



Caracterización física de las fracciones másicas que constituyen el aerosol atmosférico en la Universidad Miguel Hernández

Lucia Sanchis Navarro

Tutor: Nicolás Aguilera, Jose

Curso Académico: 2015-2016

Grado en Ciencias Ambientales

Facultad: Ciencias Experimentales

Departamento: Física y AC

Área de Física Aplicada

RESUMEN

El presente trabajo analiza las tendencias temporales y las concentraciones del material particulado atmosférico (PM) durante el año 2014. El registro de dichas concentraciones se ha realizado gracias a un espectrómetro ubicado en el interior de la UMH. El espectrómetro proporcionó las concentraciones de tres fracciones másicas: PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 . Este estudio también se centra en cuantificar la influencia que sobre el PM tienen dos tipos de eventos frecuentes en entornos urbanos: las intrusiones saharianas y los periodos de elevada estabilidad atmosférica. Como resultado más destacable decir que el verano de 2014 registró una inusual escasez de eventos saharianos que variaron tanto la tendencia estacional como la concentración esperable, sobretodo en la fracción PM_{10} . Por otra parte, se ha constatado una mayor influencia de los periodos de elevada estabilidad sobre las partículas más finas (PM_1) y de los eventos saharianos sobre las más gruesas (PM_{10}).

ABSTRACT

This work analyzes temporal trends and concentrations of atmospheric particulate matter (PM) obtained throughout 2014. Obtaining of these concentrations was conducted by an optical spectrometer located inside of the UMH. The spectrometer provided the concentrations of three mass fractions: PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1 . The study also focuses on quantifying the influence of two types of events (Saharan dust outbreaks and periods of high atmospheric stability) on PM. The summer 2014 registered an unusual lack of Saharan events. This fact varied the typical seasonal trend and mean concentration, above all in PM_{10} fraction. Moreover, a greater influence on smaller particles (PM_1) than on the coarse ones has been checked during high stability periods. Conversely, the larger particles (PM_{10}) are the most affected during Saharan dust events.

Palabras clave

PM_x ; ratio PM_1/PM_{10} ; intrusión sahariana; elevada estabilidad; fondo suburbano.

Keywords

PM_x ; PM_1/PM_{10} ratio; Saharan outbreak; high stability; suburban background.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Material particulado atmosférico: generalidades.....	3
1.1.1 Definición y clasificación	3
1.1.2 Distribución granulométrica.....	3
1.1.3 Fuentes y composición	5
1.1.4 Eventos que influyen en la concentración y composición del PM	6
1.1.5 Legislación relativa al PM	8
1.1.6 Efectos producidos por el aerosol atmosférico	10
1.2 PM: niveles y tendencias	10
1.2.1 Estaciones de medida.....	10
1.2.2 Rangos habituales de concentración	11
1.2.3 Variabilidad temporal de la concentración	12
2 OBJETIVOS	14
3 METODOLOGIA.....	15
3.1 Ubicación y periodo temporal del estudio	15
3.2 Medida de las fracciones PM_x y variables meteorológicas.....	16
3.3 Metodología para la identificación de episodios	17
3.3.1 Eventos saharianos.....	17

3.3.2 Episodios de elevada estabilidad	20
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1 Descripción meteorológica	21
4.2 PM _x : caracterización de niveles	22
4.3 PM _x : evolución temporal	23
4.3.1 Evolución mensual	24
4.3.2 Evolución horaria	25
4.4 PM _x : influencia de eventos	27
4.4.1 Cuantificación de los impactos	27
4.4.2 Seguimiento temporal de los eventos	29
5 CONCLUSIONES	32
6 PROYECCIÓN FUTURA	33
7 BIBLIOGRAFÍA	34

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Material particulado atmosférico: generalidades

1.1.1 Definición y clasificación

El material particulado atmosférico (PM) se define como un conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presenten en suspensión en la atmósfera (Mészáros, 1999). Generalmente, el término aerosol atmosférico se utiliza como sinónimo de partículas atmosféricas. Éste término es un concepto amplio que engloba tanto las partículas en suspensión como las partículas sedimentables (diámetro > 50 μm), caracterizadas por un corto tiempo de residencia en la atmósfera.

Como resultado de una gran variabilidad de fuentes y transformaciones, el material particulado atmosférico consiste en una mezcla de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica con diferentes distribuciones granulométricas. Los niveles de material particulado atmosférico se suelen expresar en forma de concentración de masa o número de partícula por unidad de volumen de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ o n/cm^3).

En función del agente emisor, el PM puede provenir de un origen natural, como la actividad volcánica, los incendios y la descomposición biológica de la materia orgánica, o de un origen antropogénico como el tráfico o la industria. Por otra parte, según su génesis, el PM se puede clasificar en primario, (aquel que se emiten directamente a la atmósfera desde el foco emisor), y secundario (formado por transformaciones químicas en las que participan los contaminantes primarios).

1.1.2 Distribución granulométrica

El diámetro (d) de las partículas atmosféricas en suspensión varía desde nanómetros (nm) hasta decenas de micras (μm). Atendiendo precisamente al diámetro aerodinámico¹ de las partículas, se pueden identificar diferentes rangos de tamaños denominados comúnmente “modas”; desde el punto de vista de las ciencias atmosféricas estas se engloban en: la *moda de nucleación*, aquellas partículas cuyo diámetro aerodinámico es inferior a 0.02 μm ; la *moda Aitken*, cuando los diámetros están comprendidos entre 0.02 y 0.1 μm ; la *moda de*

¹ Diámetro aerodinámico de la partícula es el diámetro de una esfera, con una densidad de $1\text{g}/\text{cm}^3$, que tiene la misma velocidad de caída debido a la fuerza gravitacional en aire en calma que la partícula considerada, bajo las mismas condiciones de temperatura, presión y humedad relativa.

acumulación en la que los diámetros están entre 0.1-1 μm y por último en la *moda gruesa*, constituida por partículas cuyos diámetros son mayores a 1 μm .

Los procesos de formación de las partículas en función de sus diámetros son distintos. Mientras que las partículas pertenecientes a las modas de nucleación y Aitken se forman principalmente por la condensación de vapores sobresaturados, las partículas del modo de acumulación suelen provenir de la coagulación de las partículas del modo Aitken o gracias a procesos de conversión de gas a partícula. Por su parte, las partículas del modo grueso se producen básicamente gracias a procesos de índole mecánico.

La figura 1 muestra los 4 modos anteriormente explicados y la cantidad relativa del número de partículas que presenta cada uno.

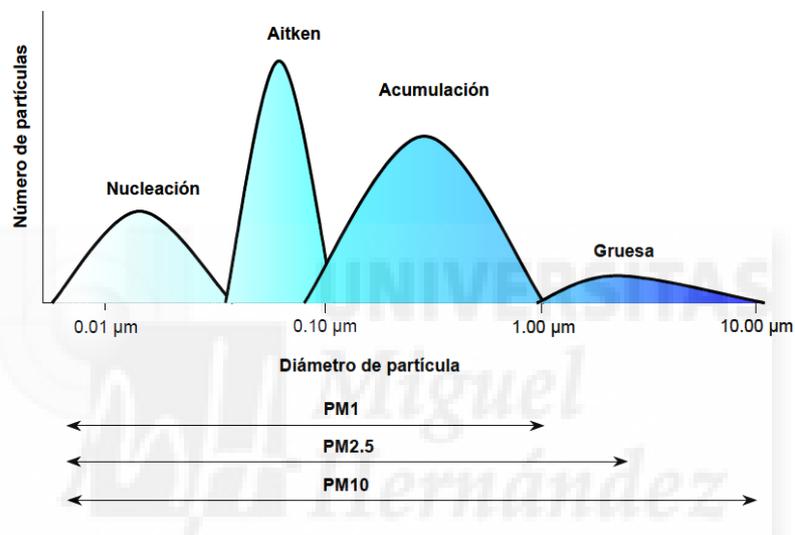


Figura 1: Distribución del número de partículas en función del diámetro.

Sin embargo, en términos de calidad del aire, para hacer referencia al tamaño de las partículas se definen cuatro parámetros fundamentales o fracciones másicas atendiendo al tamaño de corte de los sistemas de captación utilizados. Estas son las siguientes:

- PST: Hace referencia al total de partículas en suspensión.
- PM_{10} : se define como el conjunto de partículas retenidas en un filtro tras pasar a través de un cabezal que seleccionará las partículas en función de su tamaño con una eficiencia de corte del 50% para un diámetro aerodinámico de 10 μm . A veces, por abuso del lenguaje, se hace referencia a esta fracción como aquellas partículas cuyo diámetro es inferior a 10 μm , (ver figura 1).
- $\text{PM}_{2.5}$ y PM_1 : La misma definición que PM_{10} pero con cabezales de corte de 2.5 μm y 1 μm .

La figura 2 muestra la distribución porcentual de partículas en función de su diámetro aerodinámico que conforman las fracciones PM_{10} y $PM_{2.5}$. El porcentaje acumulado de masa para la fracción PM_{10} se puede ver en la Norma UNE-EN 12341.

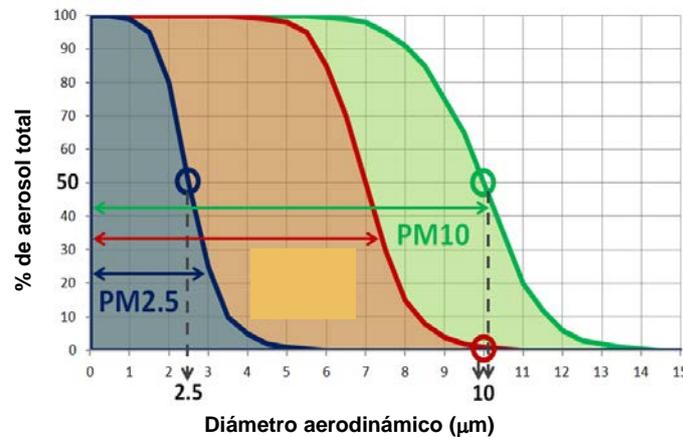


Figura 2: Porcentaje del aerosol que en función de su tamaño conforma las fracciones PM_{10} y $PM_{2.5}$.

Para hacernos una idea de los tamaños que se mencionan, en la figura 3 se representan partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ comparadas con las dimensiones de un cabello humano y un grano de arena. Destacar que es frecuente hablar de $PM_{2.5}$ y PM_1 como las fracciones más finas del PM y al PM_{10} (o en ocasiones el $PM_{10-2.5}$ o PM_{10-1}) como la fracción más gruesa.

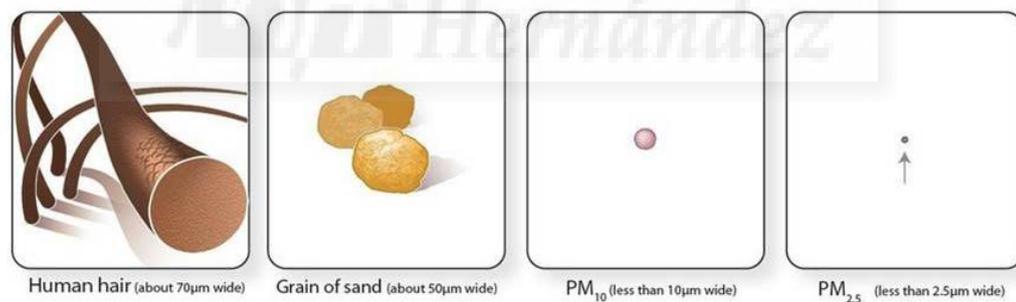


Figura 3: Comparativa de tamaño entre el PM_{10} y $PM_{2.5}$, un cabello humano y un grano de arena.

