORA DE LA SITUACIÓN				
<130	<350	Se reanudan operaciones*	Rescisión alarmas: Cuando el promedio horario <130 ppb	SSBB Seguridad
<10	<25	Se ventila con ventilación forzada “desvanes”	Cuando el promedio horario <10 ppb	SSBB

* Aplica a todo el personal del Observatorio, previa comunicación del personal de seguridad y/o SSBB.

** Responsable: personal encargado de la vigilancia y de la comunicación.

Tabla 6: Procedimiento de actuación ante niveles altos de SO₂ en el OAI.

Comunicación:

- La pre-alarma y alarma asociadas a concentraciones altas de SO₂ las recibirán el personal de seguridad, el jefe de SSBB y el Director del CIAI a través de la web preparada para tal fin, y estos las redirigirán al personal correspondiente.
- El personal de seguridad comunicará al personal que se encuentra trabajando en el Observatorio las situaciones de pre-alarma y alarma, y las acciones a seguir, mediante

comunicación verbal o envío de mensaje al móvil (siempre y cuando el personal haya dado su autorización).

3.3. Medidas a adoptar con respecto al H₂S

El personal de seguridad llevará un detector que registra el H₂S con una resolución de 0,1 ppm (figura 8). La guía islandesa mencionada (Islandic Government, 2021) indica que entre 2 y 5 ppm podrían darse efectos sobre la salud.



Figura 8: Detectores de SO₂ y H₂S del personal de seguridad del OAI

Cuando el personal de seguridad detecte valores de 1 ppm en el interior del Observatorio o mayores de 2 ppm en exterior, aplicará el protocolo de confinamiento (código rojo) descrito para el SO₂.

Se desactivarán las medidas de confinamiento cuando el H₂S sea menor de 1 ppm, siempre que los niveles de SO₂ también estén en concentraciones normales (código verde), reanudándose la operatividad.

3.4. Indicaciones con respecto a otros compuestos

Si el personal trabajando en el Observatorio advirtiese olores extraños como a huevos podridos (posible relación con el H₂S) o fuegos pirotécnicos (posible relación con el SO₂), lo debe comunicar al personal de seguridad y al jefe de SSBB, quienes consultarán la web interna de vigilancia de SO₂ y tomarán las medidas pertinentes.

Además, los observadores dispondrán de un detector de cuatro componentes (H₂S, SO₂, hidrocarburos y % de O₂), programados con las alarmas correspondientes (figura 9), que portarán durante su turno. Si saltara alguna alarma, deberán comunicarlo al personal de seguridad y al jefe de SSBB, quienes consultarán la web interna de vigilancia de SO₂ y tomarán las medidas pertinentes.



Figura 9: Detector de H₂S, SO₂, hidrocarburos y % de O₂ que portan los observadores del OAI.

Resto de gases (CO, CO₂): Durante los episodios de contaminación asociado a la erupción volcánica en el Observatorio, el CO y CO₂ han dado concentraciones muy bajas y alejadas de los valores límites de seguridad.

Material particulado (PM): Su aumento debido a la ceniza volcánica va acompañado presumiblemente del aumento del SO₂, por lo que las medidas tomadas con respecto al SO₂ evitan también la exposición al PM.

3.5. Medidas a adoptar en el transporte del personal hacia y desde el OAI

Tras comprobar que durante el tiempo que duró la erupción volcánica de la isla de La Palma hubo varios episodios de transporte de SO₂ que afectaron en altura a la isla de Tenerife, y dado que es complicado saber en tiempo real a qué altura se está dando dicho transporte por la falta de redes extensas de observación, se estableció dentro del procedimiento de actuación que durante todo el tiempo que duró la erupción volcánica, o cualquier otro episodio identificado de contaminación, el vehículo que transporta al personal al OAI deberá minimizar la entrada de aire del exterior. Para ello se establece que desde unos 1400 m s.n.m. (zona de Las Lagunetas de la carretera TF-24, La Esperanza-OAI) el vehículo deberá llevar las ventanillas y la circulación del aire exterior cerradas, y activar el aire acondicionado con recirculación interna.

