

INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN DEL AEROSOL ATMOSFÉRICO EN LA DISPERSIÓN DE LA RADIACIÓN

Autora: Isabel Yanju Gómez Sánchez

Tutor: José Francisco Nicolás Aguilera

Departamento de Física Aplicada

Curso Académico 2024/2025



CIENCIAS AMBIENTALES
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

Resumen

El presente trabajo analiza la dispersión de la radiación solar producida por los compuestos que forman el aerosol atmosférico. Los parámetros ópticos estudiados son: el coeficiente de dispersión (σ_{sp}), SAE y MSE. El registro de datos se efectuó durante el invierno de 2024, en el municipio de Beneixama, en un ambiente atmosférico que representa un fondo rural. La cuantificación de la dispersión de la luz ha sido llevada a cabo gracias a un Nefelómetro, el cual ha proporcionado los valores de σ_{sp} . Simultáneamente muestras de PM_{2.5} fueron recogidas mediante la utilización de un muestreador de alto volumen. A partir de la composición química de las muestras se obtuvieron las concentraciones de los siguientes componentes: aerosol secundario y marino, materia orgánica, carbono elemental y polvo mineral. Un modelo de regresión multilíneal determinó la contribución de cada uno de ellos al valor de la dispersión. Los resultados muestran que el aerosol secundario es el componente más relevante en el proceso.

Palabras clave

Aerosol atmosférico, dispersión de la radiación, fondo rural, componentes químicos.

Abstract

This study analyzes the scattering of solar radiation caused by the compounds that make up atmospheric aerosol. The optical parameters studied are: the scattering coefficient (σ_{sp}), SAE, and MSE. Data collection was carried out during the winter of 2024 in the municipality of Beneixama, in an atmospheric environment representative of a rural background. The quantification of light scattering was performed using a Nephelometer, which provided the σ_{sp} values. Simultaneously, PM_{2.5} samples were collected using a high-volume sampler. Based on the chemical composition of the samples, the concentrations of the following components were determined: secondary and marine aerosol, organic matter, elemental carbon and mineral dust. A multiple linear regression model determined the contribution of each component to the scattering value. The results show that secondary aerosol is the most relevant component in the process.

Keywords

Atmospheric aerosol, radiation scattering, rural background, chemical components.

ÍNDICE

1. Introducción	3
1.1 Composición química del aerosol atmosférico según su tamaño	3
1.2 Dispersión de la luz debida al PM	6
1.3 Caracterización del scattering	7
1.4 Eficiencia del proceso de dispersión	9
2. Objetivos	11
3. Materiales y métodos	12
3.1 Localización espacio-temporal del estudio	12
3.2 Obtención de las propiedades ópticas de dispersión	13
3.2.1 Nefelómetro AURORA 3000	13
3.2.2 SAE y MSE	14
3.3 PM _{2.5} : análisis químico y determinación de sus componentes	15
3.3.1 Determinación del PM _{2.5} y análisis químico	15
3.3.2 Componentes del PM _{2.5}	15
3.4 Meteorología y determinación de eventos saharianos	17
3.5 Modelo de regresión multilíneal	17
4. Resultados	19
4.1 Análisis de los parámetros de scattering	19
4.1.1 Valores estadísticos y relación entre parámetros	19
4.1.2 Evolución temporal de las propiedades de scattering	20
4.2. Contribución de los componentes químicos al PM _{2.5}	22
4.2.1 Composición química del PM _{2.5}	22
4.2.2 Validez del modelo de reconstrucción másica	25
4.3 Eficiencia de dispersión de los componentes químicos del PM _{2.5}	25
4.3.1 Verificación de los supuestos del modelo	25
4.3.2 Obtención de las eficiencias de dispersión másicas	27
5. Conclusiones	29
6. Proyección futura	30
7. Bibliografía	31

1. Introducción

1.1 Composición química del aerosol atmosférico según su tamaño

Debido a la gran variabilidad de fuentes de emisión y procesos atmosféricos, los aerosoles atmosféricos resultan ser una mezcla compleja de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica, con diversas distribuciones granulométricas y propiedades ópticas diferentes. Si bien un determinado compuesto o elemento químico puede estar distribuido en diferentes tamaños, es cierto que en gran medida suele estar ubicado en un rango de tamaño concreto. Para realizar una determinación genérica de la composición química del aerosol en función de rangos de tamaño, previamente vamos a caracterizar su distribución granulométrica y su composición química. Indicar previamente que el tamaño del aerosol atmosférico o materia particulada en suspensión (PM) puede variar desde unos pocos nm hasta unos 50 μm .

Desde un punto de vista de calidad del aire se definen diferentes fracciones másicas atendiendo al tamaño de corte de los sistemas de captación utilizados. De forma genérica la fracción "PM_x" se definiría 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 x μm . Las fracciones más utilizadas son: PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁. La figura 1 muestra la distribución porcentual de partículas en función de su diámetro aerodinámico que conforman las fracciones PM₁₀ y PM_{2.5}.

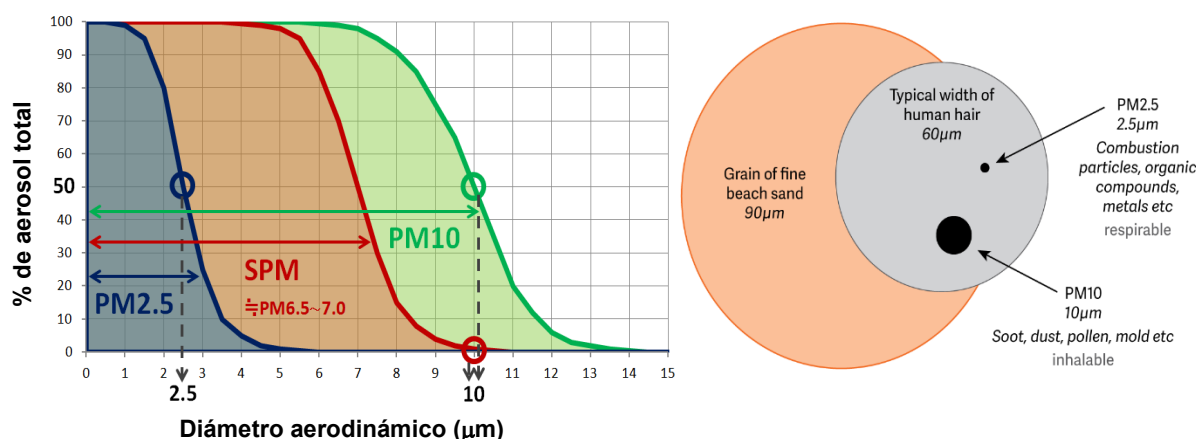


Figura 1: Porcentaje del aerosol que en función de su tamaño conforma las fracciones PM₁₀ y PM_{2.5}. Comparativa de tamaños entre partículas PM₁₀ y PM_{2.5} con un pelo humano y un grano de arena.

A veces, por abuso del lenguaje, se hace referencia a estas fracciones como aquellas partículas cuyo diámetro es inferior a 2.5 y 10 μm respectivamente. Como se puede apreciar en la figura, la fracción $\text{PM}_{2.5}$ puede contener partículas que no van más allá de unos 5 μm y lo hace en un porcentaje prácticamente nulo, mientras que el 50% de las partículas captadas en esta fracción tiene un diámetro de 2.5 μm . Tradicionalmente a este tipo de partículas se les denomina finas, en contraposición de las gruesas que estarían conformadas por la sustracción $\text{PM}_{10}-\text{PM}_{2.5}$. Por lo general las fuentes naturales (fuente marina, emisión biogénica, material crustal...) son las principales emisoras de los aerosoles de mayor tamaño, mientras las de carácter más antrópico (tráfico, industrias...) suelen emitir partículas de menor tamaño. Para hacerse una idea del tamaño de este tipo de partículas la figura 1 también presenta una comparativa de tamaños entre partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ y otras estructuras reconocibles, como un cabello humano o un grano de arena de la playa.

Indicar que, desde un punto de vista de las ciencias atmosféricas, la distribución de tamaños del aerosol está relacionada con sus procesos de formación. En este contexto las partículas se agrupan en cuatro modas distintas: nucleación, Aitken, acumulación y gruesa. Las tres primeras modas abarcan las denominadas partículas finas con límite superior de tamaño establecido en 1 μm .