1.1.3 Fuentes y composición

En general, podemos establecer que la fracción gruesa está compuesta mayoritariamente por partículas provenientes de fuentes como el aerosol marino y la materia mineral (p.ej: Mg, Fe, Ti, Na, Ca...) y se forman básicamente por disgregación de partículas de mayor tamaño por procesos de rotura, molturación y abrasión. Sin embargo existen también partículas gruesas secundarias que son las generadas por reacciones de gases ácidos (SO_2 y HNO_3) con carbonatos o con NaCl, dando lugar a sulfatos y nitratos secundarios (Nicolás et al., 2008).

La fracción de partículas finas ($PM_{2.5}$) puede ser primaria o secundaria. Las primarias pueden proceder de procesos de combustión (principalmente motores diésel) o de la explosión de burbujas en la superficie de mares y océanos (parte fina del aerosol marino). Las secundarias se forman por procesos de nucleación de especies gaseosas, por condensación, coagulación o por reacciones en fase líquida; están compuestas fundamentalmente por sulfatos y nitratos, amonio, carbono elemental, compuestos orgánicos y metales.

Por su parte, la fracción PM_1 es la más desconocida, aunque proviene en su mayoría, y especialmente en el caso de zonas urbana, de emisiones de tráfico (Bree y Cassee, 2000) y de formación de partículas secundarias.

En la figura 4 se puede ver a modo de ejemplo una comparativa entre la composición porcentual de los componentes principales de PM en función de la fracción másica analizada. (El punto de muestreo corresponde a un entorno urbano ubicado en la ciudad de Barcelona, Pérez et al., 2008). De la figura podemos observar como la componente crustal o el aerosol marino es mucho mayor en las partículas gruesas que en las finas, en cambio la concentración de los compuestos carbonosos (OM+EC) procedentes del tráfico predominan en las partículas más finas.

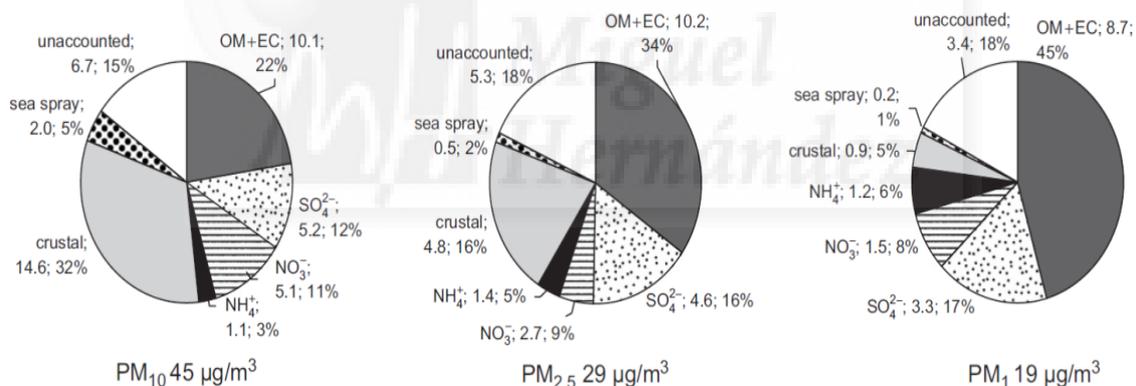


Figura 4: Composición química porcentual del PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 .

1.1.4 Eventos que influyen en la concentración y composición del PM

Variaciones temporales en la concentración y composición química del PM pueden ser ocasionadas por la persistencia temporal de determinados patrones meteorológicos, tanto a escala regional, local o sinóptica. De esta forma, se evidencia la existencia de una serie de episodios que repercuten de forma distinta en los niveles de partículas, algunos con cierta periodicidad anual. Los principales episodios conocidos y estudiados son: los episodios europeos de SO_4^{2-} , las intrusiones de masa de aire africano, los episodios de contaminación de origen antropogénico local, la recirculación de masas de aire y por último, la advecciones atlánticas. Se trata de episodios con impacto en los niveles de material particulado

atmosférico, y todos ellos se caracterizan por generar incrementos en los niveles de partículas con la excepción de los periodos de advección atlántica, que inducen una reducción de los niveles de PM_x (conjunto de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1). La influencia de cada uno de ellos dependerá del tipo de ambiente muestreado así como de la época del año.

Destacamos las 3 más importantes dentro de un entorno urbano del sureste español.

- Intrusiones de masas de aire africano: consisten en procesos de advección de masas de aire con elevada carga particulada desde los desiertos norteafricanos hacia la zona de estudio, con el consiguiente incremento de los niveles de partículas. Por lo general, son más frecuentes durante el verano y el inicio del otoño y tienen una duración variable desde un día hasta dos o tres semanas. El patrón meteorológico más común que suele propiciar estas entradas es el de un anticiclón en el norte de África, aunque pueden haber otros. Suelen afectar más a la fracción gruesa del PM que a la fina, aunque esta también puede verse incrementada, por lo que los ratios PM_{fino}/PM_{grueso} durante estos eventos suele disminuir. Los mecanismos atmosféricos que dan lugar a estos procesos, su frecuencia estacional y su impacto en los niveles de partículas tanto en la Península Ibérica como en Canarias han sido descritos por diversos autores como Querol et al., 2007, Escudero et al., 2007, Nicolás et al., 2008.
- Episodios de contaminación local: el origen de estos episodios se encuentra en la acumulación de las emisiones urbanas, como puede ser la originada por el tráfico, como consecuencia de una escasa dispersión atmosférica que se prolonga durante varios días. Estos episodios suelen darse durante el otoño y el invierno bajo situaciones meteorológicas muy estables regidas frecuentemente por una situación anticiclónica y débiles gradientes de presiones. Estos episodios suelen tener una duración variable de entre tres días y un par de semanas como máximo y por lo general afectan más al PM de origen antrópico, es decir, a la fracción fina, por lo que durante estos eventos el ratio PM_{fino}/PM_{grueso} suele aumentar. Estudios que analizan este tipo de eventos pueden encontrarse en Marcazzan et al., 2002 o Galindo et al., 2008.
- Episodios de advección atlántica: se definen como aquellos en los que el transporte de masas de aire se origina en los sectores atlánticos (esencialmente Oeste y Noroeste), que inducen una reducción de los niveles de partículas atmosféricas por medio de proceso de renovación de masas de aire y de lavado atmosférico. Este fenómeno se produce prácticamente durante todo el año, especialmente en los meses de invierno y primavera.

1.1.5 Legislación relativa al PM

La determinación de los niveles de material particulado en la atmósfera es uno de los parámetros clásicos en el control de la calidad del aire, como consecuencia de sus efectos nocivos sobre la salud, el clima y los ecosistemas.

En España, hasta el año 2001, el control de los niveles de material particulado se realizaba por medidas de humos negros (HN) y PST según los Reales Decretos 1613/1985 (BOE n°219 del 12/09/85) y 1321/1992 (BOE n°289 del 02/12/92) que provienen de la incorporación a la legislación española de las Directivas Europeas 80/779/CEE. Sin embargo, a partir 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, 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 PM_{10} en vez de HN y PST, y estableciendo una mayor restricción en los valores límite.

Actualmente la Directiva que legisla los valores límite establecido para la fracción PM_{10} y $PM_{2.5}$ es la 2008/50/CE del 21 de mayo. La tabla 1 muestra los valores límite establecidos por la actual directiva.

Tabla 1: Valores límite de las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ para la protección de la salud.

	Periodo de promedio	Valor límite
Valor límite diario (PM_{10})	24 horas	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, no podrán superarse en más de 35 ocasiones por año.
Valor límite anual (PM_{10})	1 año civil	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Valor límite anual ($PM_{2.5}$)*	1 año civil	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$

*: Obligado cumplimiento en 1 de Enero de 2020.

Como podemos observar en la tabla 1, en el caso del PM_{10} el límite diario de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no se puede sobrepasar en más de 35 días al año, mientras que el valor anual límite se establece en $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto a la fracción $PM_{2.5}$, hasta el 1 de Enero de 2015 su valor límite era de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero este valor deberá disminuir en los siguientes cinco años hasta los $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cabe destacar que en el supuesto que se superen los valores límites de PM_{10} y $PM_{2.5}$ debido a concentraciones en el aire ambiente producidas por fenómenos naturales, como las citadas intrusiones saharianas, los Estados miembros informarán de ello y facilitarán la justificación necesaria para demostrar que dichos rebasamientos se deben a fenómenos

naturales. Cuando se superen los valores límite establecidos la Directiva, los Estados miembros tendrán la obligación de ejecutar planes de actuación.

1.1.6 Efectos producidos por el aerosol atmosférico

El material particulado atmosférico es, tal como se ha descrito anteriormente, un conjunto heterogéneo de partículas emitidas por muy diversas fuentes, que incluye componentes de distinta naturaleza. Consecuentemente, los efectos del material particulado sobre el entorno son también muy variados, y los más importantes entre ellos se describen a continuación.

Efectos sobre la salud

El sistema respiratorio constituye la principal vía de entrada del material particulado en el organismo. La deposición de las partículas en diferentes partes del cuerpo humano depende del tamaño, forma y densidad de las partículas, así como de la respiración del individuo (nasal u oral). Posteriormente, los efectos que puede inducir el material particulado en el organismo dependen de la granulometría, la morfología y la composición química de las partículas, el tiempo de exposición y la susceptibilidad de cada persona.

Existen dos grupos o categorías de efectos en la salud en función del tamaño de las partículas:

- Partículas gruesas: tienen un tamaño suficiente para penetrar en la región traqueo bronquial (ver figura 5).
- Partículas finas: estas partículas se inhalan profundamente y con facilidad en los pulmones, donde pueden ser acumuladas, reaccionar, ser eliminadas o absorbidas. Solo éstas pueden alcanzar la cavidad alveolar y, por tanto, provocar mayores afecciones.

A partir de estudios epidemiológicos llevados en la década de los noventa entre los que destacan: (Dockery et al., 1993; Schwartz, 1996; Brunekreff et al., 1997) se han relacionado la contaminación por partículas, especialmente las partículas finas, con una serie de problemas significativos de salud, incluyendo: la muerte prematura en personas con enfermedad cardiaca o pulmonar, el agravamiento del asma, la disminución de la función pulmonar o un aumento de síntomas respiratorios.

