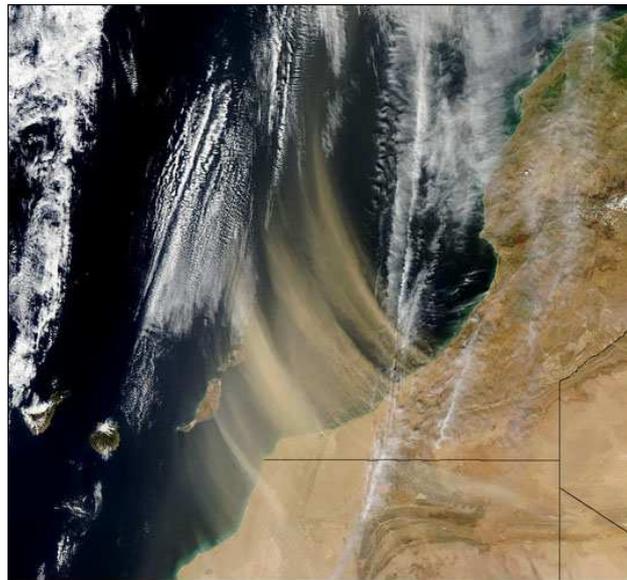


PROCEDIMIENTO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE EPISODIOS NATURALES DE PM₁₀ Y PM_{2,5}, Y LA DEMOSTRACIÓN DE CAUSA EN LO REFERENTE A LAS SUPERACIONES DEL VALOR LÍMITE DIARIO DE PM₁₀



ELABORADO POR:
INSTITUTO DE DIAGNÓSTICO AMBIENTAL Y ESTUDIOS DEL AGUA (IDAEA), CSIC
Universidade Nova de Lisboa
AEMet-Izaña
CIEMAT
Universidad de Huelva

PARA:
MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE-ESPAÑA
S.G. de Calidad del Aire y Medio Ambiente Industrial (Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, DGCEA)
MINISTÉRIO DO AMBIENTE, ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E DESENVOLVIMENTO REGIONAL – PORTUGAL
Agência Portuguesa do Ambiente

Revisado: abril de 2013

Portada: Imagen SeaWiFS-NASA-USA, para un episodio africano sobre Canarias registrado el día 3 de diciembre de 2003.

AUTORES

X. Querol, A. Alastuey, J. Pey, M. Escudero, S. Castillo
Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), CSIC
Ministerio de Ciencia e Innovación
xavier.querol@ija.csic.es

A. Orío, A. González, M. Pallarés, S. Jiménez
S.G. de Calidad del Aire y Medio Ambiente Industrial Ministerio de Agricultura, Alimentación y
Medio Ambiente (MAGRAMA)
aorio@magrama.es

F. Ferreira, F. Marques, J. Monjardino
Universidade Nova de Lisboa
ff@fct.unl.pt

E. Cuevas, S. Alonso
Observatorio Atmosférico de Izaña
Agencia Estatal de Meteorología (AEMet)
MARM

B. Artíñano, P. Salvador
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)
Ministerio de Ciencia e Innovación

J. de la Rosa
Departamento de Geología
Universidad de Huelva, La Rábida, Huelva

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Marco normativo	1
1.2. Aportes naturales de PM	3
1.3. Objetivos	4
2. INTRUSIONES DE MASAS DE AIRE AFRICANAS	5
2.1. Introducción	5
2.2. Metodología	14
2.2.1. Justificación de la selección del percentil 40	20
2.2.2. Justificación adicional de la persistencia de algunos episodios africanos	23
2.3. Otras consideraciones	24
2.4. Contribución neta africana a los niveles medios anuales de PM ₁₀ y PM _{2,5} en estaciones de fondo regional	25
2.5. Posibilidad de aplicación en otros países: niveles medios anuales de PM ₁₀ en el Sur de Europa	28
3. AEROSOL MARINO	31
4. AGRADECIMIENTOS	33
5. BIBLIOGRAFÍA	34

Puede consultarse también:

GUÍA PARA LOS ESTADOS MIEMBROS SOBRE MEDIDAS DE PM₁₀ E INTERCOMPARACIÓN CON EL MÉTODO DE REFERENCIA, Informe del Grupo de Trabajo de la Comisión Europea sobre Material Particulado (marzo de 2001):

<http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/finalwgreportes.pdf>,

y citado a lo largo del documento como “La Guía”

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Marco normativo

Debido a los efectos del material particulado atmosférico (MPA o PM) sobre la salud, el clima y los ecosistemas, la medida de los niveles de partículas en la atmósfera es uno de los parámetros clásicos en el control de la calidad del aire.

En España, hasta el año 2001, el control de los niveles de MPA se realizaba por medidas de humos negros (HN) y de partículas totales en suspensión (PST) según los Reales Decretos 1613/1985 (BOE nº 219 del 12/09/85) y 1321/1992 (BOE nº 289 del 02/12/92) que provienen de la incorporación a la legislación española de las Directivas Europeas 80/779/CEE y 89/427/CEE. A partir de julio de 2001 entró en vigor la Directiva Europea 1999/30/CE que establece “valores límite y, en su caso, umbrales de alerta con respecto a las concentraciones de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente para evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos para la salud humana y para el medio ambiente en su conjunto”. Esta nueva Directiva produjo un cambio en los parámetros de medida pasándose a medir PM10 (definido legalmente como la masa de partículas que pasan a través de un cabezal de tamaño selectivo para un diámetro aerodinámico de 10 µm con una eficiencia de corte del 50 %) en vez de HN y PST, y estableciendo una mayor restricción en los valores límite. Esta nueva Directiva proponía dos Fases. La fase I (2005) en la que el límite anual medio de concentración de partículas es de 40 µg/m³ y el límite diario es de 50 µg/m³, con un número de superaciones anuales permitidas del valor límite diario de 35 días. La fase II (2010) era más restrictiva, con valores indicativos de 20 µg/m³ de media anual y 50 µg/m³ de media diaria con 7 días de superaciones permitidas en un año. Sin embargo la Directiva expone que para que la fase de 2010 entrase en vigor, los valores indicativos fijados para tal fecha tendrían que haberse ratificado como tales en la evaluación de la directiva de 2003. Esta ratificación no se produjo y por tanto nunca llegarán a entrar en vigor, quedando como valores límite de PM10 los fijados para la primera fase. Diversos estudios científicos (Querol et al., 2004a y b) demuestran claramente que en la primera fase el valor límite diario es mucho más estricto que el anual.

En la Directiva también se proponía que a finales del 2003 se evaluara la posibilidad de determinar valores límite para el parámetro PM2,5 (masa de partículas que pasan a través de un cabezal de tamaño selectivo para un diámetro aerodinámico de 2,5 µm con una eficiencia de corte del 50 %), dado que hay estudios epidemiológicos que apuntan que las partículas más perjudiciales para la salud son aquellas con un diámetro igual o inferior a 2,5 µm.

El documento que elaboró el grupo de trabajo de material particulado dentro del Programa Aire Puro para Europa (CAFÉ, D.G. Medio Ambiente de la Unión Europea (UE)) propuso unos valores límite en el rango de 12-20 µg/m³ de PM2,5 tomando como base los estudios integrados de evaluación. Se propuso también un valor límite diario de 35 µg/m³ de PM2,5, permitiendo 35 días de superación del valor límite diario. No obstante, de acuerdo con la OMS (2003) se determina que la fracción 2,5-10 µm puede tener también impacto en la salud.

Como resultado de todo ello, la UE aprobó el 21 de mayo de 2008 la nueva Directiva 2008/50/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, (DOUE de 11 de junio), que sustituye, entre otras, a la Directiva 1999/30/CE y, en cuanto a las partículas (Tabla 1):

1. Fija como definitivos los valores límite de PM10 de la fase I (2005) y descarta definitivamente la entrada en vigor de los valores límite de PM10 de la fase 2.

2. Añade un valor objetivo anual de PM_{2,5} de 25 µg/m³ aplicable en todo el territorio europeo a partir del 2010, que a partir de 2015 (Fase 1) se convertiría en valor límite. Dicho valor límite pasaría en 2020 (Fase 2) a 20 µg/m³ (de nuevo, es un valor indicativo, que será revisado por la Comisión en 2013).
3. Introduce, además, el llamado Indicador Medio de Exposición (IME) a nivel nacional, que es el nivel medio, determinado en estaciones de fondo urbano, que refleja la exposición de la población; y dos obligaciones con respecto a este IME: la obligación en materia de concentración de la exposición, de tal modo que en 2015 el IME sea inferior a 20 µg/m³; y el objetivo nacional de reducción de la exposición, de tal modo que el IME de 2020 (media trienal 2018-2020) sea inferior al de 2011 (media trienal 2009-2011) en un porcentaje que varía en función del valor del IME en 2011.

Tabla 1. Valores límite anual y diario y número de superaciones del valor límite diario de PM₁₀ y, valores objetivo y límite anual y obligación en materia de concentración y objetivo de reducción de la exposición para PM_{2,5} establecidos por la Directiva Europea 2008/50/CE.

Parámetro de referencia	PM ₁₀	PM _{2,5}
Valor objetivo anual (µg/m ³)		25 (2010)
Valor límite anual (µg/m ³)	40	25 (2015)
Valor límite anual (µg/m ³) (Fase 2)		20 (2020)
Valor límite diario (µg/m ³)	50	
Número de superaciones del valor límite diario permitidas	35	
Obligación en materia de concentración de la exposición		20 (2015)*
Objetivo de reducción de la exposición de 2011 a 2020		Máximo del 20%**

* Valor de la media trienal de PM_{2,5} en estaciones de fondo urbano en 2013-2015

** Reducción de la media trienal de PM_{2,5} en estaciones de fondo urbano desde 2009-2011 a 2018-2020.

Además, la Directiva 2008/50/CE, al igual que hacía la Directiva 1999/30/CE, establece criterios sobre micro y macroimplantación de las estaciones de medida, el número de puntos de toma de muestras y los métodos de referencia de medidas. Así, en cuanto a la macroimplantación para la protección de la salud humana, el Anexo III.B dice textualmente:

a) la ubicación de los puntos de muestreo destinados a la protección de la salud humana deberá determinarse de manera que proporcione datos sobre:

- *las áreas situadas dentro de zonas y aglomeraciones donde se registren las concentraciones más altas a las que la población puede hallarse directa o indirectamente expuesta durante un período significativo en relación con el período considerado para el cálculo del valor o valores límite,*
- *los niveles de contaminación en otras áreas situadas dentro de zonas y aglomeraciones que sean representativas de la exposición de la población en general;*

b) en general, la ubicación de los puntos de muestreo deberá ser tal que evite que se midan los microambientes muy pequeños en sus proximidades, lo que significa que los puntos de muestreo deberán estar ubicados de manera que sean, en la medida de lo posible, representativos de la calidad del aire de un segmento de calle no inferior a 100 m de longitud en los emplazamientos de tráfico y de al menos 250 m x 250 m en los emplazamientos industriales;

c) las estaciones de fondo urbano deberán ubicarse de forma que su nivel de contaminación refleje la contribución procedente de todas las fuentes situadas a barlovento de la estación. El nivel de contaminación no debe estar dominado por una sola fuente salvo en el caso de que tal situación sea característica de una zona urbana

más amplia. Por regla general, esos puntos de muestreo deberán ser representativos de varios kilómetros cuadrados;

d) cuando el objetivo sea evaluar los niveles rurales de fondo, los puntos de muestreo no deberán estar influidos por las aglomeraciones o los emplazamientos industriales de los alrededores, es decir los situados a menos de cinco kilómetros;

e) cuando se desee evaluar las aportaciones de fuentes industriales, al menos un punto de muestreo se instalará a sotavento de la fuente en la zona residencial más cercana. Cuando no se conozca la concentración de fondo, se situará un punto de muestreo suplementario en la dirección dominante del viento;

Sin embargo, en la antigua Directiva no quedaban claros los criterios para clasificar las estaciones y no se especificaba la proporción de cada tipo de estaciones que debían integrar una red media de calidad del aire. Esta falta de precisión en la implantación permitió diferencias entre los Estados Miembros (EM) muy importantes en cuanto al diseño de las redes de calidad del aire. Así, tomando como base los datos de *Airbase* (http://air-climate.eionet.europa.eu/reports/ETCACC_TP2008_2_AQQ2006) para el año 2006 (informe de diciembre de 2008) se puede observar como en España el 67% de las estaciones son de tráfico o industriales y solamente el 33% de fondo urbano, suburbano o rural. Sin embargo en la EU-27 la media de estaciones de tráfico e industriales es solamente del 41%, existiendo EM con una proporción muy baja de este tipo de estaciones (hasta el 15%), con un predominio muy claro de estaciones de fondo (hasta un 80%).

La Directiva 2008/50/CE, aunque sigue sin definir claramente los distintos tipos de emplazamiento, propone fijar un ratio máximo de 2 en la relación entre el número de estaciones de fondo urbano y el número de estaciones de tráfico, por una parte, y entre el número de estaciones de PM10 y de PM2,5, por otro, en cada uno de los diferentes EM.

Por último, las superaciones de los valores límite, tanto para PM10 como para PM2,5, atribuibles a fuentes naturales no se considerarán como tales a efectos del cumplimiento de dichos valores límite.

1.2. Aportes naturales de PM

La principal medida que ha sido contemplada por la Comisión Europea (CE) con el fin de que se alcancen los niveles de PM10 propuestos para el año 2010, es la ejecución de planes de reducción de emisiones que repercutan tanto en PM10 como en PM2,5 (Directivas 1999/30/CE y 2008/50/CE). Desarrollar con éxito este tipo de acciones requiere del previo conocimiento del origen del MPA en aquellas regiones en las que se vayan a llevar a cabo. Así pues es necesario llevar a cabo estudios encaminados a este fin; y más concretamente a:

- Cuantificar los niveles naturales de fondo en PM10 y PM2,5. Solo así se podrá saber cuánto representa la contribución antropogénica en los niveles de partículas en suspensión que se registran en las redes de calidad del aire. Ha de tenerse en cuenta que este fondo de partículas naturales presentará en general variaciones regionales, especialmente dentro de España y Portugal, donde se pueden distinguir claramente dos regiones: la Este y Sudeste con influencia mediterránea, y la vertiente Norte, las islas Madeira y Canarias con características atlánticas.
- Cuantificar la contribución de las distintas fuentes antropogénicas en PM10 y PM2,5. Solo así se podrían llevar a cabo planes de reducción de emisiones que repercutan eficazmente en los niveles de calidad del aire. Conociendo cuál es la fuente antropogénica que mayor contribución tiene en el deterioro de la calidad del aire se podrá saber qué dirección debería tomar la reducción de emisiones.

- Determinar el papel que juegan los aportes externos de material particulado a través del transporte a larga distancia. Además de los aportes de partículas naturales mediante las intrusiones de masas de aire con origen sahariano, el transporte de aerosoles de origen antropogénico puede representar un aporte externo cuantitativamente importante, especialmente desde el Centro de Europa y el Mediterráneo (Rua *et al.*, 1998; Querol *et al.*, 1998; Artíñano *et al.*, 2001; Rodríguez *et al.*, 2001; Escudero *et al.*, 2005).

A efectos de cumplimiento de la legislación vigente, podrán descontarse las superaciones de los valores límite (anual y diario) siempre que se demuestre que dichos valores son sobrepasados por la influencia de aportaciones procedentes de fuentes naturales, que se definen, según el artículo 2.15 de la Directiva 2008/50/CE, como: *“emisiones de agentes contaminantes no causadas directa o indirectamente por actividades humanas, lo que incluye los fenómenos naturales tales como erupciones volcánicas, actividades sísmicas, actividades geotérmicas, o incendios de zonas silvestres, fuertes vientos, aerosoles marinos o resuspensión atmosférica o transporte de partículas naturales procedentes de regiones áridas”*. Para estos casos los EM de la UE deberán justificar y demostrar ante la Comisión que estas superaciones de los valores límite son debidos a fuentes naturales. En la II Posición Común de la CE sobre PM (CE 2004, documento elaborado por el Grupo de Partículas del Programa CAFÉ), se expone y demuestra que el parámetro PM_{2,5} está también afectado por los episodios naturales.

En España y Portugal los episodios naturales con mayor repercusión en los niveles de PM son los episodios de aporte de polvo africano, aunque en episodios y zonas concretos los incendios forestales (zonas forestales en verano), el aerosol marino (cornisa atlántica, islas Madeira y Canarias) e, incluso, la resuspensión (interior peninsular) pueden tener mucha importancia.

Desde 2001, la D.G. de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente (actual MARM), a través del Convenio de Colaboración con el CSIC y AEMet (antiguo INM), genera y distribuye, conjuntamente con CIEMAT y Universidad de Huelva, entre las Comunidades Autónomas (CC.AA.), administraciones locales responsables de la calidad del aire y distintos organismos de investigación, informes anuales para la justificación de cada uno de los episodios naturales (principalmente africanos) ocurridos a lo largo del año. En paralelo la Agência Portuguesa do Ambiente del Ministerio de Medio Ambiente de Portugal venía realizando la misma labor, a través de la Universidad Nova de Lisboa (UNL), utilizando criterios similares. Desde 2004 estos estudios se realizan de forma conjunta entre ambos organismos español y portugués utilizando métodos comunes. Estos métodos comunes se referían a la identificación de posibles superaciones del valor límite diario de PM₁₀ causadas por los episodios naturales (principalmente africanos). Sin embargo la asignación del origen natural o antropogénico de estas superaciones del valor límite diario registradas en las redes de calidad del aire se realizaban por los respectivos departamentos o direcciones generales de las CC.AA. o ayuntamientos. Para descontar las superaciones naturales del cómputo anual se aplicaba el procedimiento admitido por la Comisión Europea en la Guía (véase referencia en la página del Índice).