En cuanto a la composición química habitual del PM, destacar el carbono orgánico (OC) y elemental (EC), los compuestos inorgánicos secundarios (principalmente sulfatos y nitratos de amonio), el material crustal, el aerosol marino y diversos metales. La figura 2 (adaptada de Seinfeld y Pandis, 2006) muestra en que rangos de tamaño se localizan preferentemente estos compuestos. Como se puede apreciar los compuestos carbonosos y los compuestos inorgánicos secundarios se localizan preferentemente en tamaños inferiores a 1 μm , si bien los compuestos de origen secundario pueden también aparecer, aunque en menor medida en tamaños correspondientes a la fracción gruesa. Por su parte, compuestos de naturaleza más natural como la materia mineral o la sal marina se concentran dentro de la fracción gruesa.

La figura también muestra como la masa de las partículas esta predominantemente ubicada en los tamaños más grandes mientras que el número de estas lo hace en los tamaños más pequeños.

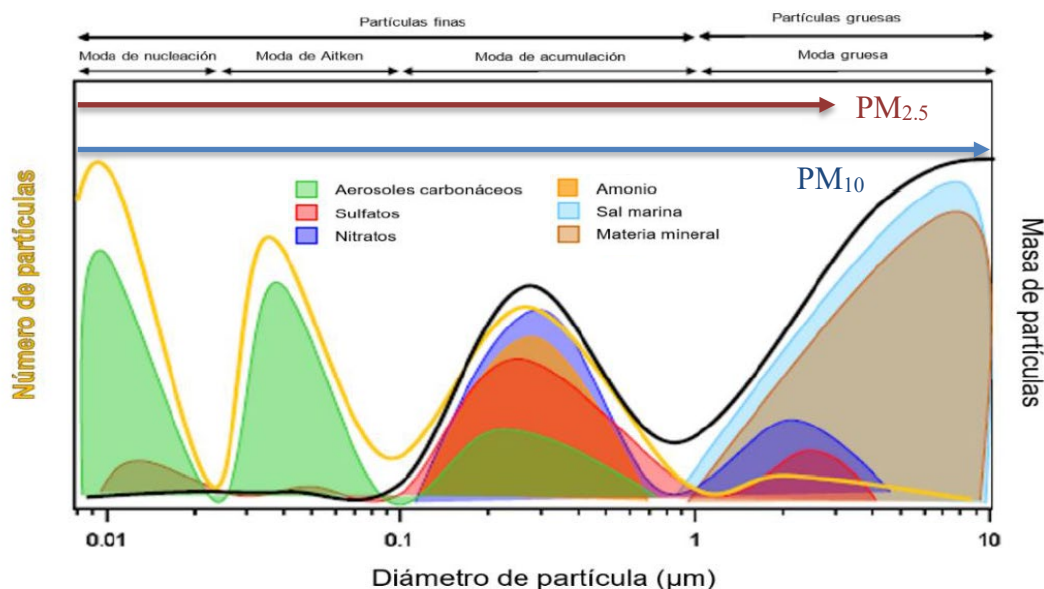


Figura 2: Distribución de tamaño de los principales compuestos químicos que conforman el PM.

La distribución porcentual de cada componente químico por lo tanto dependerá de la fracción másica analizada. Además, incluso para una misma fracción másica, la distribución porcentual variará en función del periodo temporal muestreado (ya que las fuentes emisoras pueden variar temporalmente) y con el tipo de entorno en el que se realice la medición (pues la importancia relativa de las fuentes emisoras de dichos componentes químicos varía según el ambiente monitorizado). A modo de ejemplo podemos ver en la figura 3 una comparativa entre la contribución porcentual de los componentes químicos principales del PM en función de la fracción másica analizada. El punto de muestreo corresponde a un entorno urbano ubicado en la ciudad de Elche, y el periodo de medición fue el invierno (Galindo et al., 2020).

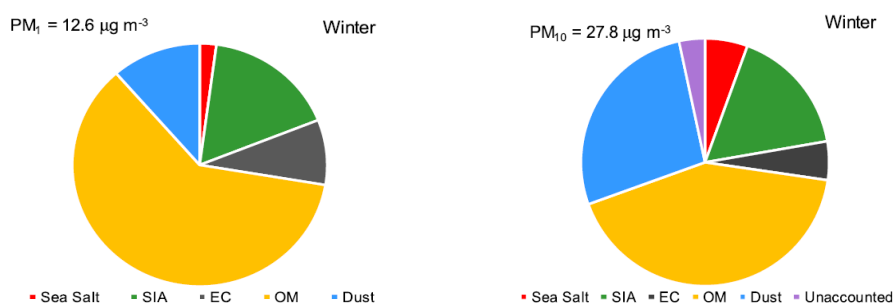


Figura 3: Distribución porcentual de los principales componentes químicos en la fracción PM₁₀ y la PM₁ en un entorno de carácter urbano durante el invierno.

Como puede apreciarse de la figura 3 la contribución de los compuestos de carbono (materia orgánica (OM) y EC) es superior en la fracción PM₁, cobrando el aporte de compuestos de origen más natural como el aerosol marino y el polvo mineral mayor relevancia en el PM₁₀.

1.2 Dispersión de la luz debida al PM

La radiación solar a su paso por la atmósfera terrestre es atenuada debida a la interacción de esta con gases y el PM. Centrándonos en el PM, esta atenuación viene constituida por dos componentes: la absorción y la dispersión (scattering en inglés). La absorción es el proceso en el que la energía lumínica incidente se transforma en parte de la energía interna de las partículas con las que interactúa. El BC (o EC, su diferencia estriba en la metodología de cuantificación), constituye el componente del PM más eficiente en este proceso. Parte del OC con capacidad de absorción de la radiación, denominado Brown carbon (BrC) y el polvo mineral, también constituyen absorbentes de la radiación. La absorción de radiación contribuye al calentamiento de la atmósfera.

Por su parte, en el proceso de dispersión, la energía incidente transportada por una onda electromagnética con una longitud de onda (λ) determinada se ve esparcida en todas direcciones a la misma λ a consecuencia de la interacción. La mayoría de los aerosoles atmosféricos son relativamente pequeños (ver figura 2), comparables o inferiores a la longitud de onda (λ) de la radiación visible, por ello, el efecto de dispersión es más intenso para λ más cortas que 1 μm y mucho menor para λ mayores.

Describimos brevemente el fenómeno: la luz (onda electromagnética) se dispersa en todas las direcciones como resultado de su interacción con el aerosol como se aprecia en la zona (A) de la figura 4. Esto es debido a que los campos eléctricos y magnéticos causan el movimiento de partículas cargadas presentes en el aerosol (electrones, moléculas polares...). Cuando estas partículas cargadas se mueven como resultado de la fuerza electromagnética, se emite una nueva radiación en cualquier dirección, que constituye la luz dispersada (B). Debe indicarse que cuando el tamaño de la partícula es mayor a la λ de la radiación incidente (dispersión Rayleigh) la dispersión de la luz es bastante isótropa, mientras que si son de una magnitud similar (dispersión

Mie) hay un claro aumento de la radiación dispersada hacia delante y además la intensidad de la luz dispersada presenta una menor dependencia con λ (C).

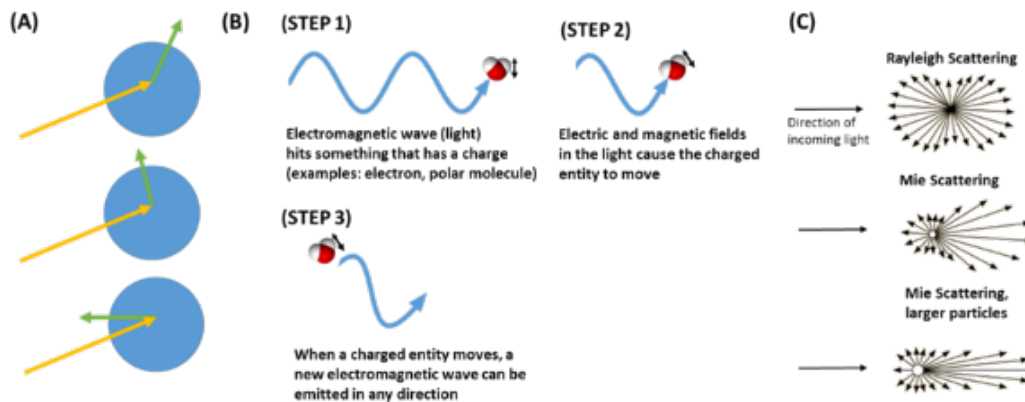


Figura 4: Proceso de dispersión de la luz por los aerosoles.

Al contrario que en el proceso de absorción, el de dispersión genera un enfriamiento atmosférico debido a la luz retrodispersada. Los aerosoles en conjunto tienen un efecto (Directo+Indirecto) radiativo neto de enfriamiento a escala global estimado en unos $-0.9 \pm (-1.9 \text{ a } -0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2})$ (Boucher et al., 2013). No obstante, la magnitud de su efecto en el clima todavía es incierta y objeto de investigación activa.