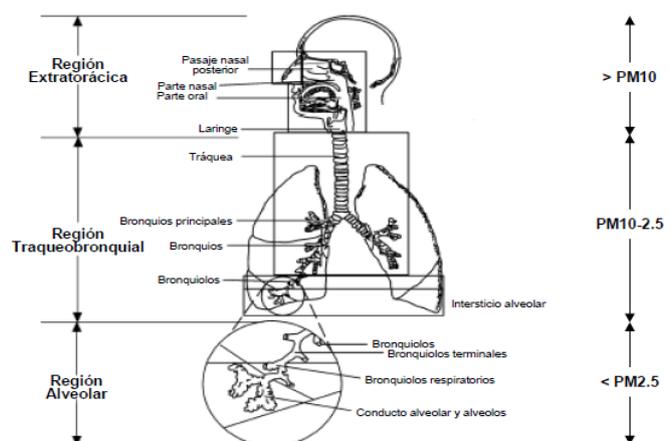


Figura 5: Representación de las diversas regiones del aparato respiratorio humano y capacidad de penetración de las partículas según su tamaño (según EPA, 2002).

Las partículas más gruesas (PM_{10}), como las que se encuentran en el viento y el polvo, son de menor importancia para la salud, a pesar de que puede irritar los ojos, la nariz y la garganta.

Los efectos en la salud del PM también pueden depender de su composición química. La mayoría de estudios apunta a que el mayor impacto en la salud viene causado por las partículas de carbono elemental (EC), compuestos orgánicos (OM, concretamente PAHs), sulfatos y nitratos, partículas ultrafinas ($<0.1 \mu m$) y determinados metales (As, Cd, Fe, Zn, Ni; Wichmann y Peters, 2000). El hecho de que la mayoría de estas partículas se acumulen en la fracción $PM_{2.5}$ contribuye a incrementar sus efectos adversos sobre la salud.

Otros efectos

Las partículas atmosféricas juegan un papel fundamental en la *regulación del clima* del planeta, ya que ejercen un cierto grado de influencia sobre la formación de las nubes. Además, también pueden modificar su albedo. Por otra parte, el PM tiene la capacidad de dispersar y/o absorber radiación dependiendo de sus características físicas y químicas, lo cual tiene efectos directos sobre el clima (EPA, 1996). Esta interacción depende de la composición química de las partículas, entre ellas su carácter higroscópico. Los efectos más significativos del material particulado atmosférico sobre la radiación solar son la dispersión y la absorción de las longitudes de onda cortas (espectro visible), que tienen como consecuencia la modificación del balance radiativo global.

Los ecosistemas también sufren los efectos directos o indirectos de la exposición al material particulado atmosférico, tanto por deposición seca como húmeda. Estos efectos adversos se producen bajo la acción de las partículas atmosféricas, pero también cuando éstas actúan como soporte para otros contaminantes atmosféricos. Las partículas de mayor diámetro tales como el polvo mineral, al depositarse sobre las hojas de las plantas pueden *reducir la capacidad de intercambio gaseoso* así como afectar a la fotosíntesis, lo cual limita el crecimiento. Cuando las partículas se depositan sobre la superficie terrestre, las concentraciones de metales presentes en el material particulado pueden *afectar a las características edáficas e inhibir funciones como la toma de nutrientes por parte de las plantas*. Asimismo, la deposición del material particulado atmosférico puede suponer la acidificación y eutrofización de suelos y aguas superficiales, lo cual a su vez puede repercutir sobre la composición de las aguas subterráneas.

Al margen de estos efectos, en los entornos urbanos el material particulado puede contribuir a la *alteración de los materiales de construcción y recubrimientos*, debido al depósito de las partículas en la superficie de los materiales y su interacción con ellos. Otro efecto significativo del material particulado atmosférico sobre el clima es la *reducción de visibilidad*,

puesto que la visibilidad puede verse alterada por la dispersión de la radiación en el espectro visible.

1.2 PM: niveles y tendencias

1.2.1 Estaciones de medida

En la caracterización (valores y evolución) del PM debe tenerse en cuenta el tipo de entorno que se está monitorizando, puesto que en función de este, habrá un predominio de unas determinadas fuentes emisoras de PM sobre otras. La elección del tipo de ambiente que debe ser muestreado se basa en el tipo de área (urbana, suburbana o rural/regional) y de fuente emisora predominante (tráfico, industria o entorno de fondo). Así la combinación de ambos criterios da lugar a la caracterización definitiva de la estación de monitorización, por ejemplo: estación urbana de tráfico, estación urbana de fondo o entorno de fondo regional.

Algunos de los principales objetivos de las estaciones de medida, los cuales también se recogen, entre otros, en el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, son la:

- Determinación del estado de la calidad del aire y el grado de cumplimiento de límites con respecto a los valores que establezca la legislación vigente.
- Observación de la evolución de contaminantes en el tiempo.
- Detección rápida de posibles situaciones de alerta o emergencia, así como seguimiento de la evolución de la concentración de contaminantes
- Aportar información para el desarrollo de modelos de predicción, además de proporcionar datos para Planes de Prevención y Corrección de la contaminación.

En la figura 6 (Querol et al., 2012) se puede ver un ejemplo de cómo esta estructuración permite discriminar los aportes que al valor global de PM₁₀ registrado presenta cada tipo de entorno. En este caso de los 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁₀ obtenidos en una estación de urbana de tráfico en Barcelona, sabemos que 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no son debidos a fuentes antropogénicas, puesto que forman parte del fondo regional.

Comentar que la mayor parte de estaciones de medición (~60%) son de tráfico o industriales. Éste hecho es debido a que los entornos urbanos del sur de Europa la población vive muy próxima al tráfico, concentrada en los núcleos urbanos. Sin embargo, en los últimos años, se ha registrado un aumento progresivo del número de estaciones de fondo.

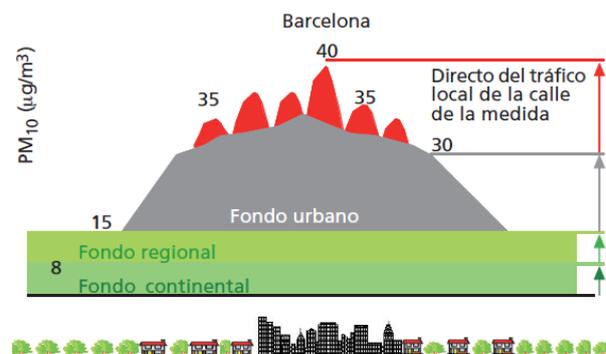


Figura 6: Distintas contribuciones a los valores de PM₁₀.

1.2.2 Rangos habituales de concentración

La figura 7 (Querol et al., 2012) presenta los rangos habituales de PM_{10} (izquierda) y $PM_{2.5}$ (derecha) en estaciones de: fondo rural, fondo suburbano, fondo urbano, industriales y de tráfico (hotspot) en España recopilados a lo largo de un periodo 1999-2012. No se incluyen los niveles de PM_1 ya que esta fracción no se encuentra disponible en un número de estaciones suficientes para obtener rangos representativos desde el punto de vista estadístico.

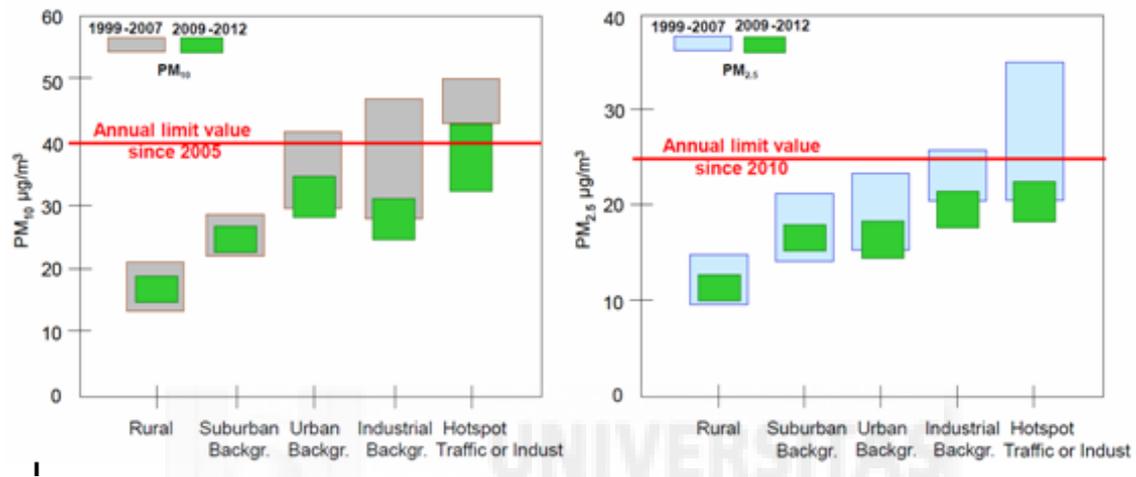


Figura 7: Valores de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en función del ambiente muestreado.

Se puede observar que durante 2009 y 2012 los niveles de PM se redujeron marcadamente respecto a 1999-2007. Este descenso se podría atribuir a tres causas: el impacto en la reducción de emisiones causadas por la crisis económica desde 2008; la consideración del periodo 2009-2012 meteorológicamente benigno para la calidad del aire y además, la eficacia de algunas mejoras ambientales.

Dependiendo de las características del emplazamiento de medida, las concentraciones medias anuales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el periodo 1999-2012 estuvieron entre 12-20 y 10-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en estaciones rurales, 21-41 y 15-24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en zonas suburbanas y urbanas, y 30-50 y 20-38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en zonas de tráfico intenso o hotspots.

El descenso de niveles también se ha visto reflejado en el número de superaciones del valor límite, así en el 2007 para PM_{10} se superó el valor límite tanto en las zonas de tráfico como en zonas urbanas. En cambio en el 2012 solamente se supera el límite establecido en las zonas de tráfico muy intenso. Por lo que respecta al $PM_{2.5}$, en el 2007 se supera el valor límite en las zonas de tráfico intenso mientras que en el 2012 las superaciones son inexistentes.

1.2.3 Variabilidad temporal de la concentración

Las figuras 8 y 9 muestran la evolución mensual del PM_{10} y $PM_{2.5}$ en función del tipo de área muestreado (rural, suburbana y urbana). Las figuras están tomadas del informe de la calidad del aire en España 2001-2012 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente-MAAMA). Como era de esperar, las concentraciones registradas en entornos rurales son menores que las suburbanas y las urbanas en ambas fracciones. En cuanto a la variabilidad temporal, de la figura 8 podemos deducir la existencia de un claro pico invernal en todas las estaciones propiciado por una mayor emisión de PM_{10} y una menor capacidad dispersiva de la atmósfera, ejemplificada sobre todo en los episodios de contaminación local debidos a una elevada estabilidad atmosférica. Este máximo, lógicamente es de menor importancia en los entornos regionales.

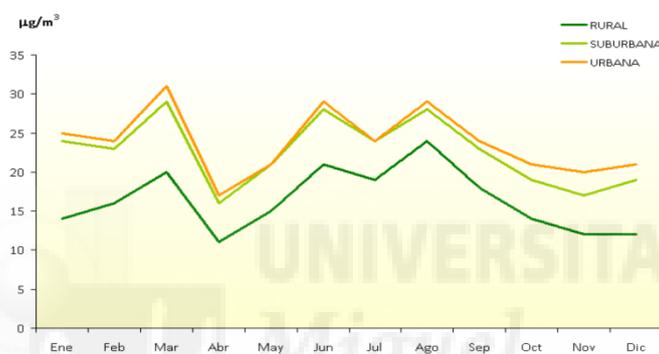


Figura 8: Evolución de las medias mensuales de PM_{10} por tipo de área.

