



UNIVERSITAS
Miguel Hernández

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Facultad de Ciencias Experimentales

Curso académico 2018-2019

TRABAJO FIN DE GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

DETERMINACIÓN DE PATRONES METEOROLÓGICOS QUE PROPICIAN INTRUSIONES DE POLVO SAHARIANO EN LA COMUNIDAD VALENCIANA Y LA INFLUENCIA DE ÉSTAS SOBRE EL PM₁₀

Autora: Ariadna Huerta Viso



CIENCIAS AMBIENTALES
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

Tutor: Nicolás Aguilera, José Francisco
Departamento de Física Aplicada
(Área de Física Aplicada)

Resumen

Con el objetivo de caracterizar los diferentes escenarios meteorológicos que propician entradas de aire sahariano en la Comunidad Valenciana, se ha realizado un análisis de todos estos eventos africanos registrados entre 2014-2017 en la estación de fondo regional localizada en Caudete de las Fuentes (Valencia). Un total de 362 días con influencia sahariana fueron determinados (~95 días/año), presentando éstos una mayor frecuencia durante los meses estivales. El porcentaje que representa el aporte másico sahariano a los valores de PM₁₀ se mantuvo bastante constante a lo largo del año. La contribución media de polvo sahariano durante el periodo de estudio fue de 3.3 µg/m³, lo cual implica un aporte del 23.2% al valor medio global de PM₁₀. Se identificaron, utilizando el análisis cluster, un total de 5 patrones meteorológicos bajo los cuales se produce la entrada de las masas de aire procedentes del desierto del Sahara a la Comunidad Valenciana. De ellos, fue el patrón caracterizado por una alta presión en el norte de Argelia en combinación con el anticiclón de las Azores el que mayor influencia presentó en la Comunidad Valenciana. Este escenario tuvo lugar fundamentalmente durante el verano.

Abstract

African episodes that took place in a regional background station located in 'Caudete de las Fuentes' (Valencia) between 2014-2017 were analysed in order to characterize the different meteorological scenarios that bring about Saharan dust outbreaks in the Valencian Community. An overall of 362 days (~95 days/year) under African influence were determined, depicting a higher frequency during summer months. A similar percentage of dust contribution to PM₁₀ values was registered throughout the year. Saharan dust contribution during the study period was 3.3 µg/m³ accounting for 23.2% to the global PM₁₀ mean value. Five meteorological circulation types that cause the transport of African air masses to the Valencian Community were obtained by means of Cluster Analysis. Our findings point out that the higher impact, both in terms of intensity and frequency, was produced by a circulation pattern characterized by a high pressure in the north of Argelia along with other in the Azores islands. This meteorological pattern took place mainly during summertime.

Palabras clave

PM₁₀, polvo mineral, estación de fondo regional, escenario meteorológico, Intrusión Sahariana.

Keywords

PM₁₀, mineral dust, regional background site, meteorological scenario, Saharan dust outbreak.

Índice

1. Introducción	3
1.1 Niveles de PM ₁₀ en estaciones de fondo regional.....	4
1.2 Descripción de las IPS.....	6
1.2.1 Regiones fuente e inyección vertical de polvo mineral.....	6
1.2.2 Patrones de circulación atmosférica y estacionalidad	7
1.3 Obtención del aporte de las IPS a los niveles de PM ₁₀	10
2. Objetivos	12
3. Metodología	13
3.1 Caracterización espaciotemporal del estudio	13
3.2 Procedimiento utilizado para determinar las IPS.....	14
3.3 Metodología utilizada para determinar el aporte de las IPS al PM ₁₀	17
3.4 Obtención de patrones de circulación mediante el Análisis Cluster.....	20
4. Resultados y discusión	22
4.1 PM ₁₀ : concentración y estacionalidad.....	22
4.2 IPS: aporte másico a la concentración de PM ₁₀	24
4.3 Patrones atmosféricos que propician IPS en la Comunidad Valenciana.....	26
4.4 Caracterización de los aportes al PM ₁₀ según el escenario meteorológico	29
5. Conclusiones.....	32
6. Perspectiva futura.....	33
7. Bibliografía	34

1. Introducción

La materia mineral es uno de los componentes principales del material particulado atmosférico (PM) y puede llegar a constituir hasta el 35% de su masa total (IPCC, 2013). Este constituyente suele distribuirse en tamaños de partícula relativamente grandes por lo que su concentración en la fracción PM_{10} (PM con diámetro aerodinámico $<10 \mu m$) es mayor que la registrada en otras fracciones másicas como el $PM_{2.5}$ o el PM_1 .

La gran extensión desértica del Sáhara constituye la mayor fuente de emisión de partículas compuestas de materia mineral (polvo mineral) liberadas a la atmósfera en todo el mundo (Prospero et al., 2002). Determinados patrones meteorológicos a escala sinóptica son los causantes de que grandes cantidades de este tipo de partículas procedentes del norte de África sean transportadas largas distancias hasta alcanzar países ubicados en la cuenca mediterránea (ver figura 1), o incluso, aunque con menor frecuencia, a países europeos localizados a mayores latitudes (Querol et al., 2009; Pey et al., 2013). Los episodios de transporte de polvo norteafricano presentan cierta estacionalidad, así pues, su contribución al PM de un determinado enclave afectado por este tipo de eventos puede ser variable en función de la época del año. Varios trabajos realizados en España (Rodríguez et al., 2001; Viana et al., 2003; Escudero et al., 2005; Querol et al., 2009; Salvador et al., 2013, 2014) han caracterizado dichos episodios analizando cuáles son los patrones sinópticos que potencian estas intrusiones, cuál es su frecuencia o cuál es el impacto sobre los niveles de PM.

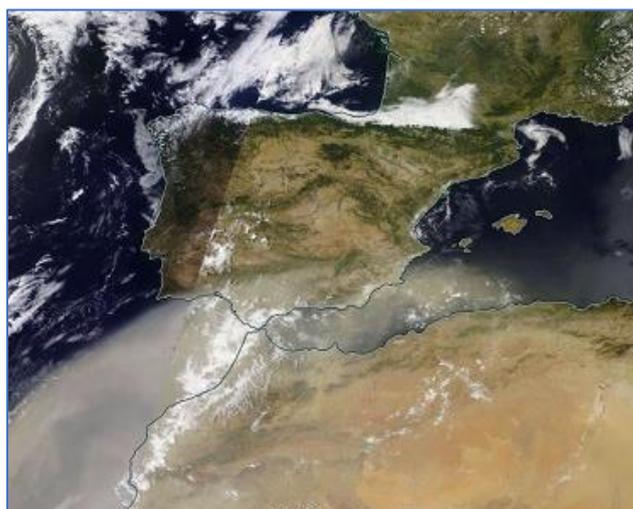


Figura 1. Episodio de intrusión sahariana sobre el sur de la Península Ibérica (Foto de satélite procedente del programa de ciencias de la Tierra de la NASA SeaWifs).

La mayor sensibilidad actual en aspectos relacionados con la calidad del aire y el cambio climático por parte de la comunidad científica se ha manifestado en las últimas décadas con el desarrollo de múltiples estudios sobre el impacto provocado por las intrusiones de polvo sahariano (IPS) en áreas sensibles a este tipo de transporte como pueden ser los países de la cuenca Mediterránea. En este sentido, determinados trabajos (Escudero et al., 2007; Querol et al., 2010; Salvador et al., 2013) demuestran que un gran porcentaje (entorno al 90%) de las ocasiones en las que se supera el valor límite diario (VLD) de PM_{10} establecido por la legislación europea ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con un máximo de 35 veces al año) en estas áreas geográficas por causas naturales se deben a la contribución másica proporcionada por las IPS. Debemos indicar que las superaciones del VLD debidas a causas naturales pueden ser descontadas previa validación científica (artículo 20 de la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo).

Por otro lado, estudios sobre la influencia del polvo mineral sobre el clima, muestran un ligero efecto neto de enfriamiento por parte de este si bien el nivel de incertidumbre en este sentido es bastante elevado. En concreto el forzamiento radiativo directo asociado al polvo mineral varía entre -0.3 y $+0.1 \text{ W}/\text{m}^2$ a escala global (IPCC, 2013) aunque a escala local los efectos pueden ser mucho mayores, sobre todo cerca de las regiones fuente emisoras (García et al., 2011).

1.1 Niveles de PM_{10} en estaciones de fondo regional

Existen varios tipos de estaciones de muestreo para la obtención de parámetros relativos a la calidad del aire (entre ellos el PM_{10}) dependiendo del tipo de ambiente que se desee caracterizar, p.ej. estaciones de tipo industrial, de tráfico, urbanas o regionales. Si el objetivo de un estudio es la obtención de valores de fondo de PM, las estaciones de tipo regional/rural (situadas en zonas alejadas de fuentes de emisión antropogénicas y por lo general a cierta altura sobre el nivel del mar) son las idóneas. Debido a su localización apartada de núcleos poblacionales, este tipo de estaciones son también eficaces para el análisis de la contribución de fuentes naturales de partículas a los valores de PM registrados. Este puede ser el caso de las IPS entendidas como fuente de partículas de carácter predominantemente natural. La eficacia de este tipo de estaciones de monitoreo a la hora de discriminar fuentes de partículas naturales se basa en que las posibles interferencias de otro tipo de fuentes de carácter antrópico son mucho menores que las existentes en otros tipos de estaciones.

Teniendo en cuenta las consideraciones expuestas anteriormente, el estudio de la fracción PM_{10} en entornos regionales pasa por ser la mejor opción a la hora de analizar las contribuciones y efectos de las IPS en localizaciones de la cuenca mediterránea (Contini et al., 2014; Brattich et al., 2015).

Una singularidad que identifica al PM₁₀ registrado en estaciones rurales es su evolución estacional. En este sentido, un amplio máximo de concentración suele presentarse en los meses más cálidos del año (ver figura 2a) y uno algo inferior durante el invierno. En contraposición, las estaciones urbanas presentan el máximo invernal con mayor concentración que el estival. Los máximos estivales están más relacionados por lo general con procesos de tipo natural (aumento del aerosol marino, mayor acción fotoquímica, mayor frecuencia de IPS...). Por lo general, los valores elevados obtenidos durante los meses los inviernos son producidos en muchos casos por acumulaciones de PM debidas a episodios de gran estabilidad atmosférica.

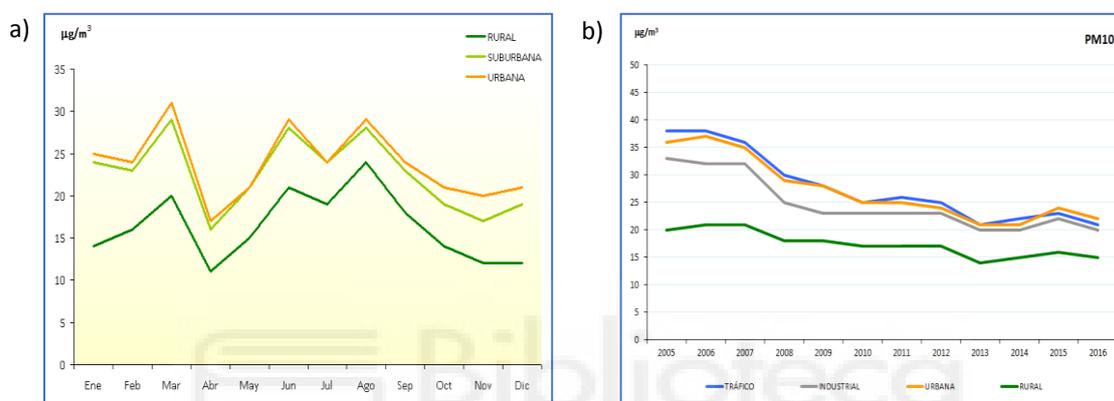


Figura 2. a) Evolución de las medias mensuales de PM₁₀ en 2012 por tipo área. (Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPAMA)); b) Evolución de las medias anuales de PM₁₀ (2005-2016) por tipo de estación (Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO)).