3.6. Ejemplo de aplicación del código de colores

Entre las 01h y las 05h de la madrugada del 3 de noviembre, se registraron valores horarios de SO₂ muy altos. Tal como se recoge en la figura 10, que muestra los datos promedio horarios de SO₂ durante esa noche (promedio de sesenta minutos posteriores a la hora nominal), se superó en dos ocasiones el valor límite horario de 350 µg/m³ establecido en las directrices de calidad del aire de la CE (EU, 2008).

Para ese mismo periodo, el código de alerta del OAI fue cambiando de fase tal como se recoge en la figura 11. Al comparar los valores diezminutales y horarios de estas gráficas se observa

que en los máximos de SO₂ el valor diezminutal, usado para la activación de las fases, cambia a rojo (>190 ppb; >500 µg/m³) antes que el promedio horario que responde más lentamente y suavizando las concentraciones. Por otro lado, tras los máximos de SO₂ las concentraciones disminuyen, tal como se observa en los datos diezminutales, pero el código de colores que muestra los datos horarios, y que determina la desactivación de las fases, se mantiene más tiempo en amarillo/rojo. Este diseño basado en promedios diezminutales (activación fases) y horarios (desactivación fases) permite que el procedimiento de actuación en caso de niveles altos de contaminación volcánica se aplique de una forma más segura para el personal del Observatorio.

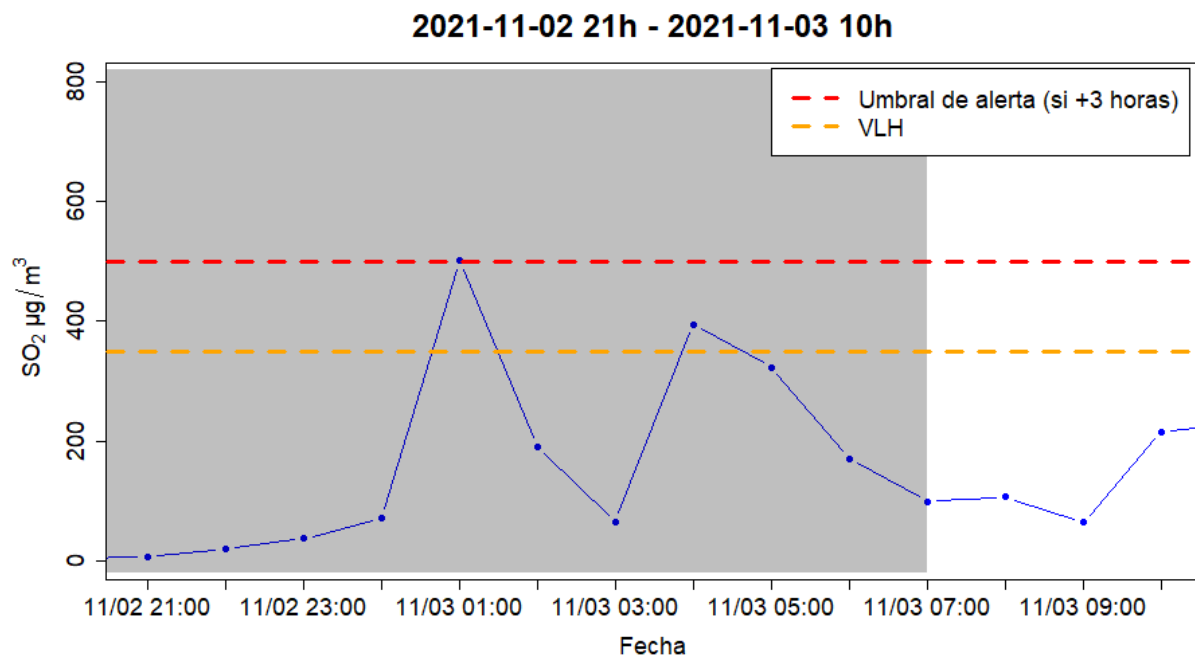


Figura 10: Valores horarios del SO₂ en OAI, entre las 21h del 02/11/2021 y las 10h del 03/11/2021 (línea punteada roja: Umbral de alerta (si +3 horas) según la guía de la OMS (2021) establecido en 500 µg/m³; línea punteada naranja: VLH igual a 350 µg/m³, de las directrices de calidad del aire de la EU (2008); sombreado: periodo “nocturno” con menor presencia de personal en el OAI).