También se observa la existencia de un segundo máximo, bastante más ancho que el anterior durante el verano propiciado por el incremento del aerosol marino, la resuspensión y sobretodo la mayor frecuencia de entradas de aire procedentes del desierto del Sahara. La repercusión, en términos relativos de este máximo veraniego es algo superior en las estaciones de ámbito rural. Finalmente, decir que los valores mínimos registrados durante la primavera y el final del otoño son debidos al mayor registro de lluvias y generalmente a una menor entrada de masas de aire sahariano.



Figura 9: Evolución de las medias mensuales de $PM_{2.5}$ por tipo de área.

En la figura 9, que presenta a la fracción $PM_{2.5}$, vemos como el pico invernal en este caso es ostensiblemente superior al veraniego en los tres entornos. Este hecho pone de manifiesto el mayor carácter antrópico que la fracción fina tiene respecto a la gruesa. Además, se puede observar como las fuentes generadoras del máximo veraniego en PM_{10} , en esta fracción no son tan eficaces.



2 OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo consiste en caracterizar las concentraciones de las principales fracciones másicas en las que se distribuye el aerosol atmosférico. Esta caracterización se llevará a cabo con los registros de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 obtenidos durante todo el año 2014 en un punto de muestreo ubicado en el interior de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

La consecución de este objetivo requerirá el análisis de varios aspectos que conforman tal caracterización y que pueden ser considerados como objetivos secundarios de este trabajo, entre ellos destacan:

- Diferenciación en la evolución temporal tanto a nivel horario como estacional de las tres fracciones másicas de estudio.
- Análisis del ratio PM_1/PM_{10} como indicador de la relación entre la componente natural y antrópica del aerosol atmosférico en el ambiente estudiado.
- Cuantificación de la influencia que, sobre las concentraciones y la tendencia del material particulado atmosférico, tienen los eventos de entradas de masa de aire procedentes del desierto del Sahara y los episodios de elevada estabilidad atmosférica.

3 METODOLOGÍA

3.1 Ubicación y periodo temporal del estudio

Los registros relativos a las concentraciones de las distintas fracciones másicas fueron llevados a cabo en la ciudad de Elche ($38^{\circ} 16'N$; $0^{\circ} 41'O$; 86 msnm), en concreto en la terraza del edificio Alcudia, ubicado en el interior de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), como se muestra en la figura 10. Aproximadamente, la altura de la terraza del edificio está situada a unos 10 m sobre el nivel del suelo.



Figura 10: Ubicación del punto de muestreo.

El punto de muestreo no presenta edificios ni estructuras de mayor altitud a su alrededor, por lo que presumiblemente se trata de una zona bien ventilada.

A priori, teniendo en cuenta cuales son las características de una estación suburbana (zona continua de edificios separados combinada con zonas no urbanizadas), presumiblemente podemos predecir por su ubicación, que el punto de muestreo represente o equivaldría a una estación de tipo suburbano o en su caso de fondo urbano.

Debido a la continua urbanización y mejora de las zonas comunes dentro de la UMH, una fuente de partículas propia del enclave será el material crustal resuspendido. A su vez, otra fuente que debemos tener presente será el tráfico procedente de los vehículos que acceden y aparcan en el recinto ya que la Universidad cuenta con unas 2000 plazas de aparcamiento. Además, la universidad en su parte sur limita con una vía de tráfico (Av. De la

Universidad) que registra una densidad de vehículos en días laborables de unos 20.000 vehículos/día. Por último, otra fuente de partículas a tener en cuenta debido a la proximidad de la ciudad con la costa (~12 km) será el aerosol marino sobre todo en las estaciones de primavera y verano.

El periodo temporal en el que se llevaron a cabo los registros de partículas fue durante todo el año 2014, por lo que se podrá poner de manifiesto tanto la evolución temporal de las fracciones másicas estudiadas como las principales diferencias estacionales que presentan.

3.2 Medida de las fracciones PM_x y variables meteorológicas

El instrumento empleado para la medición de las distintas fracciones másicas ha sido un espectrómetro de partículas GRIMM EDM 365-E (ver figura 11). El espectrómetro consiste en un contador óptico automático del número de partículas por dispersión de luz. Este analizador se emplea para la medición en continuo del número de partículas según su tamaño y gracias a un algoritmo interno, el muestreador obtiene las distintas fracciones másicas con que se va a trabajar en este estudio, PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_{10} medidas en $\mu g/m^3$.



Figura 11: Imagen del espectrómetro Grimm EDM 365-E con los sensores de parámetros meteorológicos y vía de entrada de las muestras al contador de partículas.

El espectrómetro, gracias a varios sensores meteorológicos, también es capaz de registrar niveles de humedad, presión y temperatura. Es importante indicar que el contador posee un sistema de deshumidificación que asegura que la muestra no se vea alterada por exceso de temperatura o humedad, situación en la cual no puede discernir entre partículas y gota de agua. Este sistema de desecado se activa a humedades relativas superiores al 70%, de este modo se evita que las moléculas condensen durante la medida.

El sistema puede llegar a medir concentraciones de partículas cada 6 segundos que se almacenan en una tarjeta de memoria. En nuestro caso, el espectrómetro se configuró para

almacenar datos cada 10 minutos, que posteriormente hemos transformado en registros horarios y diarios.

Para verificar la validez de los datos del Grimm previamente éste se calibró con un captador gravimétrico de referencia LVS 3.1. Este captador únicamente midió concentraciones de PM_{10} diarias durante quince días, por lo que las calibraciones de las otras fracciones másicas se han realizado en base a los ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$ y PM_1/PM_{10} obtenidos con el espectrómetro. La correlación obtenida se muestra en la figura 12.

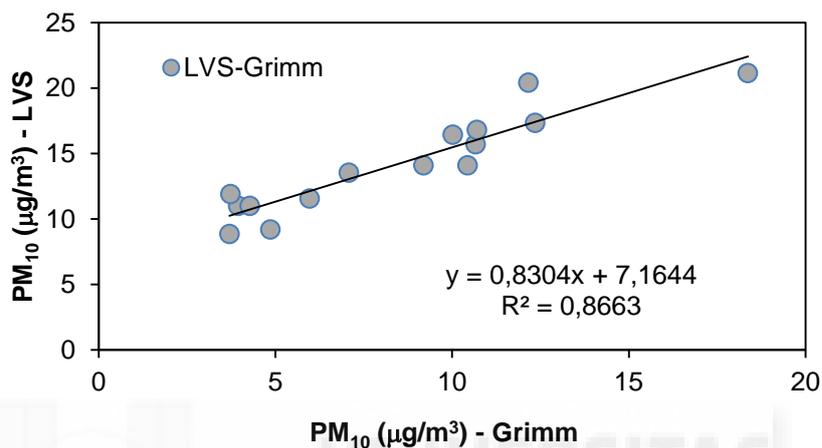


Figura 12: Correlación diaria de la fracción PM_{10} entre el captador de referencia LVS y el espectrómetro.

Para la obtención de registros de variables meteorológicas se ha utilizado los datos provenientes de la estación “Agroalimentari” que forma parte de la Red Valenciana de Vigilancia y Control de la contaminación atmosférica (<http://www.cma.gva.es>). Esta estación está ubicada a las afueras de Elche a unos 2 km de nuestro punto de muestreo. La estación recoge, además de niveles sobre contaminantes atmosféricos, medidas sobre parámetros meteorológicos como temperatura, humedad relativa, precipitaciones, dirección y velocidad de vientos, presión barométrica, y radiación solar. En cuanto, a la visualización de patrones meteorológicos a nivel sinóptico, necesarios para evaluar diversos procesos de transporte de masas de aire hemos utilizado los mapas de la web: www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/. Finalmente, para la estimación de alturas de la capa de mezcla fue llevada a cabo gracias a los sondeos atmosféricos realizados cerca de la localidad de Murcia (~60 km al suroeste de Elche) y que pueden ser obtenidos a través de la página web: weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html.

3.3 Metodología para la identificación de episodios

3.3.1 Eventos saharianos

Los periodos temporales en los que hubo influencia de entradas de aire sahariano, se han obtenido en la página web de Calima (www.calima.es). Esta página es el resultado de un

proyecto promovido por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

En la figura 13 se puede observar un ejemplo de la información obtenida en dicha página para los meses de Febrero y Marzo de 2014.

FEBRERO 2014

FEBRERO 2014									
	CANARIAS	SUROESTE	SURESTE	LEVANTE	CENTRO	NOROESTE	NORTE	NORESTE	BALEARES
COMBUSTIÓN BIOMASA									
EUROPEO SULFATOS									
AFRICANOS	14		15-18 24	15-18 24				18	15-19

Figura 13: Información de eventos según área geográfica extraída de la página Web de Calima.

La información se presenta en función de la localización geográfica afectada. Además de los eventos de intrusión sahariana también se muestran otros tipos de episodios como la combustión de biomasa (incendios forestales), y episodios de sulfato europeos.

La obtención de estos períodos se realiza en base al visionado de programas informáticos que simulan el transporte del material particulado (programas NAAPS, BSC-DREAM o SKIRON), junto con imágenes por satélite. Además del visionado se utilizan retro trayectorias de masas de aire que indican el origen de las mismas (programa HYSPLIT). La figura 14 muestra la imagen de satélite junto con el modelo ICOD-DREAM, en las que se pueden observar a modo de ejemplo y de forma nítida la intrusión que tuvo lugar el día 11/06/2014 y que afectó al área de estudio.

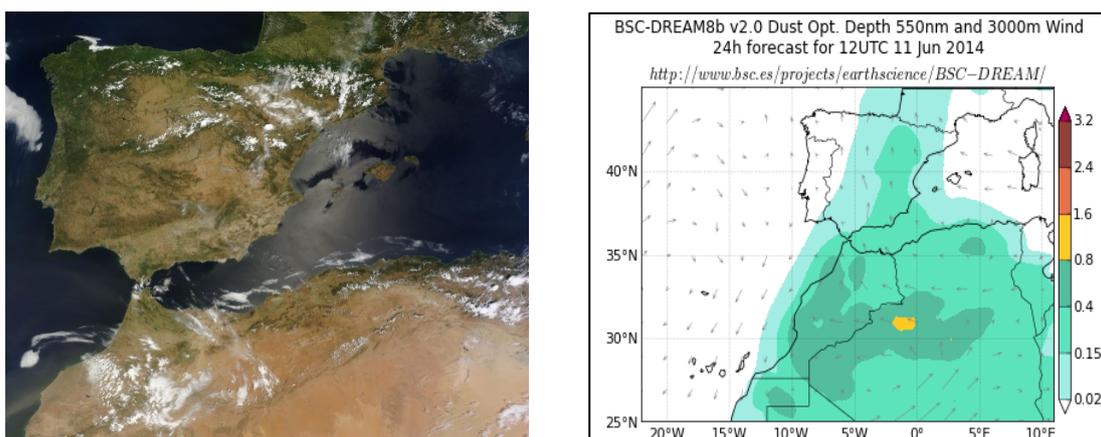


Figura 14: Imagen de satélite y previsión del modelo DREAM que muestran la intrusión que tuvo lugar principalmente en la zona este peninsular el 11/06/2014.