Por otra parte, es conveniente recordar que en la mayoría de las ocasiones que en una estación de fondo regional se supera el VLD establecido de PM₁₀ es debido al impacto de IPS. En Querol et al., 2009, se puede consultar el número de superaciones anuales del VLD debidas a IPS en estaciones de fondo regional ubicadas a lo largo de toda la cuenca Mediterránea desde España hasta Turquía.

En el contexto de la Comunidad Valenciana (CV) cabe indicar que cuenta con diez estaciones fijas de fondo regional ubicadas en las provincias de Castellón y Valencia. Las estaciones están localizadas tanto en áreas cercanas a la costa ($d < 15$ km) (3) como en el interior (7). La mitad de ellas están situadas a alturas superiores a los 350 m sobre el nivel del mar. Las concentraciones medias anuales de PM₁₀ registradas en este tipo de estaciones en la CV suelen oscilar entre los 14 y los 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Santos, 2015). Estos valores son ~30% inferiores a los registrados en estaciones de monitoreo urbano.

Generalizando para toda España, este tipo de estaciones presentan en los últimos años ligeras tendencias de decrecimiento en cuanto a valores de concentración, aunque no tan acusadas como las presentadas por estaciones urbanas o de tráfico (ver figura 2b).

1.2 Descripción de las IPS

1.2.1 Regiones fuente e inyección vertical de polvo mineral

Antes de analizar la frecuencia estacional y el impacto que las IPS presentan en un determinado enclave, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos: a) la existencia de mecanismos de inyección vertical en las áreas fuente, y b) las situaciones meteorológicas que favorecen el transporte, en este caso hacia la cuenca mediterránea (Querol et al., 2010). Además, se debe considerar la posible variación geográfica de la región emisora de polvo mineral a lo largo del año. La figura 3a presenta distintas regiones fuente de polvo mineral en el norte de África junto con las distintas trayectorias que el PM emitido puede seguir en función de los diversos patrones sinópticos (Klose et al., 2009). La figura 3a indica que únicamente un 15% del PM sahariano llega al Mediterráneo, mientras que la cantidad de PM que se dirige al océano Atlántico (llegando incluso a alcanzar las costas americanas) es justamente el doble.

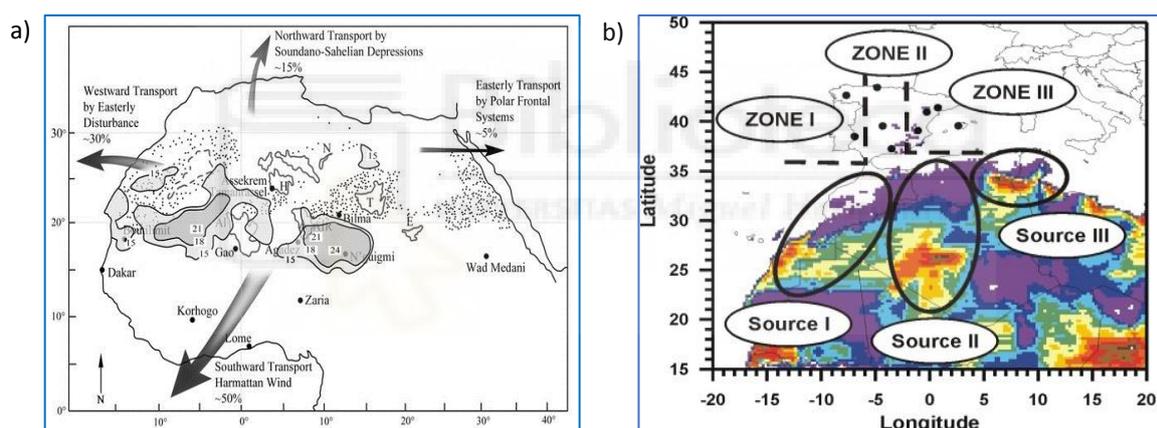


Figura 3. a) Principales áreas fuente y rutas del polvo sahariano. b) Principales regiones fuente de polvo sahariano cuyo destino principal es el mediterráneo occidental.

Por su parte en la figura 3b se puede apreciar las tres principales regiones fuente de donde procede el material mineral que llega a la Península Ibérica (Salvador et al., 2014). La primera zona la comprende la región oeste del Sáhara y el territorio de Marruecos, la segunda se localiza en Argelia y la última comprende parte del noroeste de Argelia y Túnez.

En cuanto a los mecanismos de inyección vertical, indicar que se requiere inicialmente de procesos de resuspensión masiva de PM provocados por la acumulación de grandes cantidades de polvo, inducida a su vez por la erosión de zonas áridas en épocas de lluvia torrencial (Próspero, 2002). El norte de África posee zonas desérticas calientes que se consolidan como escenarios muy favorables para que ocurra este fenómeno. Con esto, el desierto del Sáhara es un ejemplo típico donde la lluvia es

extremadamente escasa, las temperaturas estivales son muy altas y la humedad relativa extremadamente baja. Este desierto experimenta una insolación constante de la superficie durante el desarrollo del día que provoca fuertes turbulencias térmicas verticales, pudiendo suponer ascensos de hasta los 4-5 Km de altura. Además, durante la noche, inversiones térmicas dan lugar a fenómenos de gran estabilidad. Esta alternancia día-noche impide que las partículas resuspendidas e inyectadas en capas altas sedimenten, alcanzando periodos de residencia atmosférica de semanas o meses (Querol et al., 2010). Cuando estas inyecciones de polvo a la atmósfera, provocadas por procesos convectivos se combinan con escenarios meteorológicos específicos, se produce el transporte de PM resuspendido a largas distancias. El transporte a largas distancias del PM resuspendido se produce sobre el sur del continente europeo principalmente en la troposfera libre, viéndose favorecido por el aumento de la velocidad del viento con la altura y la menor incidencia en altura de los procesos de lavado de las masas de aire.

1.2.2 Patrones de circulación atmosférica y estacionalidad

La localización geográfica de la región fuente y la estación del año en la que las IPS producen su impacto son dos variables relacionadas con los diferentes patrones sinópticos de presiones que propician la llegada a la Península Ibérica del polvo sahariano.

Varios estudios han identificado cuáles son estos patrones meteorológicos (Alonso-Pérez et al., 2011; Salvador et al., 2013, 2014). Así, por ejemplo, utilizando el Análisis Cluster (AC) se han determinado cuáles son los patrones meteorológicos predominantes según la estación del año que provocan IPS en el centro de la Península (Salvador et al., 2013) y en su totalidad (Salvador et al., 2014). En ambos casos se estipularon para una altura geopotencial de 850 hPa. La figura 4 extraída de Salvador et al., 2013 muestra a modo de ejemplo cuáles son los principales escenarios meteorológicos que determinan el recorrido propicio para la llegada de polvo mineral en función de la estación del año a la capital de España. La figura también indica el sentido de giro de las masas de aire tanto para las situaciones ciclónicas (L) como anticiclónicas (H).

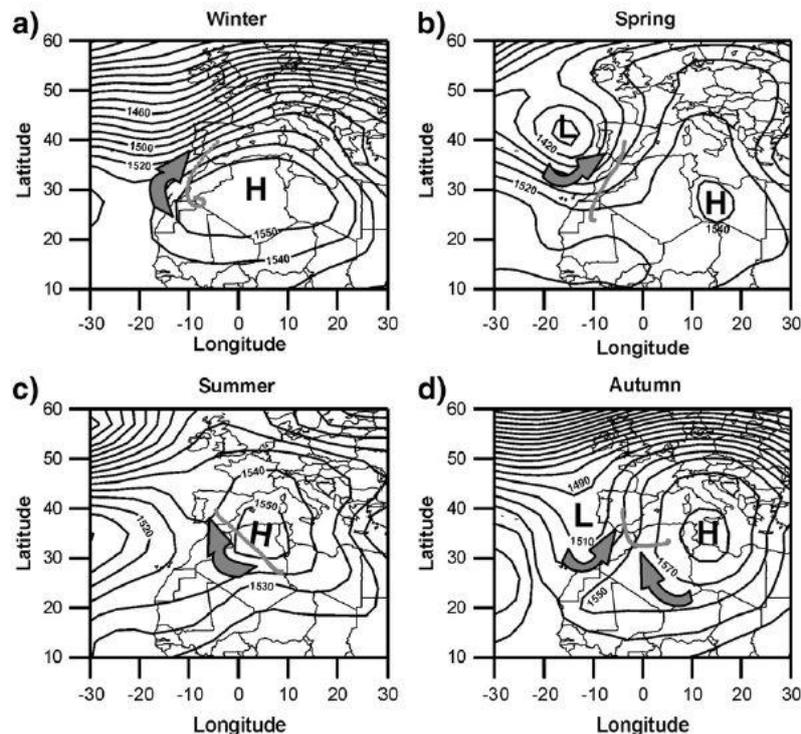


Figura 4. Clusters obtenidos para alturas geopotenciales de 850 hPa que propician entradas de aire norteafricano sobre Madrid durante el invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) a las 12:00 UTC.

De forma general, y extendiendo el área de estudio a toda España, podemos establecer cuatro tipos de circulación diferentes obtenidas a una altura geopotencial de 850 hPa (Salvador et al., 2014):

- El primer tipo de patrón meteorológico (P1) lo conforma una baja presión relativa situada en el oeste o suroeste de la Península junto con una alta presión localizada en el norte de Argelia. Este escenario se suele dar predominantemente en verano y provoca los episodios más intensos en la parte oeste de la Península. Las regiones fuente para esta circulación se localizan en el oeste del Sahara, el sur de Marruecos y Túnez.
- El segundo escenario sinóptico (P2) es una variación del anterior en el que el anticiclón se desplaza hacia el este y la baja presión al oeste. Suele darse en primavera y verano y la región fuente predominante en este caso es el norte de Argelia.
- La combinación de un fuerte anticiclón sobre el este de Argelia y Libia junto con un longitudinal gradiente bórico longitudinal producido por una fuerte borrasca localizada alrededor de Islandia además de un débil anticiclón en las Azores constituye el tercer patrón (P3). P3 se da predominantemente durante la primavera y con menor frecuencia durante el invierno. La región fuente, en este caso, se ubica en el oeste del Sahara y el sureste de Marruecos. Es el patrón que tiene lugar con una menor frecuencia, apenas el 12% de las veces, mientras que el resto de patrones se suelen dar con una frecuencia similar.

- Por último, el desarrollo de un intenso anticiclón en el noreste de Argelia y Túnez constituye el cuarto escenario (P4). La principal región fuente en este caso es Argelia y se da con mayor frecuencia en verano y otoño. Este patrón origina intensos episodios sobre la parte central y este de la Península.

No obstante, algún otro escenario meteorológico similar o derivado de los anteriores puede dar lugar a entradas de PM sahariano a la Península como es el caso del ejemplo mostrado en la figura 5. El modelo BSC/DREAM8b empleado en la figura 5 y para el desarrollo de este trabajo será comentado en el apartado de metodología.