1.3. Objetivos

En este informe se describe un procedimiento para la identificación de superaciones del valor límite diario de PM₁₀ causadas por aportes naturales (principalmente, intrusiones saharianas), así como para la asignación de causas antropogénicas o naturales de tales superaciones. El procedimiento se basa en aplicar la metodología aceptada por la D.G. de Medio Ambiente de la CE en la Guía (véase referencia en la página del Índice), tomando

como referencia las estaciones de fondo regional de las redes de calidad del aire de España y Portugal.

El procedimiento que más abajo se expone se centra en los siguientes objetivos principales:

- a) Identificación de episodio de polvo africano con impacto en los niveles de PM en aire ambiente registrados en las redes de control y vigilancia de la calidad del aire.
- b) Cuantificación de la carga neta de polvo africano en los niveles diarios de PM10 para este tipo de episodio de PM.
- c) Definición de las bases para atribuir el posible origen natural de las superaciones del valor límite diario de PM10.

El procedimiento no pretende modificar o alterar las medidas de PM10 obtenidas, sustraer aportes naturales de las medidas, ni eliminar superaciones. Se pretende suministrar información para un determinado punto de vigilancia de la calidad del aire sobre los siguientes aspectos:

- a) Los datos de medida originales (media anual de PM10 y superaciones anuales del valor límite diario).
- b) Lista de fechas en las que los episodios naturales (principalmente, africanos) han causado superaciones del valor límite, a través de la estimación cuantitativa diaria de los aportes de polvo mineral a PM10.
- c) Estimación cuantitativa de la contribución media anual de los aportes de polvo africano a la media anual de PM10.

Los resultados de la aplicación del procedimiento descrito pueden ser también de utilidad para la comunidad de investigadores en epidemiología. En este sentido los resultados de la aplicación pueden ser de gran interés para evaluar el impacto en la salud de los episodios de polvo africanos que constituye un tema de gran interés en el sur de Europa pero sobre el que se han realizado muy pocas evaluaciones.

2. INTRUSIONES DE MASAS DE AIRE AFRICANAS

2.1. Introducción

El impacto del material en suspensión atmosférico africano transportado a larga distancia desde zonas áridas en la visibilidad y en la composición de la deposición húmeda es conocido desde antiguo. Las lluvias y nevadas rojas registradas en multitud de zonas de Europa por procesos de lavado de masas de aire africanas son ampliamente conocidas. Por otro lado, la reducción de visibilidad en amplias zonas del Atlántico Ecuatorial debida a las intrusiones de aire africano es conocida desde antiguo, algunas zonas de éste eran conocidas por los marineros como “mar oscuro” (Ehrenberg, 1862).

A escala global, la fracción mineral es el componente mayoritario de los aerosoles atmosféricos. El IPCC (2001) estima unas emisiones naturales de partículas crustales (o partículas de origen mineral) del orden de 1500 millones de toneladas anuales. El transporte a larga distancia de material particulado crustal se produce cuando se generan procesos masivos de resuspensión en zonas áridas como las presentes en el Norte de África, Oriente Próximo o Asia Central. Otras zonas desérticas como Atacama o los desiertos de Australia no generan este tipo de transporte a larga distancia. Según Prospero (2002) las áreas exportadoras de partículas crustales tienen como característica común el ser cuencas en las que se acumula una gran cantidad de material particulado crustal de granulometría muy fina debido a la erosión de zonas áridas en épocas de lluvia torrencial.

En la época seca este material fino queda expuesto a posibles procesos de resuspensión. En la zona del Norte de África existen infinidad de cuencas endorreicas donde este fino material se puede depositar. Entre ellas destacan, en latitudes entre 14 y 23° Norte, el lago Chad y la depresión del Bodelé, Sudán, Malí y Mauritania. Estas zonas son las que conformarían lo que se conoce como el desierto del Sahel. Por encima de estas zonas se sitúa el Sahara (entre 23 y 33° Norte) en el que se encuentran áreas fuente de polvo como el Sahara Occidental, Argelia Occidental y Oriental, Túnez, Libia y Egipto (Prospero et al., 2002).

El Norte de África se considera ejemplo típico de área desértica caliente donde la lluvia es extremadamente escasa (1 de cada 100 días registra precipitación durante unas pocas horas en el sector oeste del Sahara, y 2 de cada 1000 días en el sector este, conocido como el desierto absoluto, Dubief, 1979). Estos ambientes de humedad relativa extremadamente baja (sobre el 10%) y temperaturas muy altas (60-65°C en verano) constituyen situaciones muy favorables para la resuspensión masiva de grandes cantidades de material particulado. Así, el calentamiento de la superficie durante el día provoca fuertes turbulencias térmicas verticales (que pueden alcanzar altitudes de hasta 4000-5000 m en verano, Dubief, 1979) seguidas de periodos de gran estabilidad inducidos por las inversiones térmicas nocturnas. Esta alternancia impide que las partículas resuspendidas e inyectadas en capas altas vuelvan a depositarse en la superficie. De este modo se crean capas semi-permanentes de material en suspensión, que pueden permanecer semanas o incluso meses, formando las denominadas “nieblas o brumas secas”. Esta reserva semi-permanente de polvo en suspensión es transportada posteriormente a largas distancias por diversos mecanismos.

La inyección de aire cargado de partículas en las capas altas de la troposfera se produce con especial intensidad en la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT) situada alrededor del ecuador térmico, debido a los procesos de convección asociados a esa zona. La posición de la ZCIT varía latitudinalmente durante el año lo que provoca diferencias en la intensidad de emisión de distintas zonas del desierto africano según la estación del año. Una vez producida la inyección vertical de materia particulada en la troposfera libre, el transporte horizontal viene controlado por situaciones sinópticas bien definidas.

Teniendo en cuenta las consideraciones expuestas, para describir los mecanismos y la frecuencia estacional de los eventos de aporte de material particulado crustal desde el Norte de África, hay que tener en cuenta la posición de la ZCIT y las propiedades de la superficie. Respecto a la variabilidad estacional de estos procesos de transporte se pueden distinguir estos periodos:

FINALES DE OTOÑO – INICIO DE INVIERNO: Existe una baja inyección vertical de partículas en la ZCIT. Uno de los hechos que impiden esta inyección puede ser la relativamente alta pluviometría que existe sobre el Norte de África en esta época. El resultado es que en la ZCIT no se desarrollan episodios de resuspensión que sean capaces de introducir grandes cantidades de material particulado en las capas altas de la troposfera. Sin embargo, esto no es óbice para que se puedan llegar a producir intrusiones puntuales de polvo africano sobre la Península Ibérica o el Archipiélago Canario y las Islas Madeira causadas por sistemas de depresiones que causen fuertes vientos en la zona sahariana. La Figura 1 muestra la distribución del índice de aerosoles (véanse detalles en capítulo siguiente sobre estos mapas) sobre América, África y Europa para periodos concretos de los meses de noviembre de 1997, 1998, 1999 y 2000. Se muestra repetitivamente a lo largo de estos 4 años que a comienzos de noviembre la concentración de aerosoles atmosféricos es relativamente baja.

FINALES DE INVIERNO – INICIO DE PRIMAVERA: Se desarrollan episodios de inyección vertical muy intensos sobre el desierto del Sahel. La ZCIT se sitúa alrededor de 10° N

provocando la formación de chimeneas cargadas de partículas que pueden alcanzar casi el límite superior de la troposfera. Una vez inyectadas en la troposfera libre, las masas de aire con altos niveles de partículas se desplazan hacia la zona atlántica, pudiendo también ser arrastradas hacia Europa, formando un arco atlántico muy bien definido. En estas condiciones se generan penachos relativamente estrechos que afectan a zonas muy concretas de la Península Ibérica. La Figura 1 muestra la distribución del índice de aerosoles para periodos concretos de los meses de febrero de 1997, 1998, 1999 y 2000. Se muestra repetitivamente a lo largo de estos 4 años que en este periodo la concentración de aerosoles atmosféricos es muy alta en la zona del Sahel, y que con excepción de 1999, se genera una nube arqueada atlántica que aporta material particulado atmosférico al continente europeo a través del Atlántico Norte. Para detectar este tipo de eventos el mapa de índice de aerosoles OMI (Ozone Monitoring Instrument) es una herramienta muy útil, dado que el cálculo de retrotrayectorias atmosféricas necesita de periodos de retorno de hasta 10 días.

FINALES DE PRIMAVERA – VERANO: Se desarrollan episodios de inyección vertical muy intensos sobre el desierto del Sahara. Este cambio de la zona de inyección vertical se puede deber al conocido desplazamiento hacia latitudes superiores (sobre el Sahara) de la ZCIT (véase Figura 2), a la formación de la baja térmica africana, o a ambos procesos. En este período no se produce tanta inyección vertical sobre el Sahel, de manera que en el mapa de índice de aerosoles, esta zona no presenta resuspensión de aerosoles. La baja térmica genera también chimeneas cargadas de partículas pero inyecta aerosoles a una altura troposférica sensiblemente inferior a las inyecciones inducidas por la ZCIT. Una vez inyectadas en la troposfera libre las masas de aire con altos niveles de partículas se pueden desplazar hacia la zona atlántica o directamente hacia el Mediterráneo. En este caso no se desarrollan nubes tan definidas como en invierno, sino que las masas de aire se desplazan en dirección norte, pudiendo llegar a cubrir la totalidad de la Península Ibérica. La Figura 1 muestra la distribución del índice de aerosoles para periodos concretos de los meses de agosto-septiembre de 1997, 1998, 1999 y 2000. Se muestra repetitivamente a lo largo de estos 4 años que en este periodo la concentración de aerosoles atmosféricos es muy alta en la zona del Sahara, expandiéndose la carga de partículas hacia el Mediterráneo y la Península Ibérica. El cálculo de retrotrayectorias atmosféricas con períodos de retorno de 3 a 5 días, además del mapa de índices de aerosoles, detectan perfectamente estos eventos.

Es bien conocido que en los periodos glaciares de la evolución de la Tierra, la variación estacional latitudinal de la ZCIT se reduce a una estrecha franja ecuatorial con un incremento asociado de las precipitaciones. Sin embargo en los periodos interglaciares (o templados), este rango latitudinal estacional de la ZCIT alcanza latitudes muy septentrionales, con la consiguiente diferenciación estacional en cuanto a precipitaciones (Ziegler *et al.*, 1987; Pfefferkorn, 1995). Este segundo escenario podría ser responsable del incremento de episodios de transporte a larga distancia de masas de aire africano sobre Europa. Por consiguiente, una tendencia a incrementar la frecuencia anual de intrusiones africanas sobre la Península Ibérica, podría ser indicador de una tendencia de cambio climático hacia el calentamiento global.

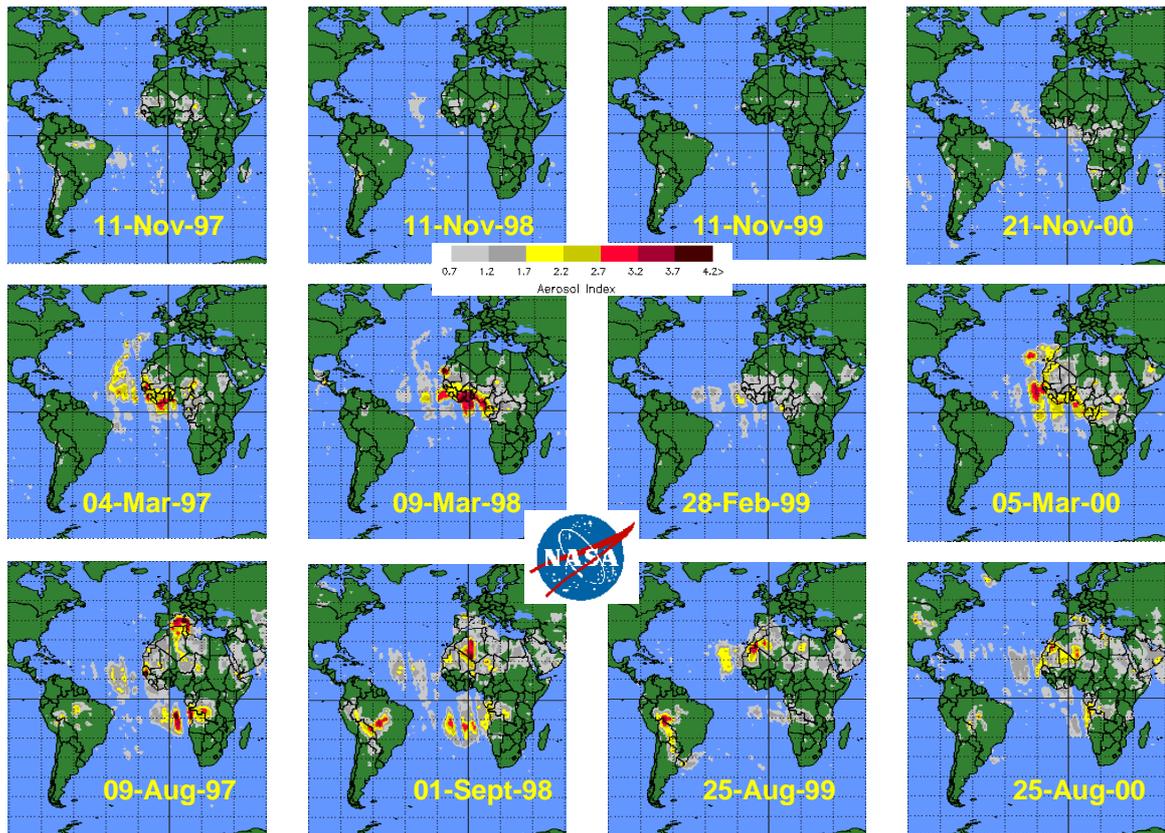


Figura 1. Mapa de distribución de índice de aerosoles OMI de la NASA para periodos similares en 1997, 1998, 1999 y 2000.

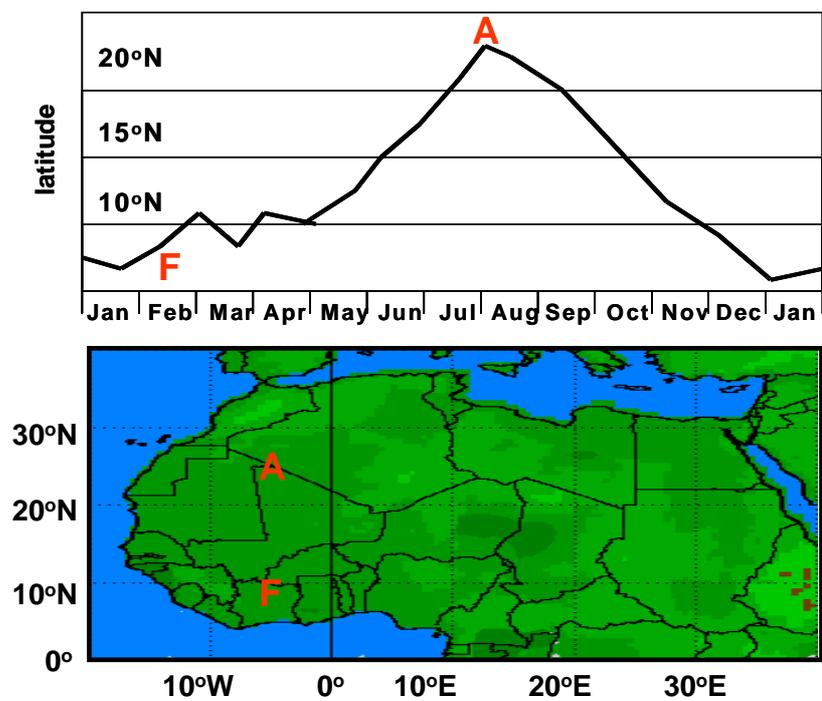


Figura 2. Posición de la Zona de Convergencia Inter-Tropical en superficie en la longitud 5° W (Níger) desde enero de 1973 a enero a 1974, según Dubief (1979).

Por otra parte, el transporte de estas masas de aire con altas concentraciones de partículas crustales se produce de manera casi permanente hacia el continente americano debido a la acción de los vientos alisios de componente este que dominan la circulación general sobre la zona Norteafricana. Este transporte, paralelo al Ecuador, tiene un alcance de miles de kilómetros. Así, se han registrado intrusiones de polvo africano en islas del Océano Atlántico y el Caribe (Prospero y Nees, 1986; Coudé-Gaussen *et al.*, 1987; Bergametti *et al.*, 1989; Prospero *et al.*, 1995; Viana *et al.*, 2002), el Sureste de Estados Unidos (Perry *et al.*, 1997; Prospero, 1999) y Suramérica (Prospero *et al.*, 1981; Swap *et al.*, 1992). Bajo determinadas condiciones sinópticas estas masas de aire africanas son transportadas hacia la Península Ibérica (Escudero *et al.*, 2005). Estos escenarios se producen cuando las condiciones meteorológicas a escala sinóptica están gobernadas o bien por sistemas de bajas presiones al oeste o suroeste de la Península Ibérica, o en el norte del continente africano o bien asociadas a la presencia de anticiclones sobre el Norte de África o sobre la Península Ibérica a niveles superficiales o en niveles más elevados de la atmósfera (por encima de los 850 hPa). Prospero (1972, 1999), Duce (1995), Andrade (1996), Alfaro *et al.* (1998), Rodríguez *et al.* (2001), Viana *et al.* (2002) y Escudero *et al.* (2005) describen con detalle los escenarios atmosféricos propicios para las intrusiones de masas de aire africano sobre el Atlántico Norte, el Archipiélago Canario o la Península Ibérica.