En la tabla 2 se muestran los periodos en los cuales han habido intrusiones en el área de estudio y la duración en días de estos, también se muestra la concentración media de la fracciones másicas estudiadas durante estos periodos.

Tabla 2: Periodos temporales, duración de intrusiones (días) y niveles medios de PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁ en (µg/m³) alcanzados durante las mismas.

Nombre	Periodo	Duración	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁
I1	15/02/2014-18/02/2014	4	21.5	12.6	8.2
I2	24/02/2014	1	26.6	19.8	17.6
I3	29/03/2014-03/04/2014	6	21.1	12.4	7.8
I4	10/04/2014-19/04/2014	10	21.2	15	12.1
I5	20/05/2014-21/05/2014	2	22.7	13.5	9.2
I6	06/06/2014-13/06/2014	8	21	14.9	11.5
I7	20/06/2014-23/06/2014	4	17.8	12.1	8.2
I8	03/07/2014-04/07/2014	2	20.1	9.8	5.7
I9	16/07/2014-19/07/2014	4	17.5	10.3	6.5
I10	27/07/2014-28/07/2014	2	18.7	13.6	10.4
I11	18/08/2014-19/08/2014	2	14.6	11.3	8.5
I12	03/09/2014	1	16.1	12.2	9.6
I13	21/09/2014-22/09/2014	2	13.9	9.1	6.2
I14	29/09/2014-02/10/2014	4	15	11.4	8.4
I15	19/10/2014-21/10/2014	3	30.3	16.7	8.3
I16	27/10/2014-28/10/2014	2	20.7	14.7	10.4
I17	20/11/2014-26/11/2014	7	30.8	20.4	14.1
I18	28/11/2014-01/12/2014	4	14	10.6	6.6
I19	14/12/2014	1	27.5	20.1	13.6

Como podemos observar hasta un total de 19 periodos de intrusión de masas de aire se registraron en el área de estudio durante el año 2014, lo que equivale a un total de 69 días (~19% del total de días del año). La duración de estos periodos oscila entre 1 y 10 días. Destacar el hecho muy inusual de que durante el mes de agosto únicamente durante dos días se registrase este tipo de evento, puesto que suele ser un mes en el que tradicionalmente se registran varias entradas de polvo del norte de África. Por su parte, fue durante la primavera cuando se registró un mayor número de días con la influencia de polvo sahariano, con un 40% del total.

3.3.2 Episodios de elevada estabilidad

Siguiendo las principales premisas que caracterizan un episodio de contaminación local (ver punto 1.1.4 de la introducción), hemos analizado los periodos del año, prioritariamente durante el otoño y el invierno que integren dichos condicionantes: velocidad de viento casi nula, la humedad relativa elevada, existencia de anticiclón que persista durante varios días, alturas de capa de mezcla menores de lo habitual y constatación del incremento diario de las concentraciones de material particulado. En la tabla 3 están expuestos dichos periodos (los más significativos) junto con la duración (en días) de los mismos.

Tabla 3: Periodos temporales, duración de episodios de contaminación local y concentración media registrada durante estos episodios de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Nombre	Periodo	Duración	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_1
AE1	07/01/2014-12/01/2014	6	30.5	27.3	25.6
AE2	15/03/2014-22/03/2014	8	28.7	22	18.9
AE3	03/10/2014-06/10/2014	4	22.4	19	16.5
AE4	10/11/2014-13/11/2014	4	23.1	18.5	16.3

Como se puede observar de la tabla 3, se han podido detectar hasta un total de 4 periodos de acumulación significativos, 2 en invierno y otros 2 en otoño. La duración de estos periodos oscila entre 4 y 8 días y puede observarse el gran impacto que tienen sobre las fracciones másicas más finas.

Un ejemplo visual claro del efecto de este tipo de evento, lo tenemos en la figura 15. En este caso se presenta el aspecto de la ciudad de Madrid. Como se puede apreciar la altura de la capa de mezcla queda muy bien definida y en su interior además de incrementarse la contaminación, la visibilidad se reduce ostensiblemente.



Figura 15: Imagen urbana típica bajo episodio de elevada estabilidad, conocida comúnmente como boina de contaminación.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Descripción meteorológica

En general, podemos decir que Elche posee un clima mediterráneo árido, de inviernos suaves y veranos moderadamente calurosos. No hay una excesiva variación de temperatura a lo largo del año ya que por lo general cuenta con unas temperaturas medias que oscilan entre los 14 °C en invierno y los 26 °C en verano. Las lluvias son escasas, entre 150 y 200 l/m², y se concentran sobre todo en primavera y otoño (Galindo et al., 2011).

La particularización meteorológica para el año 2014 en la ciudad de Elche puede verse en la tabla 4.

Tabla 4: Valores medios mensuales de las principales variables meteorológicas registradas durante el año 2014 en la ciudad de Elche.

	T (°C)	P (l/m ²)	HR (%)	RS (W/m ²)	v (m/s)	D
Enero	13.4	10.4	58.6	72.2	1.2	NO
Febrero	14.3	0.6	54.7	103.8	1.4	NO
Marzo	15.5	0.0	55.1	167.8	1.8	SO
Abril	19.6	2.4	57.4	261.2	1.3	S
Mayo	20.0	5.4	65.4	264.8	1.1	SE
Junio	24.3	4.0	61.6	284.2	1.0	SE
Julio	26.6	0.0	62.5	308.1	1.1	SE
Agosto	27.4	0.0	68.3	268.4	1.1	SE
Septiembre	26.6	48.6	67.1	218.7	0.9	SE
Octubre	22.4	13.0	69.6	162.8	0.7	SO
Noviembre	16.7	33.6	70.9	104.0	0.8	SO
Diciembre	13.3	32.2	60.9	86.7	1.0	NO
Global	20.0	150.2	62.7	191.9	1.1	

T: temperatura; P: precipitación; HR: humedad relativa; RS: radiación solar; v: velocidad del viento; D: dirección predominante del viento.

Como podemos observar, el año de estudio fue bastante seco, registrando lluvias en periodos temporales muy concentrados. De este modo, durante los meses de septiembre, noviembre y diciembre, se registraron el 76% del total de precipitación acumulada durante todo el año. Destaca la escasez de precipitaciones registrada durante los meses de primavera. Por otra parte, las variaciones mensuales de temperatura han sido las esperadas, con un máximo de 27.4 °C en Agosto y un mínimo de 13.3 °C obtenido en el

mes de Diciembre. Finalmente, las direcciones predominantes del viento son la NO durante los meses más fríos, y la SE durante el periodo más cálido.

4.2 PM_x: caracterización de niveles

La figura 16 presenta los principales parámetros estadísticos obtenidos a lo largo del año 2014 de las tres fracciones másicas estudiadas. La representación se basa en un diagrama de cajas (box-plot). En este diagrama se pueden observar diferentes parámetros: los valores máximos y mínimos, representados por los extremos de los bigotes; los percentiles 75 y 25 representado por los límites superiores e inferiores de la caja; la media la cual tiene forma de rombo y finalmente la mediana cuya forma es el rectángulo. Los círculos que están en la parte superior son los valores inusuales o atípicos.

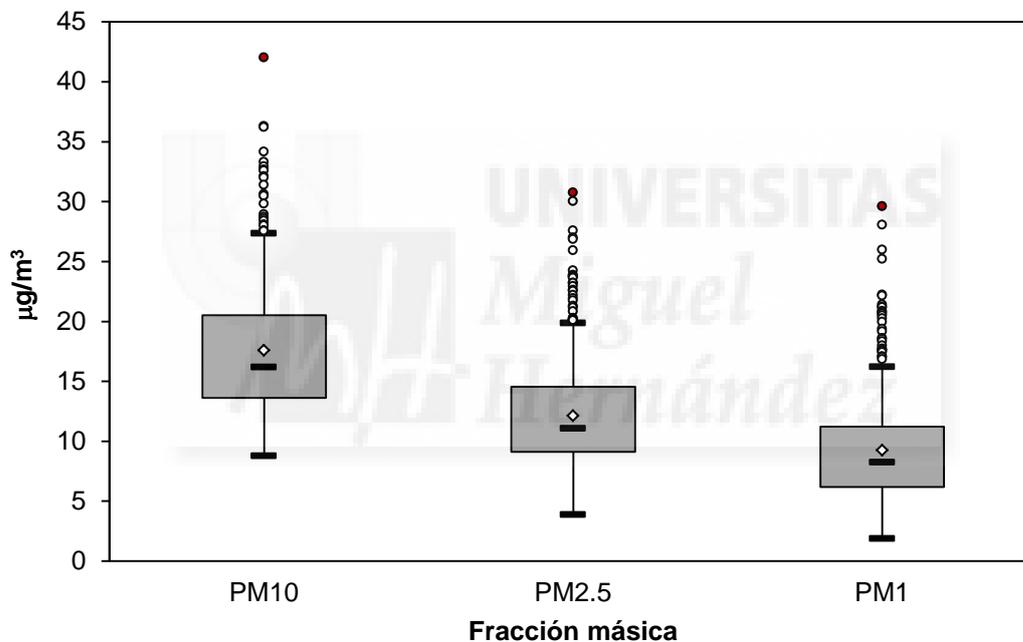


Figura 16: Diagrama de caja de las concentraciones de las fracciones másicas.

Los valores medios obtenidos de PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁ son 17.6 µg/m³, 12.1 µg/m³ y 9.2 µg/m³, respectivamente. Estos valores indican concentraciones ubicadas en el extremo inferior del rango de concentración que presentan las estaciones de tipo suburbano o en el superior de los ambientes regionales (ver figura 7-introducción). Este resultado permite establecer la afirmación de que durante el año 2014 las concentraciones medias de las tres fracciones másicas registradas en el entorno de la Universidad fueron bastante bajas. Hay que destacar, que ningún valor medio supera a los límites medios anuales establecidos por la legislación, 40 µg/m³ para PM₁₀ y 20 µg/m³ para PM_{2.5}.

En cuanto a los valores atípicos, los máximos alcanzados (representados con puntos rojos) son de $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} , $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ y $29.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_1 , por lo que el máximo valor alcanzado ese año para PM_{10} tampoco superó el valor límite establecido por la legislación, la cual dice que no podrán superarse los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en más de 35 ocasiones por año.

Por otra parte, el ratio $\text{PM}_1/\text{PM}_{10}$ (o $\text{PM}_{\text{fino}}/\text{PM}_{\text{grueso}}$) anual fue de 0.52. Esto quiere decir que el 52% del material particulado que conforma la fracción PM_{10} está constituido por partículas pertenecientes a la fracción PM_1 . En una aproximación algo tosca, podríamos establecer que aproximadamente para la fracción PM_{10} , la mitad de las partículas presentan un origen antrópico y la mitad tiene origen natural.