Indicar que la mayoría de los componentes químicos del aerosol (principalmente sulfato, nitrato, materia orgánica, polvo mineral y aerosol marino) dispersan la radiación solar (Pandolfi et al., 2018; Chen et al., 2020; Li et al., 2022).

1.3 Caracterización del scattering

Vamos a utilizar dos propiedades ópticas para caracterizar el proceso de dispersión. Para su cuantificación utilizaremos el coeficiente de dispersión ($\sigma_{sp,\lambda}$) y para determinar el tamaño de las partículas responsables del proceso usaremos el valor de SAE (Single Scattering Albedo) o albedo de dispersión simple en español.

El valor de $\sigma_{sp,\lambda}$ nos indica la magnitud de la dispersión. Sus unidades son Mm^{-1} . El valor que puede registrar esta propiedad depende en gran medida del tipo de lugar monitorizado. Una idea del rango de valores en el que típicamente puede fluctuar $\sigma_{sp,\lambda}$ nos la presenta la figura 5, extraída de Pandolfi et al., 2018. La figura muestra la

variabilidad de $\sigma_{sp,\lambda}$ registrada en diversas estaciones europeas de carácter rural y urbano en función de su localización geográfica dentro del continente.

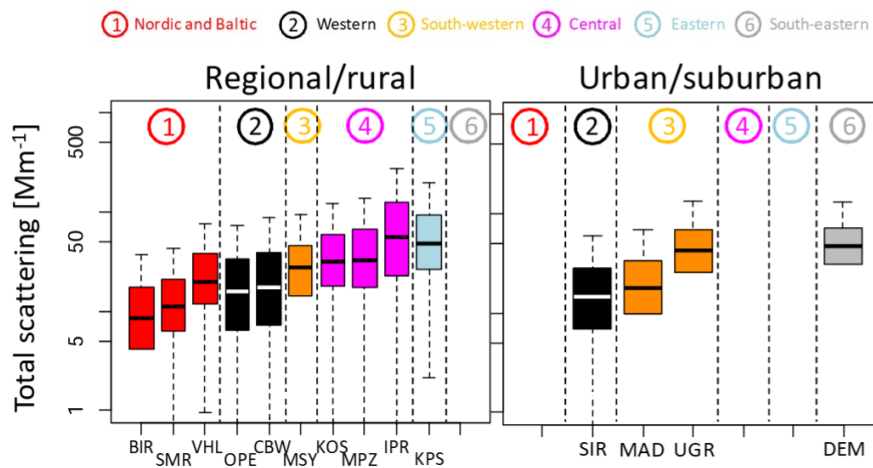


Figura 5: Coeficientes de scattering obtenidos en diversas estaciones europeas de carácter rural y urbano. (Las líneas horizontales en las cajas representan las medianas, cuyos límites superior e inferior delimitan los valores de los percentiles 25 y 75).

La λ para cual está determinado el valor de σ_{sp} puede variar de un enclave a otro, pero esta por lo general centrada entre 520 y 550 nm. Como puede apreciarse los valores más elevados de las medianas no suelen superar los 50 Mm^{-1} y por lo general son superiores a 10 Mm^{-1} . Dentro de las estaciones de tipo rural son las ubicadas en Centroeuropa las que registran mayores valores de dispersión.

Por su parte, el valor de SAE, como se ha indicado anteriormente, nos proporciona información referente al tamaño de las partículas protagonistas de la dispersión. Valores de SAE por debajo de la unidad sugieren que partículas gruesas han tenido implicación en el proceso mientras que valores por encima de 1 (hasta 4 aproximadamente) indican que son las partículas finas las responsables del scattering. La figura 6 (extraída de Pandolfi et al., 2018) muestra los valores estadísticos de SAE determinados en las mismas estaciones europeas que las presentadas en la figura 5. Como se puede apreciar la mayoría de estaciones registran valores de SAE entre 1.5 y 2.0. Indicar a este respecto que las estaciones más ubicadas al sur del continente pueden registrar valores algo inferiores debido a la mayor frecuencia en estas localizaciones de entradas de masas de aire saharianas cargadas por lo general con partículas gruesas de polvo mineral.

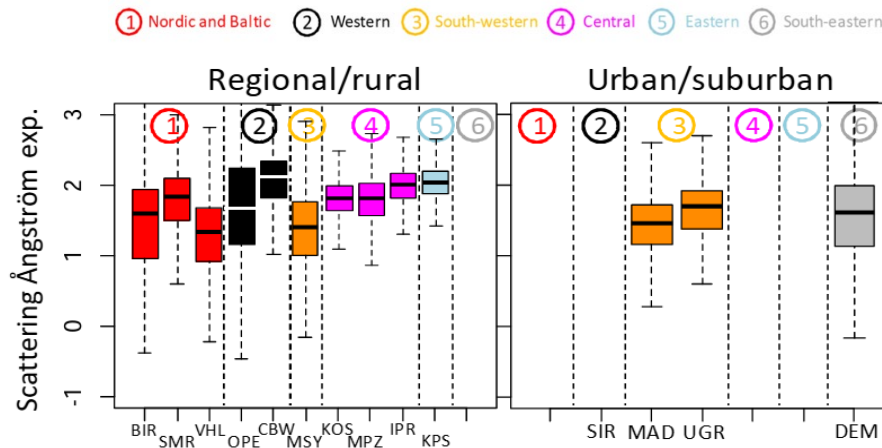


Figura 6: Valores de SAE obtenidos en diversas estaciones europeas de carácter rural y urbano. (Las líneas horizontales en las cajas representan las medianas, cuyos límites superior e inferior delimitan los valores de los percentiles 25 y 75).

1.4 Eficiencia del proceso de dispersión

La mayor o menor capacidad de dispersión que tiene una determinada fracción másica, especie química o fuente emisora de PM puede ser evaluada a partir del parámetro MSE (mass scattering efficiency). En español, eficiencia másica de dispersión. MSE es un factor crítico a la hora de evaluar la habilidad de dispersión y relaciona la concentración másica de una determinada especie/fracción con sus propiedades ópticas, en este caso, de dispersión. Los valores de MSE de diferentes fracciones y componentes químicos constituyentes han sido ampliamente determinadas (Hand and Malm, 2007; Titos et al., 2012; Velázquez-García et al., 2023).

En el trabajo de Hand and Malm, 2007, puede encontrarse un amplio informe relativo a los resultados obtenidos en 60 trabajos de investigación que proporcionan valores de MSE según tamaño del PM y componente químico del mismo. Además, el trabajo presenta como determinar el valor de MSE de cuatro formas distintas (método teórico, parcial, de medida y método de regresión multilineal). En este trabajo puede evidenciarse cómo el valor de MSE para el aerosol fino ($\sim\text{PM}_{2.5}$) es claramente superior (más del triple en promedio) al del PM más grueso ($\sim\text{PM}_{10}$). Los valores promedios obtenidos en el estudio de Hand and Malm, 2007 de MSE para diferentes componentes químicos con capacidad de dispersar (a $\lambda=550$ nm), pueden verse en la tabla 1.

Tabla 1: Valores promedio de MSE para diferentes especies químicas constituyentes del PM con capacidad para dispersar la radiación.

Especie /Tamaño	MSE (m²·g⁻¹)
Aerosol fino	3.6 ± 1.2
Sulfato fino	2.5 ± 0.6
Nitrato fino	2.7 ± 0.5
Materia orgánica (~OC) fina	3.9 ± 1.5
Polvo mineral fino	3.3 ± 0.6
Aerosol marino fino	4.5 ± 0.9
Aerosol grueso	1.0 ± 0.9
Polvo mineral grueso	0.7 ± 0.2
Aerosol marino grueso	1.0 ± 0.2

El aerosol fino y grueso, se debe entender como un aerosol compuesto por todos sus componentes químicos mezclados. Como se puede apreciar los valores en la fracción fina son siempre superiores a los de la gruesa.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el de estimar las eficiencias de dispersión másicas de los componentes químicos de la fracción PM_{2.5} en un entorno rural mediante la metodología del análisis de regresión multilíneal. Para la consecución del mismo, dos objetivos específicos deberán ser establecidos y resueltos:

- Caracterizar las propiedades ópticas del proceso de dispersión mediante la cuantificación del coeficiente de dispersión ($\sigma_{sp,\lambda}$) y el valor de SAE (Scattering Angstrom Exponent).
- Determinar, a partir de la composición química del PM_{2.5}, cual es la contribución másica de sus principales constituyentes.