El transporte se produce sobre océanos y continentes en la troposfera libre (sobre la capa de mezcla o capa límite), de manera que estas capas únicas o compuestas pueden transportarse en altitudes de hasta 8 km aunque el transporte en niveles bajos también existe. El incremento general de la velocidad del viento en el perfil ascendente de la troposfera permite que en la troposfera libre se alcancen velocidades suficientemente intensas para provocar el transporte de estas masas hasta zonas muy alejadas. Además de las altas velocidades del viento en la troposfera libre, el transporte de partículas crustales se ve favorecido también por el mayor tiempo de residencia de las partículas en esta zona de la troposfera debido a la menor incidencia de los procesos de lavado de las masas de aire.

La granulometría de las partículas transportadas por estos procesos varía mucho en función del área fuente (en el caso del Norte de África, los desiertos del Sahel o del Sahara) y de la situación del área receptora respecto al foco emisor. Así, en episodios de transporte de partículas hacia el continente americano, la moda granulométrica dominante, debido a la segregación, es la de acumulación (0,1-1,0 μm); sin embargo, los episodios africanos registrados en el Mediterráneo en verano, o en Canarias en la época invernal, suelen afectar mayoritariamente a la fracción gruesa (1-25 μm). En un caso o en otro es evidente que los niveles de PM₁₀ y PM_{2,5} se ven afectados por estos aportes de material particulado crustal.

En zonas próximas al foco emisor, como el Archipiélago Canario y las Islas Madeira, los eventos de transporte pueden llegar a ser muy evidentes. La Figura 3 (imagen inferior derecha) muestra una imagen de satélite de la NASA que permite detectar fácilmente la extensión de la nube de material crustal durante un episodio de transporte persistente desde finales de febrero a mediados de marzo de 2000. La Figura 3 muestra también dos imágenes de una zona poblada de Lanzarote tomadas durante el episodio y posteriormente al mismo, observándose la gran disminución de la visibilidad producida por las partículas en suspensión. Como muestra la misma Figura 3, los niveles de PM₁₀ superaron puntualmente los 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como media diaria, pero durante un período de 20 días superaron ampliamente el límite diario de la normativa europea de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

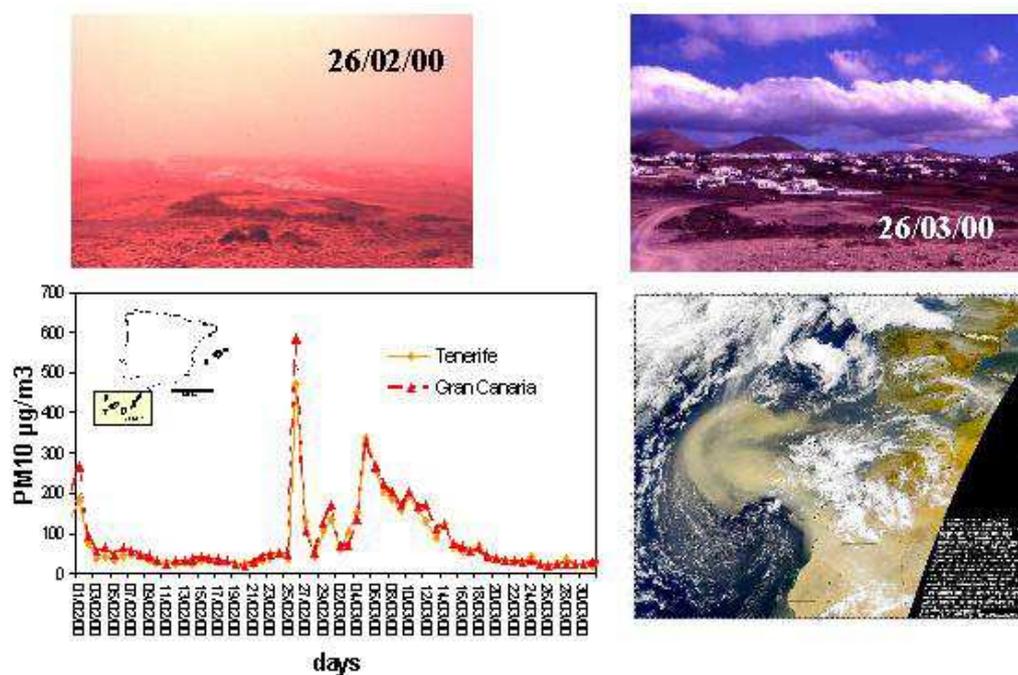


Figura 3. Superior: Dos imágenes de una zona poblada de Lanzarote tomadas durante el episodio de transporte de polvo africano del 26 de febrero de 2000 y un mes después del mismo, observándose la gran disminución de la visibilidad producida por las partículas en suspensión (fotografías tomadas por Jesús Yagüe). Inferior izquierda: Los niveles de PM10 (partículas inferiores a 10 µm) en el Archipiélago Canario superaron puntualmente los 500 µg/m³ como media diaria, pero durante un período de 20 días superaron ampliamente el límite diario de la normativa europea de 50 µg/m³. Inferior derecha: Imagen satélite facilitada por SeaWiFS Project, NASA GSF y ORBIMAGE, mostrando el episodio de transporte de partículas africanas.

En zonas más alejadas del foco emisor, los procesos de dispersión de la nube y la mezcla con emisiones locales impiden que la detección de los episodios y su impacto en las series locales de registros de niveles de PM10 sean tan evidentes como en el caso expuesto anteriormente. Para ello se ha desarrollado una metodología combinada que posteriormente se detallará.

En general, la invasión de masas de aire africano sobre la Península Ibérica viene precedida por un potente flujo atlántico del suroeste, lo cual induce bajos niveles de partículas en suspensión. Estos procesos dan lugar a registros de niveles de partículas en la Península Ibérica caracterizados por drásticos descensos e incrementos de las series temporales. El abrupto aumento en los niveles de partículas que se registra en las redes de calidad del aire se produce por la rápida expansión de la masa de aire africana dado que suele haber un importante gradiente de presión entre el Atlántico y el Mediterráneo. El rápido descenso en los niveles de partículas se debe a que muchos de estos eventos terminan con las denominadas lluvias rojas, bien conocidas en el este peninsular.

Son frecuentes los episodios de invasión de aire africano en el este peninsular al mismo tiempo que, sobre Andalucía Occidental domina un potente flujo atlántico del suroeste, y en ocasiones, intensas precipitaciones. Estos episodios se producen en general asociados a dos escenarios meteorológicos: por un lado, a la presencia de depresiones sobre el Atlántico frente a las costas de Portugal o de Marruecos, y por otro a la presencia de depresiones sobre el Norte de África o el Mediterráneo Occidental (Escudero *et al.*, 2005). Como resultado se registran elevados niveles de partículas en suspensión en la costa mediterránea y en Andalucía Oriental, mientras que en Andalucía Occidental los niveles de partículas son bajos (Figura 4). En ambos casos, estos episodios terminan por el efecto del

lavado atmosférico debido a la lluvia, provocando así las denominadas lluvias rojas (Ávila *et al.*, 1997). Los eventos causados por bajas presiones sobre el Atlántico o el Norte de África, con significativos aportes de polvo africano, se registran con mayor frecuencia entre enero y junio. Desde julio a octubre aparecen con menor frecuencia, y durante noviembre y diciembre se han documentado unos cuantos de estos episodios pese a que el Norte de África durante estos meses se encuentre más frío, viéndose inhibida la capacidad de resuspensión.

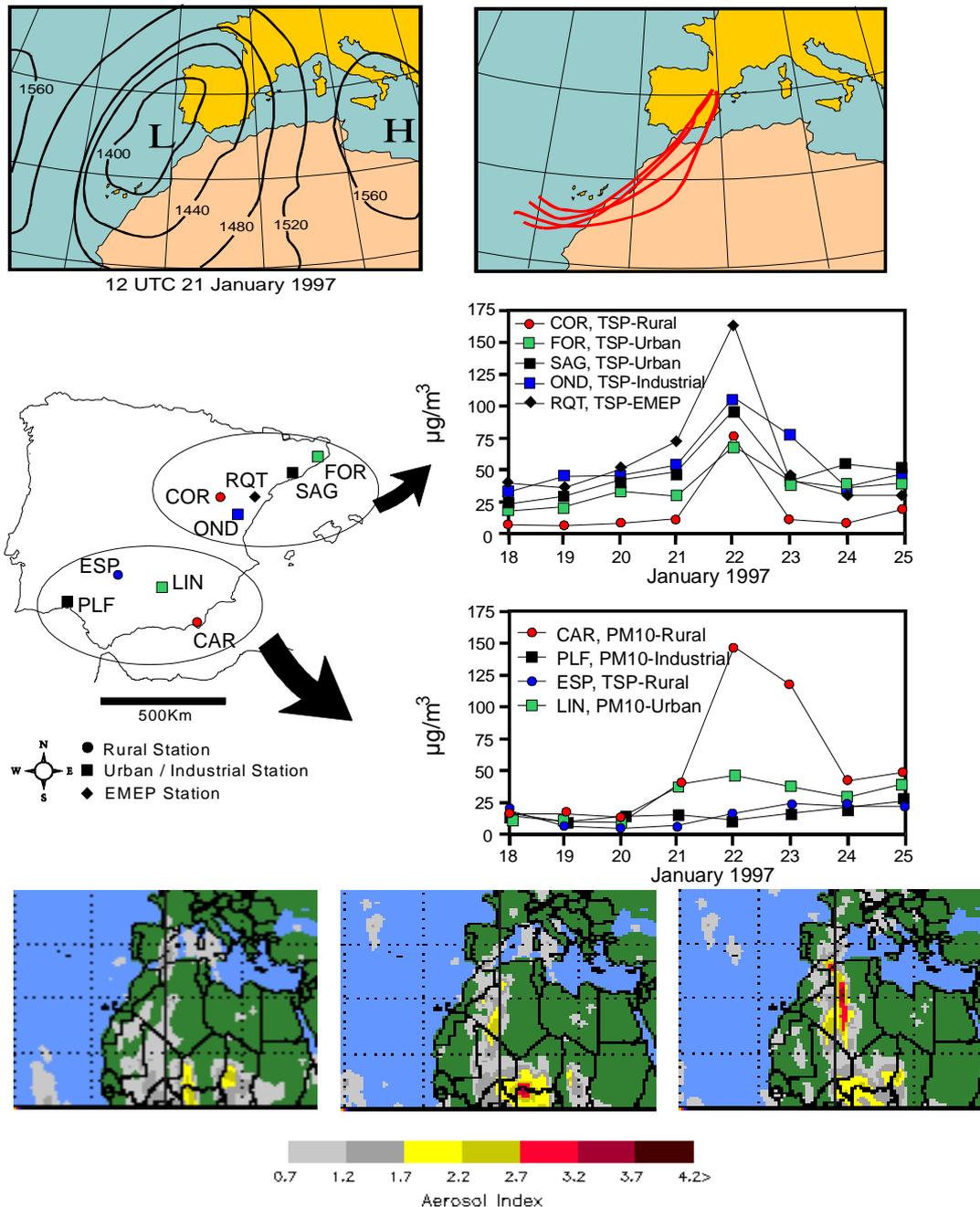


Figura 4. Ejemplo de un episodio de intrusión de masas de aire africanas, inducido por bajas presiones, con impacto en los niveles de partículas registrados en las redes de control de calidad del aire del Este de la Península Ibérica. Superior: Mapa de presiones mostrando la borrasca frente al Cabo de San Vicente y retro trayectorias indicando aporte africano. Medio: Niveles de partículas registradas en diferentes estaciones mostrando incrementos sincrónicos con la intrusión. Inferior: Mapa de distribución de índice de aerosoles OMI de la NASA reflejando la intrusión.

Otro tipo de intrusión se produce por la presencia de un anticiclón sobre la Península Ibérica, el Norte de África o la zona mediterránea en niveles superficiales de la atmósfera (Escudero *et al.*, 2005). Esta situación causa la formación de una masa de polvo bien definida y con forma convexa que gira sobre el Atlántico y alcanza la Península Ibérica por el oeste (Figura 5). Estos episodios tienen un alto impacto en los niveles de PM10 en la Península Ibérica, en parte por el carácter seco de los mismos. La época del año en la que se producen estos eventos se circunscribe casi exclusivamente a enero-marzo. Aunque, como se comentó con anterioridad, el levantamiento de polvo en esa parte del año se produce más intensamente sobre el Sahel, polvo de otras zonas más al Norte como el Sahara Occidental, Mauritania e, incluso, Argelia Occidental puede ser transportado sobre la Península Ibérica.

Finalmente, otro tipo de escenario de transporte causado por actividad anticiclónica se produce en verano. En estos casos el anticiclón norteafricano está elevado (a zonas) por encima de los 850 hPa desde donde se produce la mayor parte del transporte. En superficie, debido al fuerte calentamiento del Sahara en verano, se desarrolla la baja térmica norteafricana que desplaza el anticiclón norteafricano hacia niveles más altos. Estos eventos han sido documentados con mayor frecuencia durante julio y agosto y constituyen el escenario más común de transporte de polvo africano sobre la Península Ibérica. Una característica singular de estos eventos con respecto a los causados por los sistemas ciclónicos atlánticos es la mayor extensión que presentan las masas de aire africano que invaden la Península Ibérica. En algunos de estos episodios las masas africanas afectan la totalidad de la Península Ibérica (Figura 6).

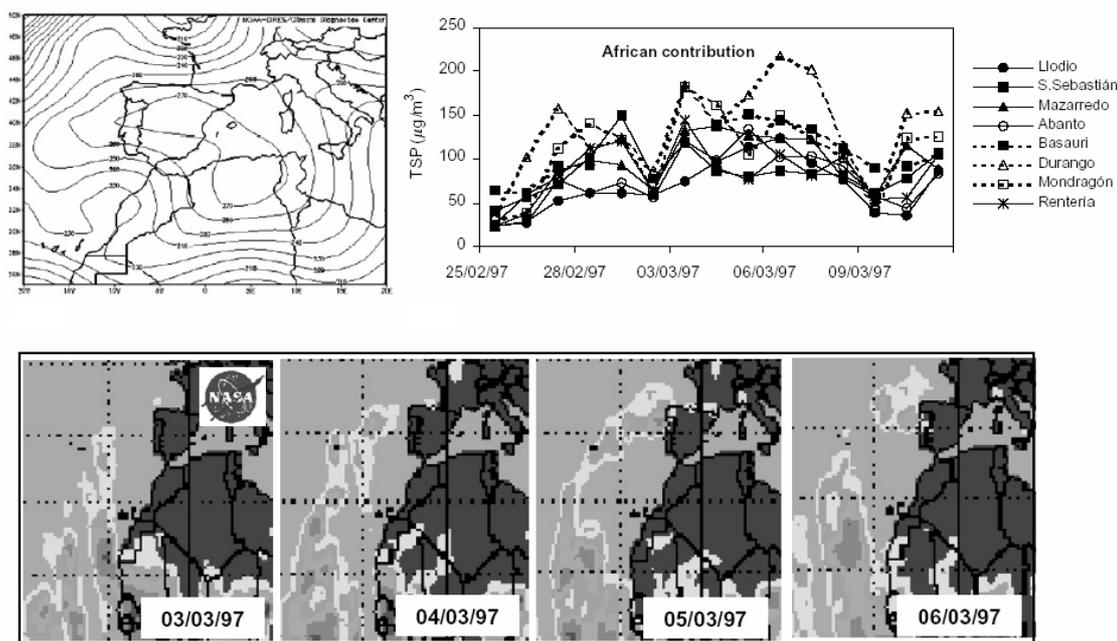


Figura 5. Ejemplo de un episodio de intrusión de masas de aire africanas, inducido por un anticiclón en niveles superficiales, con impacto en los niveles de partículas registradas en las redes de control de calidad del aire del Norte de la Península Ibérica. Superior: Mapa de presiones mostrando el anticiclón sobre la Península Ibérica y niveles de partículas registradas en diferentes estaciones mostrando incrementos sincrónicos con la intrusión. Inferior: Mapa de distribución del índice de aerosoles OMI de la NASA reflejando la intrusión.