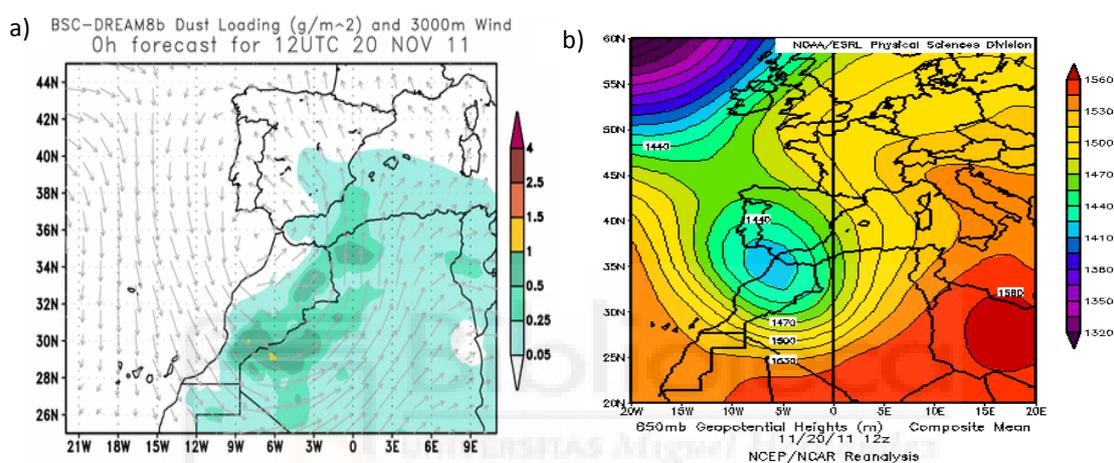


Figura 5. a) Entrada de polvo sahariano por el este de la Península Ibérica; b) Patrón sinóptico de presiones a una altura geopotencial de 850 hPa que propicia la intrusión.

La figura 5 ilustra la entrada de polvo sahariano mediante la utilización de un modelo atmosférico que simula la entrada de polvo mineral en el levante español junto con un mapa de presiones a 850 hPa que propicia el movimiento de las masas de aire. En este caso es una baja presión centrada en el golfo de Cádiz la causante principal de la entrada de materia mineral.

Los mapas de presión pueden obtenerse para cualquier día y hora de forma individual a partir de determinadas páginas web especializadas. No obstante, la agrupación de estos en grupos homogéneos que definen las distintas formas de entrada del material sahariano debidas a determinadas circulaciones atmosféricas requiere de metodologías específicas. Una de las más empleadas es el análisis cluster. Esta técnica multivariante que es la empleada en este trabajo será explicada en la sección metodológica.

El transporte de PM sahariano suele presentar un marcado componente estacional presentando en el mediterráneo occidental un máximo en los meses más cálidos (ver figura 6) debido a la intensa insolación que inyecta la materia particulada en la troposfera media (Escudero et al., 2005; Querol et

al., 2009; Pey et al., 2013). La figura 6 presenta la distribución mensual del número de días bajo influencia sahariana que tiene lugar en distintas áreas geográficas españolas. La distribución es la obtenida únicamente para el año 2012. Aunque el perfil temporal anual en general suele no variar, cada año analizado puede tener características de distribución diferentes. La región denominada “Este” corresponde con la localización geográfica de la CV. Como puede apreciarse, en general la frecuencia de episodios es claramente superior durante los meses estivales y presenta un mínimo durante los meses de invierno. Por otra parte, también puede apreciarse cómo las Islas Canarias están prácticamente todo el año influenciadas por este tipo de episodios.

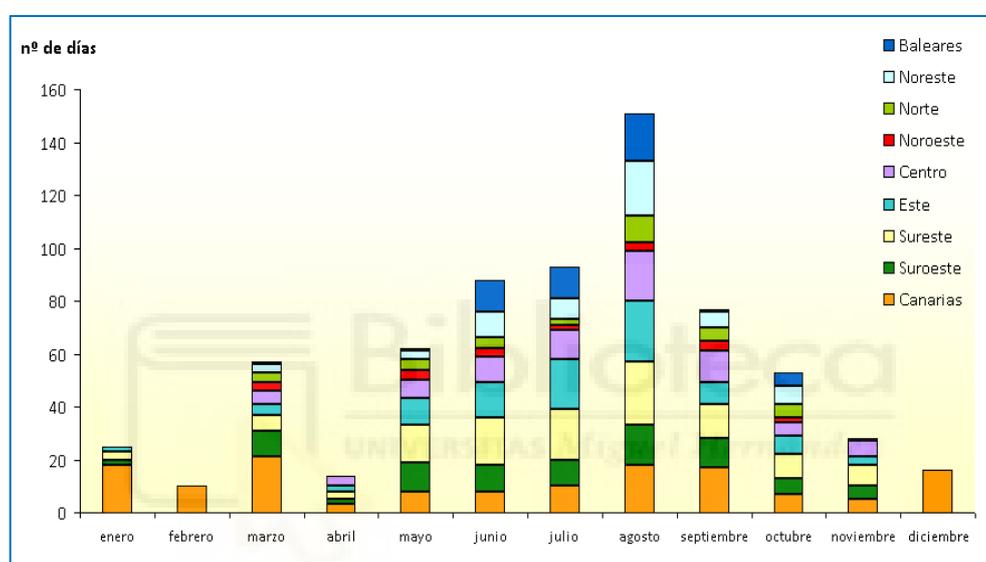


Figura 6. Distribución mensual del número de días “africanos” según las diferentes regiones consideradas en 2012 (Fuente: MAPAMA.)

Aproximadamente para el conjunto de España se establecen alrededor de unos 145 días con influencia Sahariana (Salvador et al., 2014). No obstante, la frecuencia de estos disminuye conforme más al norte de la Península nos encontremos.

1.3 Obtención del aporte de las IPS a los niveles de PM₁₀

Existen diversos métodos para la obtención de la contribución a los niveles del PM₁₀ provocado por las partículas de polvo procedentes del norte de África. Métodos de carácter predominantemente químico analizan la composición química de las muestras de PM₁₀, identificando las especies presentes en la misma. Conociendo los componentes químicos que conforman el PM₁₀ procedente del Sáhara, se discrimina la carga mineral aportada por la IPS.

Los métodos químico-matemáticos aplican sobre los elementos/compuestos químicos obtenidos técnicas estadísticas multivariantes como la 'Positive Matrix Factorization' (PMF) o el análisis de componentes principales (ACP) obteniendo así las contribuciones másicas de las distintas fuentes emisoras de PM entre las que se encuentra la fuente sahariana. En este sentido, Nicolás et al., 2008 obtuvieron una contribución del 7% debida al polvo africano en los niveles de PM_{10} registrados en la ciudad de Elche.

El método estadístico denominado del Percentil 40 (P40) (Escudero et al., 2007; Pey 2007), también es utilizado para determinar la contribución másica de las intrusiones a los niveles de PM_{10} . Este método cuenta con la ventaja de no necesitar el previo análisis químico de las muestras, pero a cambio con él no se puede obtener el perfil químico de fuentes emisoras. La aplicación de este método requiere datos continuos diarios de PM_{10} proporcionados por estaciones de fondo regional. El procedimiento de obtención del aporte sahariano mediante la utilización de este método será explicado en la sección de metodología.

Una caracterización de estas contribuciones para toda España puede verse en la figura 7.

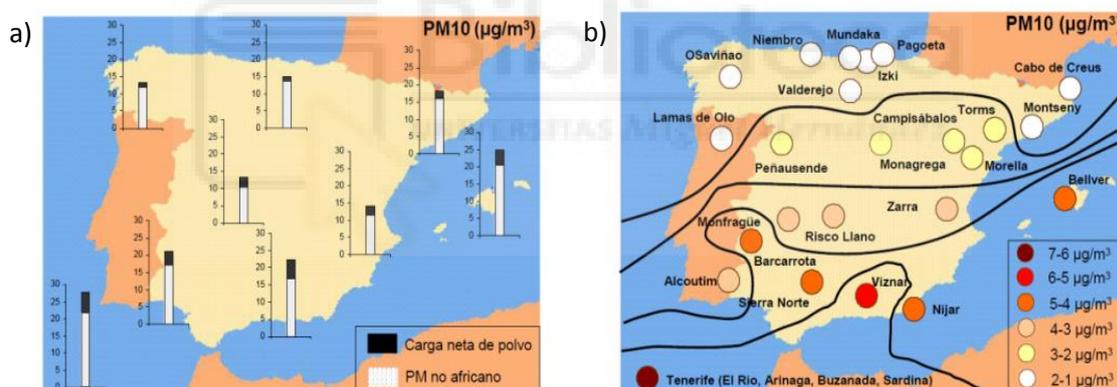


Figura 7. a) Niveles medios anuales de PM_{10} y contribución africana; b) Cargas netas de PM_{10} en estaciones de fondo regional debidas a las intrusiones (Fuente: Querol et al., 2010).

La figura 7a muestra los niveles medios anuales de PM_{10} registrados en estaciones de fondo regional y su correspondiente contribución africana. La figura 7b, por su parte, presenta el gradiente negativo de esta aportación conforme aumentamos la latitud geográfica. Para el caso concreto de la CV, podemos observar de forma aproximada una contribución mineral norteafricana de entre 3 y 4 $\mu g/m^3$, lo cual representa en torno al 20-30% del valor medio anual de PM_{10} . Las contribuciones para diversas estaciones de fondo regional ubicadas a lo largo de toda la cuenca mediterránea se pueden encontrar en Querol et al., 2009.

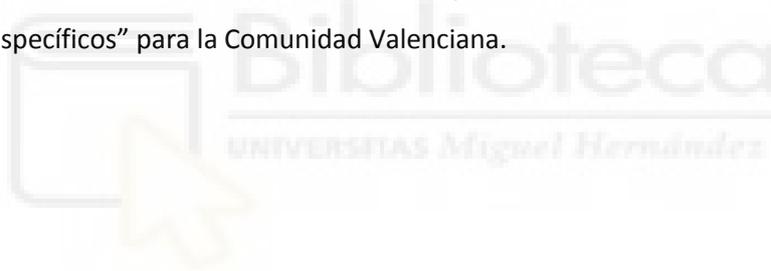
2. Objetivos

El presente estudio tiene un objetivo principal: la determinación de patrones meteorológicos sinópticos que propician intrusiones de polvo sahariano en la Comunidad Valenciana.

La consecución de este objetivo conlleva a su vez el desarrollo de dos objetivos complementarios:

- la cuantificación del aporte másico de las partículas de origen sahariano en los niveles de PM_{10} registrados.
- la determinación de la estacionalidad de cada patrón de circulación atmosférico obtenido. Al mismo tiempo se determinará para cada escenario meteorológico obtenido cuál es su impacto en los valores de PM_{10} .

Otros trabajos con objetivos y metodologías similares a los aquí mostrados ya han reportado cuáles son los patrones meteorológicos de presión que favorecen entradas de aire sahariano, pero lo han hecho bien para el conjunto peninsular o bien para áreas concretas como puede ser la Comunidad de Madrid o las Islas Canarias. La motivación de este trabajo radica en la obtención de unos escenarios meteorológicos “específicos” para la Comunidad Valenciana.



3. Metodología

3.1 Caracterización espacio-temporal del estudio

La estación de fondo regional “Caudete de las Fuentes” ($1^{\circ} 16' 43''$ O; $39^{\circ} 33' 30''$ N; 794 msnm) es el enclave elegido para la realización de este estudio. La estación está emplazada en la localidad del mismo nombre, perteneciente a la comarca de Utiel-Requena situada al oeste de la provincia de Valencia (figura 8).

La elección de esta estación radica en su condición de estación de fondo regional y su apreciable altura sobre el nivel del mar, ambas características hacen que sea considerablemente sensible a las IPS. Además, esta estación está bastante apartada de fuentes de emisión antropogénica, por lo que se evitan posibles interferencias debidas al desarrollo de actividades humanas (tráfico rodado fundamentalmente).



Figura 8. Ubicación del punto de muestreo en la cuenca mediterránea occidental.

El este estudio estadístico realizado por Santos, (2015) indica que la estación de Caudete de las Fuentes constituye una localización representativa del conjunto de estaciones de fondo regional de la CV a la hora de caracterizar los valores de PM_{10} y además la estación por su altitud muestra gran sensibilidad a la hora de revelar el paso de masas de aire sahariano.

El periodo de tiempo seleccionado abarca desde el año 2014 hasta el 2017, ambos inclusive. Este amplio periodo temporal se debe a dos razones principales. Por un lado, la aplicación de los métodos estadísticos presentes en este estudio requiere de un número elevado de datos para la obtención de resultados fiables. Por otra parte, la obtención de conclusiones representativas y lo más generalistas posibles invita a que el periodo de análisis sea ampliamente extendido en el tiempo para evitar en la medida de lo posible situaciones particulares poco representativas.