En el siguiente histograma, mostrado en la figura 17, se puede observar cómo se distribuye por frecuencias las concentraciones diarias obtenidas de PM_{10} . Se ve que las concentraciones con mayor frecuencia (55 y 52) son las comprendidas entre 13 y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

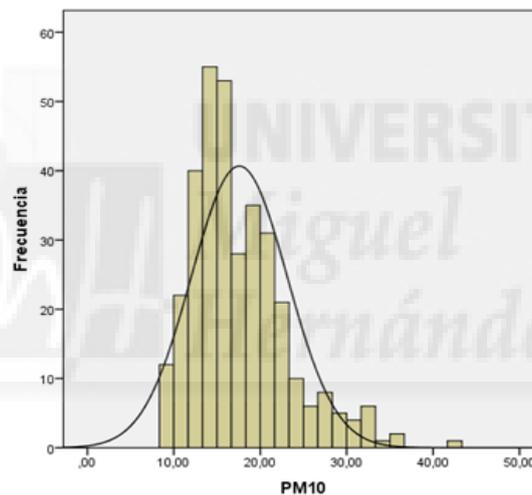


Figura 17: Distribución de las concentraciones de PM_{10} según su frecuencia.

Para evaluar la normalidad de la gráfica, se ha realizado la prueba de Kolmogorov-Smirnov la cual sirve para dilucidar si una distribución de registros como los que tenemos se distribuye de una manera normal (gaussiana). Se puede observar en la gráfica antes de hacer la prueba que su distribución no es exactamente normal (aunque se aproxima) ya que está un poco desplazada hacia la izquierda y no centrada como debería estar. La prueba ha confirmado que evidentemente no es una distribución normal ($p\text{-valor} < 0.05$). La prueba se ha realizado con las otras dos fracciones másicas y el resultado ha sido el mismo.

4.3 PM_x : evolución temporal

A continuación vamos a analizar la evolución mensual y horaria de las distintas fracciones másicas, así como la del ratio $\text{PM}_1/\text{PM}_{10}$. Con ello se evaluará como se producen las

distintas fluctuaciones temporales que caracterizan la evolución del material particulado en el entorno estudiado.

4.3.1 Evolución mensual

La figura 18 representa la evolución de los valores medios mensuales de concentración de las fracciones másicas y del ratio PM_1/PM_{10} (eje derecho).

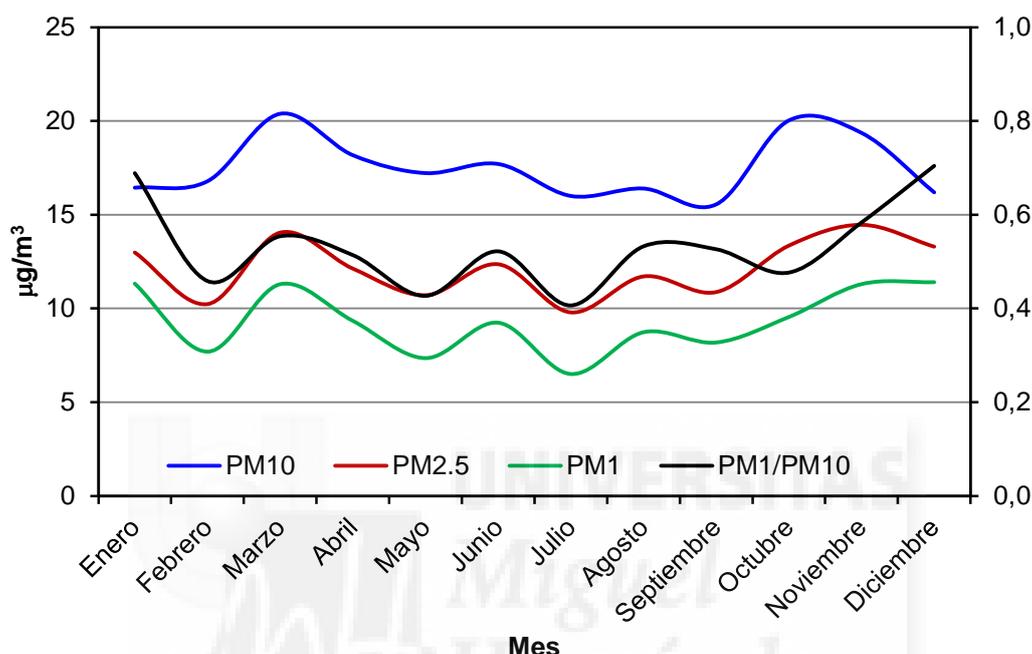


Figura 18: Evolución de las medias mensuales de PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 y del ratio PM_1/PM_{10} .

Lo más llamativo de la figura 18, es sin lugar a dudas no encontrar el típico máximo estival que la fracción PM_{10} suele presentar, (ver figura 8-introducción). La concentración registrada durante Julio, pero sobre todo durante el mes de Agosto es anormalmente baja y sin duda influye en el bajo nivel medio anual registrado para esta fracción. Algo semejante puede decirse para la fracción $PM_{2.5}$, mientras que la fracción más fina (PM_1) parece presentar una tendencia estacional más lógica y esperable. Por su parte, los picos típicos de Febrero–Marzo si son reconocibles en las tres fracciones. Las escasas lluvias registradas durante los meses de primavera (ver tabla 4) acentúan aún más los valores tan bajos registrados durante el verano.

Ya que conocemos que el típico amplio máximo estival es provocado fundamentalmente por las intrusiones de origen norte africano, podemos comprobar la frecuencia de estos episodios durante estos meses. La tabla 2, nos indica que únicamente 8 días en el mes de Julio (en las intrusiones I9 e I10) y 2 días en agosto (I11) estuvieron bajo la influencia de este tipo transporte. Muy escasos días respecto a lo que suele tener lugar. De hecho,

durante el año 2014 las intrusiones se han dado con una mayor frecuencia en primavera que en verano.

Una breve comparativa con lo acontecido durante el mes de Julio de 2015, muestra la anomalía producida en 2014. La comparación se puede observar en la tabla 5.

Tabla 5: Comparación del impacto de las intrusiones durante los meses de Julio de los años 2014 y 2015.

Periodo	N (Nº de días)	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁ (µg/m ³)
Julio 2014	8	16.0	9.8	6.5
Julio 2015	17	20.1	12.4	8.8
Diferencia	9	4.1	2.6	2.3

Como podemos observar de la anterior tabla durante el mes de julio 2015 se registraron el doble de días influenciados con este tipo de episodio, lo que dio lugar a que la concentración media para ese mes de PM₁₀ se incrementase en más de 4 µg/m³, es decir, un aumento del 26%. También debemos tener en cuenta que durante Julio 2015, ya habían empezado las obras de acondicionamiento del campus universitario en zonas muy próximas al equipo de muestreo y estas obras sin duda alguna son también generadoras de material particulado atmosférico.

Los máximos registrados en Octubre y Noviembre posiblemente tengan su explicación en la aparición de eventos de elevada estabilidad atmosférica. En cuanto al ratio PM₁/PM₁₀, que como hemos indicado anteriormente, podría ser considerado como una especie de un indicador antrópico-natural, se puede observar que cumple bastante bien con la evolución estacional esperable de él, con valores elevados en otoño e invierno debido que es la época que se genera más partícula fina (acumulación) y menores durante el verano a pesar de que no se hayan registrado muchas intrusiones.

4.3.2 Evolución horaria

A continuación en los siguientes gráficos (figura 19) representamos la evolución a lo largo de un día (evolución horaria) de las diferentes fracciones másicas y del ratio PM₁/PM₁₀ durante las estaciones de invierno y verano.

Los registros horarios corresponden a la hora UTC, no local. Pero basta recordar que durante el verano la hora local es la UTC+2h y en invierno es UTC+1h. Por otra parte, los patrones obtenidos durante las estaciones de primavera y otoño (no mostrados), pueden considerarse como fases transitorias entre las estaciones representadas, es decir, por ejemplo, el patrón de primavera sería una especie de estadio intermedio entre el de invierno y el de verano.

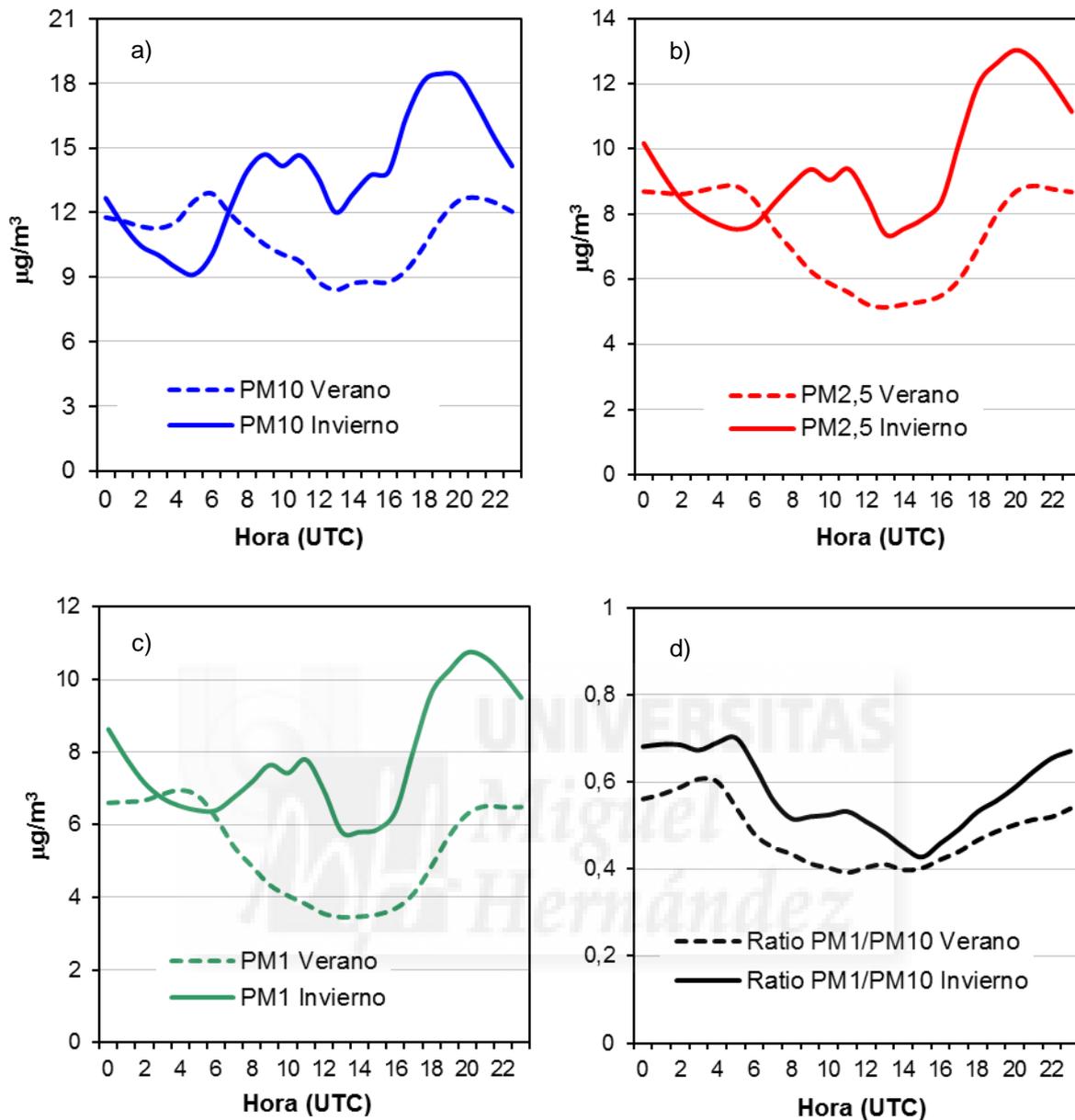


Figura 19: Evolución horaria de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 y del ratio PM_1/PM_{10} .