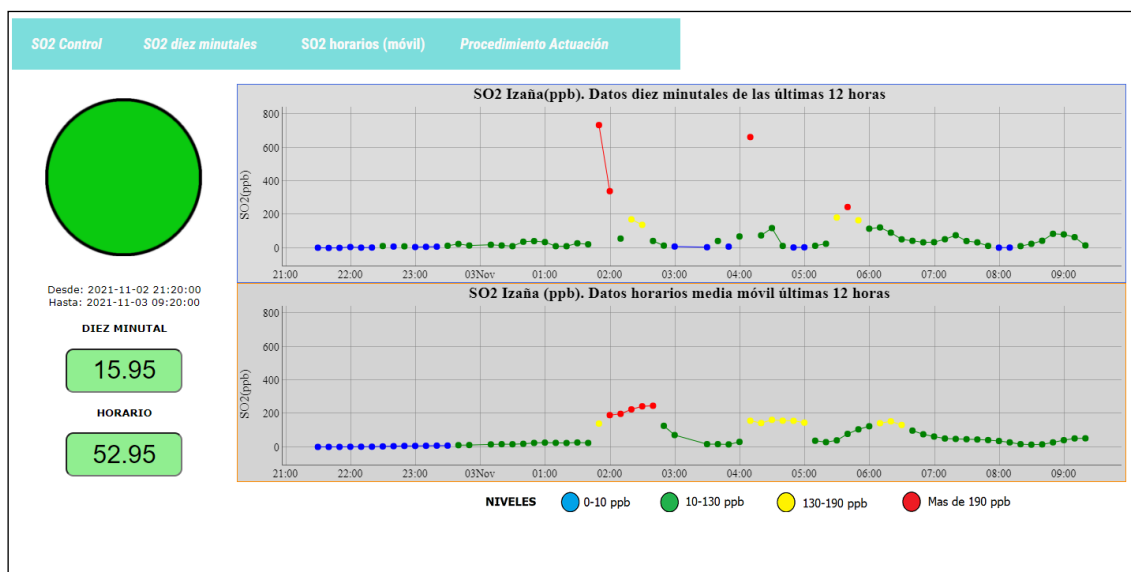


Figura 11: Sistema de alerta para la activación del procedimiento en el OAI aplicado entre las 21h del 02/11/2021 y las 09h del 03/11/2021. Gráfica superior, concentraciones diezminutales del SO₂, y gráfica inferior, concentraciones horarias del SO₂. En el Círculo se indica, a través del código de colores descrito en el apartado 3.2, la fase de alerta respecto a la concentración de SO₂ en la que se encuentra el OAI.

4. CONCLUSIONES

La experiencia técnica del Programa de Observación de Composición Atmosférica del CIAI y su conocimiento tanto sobre efectos en la salud de la contaminación atmosférica como de la legislación referente a la calidad del aire permitió dar una respuesta rápida en cuanto a prevención del personal frente a eventos de contaminación volcánica, desarrollando herramientas y guías ad hoc en tiempo record. De esta forma, se ha podido garantizar la operatividad del OAI durante el proceso eruptivo de La Palma a finales de 2021, minimizando el posible riesgo de exposición del personal que desarrolla las diferentes labores en el mismo.

La redacción de esta guía pretende dar una base sustentada bibliográficamente a los protocolos planteados, y puede ser de aplicación en otros ámbitos del entorno del Parque Nacional del Teide, aprovechando nuestra red de medidas, o en otras regiones donde exista una red de monitorización de calidad del aire, especialmente con medidas de SO₂ y material particulado.

Esta guía es susceptible de cambios debido a actualizaciones en la normativa de calidad del aire, o a propuestas de mejora, como:

- Incluir modelos de predicción para poner sobre aviso al personal de la posible llegada de plumas volcánicas.
- Añadir un nuevo umbral de aviso previo al amarillo de pre-aviso, cuando los valores de concentración puedan estar cercanos a los 350 µg/m³, de forma mantenida y sin rebasar dicho umbral.