3. Materiales y métodos

3.1 Localización espacio-temporal del estudio

La toma de datos se realizó en la localidad de Beneixama ($38^{\circ} 42' 0''$ N; $0^{\circ} 46' 0''$ O; 592 m s.n.m.), municipio situado en el interior de la provincia de Alicante, en la comarca del Alto Vinalopó. Su escasa población (1679 habitantes - INE 2024) conlleva un parque de tráfico exiguo que, junto con la falta de industrias generadoras de PM, hace que la localidad pueda ser considerada, desde el punto de vista de la calidad del aire, como un entorno de carácter rural. La figura 7 muestra una panorámica de la localidad y la localización concreta del punto de muestreo en la misma.



Figura 7: Ubicación espacial del punto de muestreo en el pueblo de Beneixama.

El área de estudio se caracteriza por tener inviernos fríos ($\sim 7^{\circ}\text{C}$ de media), ventosos y secos. La precipitación se concentra fundamentalmente durante el otoño. Durante los meses de invierno se suelen acumular aproximadamente unos $50 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}$.

Indicar que el área de estudio está influenciada por emisiones procedentes de la quema de biomasa preferentemente durante los meses más fríos. Otra fuente de partículas a tener en cuenta es el polvo mineral transportado por masas de aire provenientes del norte de África.

El periodo de estudio se extendió a lo largo de 2 meses de invierno, desde el día 01/01/2024 hasta el 29/02/2024. Durante dicho intervalo temporal valores diarios de $\text{PM}_{2.5}$ y horarios de propiedades ópticas de dispersión fueron registrados.

3.2 Obtención de las propiedades ópticas de dispersión

3.2.1 Nefelómetro AURORA 3000

La cuantificación de la dispersión de la luz por parte del PM ha sido llevada a cabo gracias a un Nefelómetro AURORA 3000 (Ecotech Pty Ltd, Knoxfield, Australia), el cual ha proporcionado los valores de los coeficientes de dispersión ($\sigma_{sp,\lambda}$) en tres longitudes de onda diferentes 450 nm (azul), 525 nm (verde), 635 nm (roja). La figura 8 muestra el Nefelómetro empleado.



Figura 8: Nefelómetro AURORA 3000.

El equipo mide el coeficiente de dispersión en un rango de medida de 0.25 Mm^{-1} a 2000 Mm^{-1} , tomando valores cinco-minutales, a partir de los cuales se obtuvieron los correspondiente promedios horarios y diarios. Destacar que el instrumento cuenta con un sistema de corrección de humedad, que permite trabajar las medidas en condiciones de menos del 40% de humedad relativa. Este sistema de control es importante ya que la dispersión de la radiación varía significativamente con la humedad (Titos et al., 2014).

Un breve resumen del procedimiento de medida utilizado por el nefelómetro es el siguiente: el instrumento recoge muestras de aire ambiente con un flujo de 30 l/min . que son llevadas gracias a una bomba a una cámara de medida donde una fuente de luz las ilumina. El PM de las muestras de aire provoca la dispersión de la luz. Dentro de la cámara hay unos deflectores que están posicionados de forma que solo la luz dispersada dentro de un estrecho cono alcanza un tubo fotomultiplicador, el cual produce una señal eléctrica de intensidad proporcional al coeficiente de dispersión de la muestra de aire. El procedimiento se realiza para cada una de las tres longitudes

de onda con las que puede operar el Nefelómetro. En el trabajo de D. Gabriel Bernabé (TFG-2023) puede leerse el complejo funcionamiento del equipo de forma detallada, así como las correcciones que deben realizarse a los datos obtenidos en bruto.

3.2.2 SAE y MSE

El coeficiente de dispersión ($\sigma_{sp,\lambda}$) cuantifica la cantidad de luz dispersada por el aerosol atmosférico y a partir de su valor, puede determinarse el valor de SAE mediante la siguiente fórmula:

$$SAE = - \frac{\ln \frac{\sigma_{st}(\lambda_1)}{\sigma_{st}(\lambda_2)}}{\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (1)$$

Siendo $\lambda_1 = 450 \text{ nm}$ y $\lambda_2 = 635 \text{ nm}$.

El valor de SAE nos indica cual es el tamaño de las partículas involucradas en la dispersión de la radiación. Su valor puede oscilar entre 0 (partículas muy gruesas) y 4 (partículas muy finas).

MSE, propiedad que indica la mayor o menor capacidad/eficiencia del PM o de un compuesto químico determinado para dispersar la radiación solar puede determinarse (para una determinada fracción másica (PM_x)) según:

$$MSE(\lambda) = \frac{\sigma_{sp}(\lambda)}{PM_x} \quad (2)$$

El valor de MSE depende de varios factores:

- El tamaño de las partículas. Cuanto menor tamaño tenga del aerosol, se dispersa más la luz por unidad de masa, en comparación con los aerosoles que tienen un mayor tamaño (Seinfeld & Pandis, 2016).
- La composición química. Los aerosoles con un contenido alto en sulfatos, nitratos o material orgánico, dispersan más la luz en comparación con los aerosoles con alto contenido en carbono negro (Hand & Malm, 2007).

- La longitud de onda incidente. La dispersión de la luz varía con la longitud de onda.

MSE es una magnitud que vincula las propiedades químicas y ópticas del aerosol atmosférico y es útil para estudios ambientales y climáticos, puesto que nos permite estimar el impacto de los aerosoles que influyen en el balance energético terrestre.

3.3 PM_{2.5}: análisis químico y determinación de sus componentes

3.3.1 Determinación del PM_{2.5} y análisis químico

Muestras diarias de PM_{2.5} fueron recogidas a lo largo del periodo de muestreo mediante la utilización de un muestreador de alto volumen (30 m³·h⁻¹) MCV. Las concentraciones fueron determinadas mediante análisis gravimétrico realizado en una cámara de ambiente controlado de T (20 ± 1°C) y humedad relativa (50 ± 5%).

Las muestras fueron analizadas para determinar su composición química. Se determinó su contenido en: carbono orgánico (CO) y elemental (EC), iones (Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ y C₂O₄²⁻). Una descripción de las técnicas analíticas utilizadas para su determinación puede encontrarse en Gómez-Sánchez et al., 2024.

3.3.2 Componentes del PM_{2.5}

Como uno de los objetivos de este trabajo consiste en determinar la contribución de los componentes químicos del PM_{2.5} al proceso de dispersión, pasamos a describir la metodología seguida para determinarlos.

La concentración de PM_{2.5} se ha dividido en cinco componentes: aerosol marino (AS), materia orgánica (OM), carbono elemental (EC), aerosoles inorgánicos secundarios (CS) y polvo mineral (MM).

- El aerosol marino se ha determinado según la ecuación (Seinfeld and Pandis, 2006):

$$[SS] = [Cl^-] + [Na^+] + [Mg^{2+}] + [ss K^+] + [ss Ca^{2+}] + [ss SO_4^{2-}] \quad (3)$$

En los que “ss” indica la concentración de origen marino de los iones potasio, sulfato y sodio, ya que estos iones pueden provenir de otras fuentes distintas. Las relaciones para determinarlas (He et al., 2018) viene dadas por:

$$[ssK^+] = 0.036 \cdot [Na^+] \quad (4)$$

$$[ssCa^{2+}] = 0.038 \cdot [Na^+] \quad (5)$$

$$[ssSO_4^{2-}] = 0.252 \cdot [Na^+] \quad (6)$$

- En cuanto a la materia orgánica (OM), su valor se aproximó multiplicando la concentración del carbono orgánico por un factor de 1.6 (Turpin and Lim, 2001).

$$[OM] = [OC] \cdot 1.6 \quad (7)$$

- Los compuestos de carácter secundario (CS) se calcularon mediante la fórmula:

$$[CS] = [nss SO_4^{2-}] + [NO_3^-] + [NH_4^+] \quad (8)$$

siendo:

$$[nss SO_4^{2-}] = [SO_4^{2-}] - [ss SO_4^{2-}] \quad (9)$$

- El carbono elemental (EC), se determina directamente mediante el método térmico-óptico, sin necesidad de ser calculada por ninguna fórmula.
- Finalmente, la materia mineral se ha obtenido a partir de la expresión:

$$[MM] = \frac{[nss Ca^{2+}]}{f} \quad (10)$$

siendo:

$$[\text{nss Ca}^{2+}] = [\text{Ca}^{2+}] - [\text{ss Ca}^{2+}] \quad (11)$$

La f representa la abundancia de calcio soluble en el polvo mineral, tomando como valor en este presente trabajo de 0.11, siendo un factor determinado por Galindo et al. (2020).