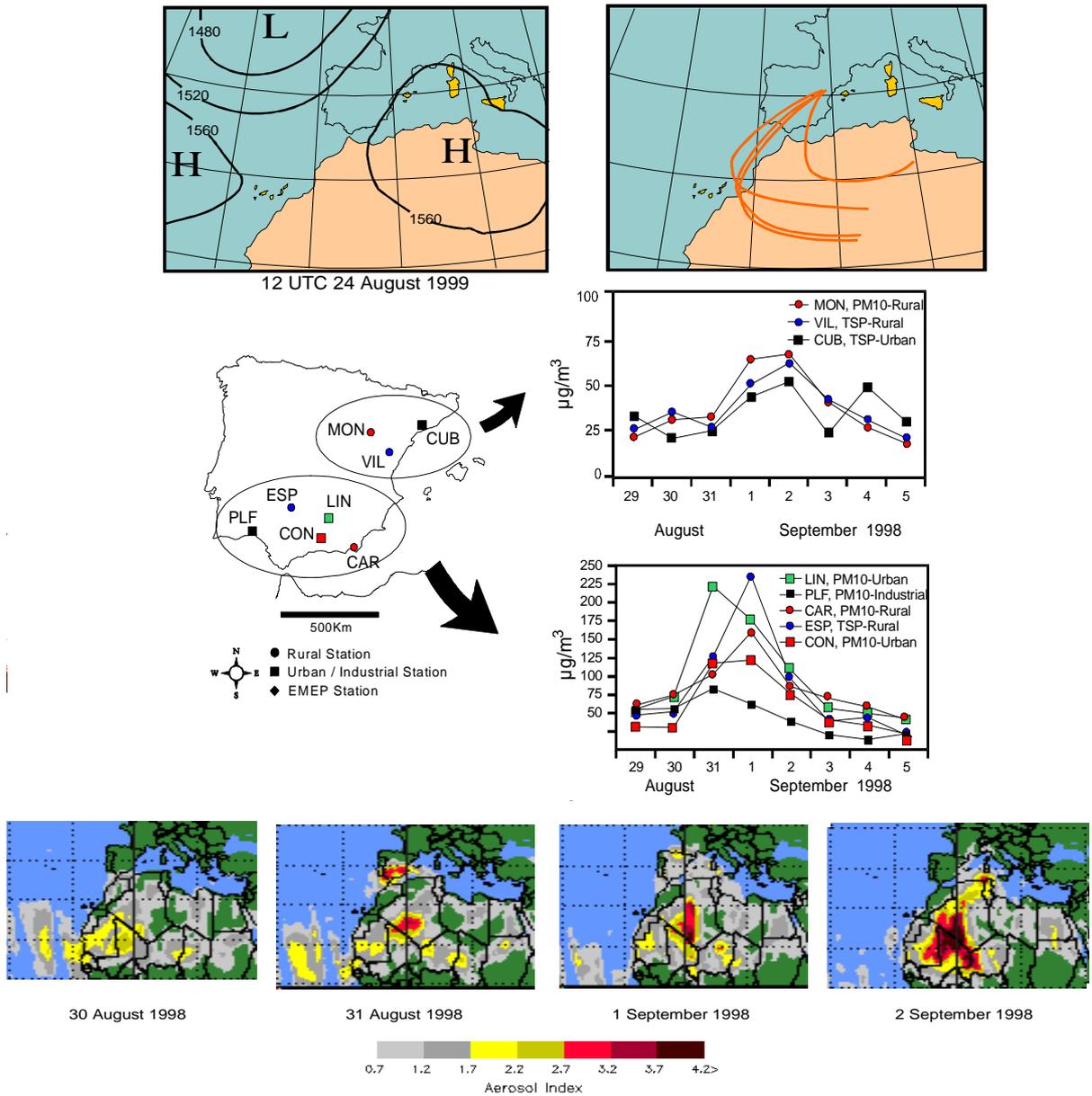


Figura 6. Ejemplo de un episodio de intrusión de masas de aire africanas, inducido por el anticiclón norteafricano, con impacto en los niveles de partículas registrados en todas las redes de control de calidad del aire de la Península Ibérica. Superior: Mapa de presiones mostrando el anticiclón sobre Argelia y retro trayectorias indicando aporte africano. Medio: Niveles de partículas registradas en diferentes estaciones mostrando incrementos sincrónicos con la intrusión. Inferior: Mapa de distribución de índice de aerosoles OMI de la NASA reflejando la intrusión.

2.2. Metodología

Como se ha citado anteriormente, para identificar las superaciones del valor límite diario de PM10 causadas por aportes naturales se venía aplicando el procedimiento admitido por la Comisión Europea y publicado por la CE en la Guía (véase referencia en la página del Índice).

En el *workshop* de febrero de 2001, organizado por la D.G. de Medio Ambiente de la UE y el MMA (actualmente MARM) de España en Madrid, la D.G. de Medio Ambiente informó de que para descontar las superaciones se proponía un método 'cualitativo'. Es decir, descontar las superaciones y no restar el fondo natural del valor medio diario, dado que este procedimiento podría ser complejo e inexacto. Sin embargo, en la nueva Directiva de calidad del aire, se especifica que en un plazo no superior a 24 meses desde su entrada en vigor (es decir, antes del 11 de junio de 2010) la Comisión propondrá unas directrices para la demostración y sustracción de las superaciones atribuibles a fuentes naturales.

Por otra parte, estudios realizados por el grupo de trabajo MARM-CSIC-AEMet-CIEMAT-UHU muestran que al descontar las superaciones causadas por episodios naturales en el cálculo de la media anual de PM10 la reducción de niveles es poco significativa ($<1-2 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$), excepto en Canarias, Baleares y el sector Sur peninsular ($2-4 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$), por su proximidad al continente africano. En lo referente al porcentaje de superaciones del valor límite diario atribuibles a aportes africanos en estaciones de fondo regional, éste varía entre 50-60% para Galicia-Euskadi y 60-100% para el resto de las zonas de estudio. En las estaciones de fondo urbano, esta proporción varía entre 25-40% para todas las zonas excepto para Canarias y Baleares (65-90%), mientras que para estaciones de tráfico e industriales, se reduce considerablemente (15-30% en todas las zonas excepto un 40% en Canarias y 63% en algunas estaciones de tráfico de Castilla-La Mancha). Aunque como se ve de lo anterior, las superaciones del valor límite diario son de origen mayoritariamente antropogénico, para la elaboración de planes de mejora de calidad del aire se debe identificar también las causadas por aportes naturales. Además, en determinadas zonas el cómputo o no de tales superaciones puede ser clave para el cumplimiento de los objetivos fijados en la Directiva referentes a dicho valor límite diario.

Teniendo en cuenta lo expuesto, a continuación se presenta un procedimiento para asignar el origen africano de las superaciones del valor límite diario de PM10 registrado en las redes de vigilancia de la calidad del aire de España y Portugal, basado en el procedimiento descrito en la anteriormente citada Guía, pero añadiendo una componente más cuantitativa para la asignación de su origen natural o antropogénico. Por último, cabe añadir que este procedimiento ha sido propuesto a la CE para que lo incorpore a las directrices sobre fuentes naturales, que debe elaborar según mandato del artículo 20.3 de la Directiva 2008/50/CE.

El **procedimiento** se puede resumir en las siguientes tareas:

1. El **equipo de investigación formado por CSIC-UNL-AEMet-CIEMAT-UHU**, realiza informes anuales para la identificación de episodios naturales, principalmente africanos. Estos informes se basan en:

1.1. Interpretación de las situaciones meteorológicas diarias, y obtención de trayectorias de masas de aire diarias calculadas a las 12 h, para 750, 1500 y 2500 m.s.n.m, y cinco días atrás, mediante el modelo HYSPLIT (Hybrid Single-Particles Lagrangian Integrated Trajectories, versión 4 Draxler y Rolph, 2003; <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>), modelizando también la velocidad vertical. Se validan los resultados obtenidos del análisis mediante el estudio de los mapas sinópticos

disponibles en el Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF) (<http://www.ecmwf.int>).

1.2. Consulta de los mapas de índices de aerosoles OMI que se pueden obtener en: <ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/aerosol/>. Estos mapas reflejan la medida indirecta del OMI (Ozone Monitoring Instrument), que determina la columna de ozono total a partir del Ultravioleta, y detecta las variaciones estacionales. Como la obtención de ozono por esta técnica tiene muchas interferencias, entre ellas los aerosoles, los cálculos que se hacen para eliminarlas permiten a la vez sacar otros "productos" de manera indirecta, como es el índice de aerosoles. Es importante resaltar que el OMI no detecta algunos eventos africanos producidos a nivel de superficie y por tanto es conveniente también consultar diariamente las imágenes de satélite de la NASA, en donde este tipo de eventos quedan claramente manifestados. Estos mapas se pueden obtener para el mismo día en: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/HTML/dust.html>

1.3. Consulta de los resultados diarios de la simulación SKIRON (<http://forecast.uoa.gr>), DREAM (<http://www.bsc.es/projects/earthscience/DREAM/>) y NAAPs (<http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol/>).

1.4. AEMet ejecuta HIRLAM para campo de vientos en superficie y en altura y para identificar posibles aportes. Además, calcula retro-trayectorias isentrópicas a demanda, hasta 5 días atrás, con el modelo del ECMWF.

1.5. El equipo **CSIC-AEMet-CIEMAT-UHU** produce, cuando está previsto un episodio africano, un informe con la predicción a 24 h del episodio (alerta que envía por correo electrónico a las redes de control de calidad del aire y a toda parte interesada que lo haya solicitado) y una tabla con las fechas de episodios africanos y otros episodios naturales validados desde principio del año respectivo. En paralelo, el equipo de investigación recibe información diaria de los niveles de PM registrados en las estaciones **de fondo regional** (una de las estaciones es suburbana de fondo, y dos son industriales de fondo) de vigilancia de calidad del aire que se exponen en la Figura 7 y la Tabla 2, y que registran los niveles de PM con equipos automáticos (por ejemplo atenuación beta ó microbalanza oscilante TEOM). Muchas de ellas cuentan además con captadores manuales en paralelo que van a permitir validar, y en su caso corregir, los datos con posterioridad. La red de alertas se compone de estaciones de las siguientes redes: Red EMEP/VAG/CAMP (12 estaciones con captadores manuales; 4 de ellas, además, equipos automáticos TEOM con FDMS), redes privadas (4), Andalucía (3), Cataluña (1), País Vasco (4), Cantabria (1), Baleares (1), Comunidad de Valencia (1), Comunidad de Madrid (1), Portugal-Península (4), Canarias (4), Islas Madeira (1). En una gran parte de estos casos se dispone de datos de PM10 en tiempo real. Los datos del resto de las estaciones que se exponen en la Figura 7 y la Tabla 2 se utilizarán en una fase final para validar los episodios con niveles de PM10 corregidos o gravimétricos (tabla final de la tarea). El resultado de estas tareas es la producción de unas tablas con los niveles de PM10 registrados en las mencionadas estaciones de fondo, con la indicación de los días en los que ha habido influencia de aportes de polvo africano o de otra fuente natural, que serán remitidas a las redes de calidad del aire con posterioridad a la detección de cada episodio africano. Se podrán considerar dentro del episodio africano los niveles altos registrados en las estaciones de fondo con un adelanto de un día o un retraso de dos días respecto a las fechas resultantes del estudio de detección de episodios africanos (tareas 1.1. a 1.4). Ello se debe a que cuando se transportan las masas de aire africanas sobre la Península Ibérica, si no son sucedidas por episodios de advección intensa que renueven las masas de aire regionales, el polvo africano en suspensión tiene un tiempo de residencia durante el cual los niveles de PM10 permanecen elevados. Estudios realizados en este sentido muestran que este efecto retardado (o indirecto) sobre los niveles de PM10 suele durar entre 1 y 2 días una vez cesada la advección de masas de aire africano sobre la Península (ver justificación adicional al final del procedimiento).

1.6. Para cuantificar los niveles de PM10 aportados por el fondo regional de la zona para un día de influencia africana (no toda la masa de PM de ese día en concreto es de origen africano), en cada serie temporal de niveles de PM10 de cada una de las estaciones seleccionadas se procederá a determinar **el percentil 40** medio móvil mensual para cada día de medida. Para ello se redondean los valores diarios al entero más próximo, y se toma el día en evaluación en la posición 15 de 30 días, excluyendo de éstos los días con influencia de polvo africano. Estudios realizados sobre los niveles de PM10 registrados en estaciones EMEP de España y estaciones de fondo regional de Portugal durante episodios de advección excluyendo la africana (atlántica, mediterránea y europea principalmente) muestran que el percentil 40 reproduce bastante adecuadamente el fondo regional registrado en procesos advectivos. Al final del procedimiento se adjunta justificación **de la elección de dicho percentil**. El valor correspondiente a este percentil móvil medio mensual diario se sustraerá de la media diaria de PM10 determinada en la estación de fondo para cada día afectado por el aporte africano. Con ello se obtendrá la carga diaria neta de polvo a PM10.

1.7. Con la información suministrada en las sub-tareas 1.1 a 1.6 se añadirá a las tablas anteriormente mencionadas para los días coincidentes con episodios de PM10 africanos, los valores diarios de carga neta de polvo a PM10 registrados en estaciones de fondo.

1.8. Se elabora a final de año (con entrega a **las redes de calidad del aire** lo antes posible en el año siguiente, una vez recibidos todos los datos de PM validados de las diferentes redes de calidad del aire) un informe completo, justificando y describiendo detalladamente cada uno de los episodios de PM10 atribuidos a aportes africanos y otras fuentes naturales para cada una de las zonas mostradas en la Figura 8. Se adjuntan también las tablas de niveles diarios de PM10 registrados en estaciones de fondo una vez validados y corregidos mediante los factores obtenidos a partir de la intercomparación de las medidas de equipos automáticos y manuales, o sustituidos por las medidas manuales, allí donde exista la posibilidad de hacerlo. Se adjuntan también los valores de la carga neta diaria de polvo africano determinados mediante el procedimiento expuesto en 1.6 y en base a los niveles de PM10 definitivos. Esta tabla será la base para el descuento de superaciones debidas a aportes naturales. Independientemente se continúa con las alertas por correo electrónico y la tabla de episodios y niveles no definitivos para cada episodio.

2. **Las redes de calidad del aire** proceden a la obtención de un inventariado sencillo de los días con superaciones del valor límite diario de PM10 para cada estación de una red determinada. Además, se compara la lista de fechas con la de las **tablas validadas** con identificación de episodios africanos y de otras fuentes naturales suministradas a final de año por el equipo **CSIC-UNL-AEMet-CIEMAT-UHU**, (**sub-tarea 1.8**), y se obtiene un listado de días con superaciones que coincidan con episodios naturales.

3. **Las redes de calidad del aire** procederán a comparar los niveles de PM10 registrados para cada superación y estación de la red con aquellos registrados simultáneamente en las estaciones de fondo regional, que serán suministrados en sendas tablas incorporadas en el Informe anual del equipo **CSIC-UNL-AEMet-CIEMAT-UHU** (**sub-tarea 1.8**).

4. Para aquellos días en que se supere el valor límite diario en una estación de tipo urbano o industrial y en los que se haya identificado un episodio de aportes de partículas africanas (según los citados informes realizados por el equipo **CSIC-UNL-AEMet-CIEMAT-UHU**, **sub-tarea 1.8**) se realizará la substracción de la carga neta diaria de polvo africano determinada en la estación de fondo correspondiente (la más próxima a la red en cuestión). Si el resultado de esta substracción es inferior al valor límite diario se puede considerar que dicha superación es atribuible al aporte natural en la estación considerada, y por tanto se puede descontar.

Por ejemplo: En dos estaciones, de fondo urbano y de tráfico, se registran 60 y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, durante un día específico en el que el informe sobre episodios africanos (sección 1.5) indica que se ha producido una intrusión de masas de aire africanas. En la

estación de fondo regional más próxima a las citadas estaciones se registra simultáneamente un valor diario de PM10 de $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el percentil 40 mensual para ese día, alcanza $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por tanto la carga neta de polvo africano en dicha estación de fondo regional, y por tanto en la zona que representa, será de $41-10=31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En este caso la superación registrada en la estación de fondo urbano se atribuye a fuentes naturales ($60-31=29 \mu\text{g}/\text{m}^3 < 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) pero no la registrada en la estación de tráfico ($100-31=69 \mu\text{g}/\text{m}^3 > 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Se ha de destacar que pueden darse casos en los que la masa de aire con alta carga de polvo africano presente una mayor concentración del mismo a determinadas alturas. Dado que muchas de las estaciones de referencia seleccionadas en la **sub-tarea 1.6** se localizan en ocasiones a una altura mayor que las redes urbanas próximas, en los casos citados pueden llegar a registrarse de forma puntual niveles de PM10 superiores en determinadas estaciones de referencia respecto a las urbanas. Por tanto al restar la carga neta de polvo africano, se obtendrían valores negativos. En estos casos se debe utilizar como carga neta de polvo el promedio entre las contribuciones africanas calculadas en la estación de referencia y en la estación de fondo regional más cercana aparte de la de referencia. Si, aún así, el valor negativo de la resta se mantuviese, aunque la contribución africana sea dominante, se consideraría como carga no africana el valor correspondiente al percentil 40 móvil de 30 días para ese día (tomándolo en la posición 15/30) concreto en la estación de la red de calidad del aire que se evalúe, calculado a partir de los niveles de PM10 excluyendo los días con influencia de masas de aire de origen africano. El problema expuesto se debe a la limitación de la representatividad de las medidas de las estaciones de referencia, y se ha de asumir, pues ubicar estaciones de referencia muy cercanas a cada una de las redes de medida sería una estrategia extremadamente costosa y además las estaciones de referencia se verían en muchos casos influenciadas por las emisiones urbanas.