ANEXOS

ANEXO A: Cuadro resumen de los estándares y guías de calidad del aire

Compuesto ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Guía OMS – 2021 (en 24h)	Guía OMS – 2021 (en 1h)	Directriz CE (en 24h)	Directriz CE (en 1h)
NO ₂	25	200	No aplica	200
SO ₂	40	500 (si +3h)*	125**	350***
O ₃	100 (media 8h)	No regula	120 (8h)	No regula
CO (mg/m^3)	4 mg/m^3	35 mg/m^3	10 mg/m^3 (8h)	No regula
PM _{2,5}	15	No regula	25	No regula
PM ₁₀	45	No regula	50	No regula

Tabla A: Estándares de Calidad del Aire para la protección de la salud, según la directiva europea de calidad del aire ambiental (EU, 2008) y la guía de la OMS (WHO, 2021). (*) La OMS no fija un límite horario sino que marca el umbral de alerta si los valores de SO₂ están por encima de los 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante más de 3 horas. (**) La CE indica que no se supere este valor en más de 3 ocasiones al año. (***) La CE indica que no se supere este valor en más de 24 horas al año.

ANEXO B: Índice de Calidad del Aire (ICA) y recomendaciones del Gobierno de Canarias

Respecto a este proceso eruptivo, en la página del Cabildo de La Palma que aglutina toda la información referente a este evento, hay un apartado específico para la Calidad del Aire (<https://volcan.lapalma.es/pages/calidad-del-aire>, último acceso mayo 2022). En este, se indican los siguientes Índices de Calidad del Aire (ICA) y recomendaciones a la población establecidas por el Gobierno de Canarias:

Calidad del aire del EAQI según la concentración de cada contaminante.					
Calidad del aire	O3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora)	NO2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ por día)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ por día)	SO2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora)
Buena	0-80	0-40	0-20	0-10	0-100
Aceptable	81-120	41-100	21-35	11-20	101-200
Moderada	121-180	101-200	36-50	21-25	201-350
Mala	181-240	201-400	51-100	26-50	351-500
Muy mala	>240	>400	>100	>50	>500

Mensajes y recomendaciones para la salud según la calidad del aire determinada por los AQI.			
Calidad del aire	Mensajes para la salud	Recomendaciones para la salud	
		Grupos de riesgo y personas sensibles ¹	Población general
Buena	Calidad del aire satisfactoria, la contaminación no supone un riesgo para la salud.	Realizar las actividades en el exterior con normalidad.	Realizar las actividades en el exterior con normalidad.
Aceptable	Calidad del aire aceptable para la población general. Podría entrañar riesgo para la salud de las personas vulnerables	Se recomienda reducir las actividades prolongadas e intensas en exterior.	Estar atentos a la aparición de síntomas como tos, irritación de garganta, falta de aire, fatiga excesiva o palpitaciones. En ese caso, reducir las actividades prolongadas e intensas en el exterior.
Moderada	La calidad del aire presentar un riesgo moderado para los grupos de riesgo.	Reducir las actividades prolongadas e intensas en el exterior. Seguir el plan de tratamiento habitual meticulosamente.	Estar atentos a la aparición de síntomas como tos, irritación de ojos, garganta, falta de aire, fatiga excesiva o palpitaciones. En ese caso, reducir las actividades prolongadas y activas en el exterior.
Mala	<i>Toda la población puede experimentar efectos sobre la salud. En los grupos de riesgo los efectos pueden ser mucho más serios.</i>	Evitar las actividades prolongadas y activas en el exterior y posponerlas para cuando la calidad del aire mejore. Seguir el plan de tratamiento habitual meticulosamente.	Reducir las actividades prolongadas e intensas en el exterior, especialmente si se experimenta tos, irritación de ojos, garganta, falta de aire, fatiga excesiva o palpitaciones.
Muy mala	Condiciones de emergencia para la salud pública, la población entera puede verse seriamente afectada.	Evitar toda actividad física en el exterior y posponerlas hasta que la calidad del aire mejore. Vigilar la aparición de síntomas respiratorios o los propios de su enfermedad en las personas vulnerables. Seguir el plan de tratamiento habitual meticulosamente.	Evitar toda actividad física en el exterior. Vigilar la aparición de tos, irritación de ojos, garganta, falta de aire, fatiga excesiva o palpitaciones o cualquier otro síntoma sospechoso.