Debemos indicar que durante el desarrollo del trabajo se ha considerado como estación invernal la comprendida entre los meses de enero a marzo, primavera (abril-junio), verano (julio-septiembre) y finalmente otoño (octubre-diciembre).

3.2 Procedimiento utilizado para determinar las IPS

Para la identificación de los episodios de intrusión se ha consultado la base de datos del proyecto Calima (Caracterización de Aerosoles originados por Intrusiones de Masas de aire Africanas). Este proyecto es promovido y financiado por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO). En la base de datos citada encontramos boletines que recogen la predicción y los datos históricos no solo de episodios africanos, sino también de episodios de combustión de biomasa (incendios forestales) y transporte de masas de aire cargadas de sulfatos procedentes del Norte de Europa. Todos estos distintos episodios pueden afectar en mayor o menor medida a los niveles de PM. Debido a que el impacto puede variar ostensiblemente según la localización geográfica, la base informativa es estructurada en diversas regiones. En nuestro caso la CV corresponde con la región denominada “Levante”. La página web para acceder al proyecto Calima es: www.calima.ws.

La figura 9 muestra a modo de ejemplo la información disponible al consultar uno de estos boletines referentes a datos históricos, en este caso para el mes de marzo de 2017. La tabla incluye por regiones geográficas los días que tuvieron lugar los distintos episodios.

MARZO 2017									
	CANARIAS	SUROESTE	SURESTE	LEVANTE	CENTRO	NOROESTE	NORTE	NORESTE	BALEARES
COMBUSTIÓN BIOMASA		12-13 15 17 20	12 15 20 31	3 10 12-15 17 20	2 8-9 11-17 19-20	9-13 15-20	2 9 11-12 15-17 20 29-31	3-4 8 11-12 15 17-20 30-31	12-15
EUROPEO SULFATOS									
AFRICANOS	1-2 6-13 17-21 30-31	11-12 15-20 31	3 12 15-20 26 30-31	20 26-27 31	3 11-12 18-21 30-31	10-11			18-23

Figura 9. Ejemplo de la información recogida en los boletines nacionales para el mes de marzo de 2017. Fuente: Proyecto Calima (MITECO).

De estos boletines se han extraído los datos históricos de los cuatro años de estudio referentes a los episodios “Africanos” en la zona de “Levante”, por encontrarse Caudete de las Fuentes en esta región. La recopilación de esta información se muestra en la tabla 1. Esta presenta un resumen de los periodos temporales en los que la CV estuvo bajo la influencia de IPS en función de la estación del año. Entre paréntesis se representa el número de días de duración de cada episodio africano. Se indica también el nº de episodios y días registrados para cada año de estudio.

Tabla 1. Tiempo y duración de las IPS registradas durante los cuatro años de estudio en la CV.

	2014	2015	2016	2017
INVIERNO	15-18/02 (4)	15/01 (1)	24/01 (1)	3/01 (1)
	24/02 (1)	9/02 (1)	27-28/01 (2)	1/02 (1)
	11/03 (1)	11-12/02 (2)	21-24/02 (4)	11-13/02 (3)
	15/03 (1)	19-22/03 (4)	30-31/03 (2)	15-19/02 (5)
	18-22/03 (5)			22-24/02 (3)
				26-27/02 (2)
				3/03 (1)
				12/03 (1)
				14/03 (1)
				19-20/03 (2)
				26-27/03 (2)
			31/03 (1)	
PRIMAVERA	29/03 - 3/04 (6)	10-17/04 (8)	6/04 (1)	14-19/04 (6)
	10-19/04 (10)	23-25/04 (3)	15/04 (1)	24-26/04 (3)
	7/05 (1)	3-4/05 (2)	6/05 (1)	4-5/05 (2)
	20-21/05 (2)	12-14/05 (3)	10/05 (1)	22/05 - 4/06 (14)
	6-10/06 (5)	10-13/06 (4)	24-28/05 (5)	9-18/06 (10)
	12-13/06 (2)	22-23/06 (2)	7-10/06 (4)	22-27/06 (6)
	23/06 (1)			
VERANO	2-4/07 (3)	1-20/07 (20)	24/06-12/07 (19)	5-18/07 (14)
	16-19/07 (4)	22/07 (1)	19-23/07 (5)	21-23/07 (3)
	27-28/07 (2)	29-31/07 (3)	29/07 - 5/08 (8)	25/07 (1)
	18-19/08 (2)	2-13/08 (12)	16-20/08 (5)	30/07 - 8/08 (10)
	3/09 (1)	30/08 - 3/09 (5)	27/08 - 8/09 (13)	15/08 - 1/09 (18)
	21-22/09 (2)	21-22/09 (2)		25/09 (1)
OTOÑO	29/09 - 2/10 (4)	4-5/10 (2)	3-9/10 (7)	18/10 (1)
	7-8/10 (2)	4-6/12 (3)	17-18/10 (2)	3-4/11 (2)
	19-20/10 (2)	14-25/12 (12)	24-28/10 (5)	23-25/11 (3)
	27-31/10 (5)	28-29/12 (2)	2-4/11 (3)	
	20-26/11 (7)		26-28/11 (3)	
	28/11 - 1/12 (4)			
	14/12 (1)			
	28/12 (1)			
GLOBAL	26 (79)	20 (92)	20 (92)	27 (117)

Es llamativo ver cómo teniendo casi el mismo número de episodios los años 2014 y 2017, el número de días de intrusión es un ~32% superior en 2017. Debido a ello la duración temporal de las IPS que tuvieron lugar durante este año es notablemente superior a la registrada durante 2014. La media global de episodios para los cuatro años es de ~23 episodios/año y respecto del nº de días ~ 95 días/año. Este último dato implica que en promedio un 26% de los días del año la CV está bajo la influencia de IPS.

En términos generales también podemos apreciar de la tabla 1 que la duración de los episodios durante el verano es ostensiblemente superior a la duración de las IPS registradas durante el invierno.

En el proceso de identificación de estas intrusiones presentadas por la base Calima se emplean diversos modelos de carácter predictivo que detectan las intrusiones mediante el visionado y posterior análisis de imágenes de satélite y mapas meteorológicos. Estos sistemas han contribuido enormemente a un mejor conocimiento de los fenómenos atmosféricos y a la estimación de su magnitud a distintas escalas, sirviendo de apoyo para su determinación y para la corroboración de los episodios. Como ejemplo de algunos de los modelos más utilizados por la base Calima, debemos citar los modelos NAAPS, BSC/DREAM8b y SKIRON. El sistema NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System-www.nrlmry.navy.mil/aerosol/), es un sistema global de modelado (figura 10a) que pronostica las concentraciones de aerosoles de sulfato, polvo mineral y humo (quema de biomasa) en la troposfera.

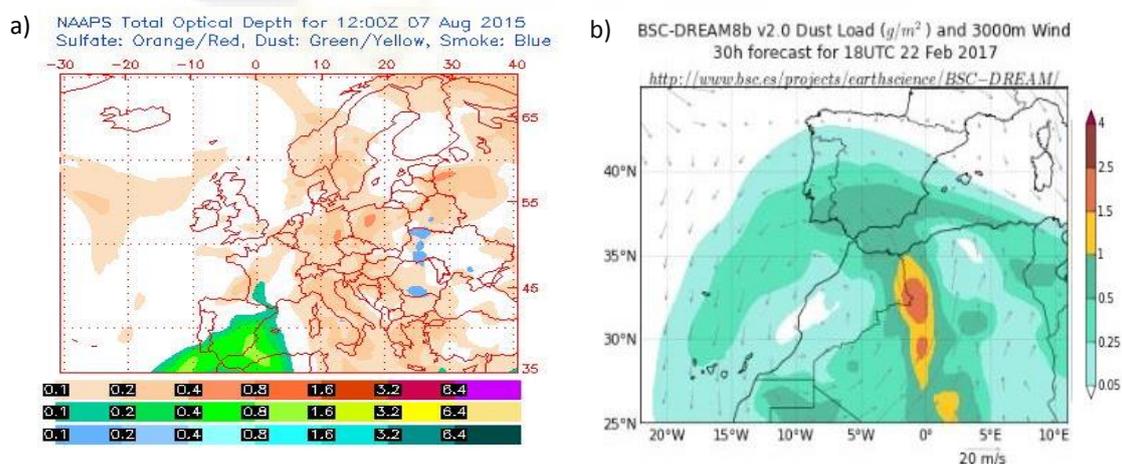


Figura 10. a) Predicción de concentración de polvo en todo el espesor óptico (color verde-amarillo) por el sistema NAAPS perteneciente al 7 de agosto de 2015; b) Predicción de concentración de polvo por el modelo BSC-DREAM8b perteneciente al 22 de febrero de 2017 que muestra la entrada de polvo sahariano en el sur de la Península Ibérica.

Por otro lado, el BSC/DREAM8b (<https://ess.bsc.es/bsc-dust-daily-forecast>) es un sistema diseñado igualmente para simular o predecir el ciclo atmosférico del polvo mineral (figura 10b). A diferencia del NAAPS, este modelo tiene en cuenta el transporte por viento, la difusión molecular, la nubosidad y los procesos de sedimentación (húmeda y seca), que son especialmente responsables del desplazamiento de polvo a velocidades de viento bajas. Otro modelo utilizado es el sistema de predicción SKIRON, el cual puede simular el ciclo del polvo mineral, así como realizar predicciones de varios parámetros meteorológicos para Europa y norte de África.

Finalmente, indicar que los datos registrados en la web de Calima referentes a la CV en lo relativo a episodios de partículas pueden ser también encontrados en la página web de la Generalitat Valenciana: (<http://www.agroambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/datos-obtenidos-a-partir-de-la-rvcca>). De igual forma en esta misma página podemos encontrar datos históricos y actuales de todos los contaminantes y parámetros meteorológicos registrados en las distintas estaciones que conforman la red de calidad del aire de la G. Valenciana. De esta página es de donde se han extraído los datos diarios de PM₁₀ utilizados en este trabajo.

3.3 Metodología utilizada para determinar el aporte de las IPS al PM₁₀

La metodología utilizada en este estudio para cuantificar el aporte másico de las IPS sobre los valores de PM₁₀ registrados es la denominada “metodología del Percentil 40” (Escudero et al., 2007; Pey, 2007). Este procedimiento ha sido utilizado en varios estudios (Querol et al., 2009; Ealo et al., 2016; Fernández et al., 2017) que han probado la eficacia del método. Este método es el de referencia para la determinación de las contribuciones de las IPS en España y Portugal desde 2004 y es aplicable a toda la parte sur del continente europeo (Querol et al., 2009).

El método resumido consiste en:

- Identificación de los máximos de la serie de temporal de valores de PM₁₀ registrados durante los episodios de intrusión. Para esta tarea contamos con las bases de datos diarios de PM₁₀ de la G. Valenciana y de las IPS del proyecto Calima.
- Obtención de los niveles de PM₁₀ relativos al fondo regional del área de estudio. Para ello debemos calcular el estadístico del Percentil 40 ‘medio mensual móvil’ a partir de los datos diarios registrados (habiendo sustraído previamente los datos diarios de PM₁₀ bajo periodos de intrusión). Es importante destacar que el día de evaluación se corresponde con el día central del periodo mensual de 30 días. El P40 reproduce de forma bastante precisa los niveles de fondo de PM₁₀ registrados en estaciones de carácter regional.

- Sustracción a los valores de PM_{10} registrados durante las IPS de los valores de fondo regional y obtención así de la carga neta de PM aportada por la IPS de forma diaria.

Una vez determinada la carga aportada por IPS resulta fácil comprobar si una superación del VLD de PM_{10} ha sido ocasionada por un episodio de intrusión o no y saber así si es susceptible de no contabilizar como tal, evitando el incumplimiento de la legislación de calidad del aire.