5. Las redes de calidad del aire procederán a remitir un listado de superaciones totales (causadas por episodios africanos y no africanos), y otro adicional identificando aquellas superaciones que cumplan los requisitos expuestos en el apartado anterior. Así mismo, se procederá al cómputo de la media anual de PM10 teniendo y sin tener en cuenta los niveles de los días con superación del valor límite de PM10 causados por episodios africanos. El cálculo de la media anual teniendo en cuenta los episodios se realizará calculando la media para todos los días pero descontando la carga de polvo neta a los niveles de los días en que se haya demostrado que efectivamente hay episodio y se haya calculado dicha carga por el procedimiento expuesto (en el ejemplo del punto 4, se tomará para la estación de tráfico un valor diario de 100 –sin tener en cuenta la intrusión– y de 69 –teniendo en cuenta la intrusión–). La diferencia entre ambas se identificará como contribución neta anual de polvo mineral africano a los niveles medios de PM10. Se informará de la contribución media de polvo calculada. Así pues, la información final a remitir al MARM consistirá en: a) los niveles medios anuales de PM10, b) el número total anual y la lista de superaciones del valor límite diario, c) una lista independiente con el número y fecha de superaciones causadas por episodios naturales; y d) la contribución media calculada de polvo mineral africano a la media anual de PM10.

6. El mismo procedimiento se puede aplicar para PM2,5, en caso de que las estaciones de fondo suministren niveles de PM2,5.



- Estaciones de fondo de redes de calidad del aire
- Estaciones EMEP con medidas en tiempo real
- Estaciones EMEP con medidas gravimétricas

Figura 7. Red de estaciones de fondo a utilizar para detección de episodios africanos.

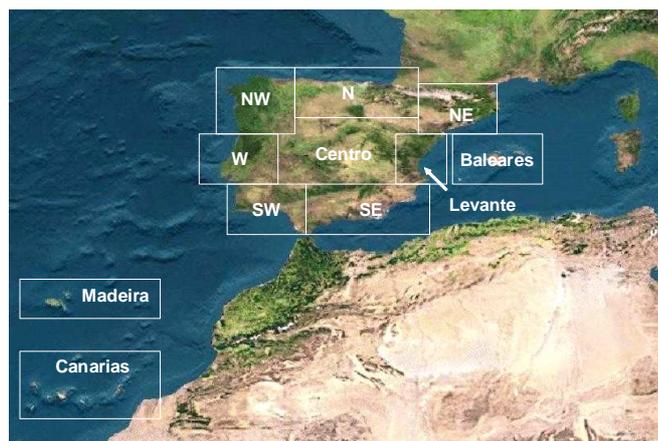


Figura 8. Zonas a distinguir para la identificación de aportes de episodios africanos de PM10. **Canarias; Islas Madeira; Suroeste (SW):** Andalucía Occidental, Sur de Extremadura, Algarve (Portugal); **Sureste (SE):** Andalucía Oriental, Murcia; **Levante:** Comunidad Valenciana hasta el Delta del Ebro; **Oeste (W):** Zona Central de Portugal; **Centro:** Resto de Extremadura, Castilla-La Mancha, Comunidad de Madrid, Castilla León (excepto su parte noroeste); **Noroeste (NW):** Galicia, Asturias, Noroeste de Castilla y León, Norte de Portugal; **Norte (N):** Cantabria, País Vasco, Navarra, La Rioja; **Noreste (NE):** Aragón, Cataluña; **Baleares.**

Tabla 2. Red de estaciones de fondo a utilizar para detección de episodios africanos.

Zona geográfica	Código estación	Latitud	Longitud	Altitud	Provincia/Distrito
<u>NW Península</u>					
O Saviñao	27058999	42° 38' 05"N	07° 42' 17"W	506 m.s.n.m	Lugo
Noia	15057999	42° 43' 14"N	08° 55' 25"W	685 m.s.n.m	A Coruña
Lamas de Olo	1048	41° 22' 28"N	07° 47' 45"W	1086 m.s.n.m	Vila Real
<u>W Península</u>					
Fundão	2020	40° 07' 48"N	07° 29' 24"W	473 m.s.n.m	Castelo Branco
Chamusca	3096	39° 12' 41"N	08° 16' 55"W	43 m.s.n.m	Santarém
<u>SW Península</u>					
Barcarrota	06016999	38° 28' 22"N	06° 55' 25"W	393 m.s.n.m	Badajoz
Doñana	21005001	37° 17' 06"N	06° 26' 24"W	96 m.s.n.m.	Huelva
Sierra Norte	41088001	37° 59' 40"N	05° 40' 01"W	573 m.s.n.m	Sevilla
Alcoutim	5012	37° 18' 45"N	07° 40' 43"W	300 m.s.n.m	Faro
<u>S y SE Península</u>					
Viznar	18189999	37° 14' 14"N	03° 32' 03"W	1230 m.s.n.m	Granada
E2: Alcornocales	11008009	36° 14' 02"N	05° 39' 49"W	189 m.s.n.m	Cádiz
Níjar	04066006	36° 59' 13"N	02° 11' 39"W	343 m.s.n.m	Almería
<u>N Península</u>					
Niembro	33036999	43° 26' 21"N	04° 51' 00"W	134 m.s.n.m	Asturias
Valderejo	01055001	42° 52' 31"N	03° 13' 53"W	911 m.s.n.m	Álava
Izki	01016001	42° 39' 27"N	02° 30' 14"W	835 m.s.n.m	Álava
Mundaka	48068001	43° 24' 22"N	02° 42' 14"W	116 m.s.n.m	Vizcaya
Pagoeta	20016001	43° 15' 02"N	02° 09' 18"W	225 m.s.n.m.	Guipúzcoa
Los Tojos	39086001	43° 09' 10"N	04° 15' 11"W	651 m.s.n.m.	Cantabria
<u>Centro Península</u>					
Campisabalos	19061999	41° 16' 27"N	03° 08' 33"W	1360 m.s.n.m	Guadalajara
Peñausende	49149999	41° 14' 20"N	05° 53' 51"W	985 m.s.n.m	Zamora
Risco Llano	45153998	39° 31' 16"N	04° 21' 11"W	1208 m.s.n.m	Toledo
S. Pablo de los Montes	45153999	39° 32' 49"N	04° 21' 02"W	917 m.s.n.m	Toledo
Monfragüe	10182001	39° 50' 57" N	05° 56' 23" W	376 m.s.n.m	Cáceres
El Atazar	28016001	40° 54' 37" N	03° 28' 00" W	940 m.s.n.m	Madrid
<u>E Península</u>					
Morella	12080007	40° 38' 14"N	00° 05' 28"W	1150 m.s.n.m	Castellón
Zarra	46263999	39° 04' 58"N	01° 06' 04"W	885 m.s.n.m	Valencia
El Pinós	03105001	38° 27' 06"N	01° 03' 53"W	642 m.s.n.m	Alicante
<u>NE Península</u>					
Els Torms	25224999	41° 23' 38"N	00° 44' 05"E	470 m.s.n.m	Lleida
Monagrega	44051002	40° 56' 48"N	00° 17' 27"W	570 m.s.n.m	Teruel
Montseny (La Castanya)	08137001	41° 45' 36"N	02° 35' 00"E	693 m.s.n.m	Barcelona
Cabo de Creus	17032999	42° 19' 09"N	03° 18' 57"E	23 m.s.n.m	Girona
<u>Baleares</u>					
Castillo de Bellver	07040003	39° 33' 50"N	02° 37' 22"E	117 m.s.n.m	Mallorca
Mahón	07032999	39° 52' 34"N	04° 19' 26"E	78 m.s.n.m	Menorca
<u>Canarias</u>					
El Río de Tajao	38006003	28° 08' 46"N	16° 31' 22"W	500 m.s.n.m.	Santa Cruz de Tenerife (Tenerife)
Tefía-Puerto del Rosario	35017004	28° 31' 38"N	14° 00' 16"W	160 m.s.n.m	Las Palmas (Lanzarote y Fuerteventura)
Echedo-Valverde	38048001	27° 49' 54"N	17° 55' 18"W	375 m.s.n.m	Santa Cruz de Tenerife (El Hierro, La Palma y La Gomera)
Camping Temisas-Sta. Lucía de Tirajana	35022002	27° 53' 54"N	15° 29' 18"W	460 m.s.n.m.	Las Palmas (Gran Canaria)
<u>Madeira</u>					
Quinta da Magnolia	6006	32° 44' 44"N	16° 58' 28"W		Funchal
<u>Estaciones reserva:</u>					
Buzanada	38006002	28° 04' 26"N	16°39'06"W	309 m.s.n.m.	Tenerife
Sardina	35022001	27° 50' 58"N	15° 27' 57"W	190 m.s.n.m.	Gran Canaria
Arinaga	35002002	27° 52' 13"N	15° 23' 09"W	12 m.s.n.m.	Gran Canaria
Horta		38° 36' 18"N	28° 37' 53"W	310 m.s.n.m	Azores

2.2.1. Justificación de la selección del percentil 40

Para descontar los niveles de PM10 aportados por el fondo regional de la zona para un día de influencia africana, en cada serie temporal de niveles de PM de cada estación de fondo regional correspondiente se procederá a determinar **el percentil 40** medio mensual móvil para cada día de medida. Para ello se tomará el día en evaluación como día central del periodo mensual de 30 días. Estudios realizados sobre los niveles de PM10 registrados en estaciones EMEP de España durante todos los episodios de advección excluyendo la africana (atlántica, mediterránea, europea) demuestran que el percentil 40 mensual móvil (de la serie de niveles de PM10 excluyendo los días africanos) representa bien la concentración de fondo regional. En estudios anteriores se había considerado el percentil 30, que reproducía mejor los niveles registrados durante los episodios de advección exclusivamente atlánticos (Escudero *et al.*, 2007). Sin embargo evaluaciones más recientes (Pey, 2008) muestran que el percentil 40 es más adecuado ya que reproduce mejor, no la media de los niveles de PM de los procesos advectivos atlánticos, sino la de todos los procesos advectivos excluyendo los africanos. Así, en la Tabla 3 y la Figura 9 adjuntas se puede observar como el citado percentil 40 reproduce muy ajustadamente los niveles medios registrados para días con advección (excluida la africana) en estaciones EMEP y otras estaciones de fondo regional de España. También se aprecia que los niveles medios registrados en periodos de advección atlántica son ligeramente inferiores a los de la media de las advecciones totales. De utilizar el percentil 30, que reproduce la advección atlántica, se podría llegar a sobreestimar la carga africana de polvo, al ser menor el fondo regional a restar al día africano.

Tabla 3. Niveles medios (Media PM10) en el periodo 2002-2004 registrados en estaciones EMEP españolas y otras estaciones de fondo españolas; niveles medios registrados en días de advección atlántica (ADV ATL); todos los días con advección excepto los africanos (ADV EXC. NAF); todos los días del año excluyendo los africanos (EXCL NAF); y medias 2002-2004 para los percentiles 30, 40 y 50 para todos los días excluyendo los africanos.

2002-2004	RISCOLLANO	CAMPISABALOS	PEÑAUSENDE	ZARRA	VALDEREJO	IZKI	C. CREUS
Media PM10	14	12	13	16	13	12	22
ADV ATL	8	6	8	10	10	8	17
EXCL NAF	11	9	11	13	12	10	21
ADV EXC. NAF	9	7	9	11	11	9	20
P30	8	7	7	11	9	8	16
P40	9	8	8	12	10	9	17
P50	10	9	10	13	11	10	19
2002-2004	ELS TORMS	MONAGREGA	O Saviñao	NIEMBRO	VIZNAR	BARCARROTA	
Media PM10	19	15	14	18	22	17	
ADV ATL	13	10	10	15	12	12	
EXCL NAF	17	13	13	17	16	14	
ADV EXC. NAF	15	11	11	16	13	13	
P30	13	10	8	13	13	10	
P40	14	11	10	15	15	12	
P50	16	12	11	17	17	13	

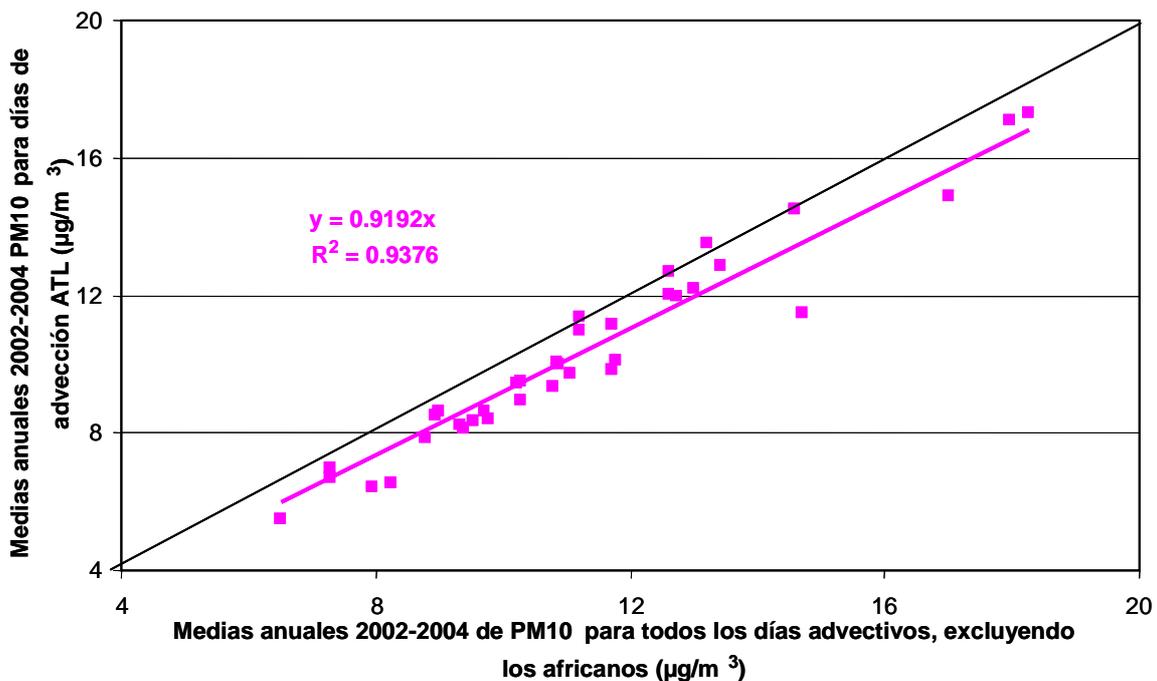
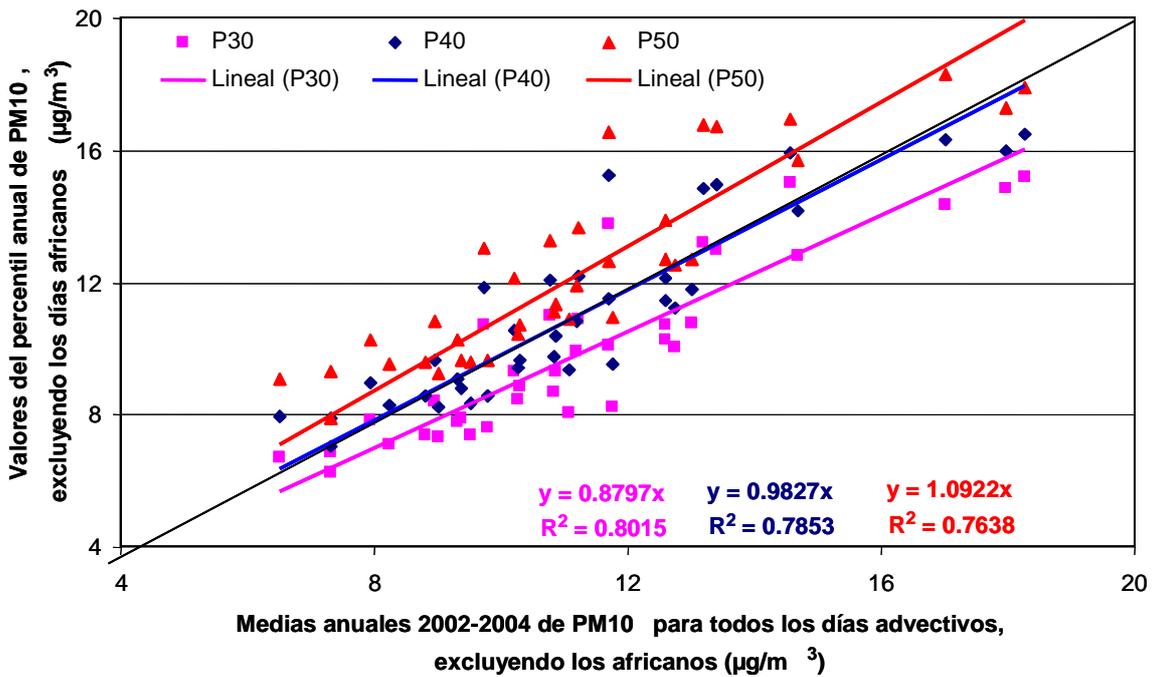


Figura 9. Superior: Correlación entre los niveles medios de PM10 para los días bajo influencia de advección (excluyendo los africanos) y los niveles medios asociados a los percentiles 30, 40 y 50 en estaciones EMEP y otras estaciones de fondo regional (excluyendo los africanos). Inferior: Correlación entre los niveles medios anuales de PM10 registrados en días de advección atlántica y en todos los días advectivos, excluyendo los africanos

La validación del método ha sido realizada y publicada en *Atmospheric Environment* (ver Escudero *et al.*, 2007) con el percentil 30, reproduciendo éste los niveles de fondo durante días de advección atlántica. Ésta ha sido realizada mediante el análisis químico y la determinación analítica de la carga de polvo neta y su comparación con la carga neta de polvo estimada mediante el procedimiento descrito anteriormente. Ello se ha realizado en 2 estaciones de fondo regional (Monagrega y Montseny) y una suburbana (Castillo de Bellver). La metodología actual es más conservativa y utiliza el percentil 40 para reproducir

el fondo regional de todos los días advectivos, excluyendo los africanos. Como muestra la Figura 10, la correspondencia obtenida con el percentil 40 es muy buena en las tres estaciones de medida.