¹ Grupos de riesgo: niños menores de 15 años, mayores de 65 años, mujeres gestantes y personas con patología cardiorrespiratoria (asma, bronquitis crónica, insuficiencia cardíaca...)

ANEXO C: Glosario

Aerosol atmosférico: se define como una suspensión de partículas sólidas y/o líquidas en la atmósfera, que van a tener un importante impacto sobre el clima regional y global debido a sus efectos tanto directos como indirectos. Son de origen muy diverso tanto antropogénico (contaminación industrial, emisiones de vehículos, incendios) como de origen natural (aerosol mineral del desierto, sales marinas, erupciones volcánicas y pólenes).

Contaminación del aire ambiente: contaminación del aire en el ambiente exterior, es decir, en el exterior, aunque puede entrar o estar presente en ambientes interiores.

Columna eruptiva: columna de gases, cenizas y material fragmentado que se lanza a la atmósfera durante una erupción. Si ese material tiene suficiente energía y volumen puede llegar a una altura de varios kilómetros en la estratosfera donde los vientos lo pueden transportar a grandes distancias.

Partículas ultrafinas: partículas de un diámetro aerodinámico menor o igual a 0,1 µm. Debido a su pequeña masa, sus concentraciones son más comúnmente medidas y expresadas en términos de concentraciones de número de partículas. Se encuentran entre las partículas más peligrosas debido a su pequeño tamaño, lo que les permite, al inhalarlas, entrar en los pulmones y pasar al torrente sanguíneo.

PEVOLCA: son las siglas para referirse al Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias. Está gestionado por la Dirección General de Seguridad y Emergencias del Gobierno de Canarias que a la redacción de este informe pertenece a la Consejería de Economía, Hacienda y Seguridad. El PEVOLCA tiene por objeto garantizar una respuesta coordinada, ágil, eficaz y eficiente de

todas las administraciones públicas para hacer frente a crisis sismovolcánicas, que pueden dar lugar a erupciones tanto subaéreas como submarinas, y a las emergencias derivadas de las mismas y que se originen en el territorio de la Comunidad Autónoma de Canarias, así como velar por el cumplimiento de las medidas de prevención contempladas en la normativa vigente (BOC N° 154, Jueves 9 de Agosto de 2018 – 3785 DECRETO 112/2018).

PM₁₀/PM_{2.5}: el material particulado con un diámetro inferior o igual a 10 µm es conocido como PM₁₀, mientras que si el diámetro es inferior o igual a 2,5 µm se denomina PM_{2.5}. Estas últimas son las que más importancia tienen en la contaminación atmosférica, ya que pueden penetrar profundamente en los pulmones y poseen riesgos potenciales significativos para la salud. Las partículas de tamaño comprendido entre los 2,5 y los 10 µm, no son realmente inhaladas hasta las vías profundas y se expulsan de manera relativamente eficaz a través de las mucosidades o de la tos, o sedimentan directamente sin llegar a penetrar en el árbol respiratorio.

VEI (Índice de Explosividad Volcánica): Índice definido en 1982 para medir la magnitud de una erupción volcánica, de forma relativa. Se determina en función del volumen de los productos expulsados, la altura de la columna eruptiva y la descripción del tipo de erupción. Su valor va de 0 (erupciones no explosivas) a 8 (erupciones muy explosivas), representando cada intervalo numérico un aumento de diez veces la explosividad volcánica en comparación con el anterior.

ANEXO D: Conversión de unidades del SO₂

Las unidades para la medida del SO₂ en Redes de Calidad del aire son los µg/m³ pero la instrumentación que se utiliza para la monitorización de dicho gas generalmente trabaja en ppb o ppm (partes por billón o por millón, dependiendo de las concentraciones del mismo, 1 ppm=10³ ppb). Para conocer la conversión entre una y otra unidad, se aplica la ecuación general de los gases ideales, en condiciones normales de presión (1 atm) y temperatura (20 °C), en la que es necesario conocer el peso molecular (PM) del gas con el que estamos trabajando. Para el caso del SO₂, con un peso molecular de 64,06 g/mol, obtenemos la siguiente relación:

$$[ppb] = \frac{24,05}{PM} \left[\frac{\mu g}{m^3} \right]$$

BIBLIOGRAFÍA

Brown, S.K., Loughlin, S.C., Sparks, R.S.J., Vye-Brown, C. et al., 2015. *Global volcanic hazards and risk: Technical background paper for the Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015*. Global Volcano Model, GVM, and International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, IAVCEI; <https://www.researchgate.net/publication/274080476>, último acceso mayo 2022.