Más información sobre la aplicación de esta metodología en estaciones de fondo regional puede consultarse en: http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/pdf/sec_2011_0208.pdf.

La figura 11 muestra gráficamente un ejemplo de aplicación del método a datos de PM_{10} registrados en una estación de fondo regional entre abril y octubre de 2016. En la cual se puede observar: 1/ los datos originales de PM_{10} , 2/ los niveles de PM_{10} a los que se les ha sustraído los periodos temporales de intrusión, 3/ el valor del P40 obtenido a partir de los datos anteriores y 4/ el valor de la contribución másica de polvo mineral aportada por las IPS.



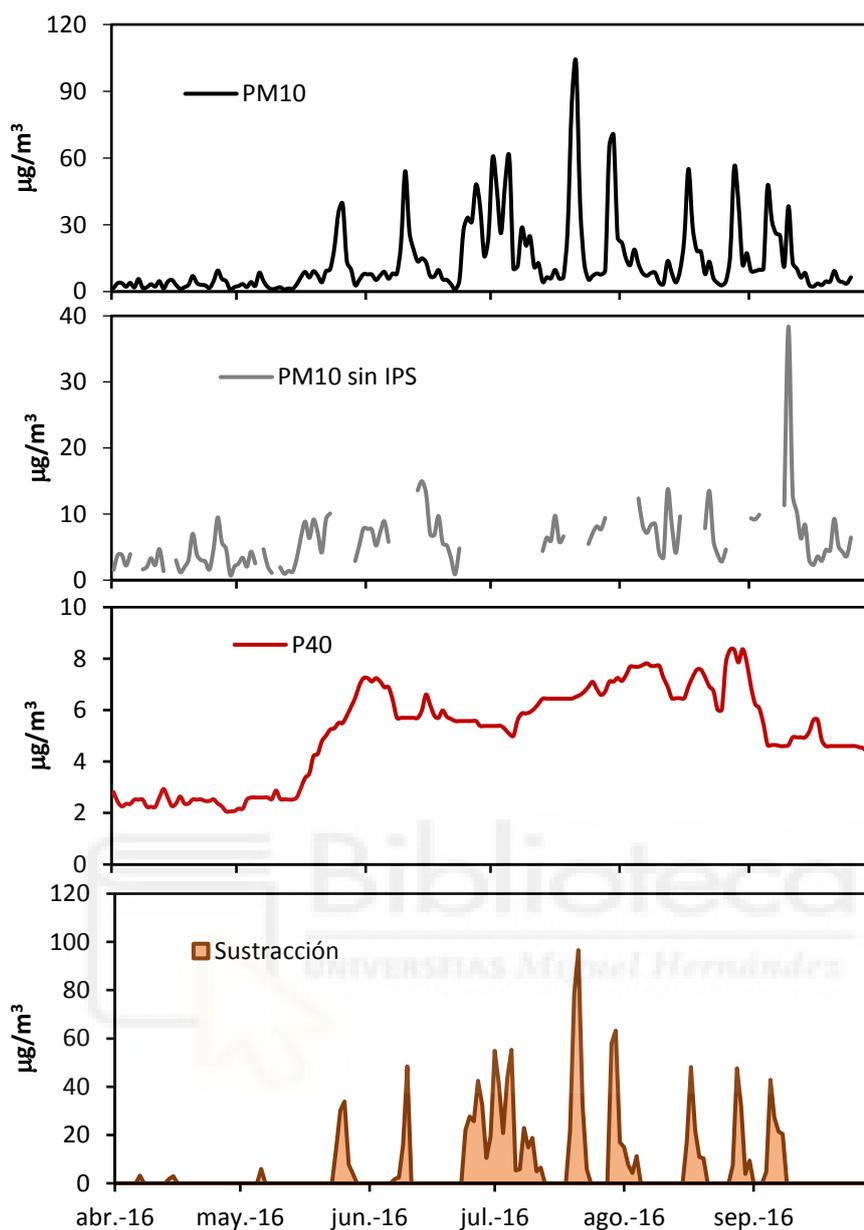


Figura 11. Aplicación de la metodología del P40 a la serie de datos de PM_{10} registrada entre abril de y octubre de 2016.

Se debe indicar que para obtener el aporte másico anual (o estacional) final debido a las IPS (por ejemplo, los valores ilustrados en la figura 7b o los que más adelante aparecerán en la tabla 3), se debe realizar la siguiente diferencia:

[Valor medio anual (estacional) de PM_{10} (obtenido de los datos diarios originales) - Valor medio de PM_{10} anual (estacional) obtenido de los datos diarios originales de PM_{10} a los que se les ha restado la carga másica diaria debida a las IPS].

3.4 Obtención de patrones de circulación mediante el Análisis Cluster

El Análisis Cluster es una técnica estadística multivariante cuyo objetivo es agrupar elementos (o variables) en distintos grupos o clusters. El análisis trata de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre ellos. La solución que reporta el AC no tiene por qué ser única y depende del procedimiento elegido para su obtención. Esto es debido a que existen varios algoritmos de formación de estos grupos. De hecho, en el proceso de utilización del AC debemos elegir en primer lugar una medida de asociación de los elementos y posteriormente una elección de la técnica Cluster a emplear.

En este trabajo el método no jerárquico de K medias fue el elegido para clasificar los distintos grupos (en nuestro caso ~ “tipos de circulación atmosférica”). Este método comienza con una división del conjunto de datos en varios grupos configurados al azar y de ellos calcula sus centroides. Posteriormente se busca mejorar esta primera clasificación mediante un proceso iterativo reasignando los elementos al centroide del cluster más cercano, bajo la premisa de reducir la distancia media entre cada elemento del grupo y su centroide (De la Fuente., 2011). El número de grupos/clusters puede ser asignado a priori. Este método ha sido utilizado en multitud de estudios similares al aquí realizado (Alonso-Pérez et al., 2011; Salvador et al., 2013, 2014) con buenos resultados de clasificación.

Para realizar el AC se utilizaron los valores de altura geopotencial a 850 hPa de los días bajo influencia sahariana durante el periodo 2014-2017, un total de 362 días. Estos datos se obtuvieron de la página web: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/> del National Center for Environmental Prediction (NCEP). En realidad, durante el periodo de estudio se registraron un total de 380 días de intrusión norteafricana, pero de 18 de ellos no se registraron datos. El dominio elegido para la obtención de las alturas geopotenciales se extiende de 15°N a 55°N de latitud y de 25°E a 15°W de longitud. El enrejado constituido incluye un total de 289 puntos ya que cada altura geopotencial cubre/representa un área de 2.5°× 2.5° (resolución espacial). De esta manera se conforma una matriz de inicio con una dimensión de 362 filas × 289 columnas.

$$\begin{pmatrix} P_{1,1} & \cdots & P_{1,289} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{362,1} & \cdots & P_{362,289} \end{pmatrix}$$

El software utilizado para realizar el análisis es el SPSS v.24. El *output* del programa nos indica cada día de intrusión a qué cluster pertenece. Con esto, una vez obtenidos los grupos, realizamos la media de los días (de sus distribuciones espaciales de alturas geopotenciales) que pertenecen a un mismo grupo

para obtener un valor promedio que define a dicho cluster. Los mapas de estas distribuciones para cada uno de los clusters obtenidos se obtienen mediante el uso del software Surfer versión 8.01.

En este trabajo, un total de 362 mapas de presión geopotencial han sido agrupados en 5 patrones meteorológicos que se exponen en el apartado de resultados y discusión.



4. Resultados y discusión

4.1 PM₁₀: concentración y estacionalidad

La figura 12 presenta la evolución diaria de la concentración de PM₁₀ para cada año de estudio. La figura también presenta el valor medio anual, así como las concentraciones medias estacionales para cada año. Señalar una cobertura de datos que supera el 90% anualmente.

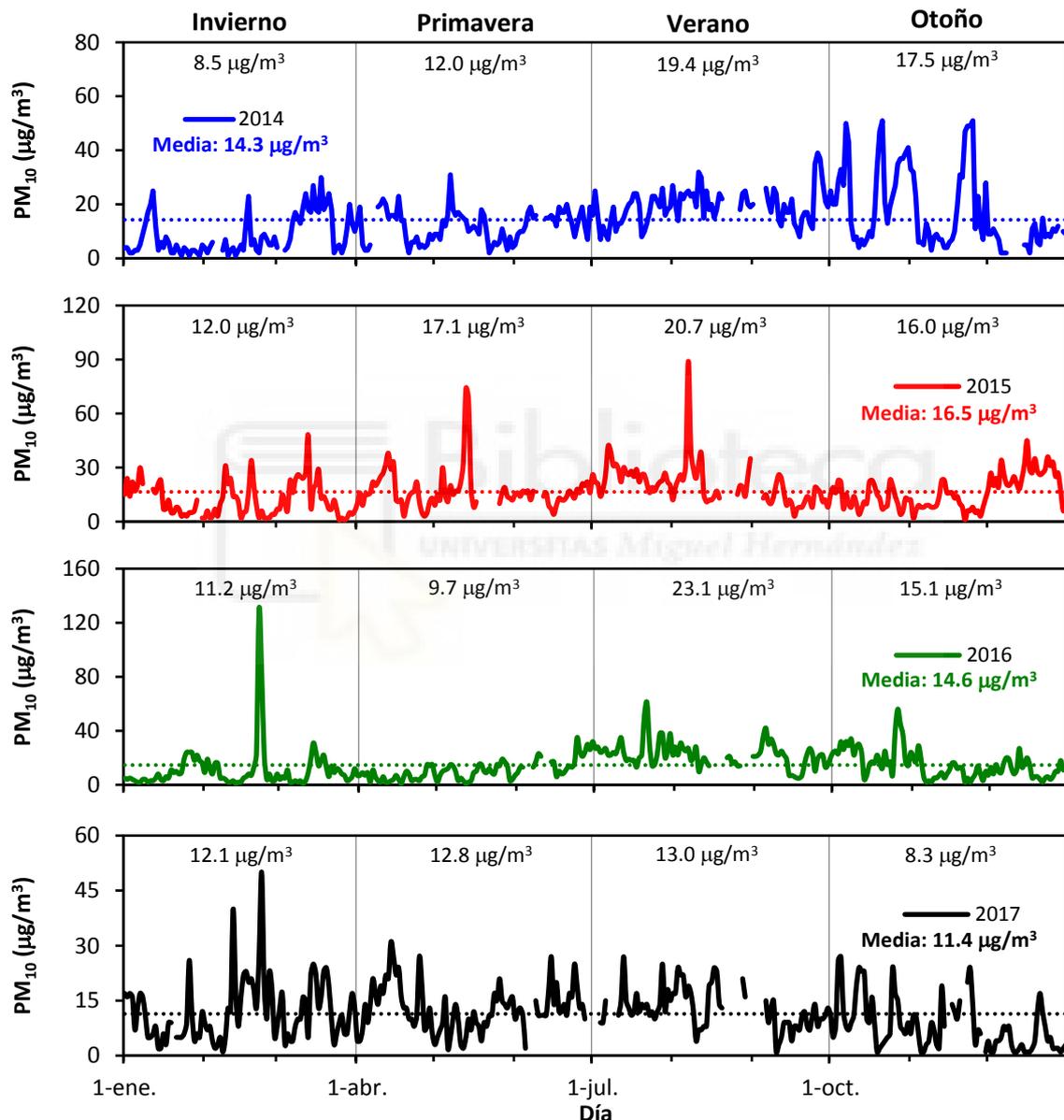


Figura 12. Evolución diaria de la concentración de PM₁₀ durante los 4 años de estudio. La concentración media anual y la estacional de cada año también está indicada.

Pueden extraerse algunos resultados evidentes de la figura 12.