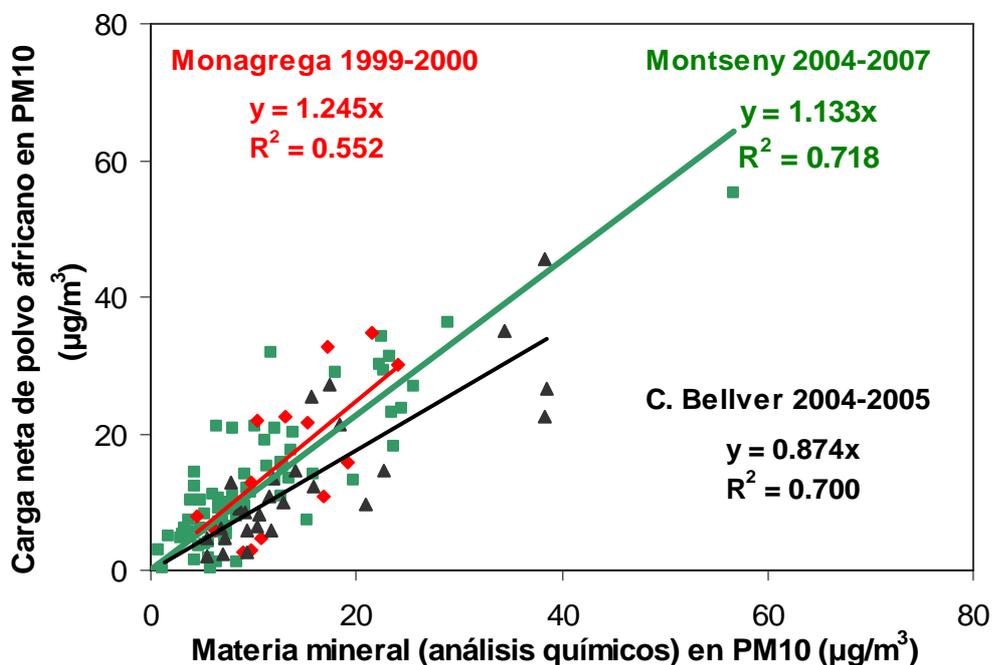


Figura 10. Resultados de la validación del procedimiento mediante el análisis químico y la determinación analítica de la carga de polvo neta y su comparación con la carga neta de polvo estimada mediante el procedimiento. Realizado en 2 estaciones de fondo regional (Monagrega y Montseny) y una suburbana (Castillo de Bellver).

Además de la publicación de la validación del método (Escudero *et al.*, 2007), éste y algunas de sus aplicaciones han sido presentados, con gran aceptación, a discusión científica en las siguientes reuniones científicas:

- QUEROL X., ALASTUEY A., CASTILLO S., ESCUDERO M., PEY J., FERREIRA F., FRANCO N., MARQUES F. African dust outbreaks over Spain and Portugal: Phenomenology and procedure for the detection and subtraction of natural dust contributions to PM10 and PM2,5. Workshop on Natural Sources to PM levels in Europe. Joint Research Centre, EC, Ispra, 12-13 octubre de 2006.
- FERREIRA F., FRANCO N., MARQUES F., QUEROL X., ALASTUEY A.. Naturale events and their contribution to PM10 levels: Experience of Portugal and Spain. Workshop on Natural Sources to PM levels in Europe. Joint Research Centre, EC, Ispra, 12-13 octubre de 2006.
- QUEROL X., ALASTUEY A., PEY J., PÉREZ N., ESCUDERO M., CASTILLO S., CRISTÓBAL A., PALLARÉS M., GONZÁLEZ A., JIMÉNEZ S., ALONSO N., ALONSO S., CUEVAS E., de la ROSA J. African dust influence on ambient PM levels in Europe (Spain and Portugal), a quantitative approach to support implementation of air quality directives. WMO/GEO Expert Meeting on an International Sand and Dust Storm Warning System, 7-9 November 2007, Barcelona Supercomputing Center (BSC) Barcelona, Spain.
- QUEROL X., ALASTUEY A., PEY J., PÉREZ N., ESCUDERO M., CASTILLO S., CRISTÓBAL A., PALLARÉS M., GONZÁLEZ A., JIMÉNEZ S., ALONSO N.,

ALONSO S., CUEVAS E., de la ROSA J. African dust influence on ambient PM levels in Southern Europe, a quantitative approach to support implementation of air quality directives. NASA, Expert Meeting on From Deserts to Monsoons, June 2008, Heraklion, Greece.

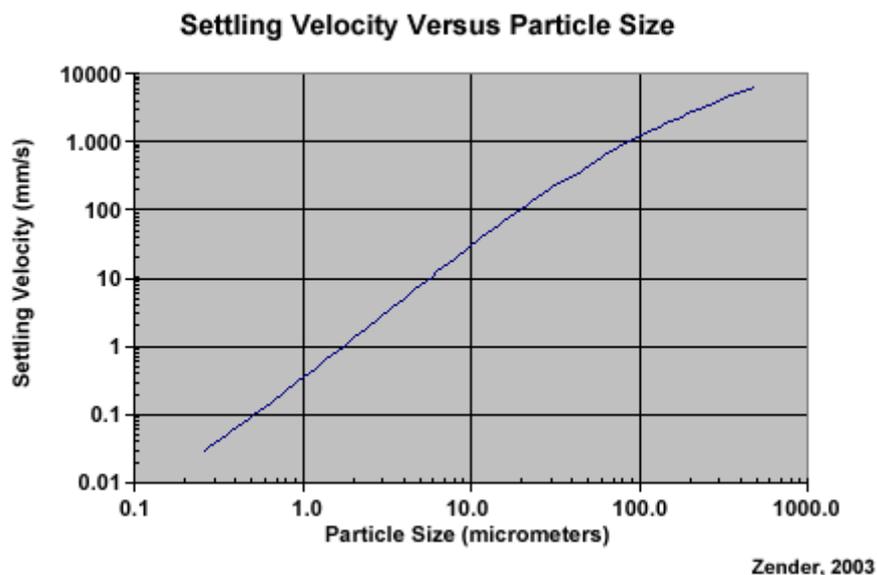
- QUEROL X., ALASTUEY A., PEY J., PANDOLFI M., CUSACK M., PÉREZ N., VIANA M., MORENO T., MIHALOPOULOS N., KALLOS G. KLEANTHOUS S. African dust contributions to mean ambient PM10 mass-levels across the Mediterranean Basin. *Atmospheric Environment* 43, 28, 2009, 4266-4277.

2.2.2. Justificación adicional de la persistencia de algunos episodios africanos

En determinados casos en los que se producen incursiones de masas de polvo africano, los niveles de PM10 pueden estar afectados por estos episodios naturales durante los días (1 o 2 días) posteriores al último día en que las retro-trayectorias indican la existencia de la intrusión. Ello es debido a que:

- Quando se transportan las masas de aire africanas sobre Europa, si no son sucedidas por episodios de advección intensa que renueven las masas de aire regionales, el polvo africano en suspensión tiene un tiempo de residencia durante el cual los niveles de PM10 se afectan marcadamente;
- Estas intrusiones se desarrollan verticalmente hasta, como mínimo, 1500 m de altitud. Según varios autores (De Tomasi, 2003; Alpert *et al.*, 2004; Balis *et al.*, 2004; Pérez, C., 2005) todos los escenarios de transporte de masas de aire con alto contenido en material particulado desde África a la Península Ibérica se desarrollan hasta una altura como mínimo de 1500 m sobre el nivel del mar. Si consideramos que la deposición de partículas entre 1 y 10 μm puede tener una velocidad media de 0,6 cm/s (ver figura de Zender *et al.*, 2003), esto significa que:

$$0,6 \text{ cm/s} = 36 \text{ cm/min} = 21,6 \text{ m/h} = 518,4 \text{ m/día}$$



Fuente: <http://meted.ucar.edu/mesoprime/dust/print.htm>

Esto quiere decir que en aproximadamente 3 días se habrá depositado el material particulado que haya viajado a unos 1500 m. En el centro de la Península Ibérica (con una

altitud media de 500 m) este material necesitaría alrededor de 2 días, una vez finalizada la intrusión, para depositarse.

2.3. Otras consideraciones

a) Cuando se registran variaciones simultáneas de los niveles de PM10 en todas las estaciones de una red de vigilancia de calidad del aire puede deberse a:

- un aporte externo que afecte a todas ellas, en cuyo caso las estaciones de fondo presentarían niveles similares a las más contaminadas,
- unas condiciones meteorológicas (estancamiento, condiciones dispersivas, precipitación) que favorezcan de forma simultánea la acumulación de contaminantes locales, (su dispersión o su lavado), o bien
- unas emisiones antropogénicas, cuyas intensidades varían simultáneamente, por ejemplo las secuencias de emisiones de tráfico semanales (bajos niveles en fines de semanas y altos durante la semana).

Por todo ello las superaciones del valor límite diario solamente deben ser atribuidas a aportes externos si hay una demostración previa (sub-tareas 1.1. a 1.6) de que éstos están presentes.

b) La utilización de una estación de referencia puede reemplazarse por la realización de un balance químico de masas de los componentes mayoritarios de PM10 para los días que superen el valor límite. Dado que el material particulado del Sahara/Sahel está constituido principalmente por cuarzo, calcita, dolomita y minerales arcillosos, el análisis directo de Ca, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K, Mg, y la determinación indirecta de Si ($3^*\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{SiO}_2$) y CO_3^{2-} ($1.5^*\text{Ca} + 2.5^*\text{Mg} = \text{CO}_3^{2-}$) permite la determinación de la carga mineral aportada por el Sahara. Si esta carga se extrae del total de PM10 y no se supera el valor límite se puede deducir que el aporte natural es responsable de la superación. Este procedimiento es mucho más caro, y además está sometido a la interferencia de polvo mineral procedente de otras fuentes antropogénicas (Querol et al., 2001 y 2004b y c), por tanto en caso de aplicarse debería de hacerse solamente para días en que se ha identificado aporte africano en las sub-tareas 1.1 a 1.6.

c) Las partículas atmosféricas en suspensión en las áreas áridas y semi-áridas en el Sur de Europa tienen una mayor carga mineral cuando se compara con los países de Europa Central y del Norte. Esta característica no es exclusiva de Europa ya que un gran número de estudios han demostrado una diferenciación similar entre las costas del Este y Oeste de Estados Unidos. El mayor aporte mineral en el material particulado en las áreas áridas y semi-áridas se atribuye principalmente a:

- a) La ausencia de cobertura vegetal del suelo, que favorece la resuspensión de las partículas del suelo.
- b) El bajo volumen de precipitación, que disminuye el lavado potencial del material particulado.
- c) La intensa dinámica convectiva atmosférica (inducida por la alta insolación), frecuente en primavera y verano, que favorece la resuspensión.

Dado que las características físico-químicas de las partículas naturales resuspendidas difieren claramente de las partículas antropogénicas, en la mayoría de las situaciones las determinaciones físicas y químicas pueden permitir la identificación de altos niveles de partículas inducidos por procesos de resuspensión local.

En el caso de que se sospeche que los procesos de resuspensión local puedan dar lugar al incremento de los niveles de PM10 en una determinada estación de control se recomienda la realización de balances químicos de masas. Este análisis se debe llevar a cabo durante un mínimo de un año (aproximadamente 75 muestras diarias distribuidas homogéneamente a lo largo del año) para determinar los períodos de influencia y demostrar la alta proporción de material natural en los niveles de PM10. El análisis directo de Ca, Al₂O₃, Fe₂O₃, K, Mg, Ti y P y la determinación indirecta de Si ($3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{SiO}_2$) y CO₃²⁻ ($1.5 \cdot \text{Ca} + 2.5 \cdot \text{Mg} = \text{CO}_3^{2-}$) permite la determinación de la carga mineral. Si después de realizar la extracción de esta carga de la concentración total de PM10 no se supera el valor límite de PM10 se puede deducir que el aporte natural es responsable de la superación. En estaciones urbanas de fondo, los niveles de SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ y C no mineral (C de origen orgánico) representarían la carga antropogénica, mientras que los niveles de Cl⁻, Na⁺ y SO₄²⁻ marino y Mg²⁺ (ambos determinados indirectamente a partir de los niveles de Na⁺) representarían la carga de aerosol marino.

Una vez se ha demostrado la importancia del aporte de material particulado por resuspensión mediante análisis de contribución de fuentes, en los años siguientes se puede aplicar el siguiente procedimiento para identificar los eventos de resuspensión:

1. Identificación de superaciones de los valores límite de PM10 diarios de la Directiva (PM10 > 50 µg/m³).
2. Recopilación de la información de series temporales obtenidas simultáneamente en diferentes estaciones de la red de control y en una estación rural / remota EMEP/VAG/CAMP (serie de referencia) cercana al área de control.
3. Comparación de las series temporales de PM10 obtenidas durante cada superación de los niveles límite de PM10 y elaboración de un listado con los picos de PM10 registrados simultáneamente en las estaciones consideradas. Las menores concentraciones de contaminantes particulados antropogénicos son más probables en primavera y verano que en otoño e invierno debido a las condiciones de mayor dispersión atmosférica y a los menores ratios de emisión. Por tanto, los episodios con niveles altos de PM10 que tengan lugar en primavera y verano pueden tener un mayor aporte natural que aquellos que tengan lugar en invierno.
4. Realización de mediciones simultáneas de los niveles de PM10 y PM2,5 en una de las estaciones de control y en el área de referencia. La fracción mineral de las partículas de suelo resuspendidas se concentran principalmente en la fracción gruesa (>2,5 micras). Por tanto, en el caso de episodios con niveles altos de PM10 registrados simultáneamente en las estaciones de referencia y de control, si la proporción de PM2,5 en PM10 o en PST es baja (<50 % en peso), los procesos de resuspensión serán, posiblemente, los responsables de los altos niveles de PM10. No obstante, hay que reseñar que se debe demostrar la ausencia de fuentes de emisión de partículas primarias (cerámica, minería, cemento) en la zona, ya que este tipo de fuentes antropogénicas emite partículas mayoritariamente concentradas en el rango comprendido entre 2,5 y 10 micras.

2.4. Contribución neta africana a los niveles medios anuales de PM10 y PM2,5 en estaciones de fondo regional

La metodología descrita en este trabajo permite discernir entre los aportes correspondientes a los episodios africanos y aquellos correspondientes a los niveles de fondo. A partir de estos cálculos es posible calcular la contribución media anual de polvo mineral africano a los niveles de PM. Se ha realizado este cálculo para las fracciones PM10 (en todas las zonas distinguidas) y PM2,5 (solamente en las zonas en que se dispone de medidas de esta fracción granulométrica).

Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 11 y 12. Las estaciones de fondo regional emplazadas en el Sur de la Península Ibérica y en los Archipiélagos Balear y Canario registran unos niveles de PM10 más elevados que las localizadas en las zonas Norte, Este y Centro. Este hecho se debe en gran medida al aporte natural de polvo africano que se registra en estas áreas, que supone incrementos en la media anual de PM10 de 4-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Baleares y Suroeste; 5-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el Sureste; y 6-7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Canarias. El aporte de materia mineral desde el Norte de África disminuye conforme nos desplazamos hacia el Norte y Noroeste. Así, se registran incrementos de 2-3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona Centro y el Valle del Ebro, y los incrementos están en 1-2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en toda la mitad Norte.