3.4 Meteorología y determinación de eventos saharianos

Las variables meteorológicas fueron monitorizadas gracias a una estación meteorológica ubicada en el punto de muestreo modelo Davis Vantage Pro2. La identificación de las entradas de aire sahariano a la zona de estudio se realizó mediante el visionado del modelo predictivo BSCDREAM8b (<https://ess.bsc.es/bsc-dust-daily-forecast>). El análisis de las series temporales de PM_{2.5} registradas ayudó a confirmar la entrada de este tipo de masa de aire. La figura 9 muestra, a modo de ejemplo, la intrusión de aire sahariano sobre el sureste peninsular que tuvo lugar el día 8 de febrero de 2024.

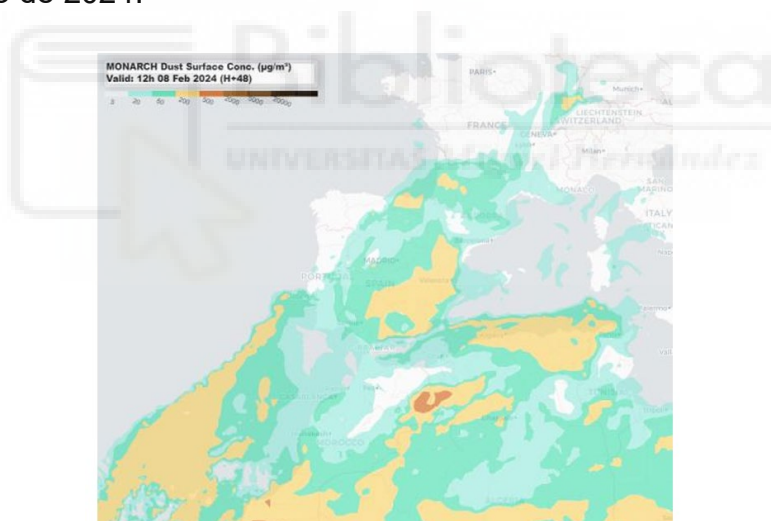


Figura 9: Concentración de polvo (µg/m³) predicha por el modelo MONARCH para el día 8 de febrero de 2024 a las 12h UTC. © Barcelona Dust Regional Center.

3.5 Modelo de regresión multilíneal

Para la determinación de las contribuciones de cada componente químico del PM_{2.5} al valor de dispersión se utilizó un análisis de regresión multilíneal. La ecuación de la modelo viene dada por:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot x_i + \varepsilon \quad (12)$$

donde:

y es la variable que debe ser predicha por el modelo, en nuestro caso esta variable es la dispersión a 525 nm ($\sigma_{sp,525}$), x_i son las variables independientes (concentraciones determinadas de los componentes químicos), b_0 representa la ordenada en el origen, ε es el término residual y los coeficientes a_i representan los valores de MSE (en $m^2 \cdot g^{-1}$) de cada componente.

El software utilizado para la consecución del modelo fue el SPSS v.30.



4. Resultados

4.1 Análisis de los parámetros de scattering

4.1.1 Valores estadísticos y relación entre parámetros

La tabla 2 presenta los valores de algunos estadísticos descriptivos de los parámetros de dispersión del aerosol atmosférico en el área de estudio, junto con los valores correspondientes al PM_{2.5}.

Tabla 2: Estadísticos descriptivos de los valores de σ_{sp} (Mm⁻¹) para las longitudes de onda de 450 nm, 525 nm y 635 nm, SAE y PM_{2.5} (μg·m⁻³) en el área de estudio. (Estadísticos obtenidos bajo análisis diario).

Parámetro	Media (DE)	P5	P50	P95
σ_{sp} ($\lambda=450$ nm)	44.4 (27.2)	11.4	40.3	86.7
σ_{sp} ($\lambda=525$ nm)	35.1 (21.0)	9.2	30.4	67.0
σ_{sp} ($\lambda=635$ nm)	27.5 (15.3)	7.6	23.8	50.4
SAE	1.19 (0.45)	0.43	1.28	1.73
PM _{2.5}	8.4 (3.4)	4.2	8.6	13.8

DE: Desviación Estándar; P: Percentil.

A nivel nacional y cogiendo como base el valor medio de la dispersión a 525 nm, este es inferior, como es lógico, a los registrados en estaciones próximas de carácter más urbano: 53.9 Mm⁻¹ en Elche, López-Caravaca et al., 2021; ~80 Mm⁻¹ en Burjassot, Esteve et al., 2012, o ~61 Mm⁻¹ en Granada, Titos et al., 2012. Sin embargo, los valores medios presentados por los coeficientes de dispersión de la tabla 2 están dentro del intervalo de valores típicos pertenecientes a entornos rurales registrados en observatorios europeos (Pandolfi et al., 2018). Contrariamente, el valor medio de SAE se encuentra por debajo de los valores habituales registrados en estaciones de tipo rural en Europa (Pandolfi et al., 2018). Posiblemente este hecho sea debido a la mayor frecuencia de SDE registradas en el área de estudio respecto a otras localizaciones europeas situadas más al norte.

El valor medio registrado 1.19 indica que si bien por lo general son las partículas más finas quienes preferentemente contribuyen a la dispersión, las más gruesas tienen cierta importancia en el proceso. De hecho, el valor de P5 (0.43) sugiere la existencia de algún periodo temporal en las que este tipo de partículas fueron dominantes en la dispersión. La relación entre la dispersión y el tamaño de partícula lo podemos ver en

la figura 10. La figura muestra como los valores más elevados de concentración de partículas $PM_{2.5}$ corresponden a valores de dispersión más altos y esto tiene lugar por lo general cuando el tamaño de partícula es más pequeño ($SAE > 1.0$).

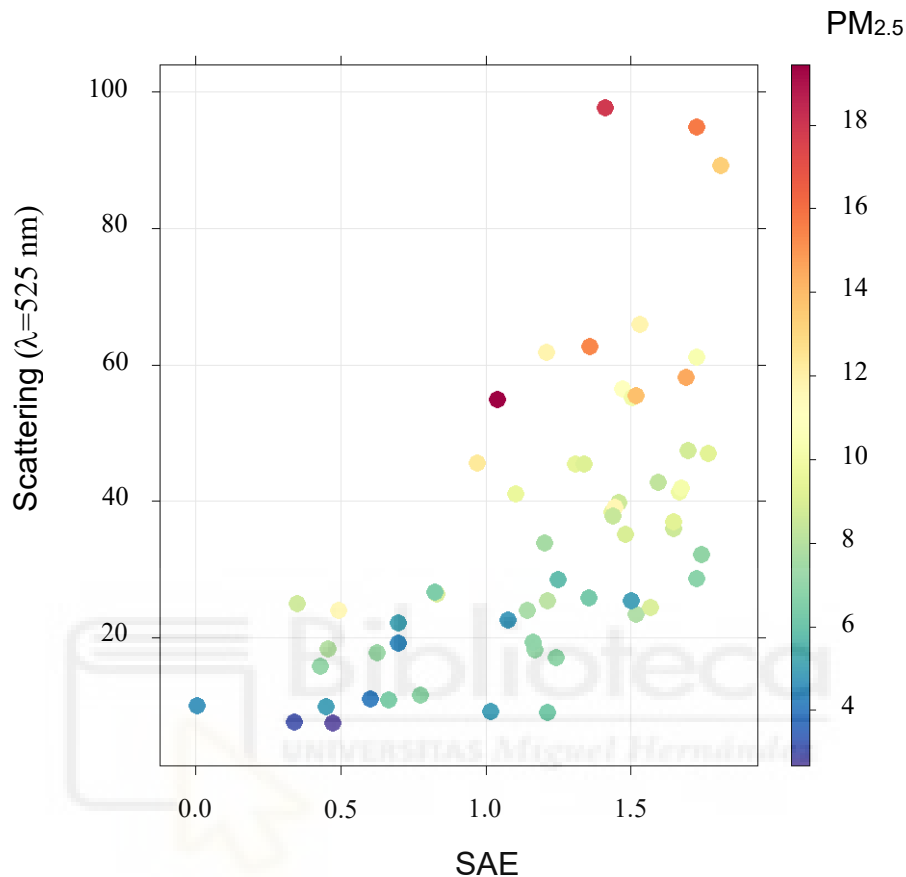


Figura 10: Relación entre el scattering ($\sigma_{sp,525}$ en Mm^{-1}) y el tamaño de partícula (SAE) en función de la concentración de partículas en $\mu g \cdot m^{-3}$.