En los 4 gráficos que constituyen la figura 19 se aprecian algunas diferencias y similitudes que a continuación comentamos:

- Se evidencia una gran similitud en la evolución horaria de las distintas fracciones másicas para una misma estación (figuras 19a, 19b y 19c). En el caso de la evolución invernal se presentan dos claros máximos. Un máximo relativo durante la mañana y uno absoluto a últimas horas del día e inicio del siguiente. Por su disposición horaria ambos están relacionados con el tráfico, sin embargo, el absoluto es ostensiblemente mayor debido a que además es consecuencia de la disminución de la altura de la capa de mezcla que favorece la acumulación de partículas y

consecuentemente la coagulación entre ellas (Pey et al., 2008). Este fenómeno parece ser que en términos relativos afecta más a la fracción PM_1 como se puede apreciar en la figura 19c. Por su parte, la evolución estival presenta un claro y ancho mínimo durante las horas centrales del día (10:00-18:00 UTC), el cual es más pronunciado cuanto más fina es la fracción másica. Posiblemente, la mayor altura de la capa de mezcla que tiene lugar a esas horas en la estación estival hace que el volumen de dilución sea mucho más grande que en invierno y no se produzca ningún tipo de acumulación del material particulado.

- Durante la mayor parte del día la concentración de las tres fracciones másicas es superior durante el invierno que durante el verano. De hecho las diferencias pueden llegar a ser notables, sobre todo a últimas horas del día con diferencias de más de $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} o de más de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la fracción PM_1 .
- En la figura 19d podemos observar como el ratio PM_1/PM_{10} es siempre mayor durante el invierno que durante el verano. Posiblemente de haber acontecido un verano con más intrusiones de masas de aire procedentes del Sahara esta diferencia aún sería mayor. Este resultado es lógico si consideramos que durante el invierno hay una mayor generación de partícula fina de carácter antrópico. Tanto durante el verano como en el invierno los mayores ratios se obtienen a últimas horas del día y primeras de la mañana.

4.4 PM_x : influencia de eventos

4.4.1 Cuantificación de los impactos

Para ayudar a cuantificar la influencia que los dos eventos estudiados tienen sobre las tres fracciones másicas, la tabla 6 muestra una comparativa de las concentraciones obtenidas cuando se producen este tipo de episodios (Intrusión y Acumulación o periodo de elevada estabilidad atmosférica) y cuando no (Sin evento). También se muestra para cada evento el número de días que fue registrado durante todo el año (N), su porcentaje respecto al total de datos (%) y el incremento porcentual de su concentración respecto a cuándo no se produce evento (Incremento %).

La tabla muestra como alrededor del 24% del total de días estuvieron influenciados por estos dos tipos de episodios: 18.4% de intrusiones y 6.0% de acumulaciones. El resto de días ha sido considerado como "sin evento".

La tabla muestra un mayor incremento de concentración en las tres fracciones másicas cuando se produce un proceso de elevada estabilidad que cuando tiene lugar una intrusión sahariana (fenómeno que sería más relevante en una estación de montaña por ejemplo). Por otra parte, se evidencia que el fenómeno de intrusión afecta más a las partículas

gruesas (31.4% de incremento) frente a las más finas (20.7%). Sin embargo, la situación es la inversa cuando hablamos del otro tipo de episodio, en el que se produce un incremento excepcional del 139% en la fracción $PM_{1.0}$. Esta tabla a su vez muestra que la consecución de este tipo de episodios es importante y repercute en el valor medio anual de las distintas fracciones de partículas, de hecho son responsables de aproximadamente un 10-12% de su valor final anual.

Tabla 6: Comparación de las concentraciones de PM_x y ratio PM_1/PM_{10} durante periodos de intrusión, elevada estabilidad y cuando no se produce ningún tipo de evento.

	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	$PM_{1.0}$ ($\mu g/m^3$)	PM_1/PM_{10}
Intrusión				
N	67	67	67	67
%	18.4	18.4	18.4	18.4
Concentración	20.9	14.0	9.9	0.49
Incremento %	31.4	29.6	20.7	-3.9
Acumulación				
N	22	22	22	22
%	6.0	6.0	6.0	6.0
Concentración	26.8	22.1	19.6	0.72
Incremento %	68.6	104.6	139	41.2
Sin evento				
N	251	251	251	251
%	68.8	68.8	68.8	68.8
Concentración	15.9	10.8	8.2	0.51
Total				
N	340	340	340	340
%	93	93	93	93
Concentración	17.6	12.1	9.2	0.52

Respecto del ratio PM_1/PM_{10} , como era de esperar se produce un incremento positivo (41.2%) durante los periodos de elevada estabilidad, mientras que tiene lugar un ligero descenso del ratio en periodos de entradas de masas de aire norteafricano.

4.4.2 Seguimiento temporal de los eventos

La figura 20 muestra la evolución temporal de los valores medios diarios de las fracciones másicas y del ratio PM_1/PM_{10} durante el mes de Octubre. Se ha elegido este mes pues en el concurren, de forma casual, los dos tipos de eventos analizados en este trabajo, y de este

modo puede reflejarse claramente sus distintas formas de influir sobre el material particulado. El primero que tiene lugar es el AE3 (ver tabla 3) a finales de la primera semana del mes y el segundo es la I15 que tuvo lugar a finales de la tercera semana (ver tabla 2).

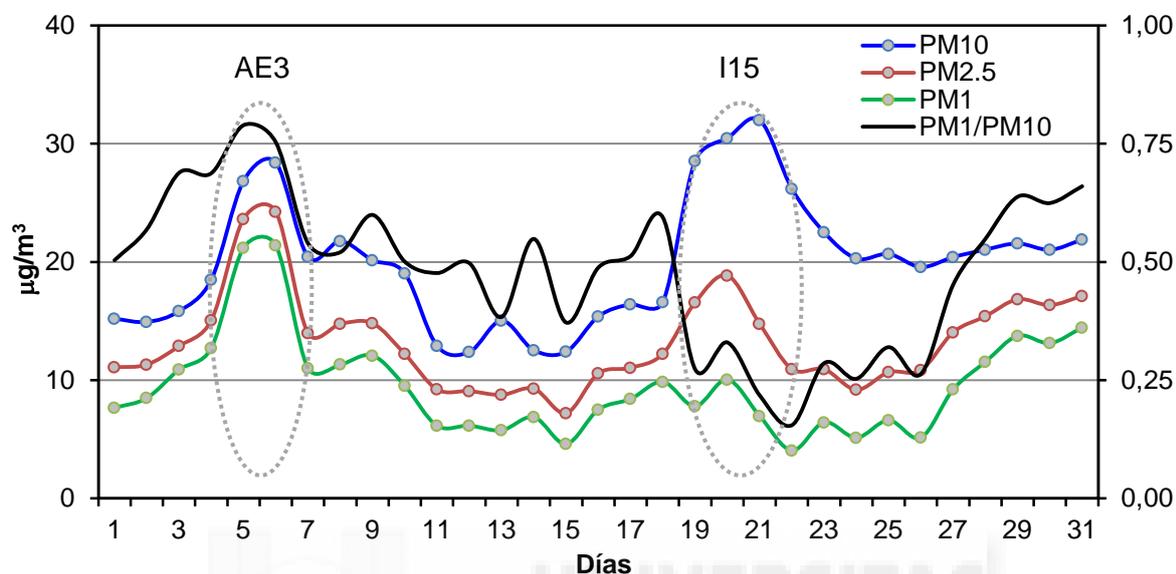


Figura 20: Evolución diaria de PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁ y del ratio PM₁/PM₁₀ durante el mes de Octubre.

De la figura 20 podemos evidenciar como se produce durante el transcurso del AE3 una progresiva acumulación diaria de la concentración de partículas en todas las fracciones másicas desde el día 2 hasta el día 6. También se puede apreciar como en términos relativos los incrementos de las fracciones más finas son superiores a los de la fracción PM₁₀, y consecuencia de ello es el incremento del ratio por encima de valores de 0,75.

Por su parte, y tras un periodo de transición (sin eventos), tiene lugar la I15. Esta intrusión es bastante corta, de apenas 3-4 días, sin embargo refleja bastante bien la diferente influencia que ejerce sobre el PM_x con respecto a la ejercida por los episodios de elevada estabilidad. De este modo, mientras la fracción PM₁₀ presenta un notable aumento, éste es bastante inferior en la fracción PM_{2.5}, mientras que no se llega a percibir en el PM₁. Resultado de todo ello es que el ratio PM₁/PM₁₀ presenta valores inferiores a 0,25, los valores más bajos de todo el mes.

Las figuras 21a y 21b muestran de forma específica los episodios con una mayor resolución temporal, para poder así observar cómo evolucionan de forma horaria ambas influencias en los niveles de las fracciones másicas. En este caso únicamente se han representado el PM₁₀ y el PM₁ junto con el ratio.

La figura 21a muestra la evolución durante el AE3. En ella se observa como el patrón temporal (principalmente el de invierno) mostrado en las figuras 19a y 19c se sigue

cumpliendo. Sin embargo, durante los días que dura el episodio son sobre todo, los picos nocturnos los que incrementan tanto su concentración como su amplitud temporal. De hecho son estas perturbaciones las principales responsables de los incrementos diarios observados durante el episodio en la figura 20. Es importante también hacer notar que la tendencia de ambas fracciones es prácticamente la misma y que durante estos picos nocturnos el PM_1 llega a constituir el 80% del PM_{10} . Por lo tanto, durante estos periodos el efecto de la disminución de la altura de la capa de mezcla incrementa su efecto y eleva considerablemente las concentraciones que al no ser diluidas, día a día van incrementándose.