1/- La ocurrencia de claros máximos (entre 1 y 4) al año no guarda relación con la estación donde tienen lugar. Mientras que durante 2014 los máximos se presentan durante el otoño, en 2015 se dan en primavera y verano y en los dos últimos años ocurren en invierno. La presencia de estos máximos hace que la distribución de concentraciones presente una clara asimetría positiva, obteniéndose valores de la mediana anuales ligeramente inferiores al de la media. Así, durante el año 2014 el valor de la mediana fue de $13.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el de la media $14.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La distribución de frecuencias para este año a modo de ejemplo se muestra en la figura 13, en la cual también se puede ver cómo esta distribución no se ajusta estrictamente a una distribución normal mediante un gráfico Q-Q. El ejemplo es extensible al resto de años.

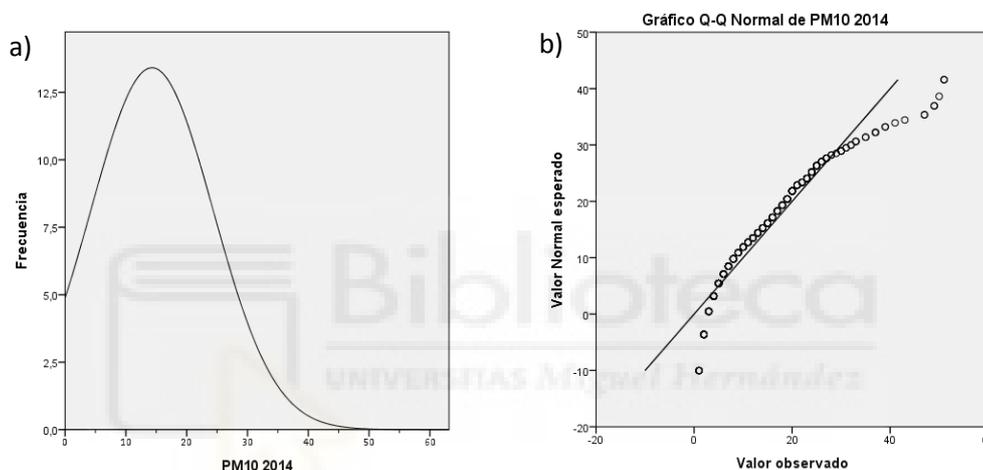


Figura 13. a) Distribución de frecuencias de los valores de PM₁₀ diarios registrados durante el año 2014. b) Gráfico Q-Q para una distribución de prueba gaussiana.

2/- Se aprecia una aparente similitud en las concentraciones medias anuales obtenidas a excepción del año 2017, donde se evidencia una clara disminución. La aplicación del test no paramétrico de Kruskal-Wallis así nos los indica obteniendo un $p\text{-value} = 0.000 < 0.05$. En consecuencia, al menos la media de uno de los años es estadísticamente diferente del resto, presumiblemente la de 2017.

3/- Los periodos de otoño y, sobre todo, del verano son los que registran una mayor concentración. Las concentraciones medias (para los cuatro años de estudio) estacionales son las siguientes: $19.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (verano), $14.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (otoño), $12.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (primavera) y $11.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (invierno). Varios factores pueden explicar esta estacionalidad. El máximo estival puede ser explicado gracias a una mayor resuspensión del PM durante la época estival junto con un mayor aporte del aerosol marino transportado por la brisa marina (aunque la estación de medida esté ubicada bastante lejos de la costa), una mayor actividad fotoquímica y una menor tasa de precipitación. La influencia estacional de las IPS será abordada en el siguiente apartado. No obstante, utilizando la tabla 1 podemos observar

cómo la gran mayoría de los picos más sobresalientes vistos en la figura 12 están asociados a IPS. Como por ejemplo los registrados el 22 y 23 de febrero de 2016 (130 y 84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente) o el 14 de mayo de 2015 (68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Así pues, las características de estos episodios (duración e intensidad) tienen una gran influencia en la estacionalidad presentada por el PM_{10} .

4.2 IPS: aporte másico a la concentración de PM_{10}

Durante el periodo comprendido entre los años 2014-2017 un total de 93 episodios de intrusión sahariana fueron identificados, con una media de 23 episodios al año como ya se indicó en el apartado 3.2 de la metodología. La duración de los episodios saharianos es variable según la estación del año. Los episodios más breves suelen darse en invierno con un promedio de 2.1 días/episodio, seguido del otoño (3.5 días/episodio), primavera (4.1 días/episodio) y finalmente los más extensos son los registrados durante el verano (6.7 días/episodio). El episodio más largo registrado durante el tiempo de muestreo fue de 20 días y tuvo lugar durante el mes de julio de 2015. En promedio la duración a lo largo del periodo de estudio de los episodios es de unos 4 días.

Se expone a continuación una tabla resumen con el número de días de intrusión por estación y año y su porcentaje frente al total (de los días de la estación o año). Esta tabla se obtiene a partir de los datos de la tabla 1.

Tabla 2. Días de intrusión por estación del año a lo largo del periodo de estudio.

Periodo	2014	2015	2016	2017	Media
Invierno	12 (13.2%)	8 (8.8%)	9 (9.9%)	23 (25.3%)	~13 (14.3%)
Primavera	27 (29.7%)	22 (24.1%)	13 (14.3%)	41 (45.1%)	~26 (28.6%)
Verano	14 (15.4%)	43 (47.3%)	50 (54.9%)	47 (51.6%)	~39 (42.8%)
Otoño	26 (28.6%)	19 (20.9%)	20 (22.0%)	6 (6.6%)	~18 (19.8%)
Global	79 (21.6%)	92 (25.2%)	92 (25.1%)	117 (32.1%)	~95 (26.0%)

La tabla 2 nos muestra cómo en promedio durante el periodo estival casi la mitad (42.8%) de los días están influenciados por IPS. De hecho, durante los dos últimos años de estudio este porcentaje incluso fue superado. Por su parte, durante el invierno el porcentaje de días con presencia de polvo sahariano desciende notoriamente al 14.3%. También se puede apreciar cómo la frecuencia de episodios durante

el otoño es algo inferior a la registrada durante la primavera. No obstante, como indicamos en el apartado anterior, la concentración de PM₁₀ otoñal es ligeramente superior a la registrada en primavera. Así pues, es de esperar que el aporte mineral sahariano sea durante el otoño algo superior al registrado en primavera. Por otro lado, el que más de un cuarto de los días al año (26.0%) estén influenciados por este tipo de episodios de transporte da una idea de lo importante que es esta fuente de partículas en la CV.

Con la finalidad de cuantificar la contribución de estas intrusiones a los niveles de PM₁₀ expuestos anteriormente en la figura 12, la tabla 3 presenta el aporte másico medio estacional obtenido mediante la metodología del P40. La tabla también muestra el porcentaje respecto al valor estacional de PM₁₀ registrado, así como los aportes globales.

Tabla 3. Aporte másico en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de las IPS al valor de la concentración media estacional de PM₁₀.

Periodo	2014	2015	2016	2017	Media
Invierno	2.1 (24.7%)	1.3 (10.8%)	4.5 (40.2%)	3.6 (29.8%)	2.9 (26.4%)
Primavera	2.6 (21.7%)	4.0 (23.4%)	1.7 (17.5%)	3.0 (23.4%)	2.8 (21.7%)
Verano	1.2 (6.2%)	5.6 (27.1%)	6.6 (28.6%)	3.4 (26.2%)	4.2 (22.0%)
Otoño	6.5 (37.1%)	1.9 (11.9%)	3.2 (21.2%)	1.3 (15.7%)	3.2 (22.5%)
Global	3.1 (21.7%)	3.2 (19.4%)	4.0 (27.4%)	2.8 (24.6%)	3.3 (23.2%)

Desde un punto de vista anual, podemos decir que la contribución másica de las IPS a los valores anuales de PM₁₀ es bastante constante, oscilando entre 2.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2017 a 4.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenido en 2016. (Aunque puedan existir otras razones, se podría asociar en parte, el menor valor de PM₁₀ medio obtenido en el año 2017 a que durante este año se registró el mínimo aporte másico de polvo mineral). De igual forma estos aportes implican una contribución porcentual del polvo sahariano a los valores de PM₁₀ que oscilan entre el 19.4 y el 27.4%. La lectura de la tabla 3 a nivel estacional igualmente nos indica una contribución porcentual estacional muy similar que en ningún caso supera el 30% del valor de PM₁₀ medido. A nivel de concentración destaca la contribución obtenida en otoño de 2014, con 6.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que equivale al 37.1% de la concentración de PM₁₀ obtenida en dicha estación.

El valor global registrado de aporte sahariano, 3.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (23.2%), está dentro del rango de concentraciones establecido para nuestra localización geográfica, que es de entre 3 y 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver

figura 7b). Por su parte, cabe indicar que un estudio realizado en el mismo punto de muestreo entre los años 2008 a 2013 (Santos, 2015), se obtuvo para ese periodo temporal un aporte medio de $\sim 2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En consecuencia, en estos últimos años se ha registrado una ligera subida de este aporte.

La tabla 3 también muestra cómo un parecido aporte másico no implica una misma contribución porcentual, un claro ejemplo de ello es la primavera y el verano en sus valores medios. Ambos tienen una contribución porcentual similar de alrededor del 22%, sin embargo, el aporte estival es bastante superior al primaveral. Por otra parte, debemos indicar que, aunque generalmente un mayor nº de días al año con presencia de polvo sahariano implica un mayor aporte anual de concentración (ver Santos, 2015), esta correlación no se cumple para el periodo de tiempo analizado en este estudio, por lo que duración e intensidad de las IPS no tienen por qué tener una correlación positiva. Este hecho se ejemplifica en los datos de 2014 y 2017. Durante el año 2017 se presentan bastantes más días de influencia sahariana que 2014, sin embargo, el aporte másico en 2014 es superior al registrado en 2017.

4.3 Patrones atmosféricos que propician IPS en la Comunidad Valenciana

En este apartado se ha aplicado la metodología expuesta en la sección 3.4 para la obtención de un número de clusters óptimo que caracterice los distintos patrones meteorológicos que dan lugar a entradas de aire sahariano. Después de un análisis previo en el que se estudió la elección del número de clusters (C), se optó por la elección de $n=5$, basándonos en que un número superior o inferior del mismo bien repetiría ciertos escenarios meteorológicos, bien no llegaría a reproducir toda la casuística. La distribución del nº de días en función del cluster asignado, así como su estacionalidad se puede observar en la tabla 4.

Tabla 4. Porcentaje de días con influencia sahariana perteneciente a cada cluster durante el periodo de estudio y estacionalidad de los mismos.

Nº de Cluster	% (Total de días)	% (Invierno)	% (Primavera)	% (Verano)	% (Otoño)
C1	17.4	26	20	47	8
C2	16.8	16	62	2	20
C3	39.2	6	27	56	11
C4	7.2	12	64	0	24
C5	19.4	17	25	35	24

Como se puede apreciar, el nº de días ubicados en los clusters C1, C2 y C5 es muy semejante. El C3 es el más abundante, mientras que el C4 únicamente lo registran el 7.2% de los días. Las siguientes figuras muestran los diferentes escenarios meteorológicos (alturas geopotenciales a 850 hPa) referidos a cada cluster obtenido. Estos mapas surgen del cálculo de la media de los datos correspondientes a todos los días de los episodios asignados a un determinado cluster. Las figuras también muestran gráficamente la circulación que propicia la entrada de polvo sahariano a la CV.