La relación entre $\sigma_{sp,525}$ y $PM_{2.5}$ que nos indica el valor de la eficiencia de dispersión másica (MSE) del $PM_{2.5}$ se establece en $4.2 \pm 0.2 \text{ m}^2 \cdot g^{-1}$ con un R^2 de 0.91. (Este valor está dentro del rango de valores habituales registrados para partículas finas (Hand and Malm, 2007)).

4.1.2 Evolución temporal de las propiedades de scattering

La evolución temporal de SAE y $\sigma_{sp,525}$ puede observarse en la figura 11. Como se puede apreciar la evolución de ambos parámetros ha sido variable a lo largo del periodo de medida y hasta cierto punto ha estado influenciada por determinados eventos de carácter meteorológico. Destacar a este respecto tres eventos saharianos que incrementaron los niveles de $\sigma_{sp,525}$ durante los periodos: SDE₁:13-16 de enero;

SDE₂: 28-29 de enero y SDE₃: 7-9 de febrero. Al final de SDE₁ y durante SDE₃ los niveles de SAE descendieron notoriamente indicando que dichas entradas de aire sahariano venían cargadas con partículas gruesas. No sucedió lo mismo durante SDE₂, en los que solo hubo flujo de partículas más finas. Por otro lado, tanto el descenso de SAE como de $\sigma_{sp,525}$ al final del periodo de medida (23-26 de febrero) podría explicarse por el fuerte viento que hubo (velocidades medias diarias por encima de los 5 m·s⁻¹), el cual es propicio para resuspender aerosol de gran tamaño. Los periodos de precipitación con cierta entidad (>5 l·m⁻², valor acumulado diario) fueron escasos, destacando el producido el 9 de febrero que coincidió con la finalización de SDE₃ y que previsiblemente ocasionó una “lluvia roja”.

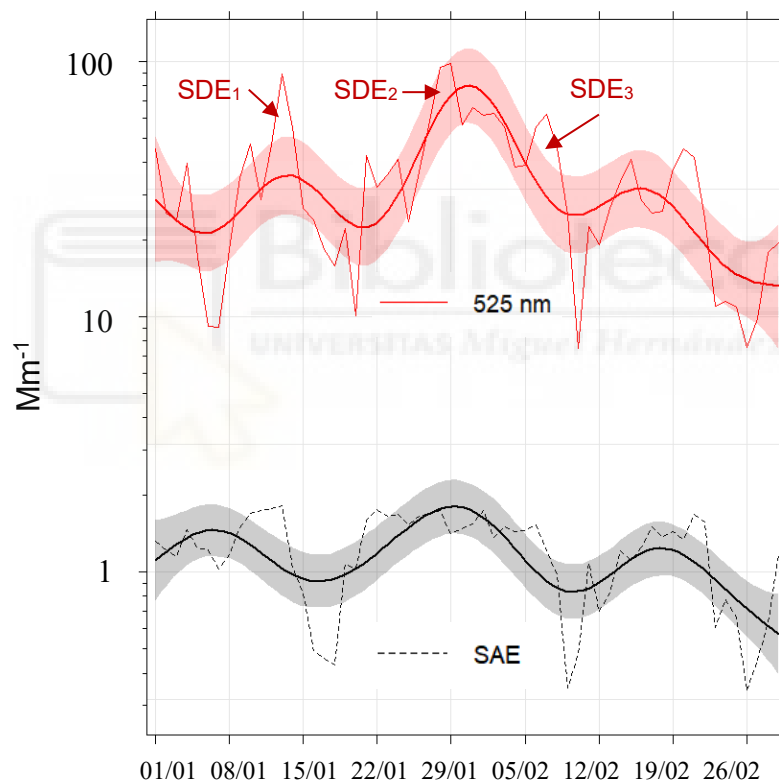


Figura 11: Evolución temporal de $\sigma_{sp,525}$ (Mm⁻¹) y SAE.

La figura 12 nos muestra cual ha sido la evolución diaria de SAE y $\sigma_{sp,525}$. La evolución del scattering presenta dos claros máximos que se registran a horas coincidentes con el inicio y el final de la jornada laboral, con un claro descenso durante el periodo nocturno. Aunque la medición se realiza en un entorno de carácter rural, el perfil mostrado se asemeja a uno con características típicas urbanas. El valor de SAE presenta un claro pico coincidente con el segundo máximo registrado por el scattering.

Por lo tanto, durante dicho periodo horario se produce la emisión de partícula más fina que durante el resto del día. Es complejo dilucidar el origen de este máximo ya que si fuera debido únicamente a la fuente vehicular debería mostrarse también sobre las 09.00 h y no lo hace. Una posible hipótesis sería que la emisión de partícula fina a esas horas se corresponde con una fuente de quema de biomasa doméstica.

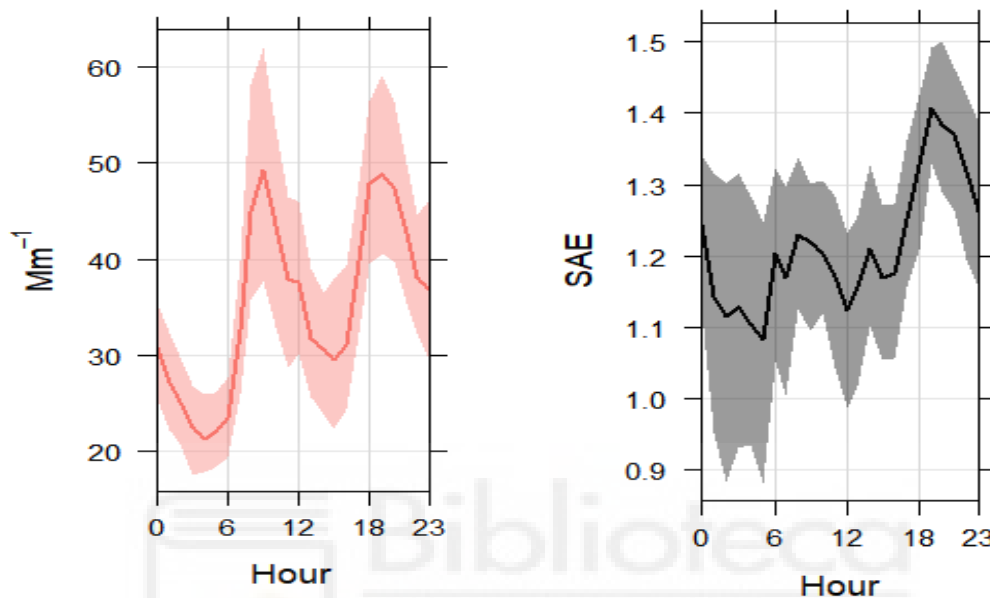


Figura 12: Variación horaria promedio a lo largo del periodo de medida de SAE y $\sigma_{sp,525}$.

4.2. Contribución de los componentes químicos al PM_{2.5}

4.2.1 Composición química del PM_{2.5}

Como se comentó en la introducción la composición química del PM es un factor clave a la hora de entender la dispersión que produce. Valores estadísticos relativos a la concentración iónica y del carbono orgánico (OC) y elemental (EC) de las muestras de PM_{2.5} puede verse en la tabla 3. Como se puede apreciar es la concentración de OC la más destacable.

A partir de las fórmulas expuestas en la metodología se ha obtenido diariamente la contribución másica y porcentual al valor de PM_{2.5} registrado de los siguientes componentes: Aerosol marino (AS), compuestos secundarios (CS), materia mineral (MM), materia orgánica (MO) y carbono elemental (CE).

Tabla 3: Estadísticos descriptivos de los valores de concentración de iones y carbono orgánico y elemental. (Todas las unidades en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

Especie	Media $\pm$ DE	P5	P50	P95
Na^+	0.079 ± 0.065	0.008	0.057	0.203
NH_4^+	0.139 ± 0.167	0.015	0.076	0.476
K^+	0.177 ± 0.088	0.072	0.167	0.340
Mg^{2+}	0.017 ± 0.008	0.006	0.016	0.032
Ca^{2+}	0.315 ± 0.233	0.060	0.250	0.700
Cl^-	0.071 ± 0.057	0.028	0.049	0.190
NO_3^-	0.291 ± 0.190	0.125	0.250	0.675
SO_4^{2-}	0.460 ± 0.362	0.153	0.362	1.236
OC	2.983 ± 0.897	1.592	2.960	4.586
EC	0.493 ± 0.211	0.178	0.480	0.846

DE: Desviación Estándar; P: Percentil.