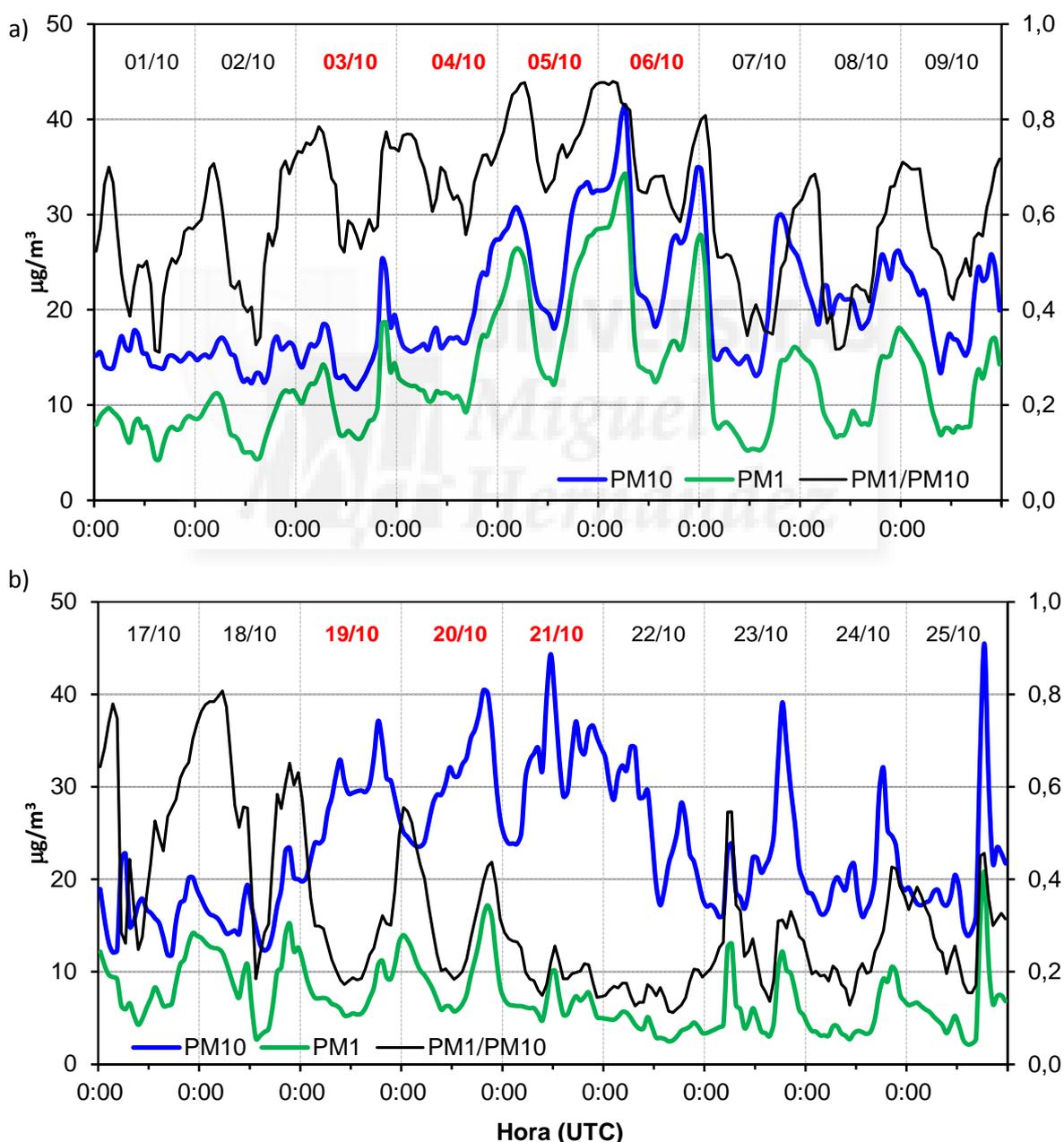


Figura 21: a) Evolución horaria de las fracciones másica durante AE3; b) Evolución horaria de las fracciones másica durante la I15.

La figura 21b por su parte, muestra el impacto de la I15 sobre los niveles de partículas. En ella podemos ver dos importantes diferencias respecto a la figura 21a. Por un lado, el PM_{10} no se ve afectado en absoluto y sigue su evolución horaria normal. Por otro, el registro horario de PM_{10} durante la intrusión no mantiene el patrón horario regular de forma tan evidente, así se van registrando picos de concentración conforme la intrusión va penetrando en el ambiente urbano de la ciudad. Este efecto sobre todo se puede observar durante el día 21. Durante este día se puede observar un gran pico registrado sobre las 12:00 UTC que únicamente tiene que ver con la entrada puntual de material particulado sahariano.



5 CONCLUSIONES

El presente estudio pone de manifiesto que el año 2014 fue un año algo atípico en lo que corresponde a la evolución estacional de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y sobre todo de PM_{10} . Debido a ello, las concentraciones medias anuales de las fracciones másicas analizadas fueron bastante inferiores a lo esperado.

En función de estas concentraciones, las cuales no superaron los valores límites establecidos por la legislación, podríamos designar el punto de muestreo utilizado como un tipo de ambiente sub-urbano. El principal causante de esta inusual anomalía fue la escasez de periodos de intrusión sahariana registrados durante el verano. Aun teniendo en cuenta la relevancia de este hecho, el ratio PM_1/PM_{10} si mantuvo una tendencia estacional esperable, registrando valores más elevados durante el invierno y menores en verano.

Destacar la existencia de una clara diferencia respecto a la evolución horaria para una misma fracción másica en función de la estación del año analizada. Se puede apreciar como el tráfico y la evolución de la capa de mezcla a lo largo del día modulan la evolución horaria de las distintas fracciones másicas.

La influencia que los episodios de intrusiones saharianas y elevada estabilidad atmosférica presentan sobre el PM_x es muy apreciable y a la vez muy diferente. Mientras los eventos de transporte africano afectan principalmente a la fracción gruesa, los de elevada estabilidad lo hacen sobre todo en el $PM_{2.5}$ y el PM_1 . De esta forma, durante periodos de acumulación, en promedio, ambas fracciones presentan un incremento superior al 100% de su concentración base (la que se registra cuando no se produce ningún tipo de evento). Lógicamente, durante estos periodos, el ratio PM_1/PM_{10} también incrementa su valor de forma apreciable.

Otra diferencia en la influencia que estos eventos ejercen en el PM_x se observa en la diferente forma con la que ambos incrementan de forma temporal los niveles de PM_x . Mientras, durante los periodos de elevada estabilidad, la evolución/forma horaria de las concentraciones permanece inalterada, únicamente se incrementan sus valores especialmente los registrados durante el periodo nocturno, en los periodos de intrusión la estructura horaria puede verse alterada con la presencia de un pico de concentración que corresponda con la entrada en el ambiente urbano de la masa de aire sahariana.

6 PROYECCIÓN FUTURA

Considero que se podrían plantear algunos proyectos futuros que complementarían los resultados obtenidos en este estudio y proporcionarían una información más detallada sobre la calidad del aire en el entorno de la universidad.

- Profundizar en los aspectos meteorológicos que nos describen tanto los episodios de acumulación como los de intrusión, por ejemplo, detallando con más profundidad la influencia de la altura de la capa de mezcla en ambos eventos y por lo tanto su implicación en las concentraciones y evoluciones temporales obtenidas.
- Realizar una caracterización química de las fracciones másicas y determinar sus principales componentes y así poder conocer cuáles son los más representativos o abundantes en función de la fracción másica analizada, así como sus tendencias y concentraciones. Este proyecto requeriría de tres captadores gravimétricos.
- Realizar el mismo análisis que se ha realizado en este documento pero en función del número de partículas según su tamaño en lugar de trabajar con concentraciones másicas. Para este fin, se podría utilizar el mismo espectrómetro de partículas que el usado en este trabajo.

En cualquiera de los supuestos anteriores, el estudio debe ser prolongado en el tiempo. Cuanto mayor tiempo se abarque, mayor información proporcionarán los datos.

7 BIBLIOGRAFÍA

Análisis de la calidad del aire en España. Evolución 2001-2012. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAAMA). (2014). http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/estudios/Libro_Aire.aspx

Brunekreef B., Janssen N.A.H., Harssema H., Knappe M. y Vliet P.V. *Air Pollution from truck traffic and lung function in children living near motorways*. Epidemiology 8, 8. (1997).

Directiva 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.

Dockery D.W., Pope C.A., Xu X., Spengler J.D., Ware J.H., Fay M., Ferris B.G., Speizer F.E. *An association between air pollution and mortality in six U.S. cities*. New England Journal of Medicine 329, 753-1759. (1993).

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, 5516–5524. (2007).

Galindo, N., Nicolás, J.F., Yubero, E., Caballero, S., Pastor, C., Crespo, J. *Factors affecting levels of aerosol sulfate and nitrate on the Western Mediterranean coast*. Atmospheric Research 88, 305-313. (2008).

Galindo, N., Varea, M., Moltó, J., Yubero, E., Nicolás, J.F. *The influence of Meteorology on particulate matter concentrations at an urban Mediterranean location*. Water air and soil pollution 215, 365-372. (2011).

Marcazzan, G. M., Valli, G., Vecchi, R. *Factors influencing mass concentration and chemical composition of fine aerosol during a PM high pollution episode*. Science of Total Environment 298, 65-79. (2002).

Mészáros, E. *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. Akadémiai Kiado. (1999).

Nicolás, J.F., Chiari, M., Crespo, J., García Orellana, I., Lucarelli, F., Nava, S., Pastor, C., Yubero, E. *Quantification of Saharan and local dust impact in an arid Mediterranean area by the positive matrix factorization (PMF) technique*. Atmospheric Environment 42, 8872-8882. (2008).

Nicolás, J.F., Galindo, N., Yubero, E., Pastor, C., Esclapez, R., Crespo, J. *Aerosol Inorganic ions in a semiarid region on the southeastern Spanish Mediterranean coast*. Water, air and soil pollution 201, 149-159. (2009).

Norma UNE-EN 12341 Calidad del Aire - Determinación de la fracción PM_{10} de la materia particulada en suspensión – Método de referencia y procedimiento de ensayo de campo para demostrar la equivalencia de los métodos de medida al de referencia. (1999).

Pérez, N., Pey, J., Querol, X., Alastuey, A., Lopez, J.M., Viana, M. *Partitioning of major and trace components in PM_{10} – $PM_{2.5}$ – PM_1 at an urban site in Southern Europe*. Atmospheric Environment 42, 1677-1691. (2008).

Pey, J., Rodríguez, Sergio., Querol, X., Alastuey, A., Moreno, T., Putaud, J.P., Van Dingenen, R. *Variations of urban aerosols in the western Mediterranean*. Atmospheric Environment 42, 9052–9062. (2008).

Querol, X., Pey, J., Pandolfi M., Alastuey, A, Cusack, M., Perez, N., Moreno, T., Viana, M., Mihalopoulos, N., Kallos, G., Kleanthous, S. *African dust contributions to mean ambient PM_{10} mass-levels across the Mediterranean Basin*. Atmospheric Environment 41, 5516–5524. (2007).

Querol, X., Viana, M., Moreno, T., Alastuey, A., Pey, J., Amato, F., Pandolfi, M., Minguillón, M.C., Reche, C., Pérez, N., González, A., Pallarés, M., Moral, A., Monfort, E., Escrig, A., Cristóbal, A., Hernández, I., Miró, J.V., Jiménez, S., Reina Velázquez, F., Jabato R., Ballester, F., Boldo, E., Bellido J. *Bases científico-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire*. ISBN: 978-84-00-09475-1. Editorial: CSIC. (2012).

Schwartz, J., Dockery, D.W., Neas, L.M. *Is daily mortality associated specifically with the fine particles?* Journal of Air and Waste Management Association 46, 927-939 (1996).

Van Bree, L., and Cassee, F.R. *A Critical Review of potentially causative PM properties and mechanisms associated with health effects*, National Institute of Public Health and the Environment (RIVM) Research Report, report no. 650010015, Bilthoven, the Netherlands. (2000).

Wichmann, H.E., Peters, A. *Epidemiological evidence of the effects of ultrafine particle exposure*. *Philosophical Transactions A* 358, 2751–2769. (2000).