Cluster 1

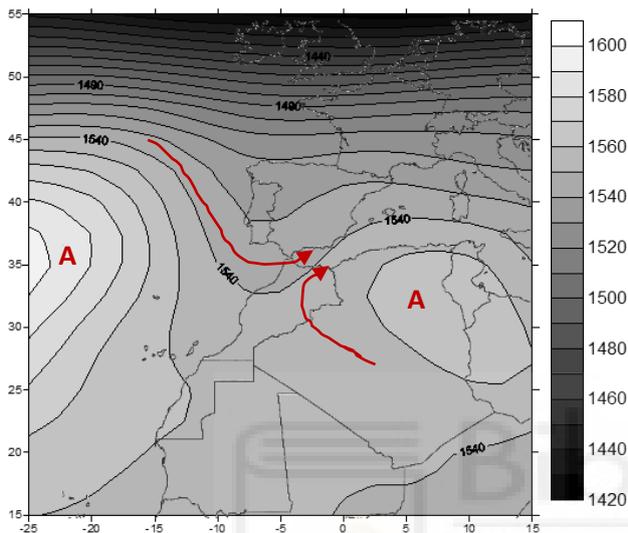


Figura 14. Circulación atmosférica obtenida en C1.

En el primer cluster encontramos dos frentes de alta presión (A) responsables del transporte de las masas de aire cargadas de polvo. Un anticiclón se encuentra en las islas Azores y el otro en el noreste de Argelia y la práctica totalidad de Túnez. Este escenario tiene lugar predominantemente en verano (tabla 4), cuando se alcanza la máxima actividad de la mayoría de las fuentes de polvo africanas, con una ocurrencia que alcanza casi el 50%.

Por otra parte, es el cluster que se da con mayor frecuencia durante el invierno y el que menos durante el otoño. Este cluster es similar a los patrones 3 y 4 descritos por Salvador et al., 2014 para el conjunto peninsular descritos en la introducción.

Cluster 2

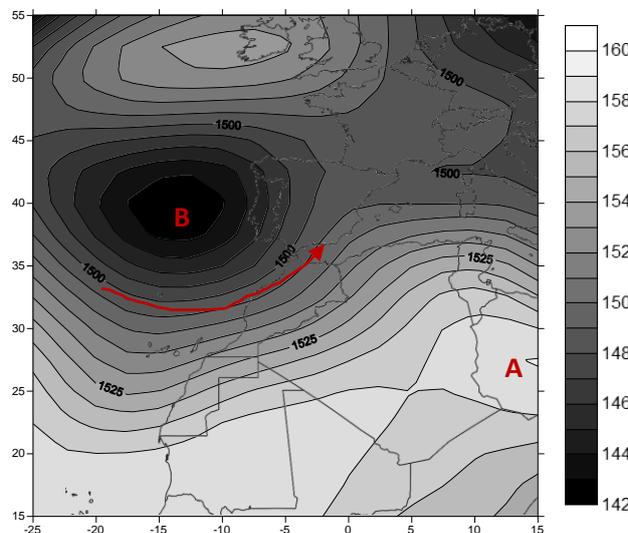


Figura 15. Circulación atmosférica obtenida en C2.

El segundo cluster presenta un patrón muy diferente al anterior. En este caso, una baja presión (B) presente al oeste de Portugal es la principal responsable del transporte de polvo mineral. Un anticiclón situado al sur de Túnez y Libia también podría ser responsable de esa circulación. Este patrón es predominante en primavera, ya que en más del 60% de las veces que tiene lugar este patrón se da en esta estación. Sin embargo, prácticamente nunca se da en verano.

Este cluster es similar o debe en parte estar relacionado con los patrones 1 y 2 de circulación descritos en la introducción.

▪ Cluster 3

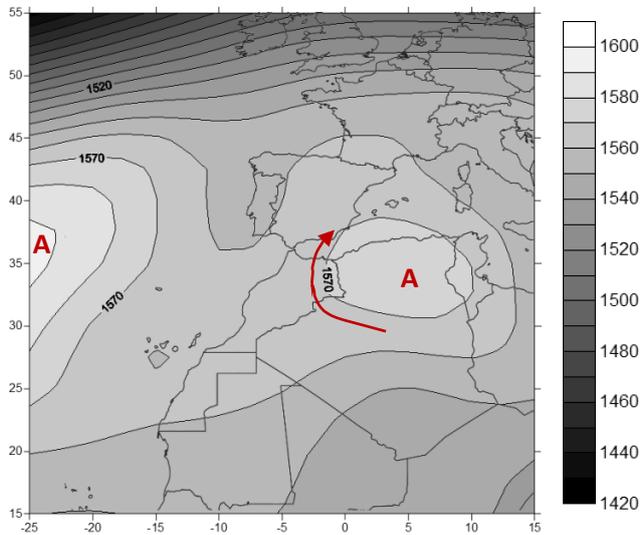


Figura 16. Circulación atmosférica obtenida en C3.

El tercer cluster presenta un patrón meteorológico bastante semejante al C1. Sin embargo, en este caso el anticiclón se encuentra desplazado hacia el oeste, encontrándose casi enteramente en Argelia y en menor medida sobre Túnez. Por su parte, el anticiclón de las Azores presenta una menor intensidad. Este escenario, al igual que el primero, se da fundamentalmente durante los meses de verano.

Este patrón de circulación es el más habitual (39.2 %) y está relacionado con el patrón 4 descrito en la introducción, el cual se caracterizaba por registrar los eventos más intensos en la zona este peninsular.

▪ Cluster 4

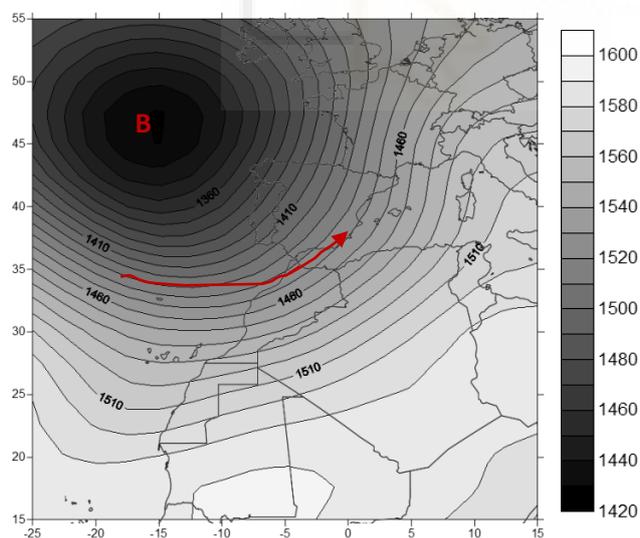
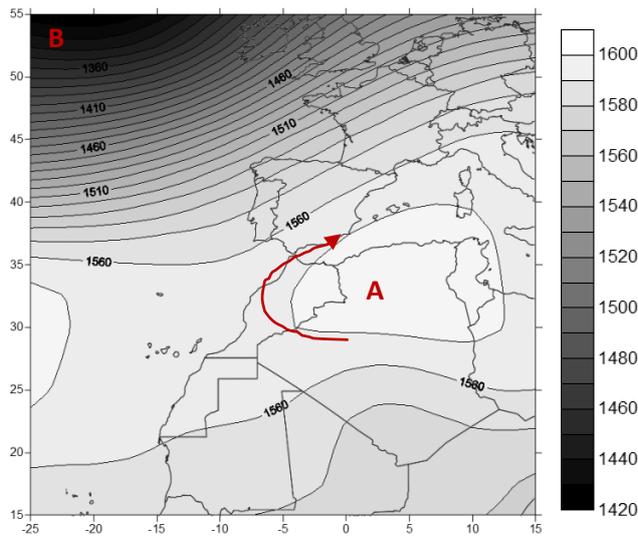


Figura 17. Circulación atmosférica obtenida en C4.

Este cluster muestra una situación similar a la presentada por el C2, pero con un apreciable desplazamiento de la borrasca hacia el atlántico norte. De igual forma que el C2, este patrón se da principalmente en primavera, aunque también durante el otoño, siendo inexistente durante el verano. Es el tipo de circulación con menos frecuencia (7.2%).

Cluster 5



En el C5, encontramos un desplazamiento hacia el noroeste de la borrasca que en el C2 encontrábamos al oeste de Portugal y un desplazamiento hacia el sur del anticiclón de las Azores. Por otro lado, el anticiclón del norte de África queda centrado en Argelia y sur del Mediterráneo y es el principal responsable del transporte. Este patrón puede darse en cualquier estación del año con semejante probabilidad.

Figura 18. Circulación atmosférica obtenida en C5.

Este cluster se podría identificar con el patrón 2 indicado en la introducción.

4.4 Caracterización de los aportes al PM₁₀ según el escenario meteorológico

La figura 19 muestra la carga de polvo asociada a cada uno de los clusters obtenidos en forma de diagrama caja.

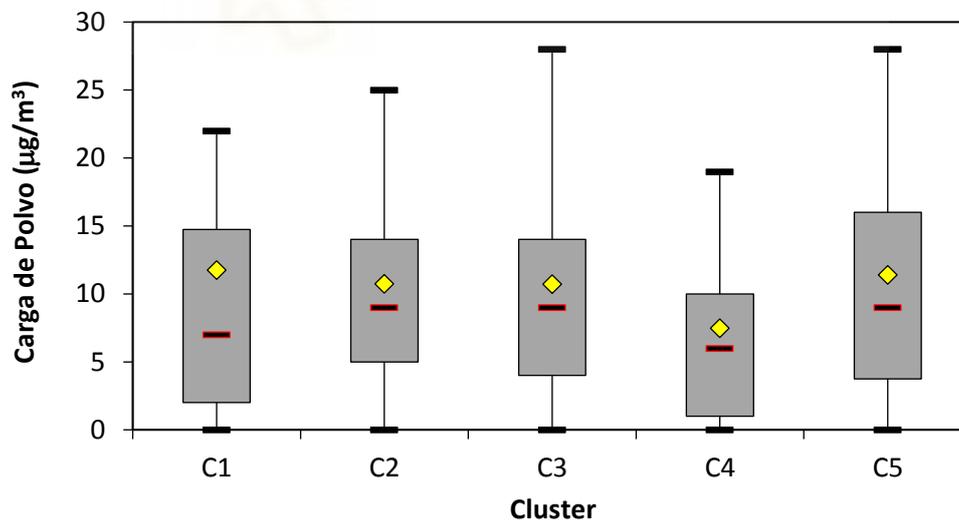


Figura 19. Diagrama de cajas que muestra distintos parámetros estadísticos asociados a la carga de polvo mineral relacionada con los distintos clusters obtenidos.

El rombo amarillo representa la media, la raya roja indica el valor de la mediana (Q2), los extremos de las cajas representan los percentiles 25 (Q1) y 75 (Q3). Finalmente, los valores superiores (Ls) e inferiores (Li) mostrados, están relacionados con el rango intercuartílico (RI). Este rango es igual a la

diferencia $Q3-Q1$, siendo $Ls=RI \cdot 1.5+Q3$ y $Li=Q1-RI \cdot 1.5$. Debemos destacar que el valor Ls no tiene por qué ser el máximo valor de la serie de datos. Los aportes de polvo mineral que se presentan en la figura 19 son únicamente los obtenidos en días bajo la influencia de IPS dentro de cada cluster.

Los valores mostrados en la figura 19 son más elevados que los mostrados en la tabla 3 puesto que no están promediados para todo un periodo temporal (estacional o anual) en los que se incluyen tanto los días con influencia sahariana como sin ella.

La figura 19 indica que el C1 presenta el valor medio de contribución mineral más elevado ($11.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) mientras que el C4 registra su nivel más bajo ($7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). De igual forma este tipo de cluster no se da nunca en verano (tabla 4) que es cuando el aporte másico es más elevado (tabla 3). Por otra parte, la diferencia más elevada entre media y mediana se obtiene también durante los días pertenecientes al C1. Posiblemente esto sea debido a que algunos episodios registrados en este cluster alcanzaron elevadas contribuciones de polvo mineral como es el caso de los días 22 y 23 de febrero de 2016 (ver figura 12) en los que se registraron concentraciones de PM_{10} de 84 y $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. No obstante, a excepción del C4, los parámetros estadísticos obtenidos son bastante parecidos en todas las situaciones meteorológicas.