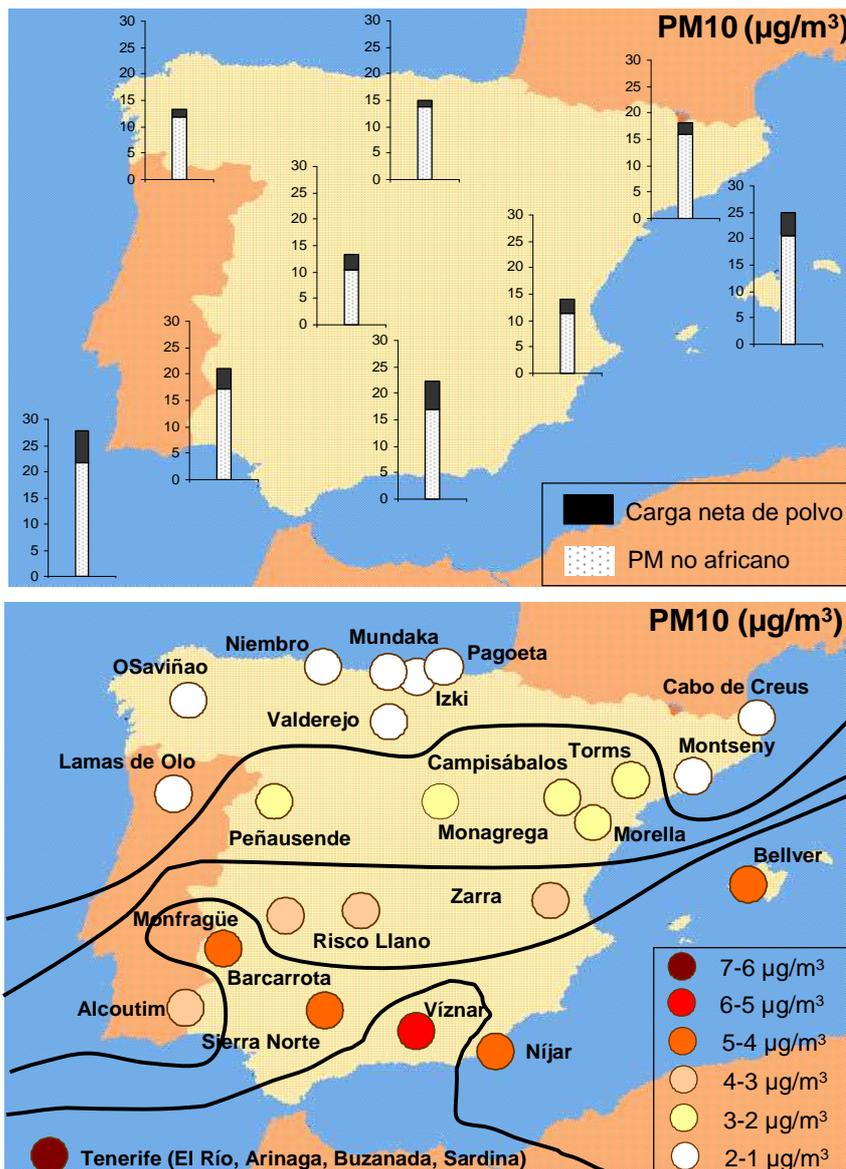


Figura 11. Superior: Niveles medios anuales de PM10 obtenidos a partir de las estaciones de fondo regional de las distintas zonas geográficas. Se distingue entre el PM10 no africano (trama de puntos) y el PM10 de origen africano (trama negra). Inferior: Carga neta media anual de polvo africano obtenida en PM10 para cada una de las zonas geográficas.

Los niveles de PM2,5 más elevados (en torno a 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se registran en el Noreste y Sureste de la Península Ibérica. En el primer caso, los niveles relativamente elevados obedecen a las mayores emisiones de carácter antropogénico que se registran en esta

zona con respecto a otras regiones. En el caso del Sureste de la Península Ibérica estos niveles relativamente elevados se atribuyen tanto a la influencia de emisiones de carácter antropogénico como al impacto de partículas minerales de origen africano. La contribución del polvo mineral africano a los niveles de PM_{2,5} presenta la misma distribución espacial que la comentada para PM₁₀. En la zona Sur la contribución media anual se estima en 1,5-2,0 µg/m³. En las zonas Centro, Este y Noreste la contribución de polvo mineral africano varía entre 1,0 y 1,5 µg/m³, y en el resto de las zonas geográficas esta contribución está comprendida entre 0,5 y 1,0 µg/m³.

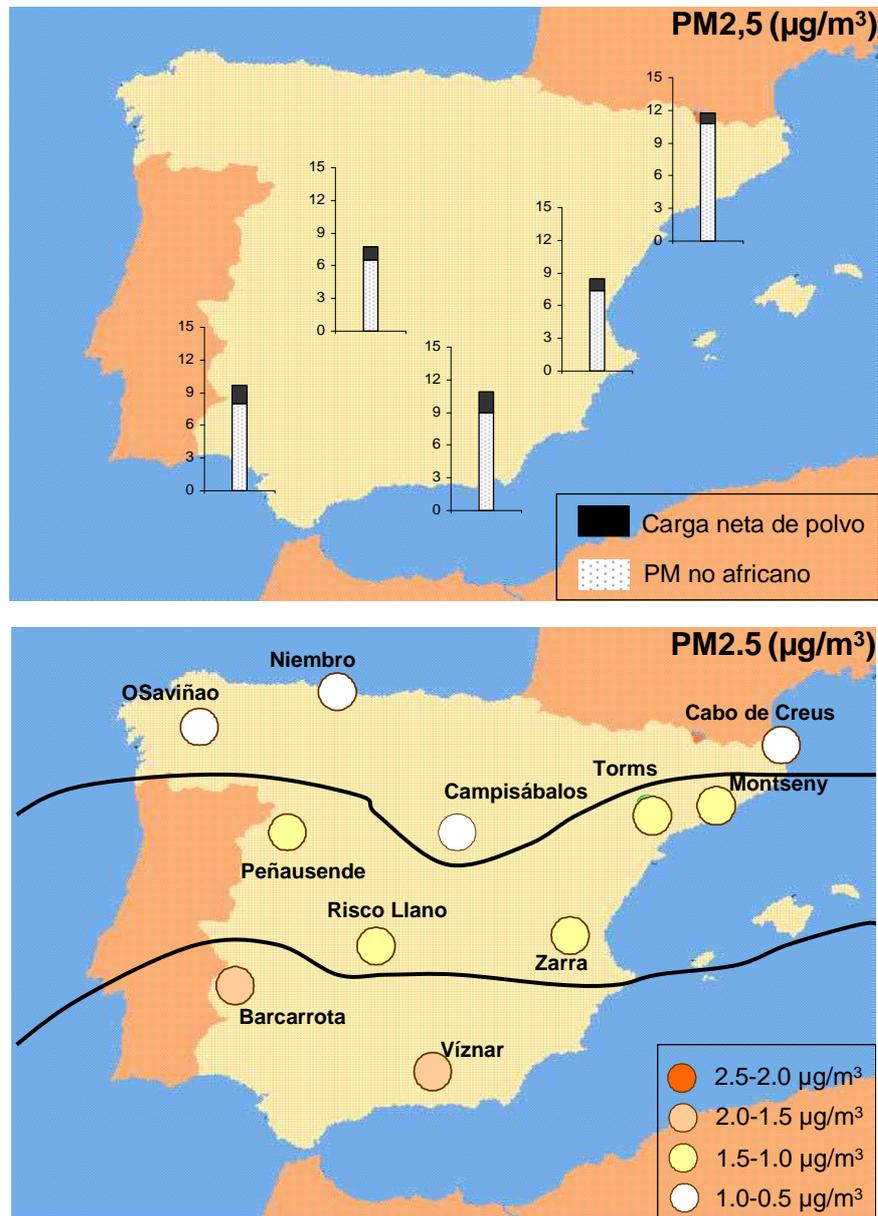


Figura 12. Superior: Niveles medios anuales de PM_{2,5} obtenidos a partir de las estaciones de fondo regional de las distintas zonas geográficas. Se distingue entre el PM_{2,5} no africano (trama de puntos) y el PM_{2,5} de origen africano (trama negra). Inferior: Carga neta media anual de polvo africano obtenida en PM_{2,5} para cada una de las zonas geográficas.

2.5. Posibilidad de aplicación en otros países: niveles medios anuales de PM10 en el Sur de Europa

Es importante resaltar que para cada región de Europa es necesario determinar que percentil (30, 40,...) móvil mensual reproduce los niveles de fondo regional. Ello requiere de un estudio de interpretación diaria (con al menos 2 a 3 años de datos diarios) de los escenarios atmosféricos de transporte de masas de aire. Una vez identificados los días advectivos, se calculan los niveles medios para éstos, y luego se ajusta el percentil mensual móvil más adecuado.

Con el fin de demostrar a la CE que la metodología desarrollada es aplicable a toda Europa, se ha realizado un estudio con los datos disponibles en todo el Sur de Europa, de manera que se ha cubierto todo el Mediterráneo. Así, el procedimiento, utilizando un percentil 30 mensual móvil, se aplicó a los datos disponibles sobre niveles de PM₁₀ registrados en estaciones de fondo regional a través de toda la cuenca mediterránea, disponibles en *Airbase* (Agencia Europea de Medio Ambiente) y de algunas estaciones de investigación sobre aerosoles atmosféricos (Figura 13).

Los resultados demuestran que el método es aplicable a través de toda la cuenca mediterránea. La Figura 14 muestra claramente que los niveles de PM10 aumentan de norte a sur y de oeste a este de la cuenca mediterránea. Estas variaciones son coincidentes con la carga neta de polvo mineral africano de PM10. Sin embargo, cuando se sustrae la carga neta de polvo africano a las medias anuales de PM10 utilizando la metodología propuesta, los niveles de fondo de PM10 son aún 5-10 µg/m³ más elevados en el sector este de la cuenca (CME) que en el oeste (CMW), principalmente debido a las cargas de atomizador antropogénicas y de aerosol marino más altas.

En cuanto a las tendencias estacionales, están claramente controladas por los episodios de polvo africano, dando lugar a un máximo de verano-primavera en la CME, y un máximo de verano claro en la CMW (Figura 15), aunque en esta última región las recirculaciones estivales de masas de aire elevan también los niveles de PM. Además, al eliminar los días con polvo africano existe aún una clara tendencia temporal marcada y caracterizada por un máximo de verano alto (precipitación baja, insolación alta) y un mínimo de invierno (vientos sinópticos intensos, mayores precipitaciones).

Se detectan también variaciones inter-anales importantes de la contribución de polvo, más evidente en las regiones del Sur del Mediterráneo. Estas diferencias se asocian generalmente con la ocurrencia de episodios singulares de polvo extremos en determinados años. Generalmente, los años con contribuciones de polvo más altas sobre la CMW corresponden a contribuciones más bajas sobre la CME, y viceversa.

Estos resultados se han evaluado y se han publicado en *Atmospheric Environment* (Querol *et al.*, 2009).

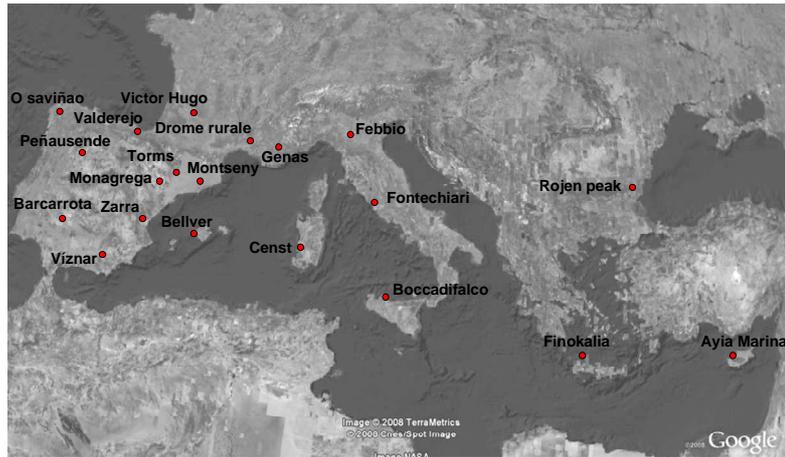


Figura 13. Localización de las estaciones de medida de PM10 (Querol *et al.*, 2009) utilizadas en el estudio para extender el procedimiento a toda la cuenca mediterránea. *Figura 1 de Querol et al. (2009).*

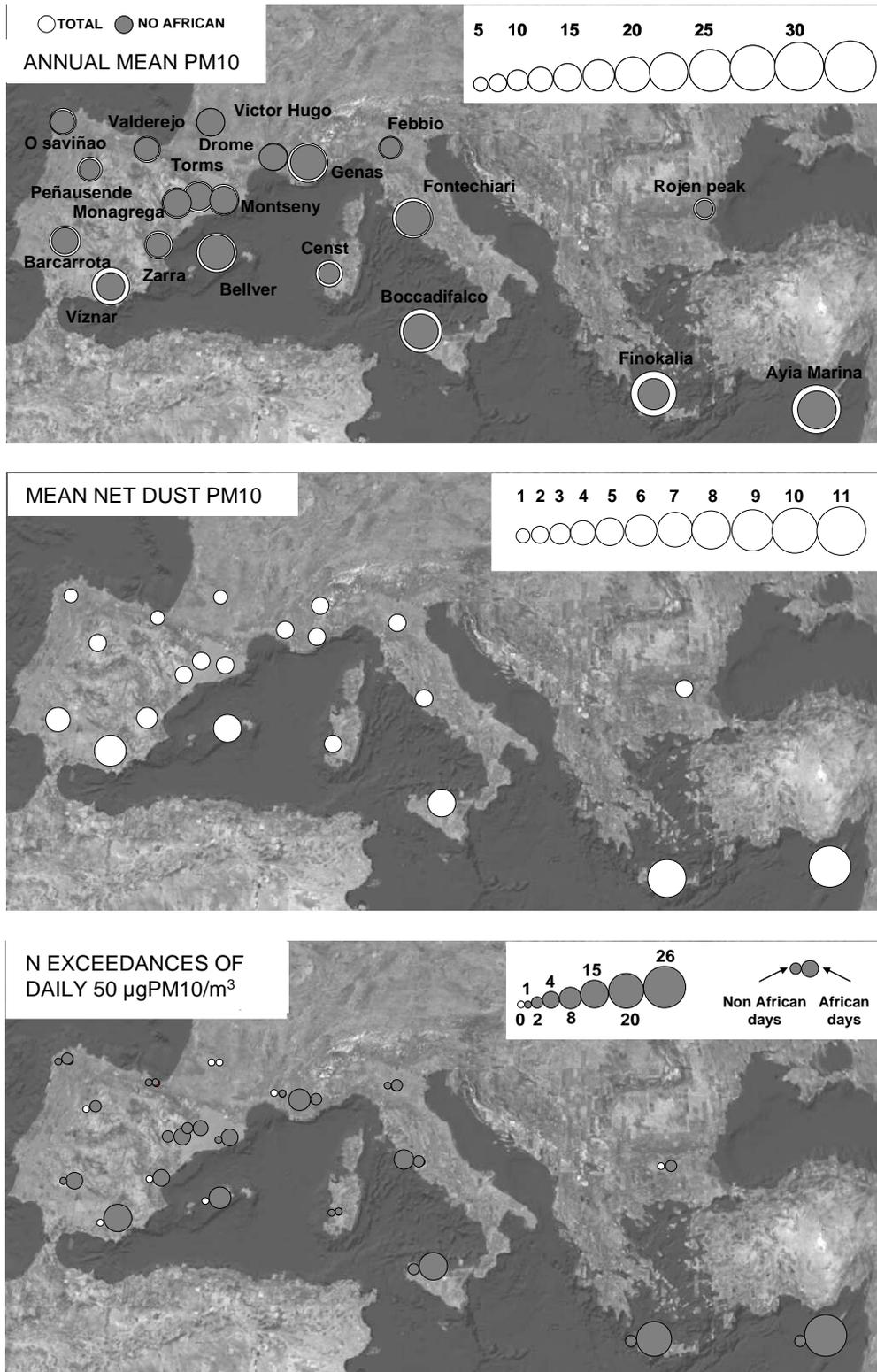


Figura 14. Superior: Media anual de niveles de PM10 para todos los días (círculos blancos) y con exclusión del aporte neto anual de polvo africano (círculos grises). Medio: La media anual de contribución de polvo africano a los niveles de PM10. Inferior: Media anual del número de superaciones diarias de 50 µg/m³, debidas a la contribución africana (círculo de la derecha) y debido a otras causas (círculo de la izquierda). *Figura 2 de Querol et al. (2009).*

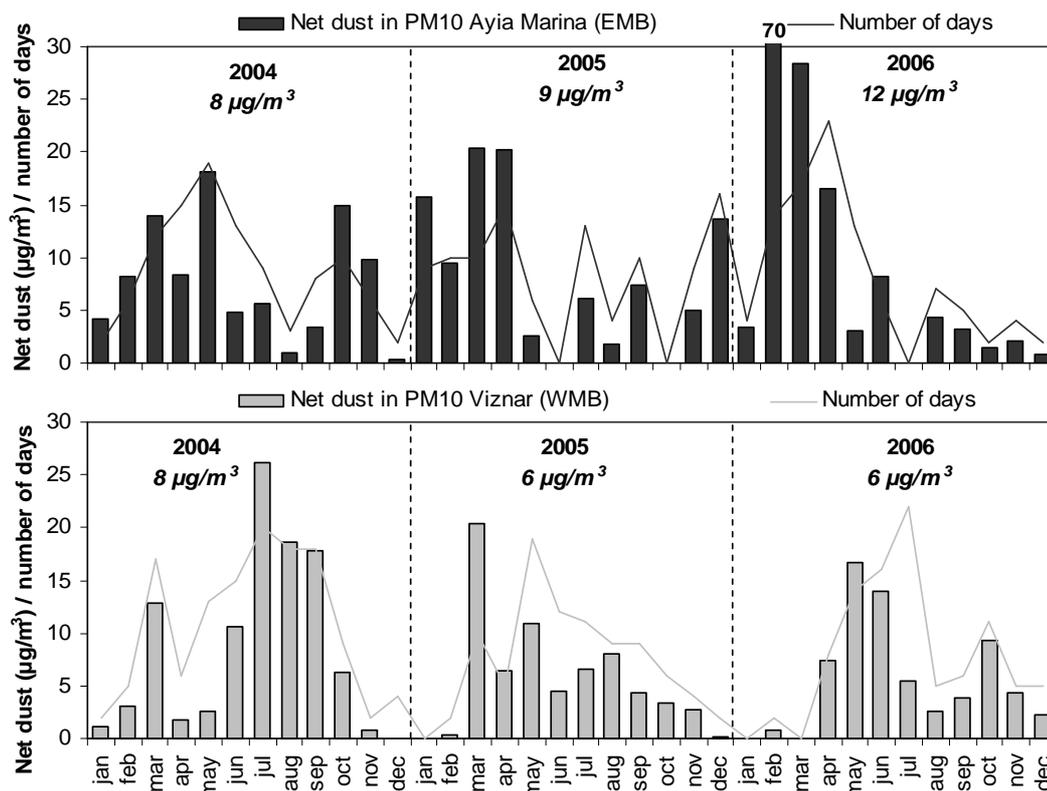


Figura 15. Media mensual de aporte neto de polvo africano a PM10 (barras sombreadas) de 2004 a 2006 calculada para Aya Marina, Chipre (CME) y Viznar, España (CMW). Número de días con aporte de polvo africano (línea). Debajo de cada año se indica la contribución media anual de polvo africano a PM10. *Figura 10 de Querol et al. (2009).*

3. AEROSOL MARINO

Otra contribución natural a los niveles de PM10 y PM2,5 puede deberse a los aportes de aerosol marino, especialmente en zonas costeras e insulares. Aunque el presente documento se ha centrado sobre el polvo africano, en este apartado hacemos un breve resumen de los niveles medios anuales registrados por medio de análisis químico de Cl⁻ y Na⁺ en alrededor de 40 puntos de España (con medidas de al menos un año de duración).