Carlsen, H.K., Ilyinskaya, E., Baxter, P.J., 2021. *Increased respiratory morbidity associated with exposure to a mature volcanic plume from a large Icelandic fissure eruption*. Nat Commun 12, 2161; <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22432-5>, último acceso mayo 2022.

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., 2019. *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; https://izana.aemet.es/wp-content/docs/Izana_Report_2017_2018.pdf, último acceso mayo 2022.

European Environment Agency, *Air quality in Europe — 2016 report*, EEA Report No 28/2016; <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2016>, último acceso mayo 2022.

EU, 2004, *Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air* (OJ L 23, 26.1.2005, pp. 3-16); <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2004/107/oj>, último acceso mayo 2022.

EU, 2008, *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* (OJ L 152, 11.6.2008, pp. 1-44); <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>, último acceso mayo 2022.

González, Y., Rodríguez, S., Guerra, J.C., Trujillo, J.L., García, R., 2011. *Ultrafine particles pollution in urban coastal air due to ship emissions*. Atmospheric Environment 45, 4907-4914.

Islandic Government, 2021, *Healthy ricks due to air pollution from Volcanic Eruption. Guidelines for the public*. 2ª edición. Folleto. ISBN 978-9935-9481-5-1; https://www.landlaeknir.is/servlet/file/store93/item45005/Haetta%20a%20heilsutjoni%20vegna%20loftmengunar_EN%202.pdf, último acceso mayo 2022.

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

PEVOLCA, 2021, *INFORME Comité Científico PEVOLCA. ACTUALIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA EN CUMBRE VIEJA (LA PALMA)*; https://info.igme.es/eventos/la-palma/pevolca/211225_Informe-Comite-Cientifico-PEVOLCA.pdf, fecha 25.12.2021.

Schmidt, A., Ostro, B., Carslaw, K. S., Wilson, M., Thordarson, T., Mann, G. W., & Simmons, A. J., 2011. *Excess mortality in Europe following a future Laki-style Icelandic eruption*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108(38), 15710–15715; <https://doi.org/10.1073/pnas.1108569108>, último acceso mayo 2022.

Stewart C., Damby D.E., Horwell C.J., Elias T., Ilyinskaya E. Tomašek I., Longo B.M., Schmidt A., Carlsen H.K., Mason E., 2022. *Volcanic air pollution and human health: recent advances and future directions*. Bulletin of Volcanology 84:11; <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01513-9>, último acceso mayo 2022.

Thordarson, T and Self, S., 2003. *Atmospheric and environmental effects of the 1783–1784 Lakieruption: A review and reassessment*; J. of Geophys. Res., Vol. 108, No. D1, 4011; <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2001JD002042>, último acceso mayo 2022.

Tobías, A., Rivas, I., Reche, C., Alastuey, A., Rodríguez, S., Fernández-Camacho, R., Sánchez de la Campa, A.M., de la Rosa, J., Sunyer, J., Querol, X., 2018. *Short-term effects of ultrafine particles on daily mortality by primary vehicle exhaust versus secondary origin in three Spanish cities*. Environ. Int. 111, 144–151; <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.11.015>, último acceso mayo 2022.

Weiser, F., Baumann, E., Jentsch, A., Medina, F.M., Lu, M., Nogales, M., Beierkuhnlein, C. *Impact of Volcanic Sulfur Emissions on the Pine Forest of La Palma, Spain, 2022*. Forests 2022, 13, 299; <https://doi.org/10.3390/f13020299>.

WHO, 2021, *Global air quality guidelines*. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Ginebra: World Health Organization; <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>, último acceso mayo 2022, licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.