Con el objetivo de evaluar el impacto producido por cada tipo de circulación atmosférica sobre las concentraciones de PM_{10} se define el siguiente índice:

$$\text{IND}_i = \frac{(\text{ADC}_i \cdot N_i)}{(\text{ADC} \cdot N_T)} \cdot 100 \quad / \quad \sum_{i=1}^n \text{IND}_i = 100\%$$

Donde:

IND_i : índice de impacto asociado al cluster i .

N_i : nº de días que tiene lugar el cluster i durante el periodo de estudio.

ADC_i : valor medio de la contribución másica sahariana durante el cluster i .

ADC : valor medio de la contribución másica sahariana global (incluyendo todos los clusters).

N_T : número total de días en los que se han registrado IPS.

Cuanto mayor es el valor del índice, mayor es la contribución de polvo sahariano asociado a un cluster determinado y mayor es la frecuencia de días episódicos. Más información sobre el índice se puede encontrar en Salvador et al., 2014.

La figura 20 muestra el valor de los índices de impacto obtenidos asociados a cada cluster. Como se puede apreciar el cluster 4 se mantiene como el de menor impacto registrando un valor del índice por debajo del 5%. Sin embargo, es el cluster 3 el cual presenta un mayor índice alcanzando casi el 40% y doblando así el impacto registrado por el resto de clusters.

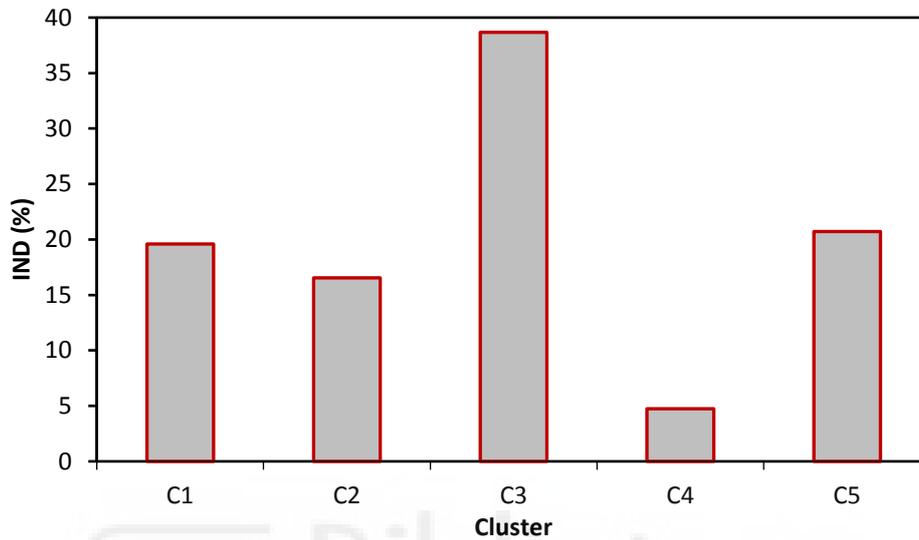


Figura 20. Índices de impacto asociados a cada tipo de cluster obtenido.

Por lo tanto, es el patrón atmosférico definido por C3 el que presenta una mayor influencia/impacto (tanto a nivel de intensidad como de frecuencia) en la CV. Este cluster como ya indicamos anteriormente se da de forma prioritaria durante los meses de verano.

5. Conclusiones

Este trabajo presenta las siguientes conclusiones derivadas de los objetivos propuestos y los resultados hallados:

- El análisis estacional de la concentración de PM_{10} en la estación de medida muestra la estacionalidad característica que se le presupone a una estación de ámbito regional presentando claros máximos estivales y mínimos durante los meses más fríos. Por su parte, la concentración media registrada (propia de una estación de estas características) es muy similar durante todos los años de análisis, si bien durante el último año desciende. Este descenso de concentración puede ser en parte asociado a una menor carga de polvo mineral sahariana registrada durante ese año.
- El número de episodios de intrusión (así como el número de días por episodio) registrados puede variar anualmente de forma ostensible. A este respecto y en función de los datos obtenidos no podemos correlacionar linealmente la frecuencia de las intrusiones con el aporte anual o estacional que estas proporcionan a los niveles de PM_{10} .
- El aporte másico medio a la concentración de PM_{10} debido a las IPS obtenido ($3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a lo largo del periodo de estudio ha sido el esperable en función de la latitud geográfica del punto de muestreo dentro de la Península Ibérica. Este aporte indica que casi una cuarta parte de la concentración de PM_{10} registrada procede del norte de África, lo cual da una idea de la importancia de esta fuente natural de partículas en la CV.
- Se han obtenido cinco escenarios meteorológicos que propician entradas de aire sahariano en la CV. Estos patrones meteorológicos presentan diferentes porcentajes de frecuencia en función de la estación del año en la que nos encontremos. Desde un punto de vista global podemos indicar que el patrón de circulación 4 es el que tiene lugar en menos ocasiones y es el que menor aporte másico registra. No existen diferencias significativas en el aporte del resto de patrones.
- Una ponderación entre el aporte másico y el nº de días de ocurrencia para cada cluster obtenido nos indica que el patrón 3 es el más influyente en la CV. Este tipo de circulación se caracteriza por una alta presión localizada en el norte de Argelia y suele darse con más frecuencia durante el verano.

6. Perspectiva futura

Una vez realizado el estudio y a la vista de los resultados obtenidos, un posible trabajo futuro relacionado con el actual consistiría en la ampliación del periodo temporal del mismo. La realización del trabajo aquí presentado con esta extensión nos permitiría:

- Profundizar en el estudio de una posible correlación entre la duración y la intensidad de las IPS, es decir, entre los días de intrusión sahariana y el aporte másico registrado.
- La realización del análisis Cluster con un mayor número de días de intrusión podría mejorar sin duda la determinación/exactitud de los escenarios meteorológicos, así como determinar la posible existencia de nuevos tipos de circulación.

Por otra parte, el mismo estudio podría ser realizado con la fracción másica $PM_{2.5}$. Esta fracción desde un punto de vista epidemiológico podría ser interesante de analizar ya que está más involucrada en problemas de salud pública debido a su mayor capacidad penetración en el tracto respiratorio humano.



7. Bibliografía

- Alonso-Pérez, S., Cuevas, E., Querol, X. (2011). Objective identification of synoptic meteorological patterns favouring African dust intrusions into the marine boundary layer of the subtropical eastern north Atlantic region. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 113, 109-124.
- Brattich, E., Riccio, A., Tositti, L., Cristofanelli, P., Bonasoni, P. (2015). An outstanding Saharan dust event at Mt. Cimone (2165 m a.s.l, Italy) in March 2004. *Atmospheric Environment*, 113, 223-235.
- Contini, D., Cesari, D., Genga, A., Siciliano, M., Ielpo, P., Guascito, M. R., Conte, M (2014). Source apportionment of size-segregated atmospheric particles based on the major water-soluble components in Lecce (Italy). *Science of the Total Environment*, 472, 248-261.
- Ealo, M., Alastuey, A., Ripoll, A., Pérez, N., Cruz Minguillón, M., Querol, X., Pandolfi, M. (2016). Detection of Saharan dust and biomass burning events using near-real-time intensive aerosol optical properties in the north-western Mediterranean. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 12567-12586.
- Escudero, M., Castillo, S., Querol, X., Ávila, A., Alarcón, M., Viana, M. M., Alastuey, A., Cuevas, E., Rodríguez, S. (2005). Wet and dry African dust episodes over eastern Spain. *Journal of Geophysical research*, 110, D18S08, doi:10.1029/2004JD004731.
- Escudero, M., Querol, X., Pey, J., Alastuey, A., Pérez, N., Ferreira, F., Alonso, S., Rodríguez, S., Cuevas, E. (2007). A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks. *Atmospheric Environment* 41, 5516-5524.
- Fernández, A. J., Molero, F., Salvador, P., Revuelta, A., Becerril-Valle, M., Gómez-Moreno, F.J., Artíñano, B., Pujadas, M., (2017). Aerosol optical, microphysical and radiative forcing properties during variable intensity African dust events in the Iberian Peninsula. *Atmospheric Research*, 196, 129-141.
- Fuente, S. de la (2011). "Análisis conglomerados". Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. UAM, Madrid.
- García, O. E., Expósito, F. J., Díaz, J. P., Díaz, A. M. (2011). Radiative forcing under aerosol mixed conditions. *Journal of Geophysical research*, 116, D01201, doi:10.1029/2009JD013625.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Klose, M. (2009). Numerical Simulation of a Sahara Dust Storm Event. 9th EMS Annual Meeting.

- Nicolás, J., Chiari, M., Crespo, J., García Orellana, I., Lucarelli, F., Nava, S., Pastor, C., Yubero, E. (2008). Quantification of Saharan and local dust impact in an arid Mediterranean area by the positive matrix factorization (PMF) technique. *Atmospheric Environment*, 42, 8872-8882.
- Pey, J. (2007). *Caracterización físico-química de los aerosoles atmosféricos en el Mediterráneo Occidental* (Tesis doctoral). Departament d'Enginyeria Minera y Recursos Naturals de la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Pey, J., Querol, X., Alastuey, A., Forastiere, F., Stafoggia, M. (2013). African dust outbreaks over the Mediterranean Basin during 2001-2011: PM10 concentrations, phenomenology and trends, and its relation with synoptic and mesoscale meteorology. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 1395-1410.
- Próspero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., Gill, T. E. (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, 1-31.
- 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 mass-levels across the Mediterranean Basin. *Atmospheric Environment*, 43, 4266-4277.
- Querol, X., Alastuey, A., Pey, J., Escudero, M., Castillo, S., Orío, A., Pallarés, M., Jiménez, S., Ferreira, F., Marques, F., Monjardino, J., Cuevas, E., Alonso, S., Artíñano, B., Salvador, P., de la Rosa, J. (2010). *Procedimiento para la identificación de episodios naturales de PM10 y PM2,5 y la demostración de causa en lo referente a las superaciones del valor límite diario de PM10*. Lisboa, Huelva, Portugal: CSIC, Gobierno de España, S.G. de Calidad del Aire y Medio Ambiente Industrial (Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental), Agência Portuguesa Do Ambiente.
- Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Kallos, G., Kkaliagou, O. (2001). Saharan dust contributions to PM10 and TSP levels in Southern and Eastern Spain. *Atmospheric environment*, 35, 2433-2447.
- Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Plana, F. (2002). Sources and processes affecting levels and composition of atmospheric aerosol in the western Mediterranean. *Journal of Geophysical research*, 107, NO. D24, 4777, doi:10.1029/2001JD001488.
- Salvador, P., Artíñano, B., Molero, F., Viana, M., Pey, J., Alastuey, A., Querol, X. (2013). African dust contribution to ambient aerosol levels across central Spain: Characterization of long-range transport episodes of desert dust. *Atmospheric Reserach*, 127, 117-129.
- Salvador, P., Alonso-Pérez, S., Pey, J., Artíñano, B., de Bustos, J. J., Alastuey, A., Querol, X. (2014). African dust outbreaks over the western Mediterranean Basin: 11-year characterization of

atmospheric circulation patterns and dust source areas. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 6759-6775.

Santos, F. A. (2015). *Análisis de los niveles de PM10 en las estaciones de fondo regional de la Comunidad Valenciana; aplicación metodológica para la obtención de la carga neta de polvo sahariano* (Tesis de pregrado). Universidad Miguel Hernández, Elche.

Soler, R., Nicolás, J. F., Caballero, S., Yubero, E., Crespo, J. (2016). Depletion of tropospheric ozone associated with mineral dust outbreaks. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 19376-19386.

Unión Europea. Directiva (UE) 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Diario Oficial de la Unión Europea L 152/1, 11 de junio de 2008, pp. 1-44.

Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Gangoiti, G., Menéndez, M. (2003). PM levels in the Basque Country (Northern Spain): analysis of a 5-year data record and interpretation of seasonal variations. *Atmospheric Environment*, 37, 2879-2891.