La Figura 16 muestra el rango de contribución anual media de aerosol marino a los niveles medios anuales de PM10 y PM2,5 en diferentes zonas de España. Como era de esperar, los niveles de aerosol marino son especialmente reducidos en el interior peninsular (alrededor de 1 µg/m³ en PM10) y se duplican en entornos costeros mediterráneos; se cuadruplican en zonas insulares como Mallorca (4 µg/m³), y en zonas costeras atlánticas insulares pueden alcanzar 11,5 µg/m³, como en la estación de Las Palmas de Gran Canaria. Es necesario considerar que la contribución de aerosol marino en Canarias puede variar mucho, incluso en zonas costeras, dependiendo de su protección o no frente a los vientos. La contribución del aerosol marino en PM10 en las estaciones ubicadas en la costa atlántica es superior a la registrada en las estaciones del Mediterráneo, con niveles de hasta 7 µg/m³ como promedio anual.

Como se aprecia en la Figura 16 (inferior), la contribución en PM2,5 es mucho más reducida que en PM10 con contribuciones de entre 0,5 y 2 µg/m³.

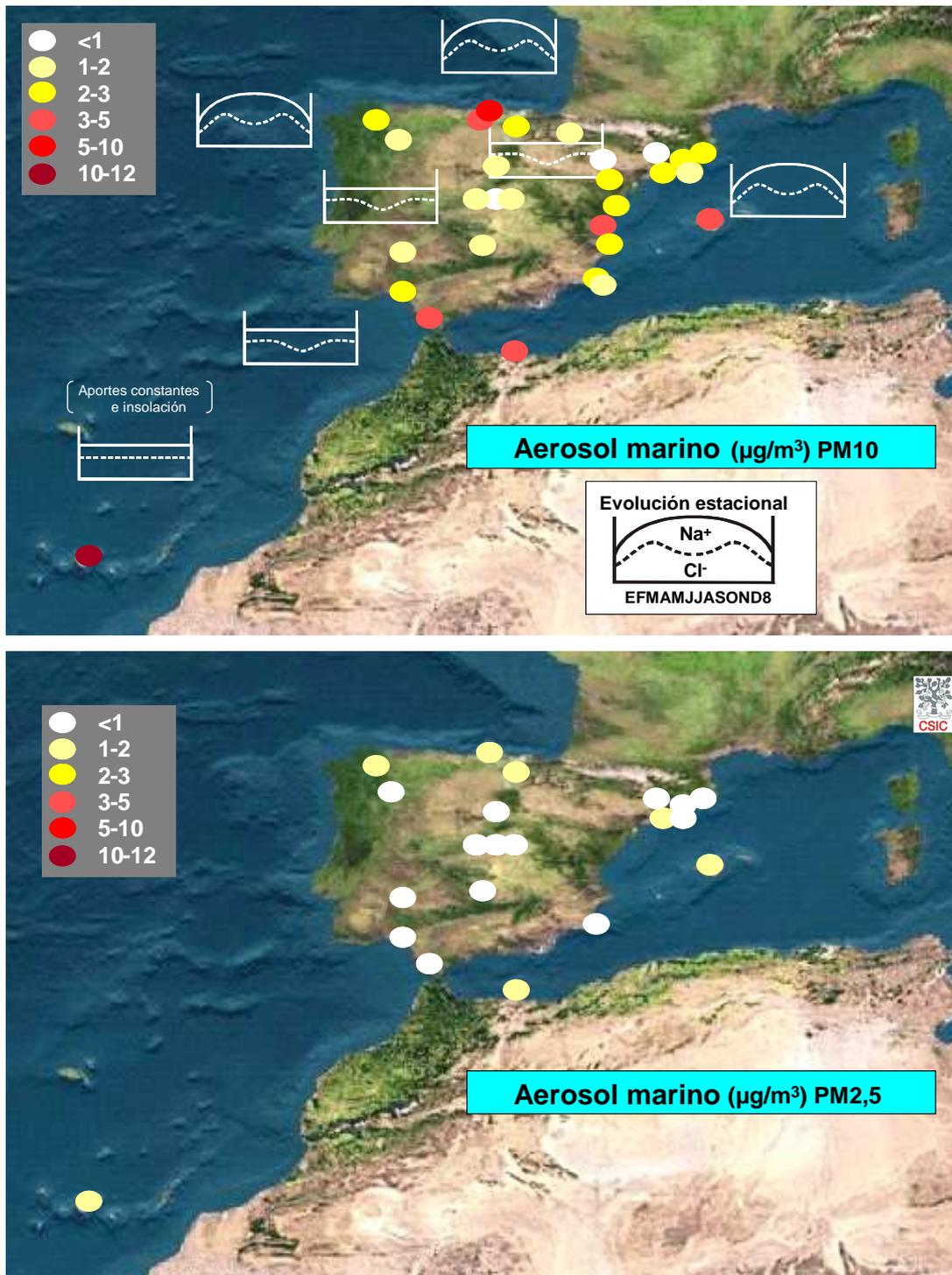


Figura 16. Rango de contribución anual media de aerosol marino a los niveles medios anuales de PM10 y PM2,5 en diferentes zonas de España.

Así pues, de estos datos podemos obtener una orientación sobre las contribuciones anuales medias de aerosol marino a los niveles de PM10 y PM2,5 en aire ambiente en diferentes zonas de España. En una guía específica que está elaborando la CE, se describe la metodología para la cuantificación de las contribuciones diarias. Estas contribuciones son relevantes en los archipiélagos y las cornisas cantábrica y atlántica.

4. AGRADECIMIENTOS

El presente informe ha sido realizado en base a estudios desarrollados en el marco de convenios de colaboración del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino con CSIC, AEMet, CIEMAT, ISCIII, y por el Plan Nacional de I+D del Ministerio de Ciencia e Innovación (CGL2005-03428-C04-03/CLI, CGL2007-62505/CLI, GRACCIE- CSD2007-00067), la Unión Europea (6th framwork CIRCE IP, 036961, EUSAAR RII3-CT-2006-026140); así como entre la Agência Portuguesa do Ambiente y la Universidad Nova de Lisboa. Se agradece a NOAA Air Resources Laboratory (ARL) por las facilidades de uso del modelo HYSPLIT (<http://www.arl.noaa.gov/ready.html>), al NASA/Goddard Space Flight Center (Maryland, USA), al Atmospheric Modelling and Weather Forecasting Group (University of Athens), Centro Nacional de Supercomputación - Barcelona Supercomputing Centre, a Marine Meteorology Division, Naval Research Laboratory (Monterrey, USA) y a SeaWiFS Project (NASA) por la valiosa información suministrada por los mapas TOMS, SKIRON, DREAM y NAAPS y las imágenes de satélite, respectivamente.

5. BIBLIOGRAFIA

Alfaro, S.C., A. Gaudichet, L. Gomes, and M. Maillé (1998). Mineral aerosol production by wind erosion: Aerosol particles sizes and binding energies. *Geophysical Research Letters*, 25 (7), 991-994.

Alpert P, Kishcha P, Shtivelman A, Krichak SO, Joseph JH. (2004). Vertical distribution of Saharan dust based on 2.5-year model predictions. *Atmos. Res.* (2): 109-130.

Andrae MO (1996). Raising dust in the green house. *Nature* 380, 389-390.

Artiñano B., Querol X., Salvador P., Rodriguez S., Alastuey A. (2001). Assessment of airborne particulate matter in Spain in response to the new EU-directive. *Atmospheric Environment*, 35, 1001, S43-S53.

Avila, A., I. Queralt, and M. Alarcón (1997). Mineralogical composition of African dust delivered by red rains over North-Eastern Spain, *Journal of Geophysical Research*, 102, 21977-21996.

Balis DS, Amiridis V, Nickovic S, Papayannis A, Zerefos C. (2004). Optical properties of Saharan dust layers as detected by a Raman lidar at Thessaloniki, Greece. *Geophys.Res. Lett.* 31 (13).

Bergametti G., Dutot A.L., Buat-Menard P. Losno R. and Remoudaki E. (1989). Seasonal variability of the elemental composition of atmospheric aerosols particles over the northwestern Mediterranean. *Tellus*, 41 B, 353-361.

Coudé-Gaussen, G., P. Rognon, G. Bergametti, L. Gomes, B. Strauss, J.M. Gros, and M.N.L. Coustumer (1987). Saharan dust over Fuerteventura Island (Canaries), Chemical and mineralogical characteristics, air mass trajectories and probable sources, *Journal of Geophysical Research*, 92, 9753-9711.

De Tomasi F, Blanco A, Perrone MR. (2003). Raman lidar monitoring of extinction and backscattering of African dust layers and dust characterization. *App. Opt.* 42 (9): 1699-1709.

Draxler, R.R. and Rolph, G.D. (2003). HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

Dubief J. (1979). Review of the North African climate with particular emphasis on the production of eolian dust in the Sahel zone and in the Sahara. In: *Sahara Dust*, C. Morales (Eds.), SCOPE 14, John Wiley & Sons, 27-48.

Duce R.A. (1995). Sources and distributions and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate. In: Charlson R.J. and Heintzenberg J. (Eds.): *Aerosol forcing of climate*. New York, Wiley, 43-72.

EC (2004). Second position paper on particulate matter, CAFÉ Working Group on PM, European Commission. D.G. Environment.

Ehrenberg C.G. (1862). Erläuterungen eines neuen wirklichen Passatstaubes aus dem atlantischen Dunkelmeere vom 29 Okt. 1861. *Monatsber. Kgl. Preuss. Akad. Wiss.*,

Escudero, M., S. Castillo, X. Querol, A. Avila, M. Alarcón, M.M. Viana, A. Alastuey, E. Cuevas, and S. Rodríguez (2005). Wet and dry African dust episodes over Eastern Spain, *Journal of Geophysical Research*, 110 (D18S08), 10.1029. Berlin, 202-224.

Escudero M., Querol X., Pey J., Alastuey A., Pérez N., Ferreira F., Cuevas E., Rodríguez S., Alonso S. A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks. *Atmospheric Environment* 41 (2007) 5516–5524.

IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press.

Pérez C. (2005). *Local to Regional Atmospheric Modeling and Aerosol Lidar Methods in the Mediterranean*. Tesis Doctoral Universidad Politècnica de Catalunya.

Perry, K.D., T.A. Cahill, R.A. Eldred, D.D. Dutcher, and T.E. Gill (1997). Long-range transport of North African dust to the Eastern United States, *Journal of Geophysical Research*, 102, 11225-11238.

Pey J. (2008). *Caracterización físico-química de aerosoles atmosféricos en el Mediterráneo occidental*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya. 389 pp.

Pfefferkorn H.W. (1995). We are temperate climate chauvinists? *Palaios*, 10, 389-391.

Prospero, J.M., Carlson T.N. (1972). Vertical and areal distribution of Saharan dust over the western equatorial North Atlantic Ocean. *J. Geophysical Research*, 77, 5255-5265.

Prospero, J.M. (1996). Saharan dust transport over the North Atlantic ocean and the Mediterranean: an overview, in *The impact of desert dust across the Mediterranean*, edited by S. Guerzoni, and R. Chester, pp. 133-151, Kluwer academic publishing, Dordrecht.

Prospero, J.M. (1999). Long range transport of mineral dust in the global atmosphere: impact of African dust on the environment of the south-eastern United States, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96, 3396-3403.

Prospero, J.M., and T.N. Carlson (1981). Saharan air outbreaks over the tropical North Atlantic, *Pure and Applied Geophysics*, 119, 667-691.

Prospero, J.M., and R.T. Nees (1986). Impact of the North African drought and El Niño on mineral dust in Barbados trade winds, *Nature*, 320, 735-738.

Swap, R., M. Garstang, S. Greco, R. Talbot, and P. Kallberg (1992), Saharan dust in the Amazon basin, *Tellus*, 44 (2), 133-149.

Prospero, J.M., P. Ginoux, O. Torres, S.E. Nicholson, and T.E. Gill (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product, *Reviews of Geophysics*, 40 (1), 2-1:2-31.

Querol, X., Alastuey, A., Puigercus, J.A., Mantilla, E., Miró, J.V., Lopez-Soler, A., Plana, F., Artinano, B. (1998). Seasonal evolution of suspended particles around a large coal-fired power station: Particles levels and sources. *Atmospheric Environment*, 32, 11 1963-1978.

Querol X., Alastuey A., Rodriguez S., Plana F., Mantilla E. and Ruiz C.R. (2001). Monitoring of PM₁₀ and PM_{2.5} ambient air levels around primary anthropogenic emissions. *Atmospheric Environment*, 35, 5 848-858.

Querol X., Alastuey A., Ruiz C.R., Artiñano B., Hansson H.C., Harrison R.M., Buringh E., ten Brink H.M., Lutz M., Bruckmann P., Straehl P., Schneider J. (2004). Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in selected European cities. *Atmospheric Environment*, 38, 6547-6555.

Querol X., Alastuey A., Rodríguez S., Viana M.M., Artiñano, B., Salvador P., Mantilla E., Garcia Do Santos S., Fernandez Patier R., de la Rosa J., Sánchez de la Campa A., Menéndez M. (2004). Levels of PM in rural, urban and industrial sites in Spain. *The Science of Total Environment*. 334-335, 359-376.

Querol X., Alastuey A., Viana M.M., Rodríguez S., Artiñano, B., Salvador P., Garcia Do Santos S., Fernandez Patier R., Ruiz C., de la Rosa J., Sánchez de la Campa A., Menéndez M., Gil J.I. (2004). Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in Spain. *Journal of Aerosol Sciences* 35, 1151–1172.

Querol X., Pey J., Pandolfi M., Alastuey A., Cusack M., Pérez N., Moreno T., Viana M., Mihalopoulos N., Kallos G., Kleanthous S. (2009). African dust contributions to mean ambient PM₁₀ levels across the Mediterranean Basin. *Atmospheric Environment* 43, 28, 4266-4277.

Rodriguez S., Querol X., Alastuey A., Kallos G. And Kakaliagou O. (2001). Saharan dust contribution to PM₁₀ and TSP levels in Southern and Eastern Spain. *Atmospheric Environment*. 35/14, 2433-2447.

Rua A, Hernandez E, Parras J, Martin I (1998). Sources of SO₂, SO₄-2, NO_x and NO₃- in the air of four Spanish remote stations. *Journal of Air & Waste Management Association*, 48, 838-845.

Swap, R., M. Garstang, S. Greco, R. Talbot, and P. Kallberg (1992). Saharan dust in the Amazon basin, *Tellus*, 44 (2), 133-149.

Viana, M., X. Querol, A. Alastuey, E. Cuevas, and S. Rodríguez (2002). Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network, *Atmospheric Environment*, 36, 5861-5875.

WHO (2003). Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide, World Health Organization, Bonn, Germany.

Zender C., Newman D., and Torres O. (2003). The mineral Dust Entrainment And Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology *J. Geophys. Res.*, 108, D14, 4416, doi:10.1029/2002JD002775.

Ziegler A.M., Raymond A., Gierlowski T.C., Horrell M.A., Rowley D.B., Lottes A.L. (1987). Coal, climate and terrestrial productivity. The present and Early Cretaceous compared. *Geological Soc. London. Sepec. Publ.* 32, 25-49.