La figura 13 presenta la concentración promedio de cada componente, así como la distribución media porcentual. En la figura, las aspas representan los valores medios; los segmentos horizontales que están dentro de las cajas representan el valor de la mediana; las partes inferior y superior de las cajas grises informan sobre los valores de los percentiles (P25) y (P75) y los segmentos superiores (Ls) e inferiores (Li) están relacionados con el rango intercuartílico (RI) de la forma: $Ls = RI \cdot 1.5 + P75$ y $Li = P25 - RI \cdot 1.5$ siendo $RI = (P75 - P25)$; los puntos representan valores atípicos.

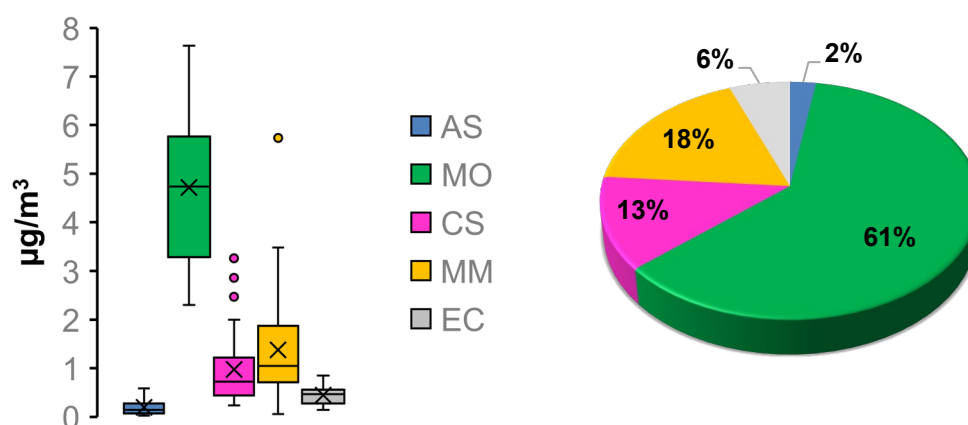


Figura 13: Concentración y valor porcentual de los componentes químicos determinados del PM_{2.5}.

Como puede apreciarse más de la mitad de la concentración media del PM_{2.5} corresponde a MO. Esto puede ser debido a que el entorno muestreado es de tipología rural donde la quema de biomasa está presente de forma habitual durante el periodo de estudio y la quema de biomasa es una de las fuentes principales de carbono orgánico (Pandolfi et al., 2018). La materia crustal y los compuestos secundarios mayoritarios son los siguientes componentes que más aportan. El aerosol marino es escaso debido a que el enclave está relativamente lejos del mar y a que la sal marina suele distribuirse mayoritariamente en la denominada fracción gruesa (PM₁₀-PM_{2.5}). Finalmente, las concentraciones de carbono elemental son las habituales de un entorno rural en el que el tráfico rodado (principal fuente de EC) es más bien escaso. Lógicamente estos valores porcentuales son variables con el tiempo. Así, si observamos dichas contribuciones, pero restringidas a un periodo concreto en el que una SDE tuvo lugar (figura 14), los valores varían.

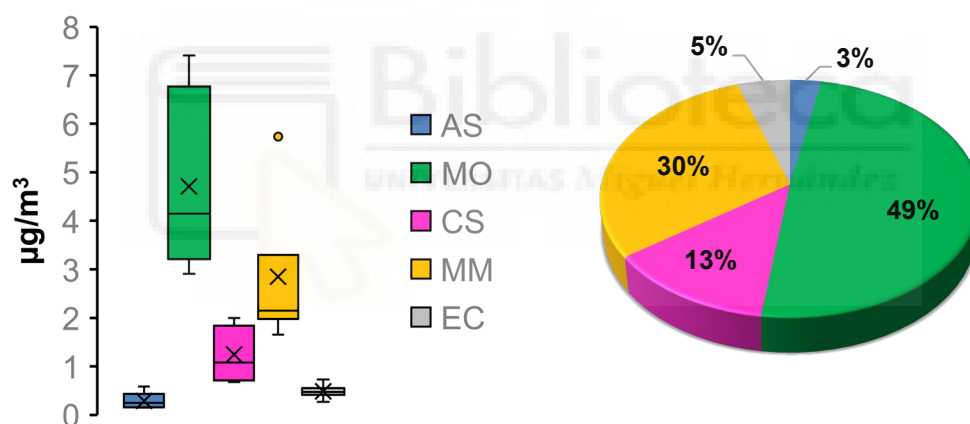


Figura 14: Concentración y valor porcentual de los componentes químicos determinados del PM_{2.5} durante el periodo de tiempo en el que tuvieron lugar las entradas de polvo sahariano en el área de estudio.

Como puede apreciarse en la figura 14, la principal variación respecto a la contribución porcentual media se da en el aumento del material mineral que aporta la entrada de aire sahariano, pasando de un 18% al 30%, en detrimento de la materia orgánica. El aerosol marino también experimenta un ligero incremento.

4.2.2 Validez del modelo de reconstrucción másica

Si denominamos $PM_{2.5}$ modelado a la suma de todos los componentes químicos determinados y $PM_{2.5}$ medido al valor de concentración obtenido mediante el muestreo diario, podremos comprobar hasta qué punto el modelo químico seguido para la reconstrucción másica del $PM_{2.5}$ es válido. Para ello la figura 15 muestra la correlación obtenida entre ambas variables. Como puede deducirse de la figura 15, la reconstrucción del valor de $PM_{2.5}$ mediante el modelo seguido se ajusta bastante bien al su valor real, siendo este por término medio alrededor de un 10% superior al modelado.

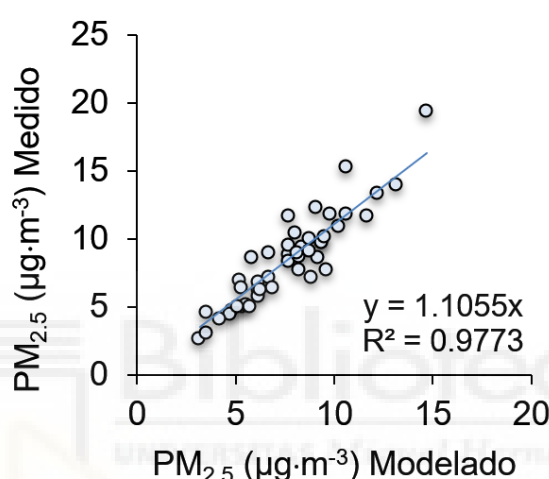


Figura 15: Correlación obtenida entre el $PM_{2.5}$ modelado y el registrado.

4.3 Eficiencia de dispersión de los componentes químicos del $PM_{2.5}$

Para determinar la implicación de cada componente químico en la dispersión de la luz vamos a aplicar un modelo de regresión multilíneal según lo descrito en la metodología. Sin embargo, la aplicación de esta técnica estadística requiere del cumplimiento por parte de las variables implicadas de cinco supuestos que a continuación verificamos.

4.3.1 Verificación de los supuestos del modelo

Los supuestos a cumplir antes de iniciar la técnica son los siguientes: 1-Linealidad (la relación entre las variables debe ser lineal); 2- Independencia (los errores en la medición de las variables explicativas deben ser independientes entre sí); 3- Homocedasticidad (los errores deben tener una varianza constante); 4-Normalidad

(las variables deben seguir una ley Normal) y 5- No colinealidad (las variables independientes no deben estar correlacionadas entre sí).

En el caso de la linealidad, la comprobación puede llevarse a cabo generando diagramas de dispersión parcial de cada variable y realizar la comprobación. A modo de ejemplo tenemos la figura 16. La figura muestra como la variable CS si es lineal, mientras que MD no lo es. Únicamente han resultado ser lineales las variables CS y MO. Por lo que únicamente vamos a aplicar la técnica con esas dos variables.

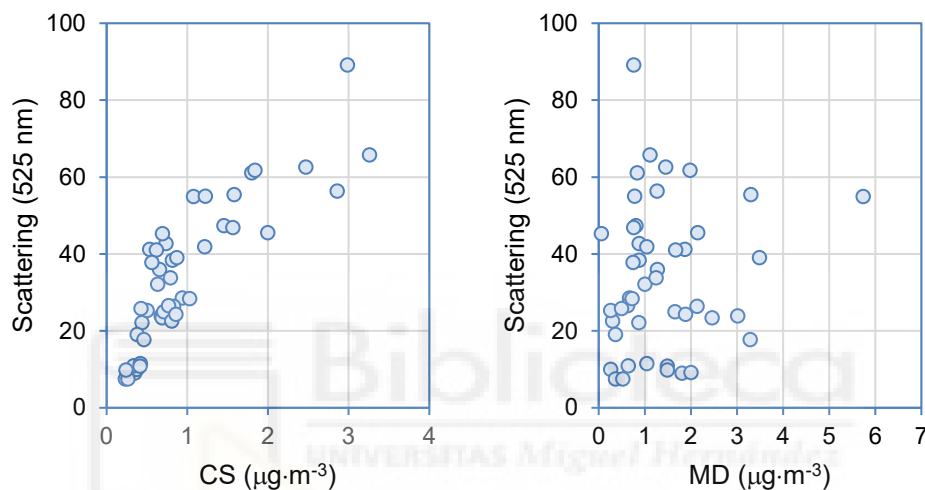


Figura 16: Verificación de la linealidad entre el scattering y las variables MD y CS.

La independencia de los errores la podemos verificar a partir del estadístico de Durbin-Watson ya que se consideran que son independientes entre sí cuando este estadístico se sitúa en el intervalo 1.5-2.5. Al realizar el modelo contando únicamente con las variables CS y MO, el valor del estadístico da 1.7, por lo que este supuesto se cumple.

La verificación del supuesto de Homocedasticidad (la variación de residuos es uniforme) se puede obtener a partir de un gráfico de dispersión que proporciona el software utilizado SPSS v.30. En nuestro caso la figura 17 muestra como la variabilidad de los errores no cambia a medida que la variable independiente aumenta o disminuye.

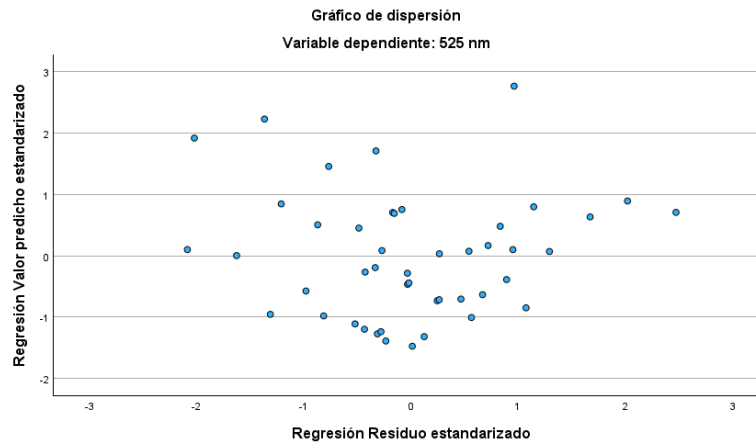


Figura 17: Gráfico que muestra la verificación del supuesto de homocedasticidad.

En cuanto al supuesto de normalidad, basta con aplicar la prueba de Kolmogorov-Smirnov a las variables o bien de forma visual elaborar un gráfico de probabilidad. En nuestro caso las dos variables implicadas en el modelo fueron “normales”.

Finalmente, la no colinealidad se puede detectar en función de la tolerancia o el indicador VIF. El criterio a aplicar indica que valores de tolerancia menores a 0.10 o valores de VIF mayores de 10 diagnostican graves problemas de colinealidad. En nuestro caso se comprobó que no existen problemas de colinealidad. Las dos variables dieron un valor de VIF=1.28.

4.3.2 Obtención de las eficiencias de dispersión másicas

El resultado de la aplicación del modelo se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: Resultados del análisis de regresión multilíneal entre $\sigma_{sp,525}$ vs. [OM] y [CS] (parámetros independientes).

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Desv. Error	Beta		
Constante	-10.40	2.93		-3.55	0.001
OM	6.15	0.70	0.484	9.19	0.000
CS	15.73	1.33	0.625	11.85	0.000

En función de los resultados mostrados en la tabla 4 podemos considerar que:

$$\sigma_{sp,525} = -10.4 + 6.15 \cdot [OM] + 15.73 \cdot [CS]$$

En base a ello podemos asimilar los valores de $6.15 \pm 0.70 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ como el valor de MSE para la materia orgánica y el de $15.73 \pm 1.33 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ para el de los compuestos secundarios. Estos valores de MSE no se pueden comparar con los obtenidos en otros estudios ya que los compuestos secundarios suelen ser divididos en sulfato de amonio y nitrato de amonio para evaluar su eficacia por separado. Además, en los modelos el aerosol marino y el polvo mineral suelen incluirse (ya que, aunque no fueran variables lineales hay mecanismos para “linealizarlas”, por ejemplo, tomando logaritmos) lo que conllevaría a obtener valores más pequeños que los mostrados en la tabla 4 para el OM y CS.

Por su parte, el valor obtenido de los coeficientes estandarizados (los cuales indican la contribución de cada variable independiente para explicar la variable dependiente), nos informa de que son los compuestos de carácter secundario los que más contribuyen a la hora de explicar la variabilidad de $\sigma_{sp,525}$, si bien el valor mostrado por la variable OM es bastante cercano.

La evolución diaria del scattering obtenido con el modelo en comparación con el medido, así como su correlación pueden verse en la figura 18.

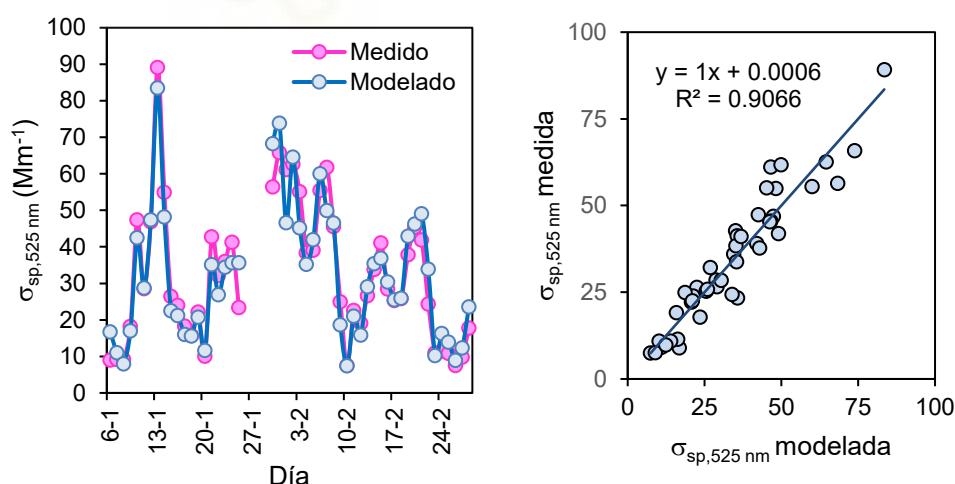


Figura 18: a) Evolución del scattering medido y el obtenido mediante el modelo. b) Correlación obtenida entre el $\sigma_{sp,525 \text{ nm}}$ modelado y el medido.

5. Conclusiones

Las principales conclusiones extraídas del trabajo realizado son:

- El tamaño de las partículas es un factor determinante en el proceso de dispersión. Los valores más elevados de σ_{sp} se corresponden por lo general con tamaños de partículas más pequeños ($SAE > 1.0$).
- Las intrusiones de masas de aire provenientes del Sahara influyen en la variabilidad diaria del σ_{sp} registrándose importantes máximos cuando tienen lugar debido al incremento del PM.
- En promedio, hasta un 61% de la concentración media del $PM_{2.5}$ corresponde a Materia Orgánica (MO). Por lo que, al realizarse el estudio en un entorno rural con poca densidad vehicular, es de esperar que la quema de biomasa sea una de las principales fuentes de partículas.
- De la determinación de los valores de eficiencia de dispersión másica (MSE) de los componentes químicos que conforman el $PM_{2.5}$ podemos concluir que los compuestos de carácter secundario junto con la materia orgánica reproducen de forma bastante fidedigna el proceso de dispersión de las partículas $PM_{2.5}$ en el área de estudio.

6. Proyección futura

Una vez realizado el estudio, se plantean 3 aspectos que podrían ayudar a realizar un trabajo más completo y exacto:

- Ampliación temporal: debido a que el presente estudio recoge los datos de 2 meses de invierno, sería conveniente ampliar el estudio a los meses de verano, ya que tanto la implicación como el número de fuentes del $PM_{2.5}$ podría variar.
- Discriminación de los compuestos secundarios: En este estudio se ha tratado la contribución de los CS de manera conjunta. Sin embargo, cabe la posibilidad de discriminar las eficiencias másicas de dispersión de al menos sus dos principales integrantes, el sulfato de amonio y el nitrato de amonio. Esto permitiría su comparación con resultados equivalentes de otros estudios.
- Mejora del análisis multivariante: varios de los compuestos químicos obtenidos no cumplían las exigencias para ser incluidos en el análisis multilíneal. De esta forma, la contribución (y su valor de MSE) de algunos de ellos con capacidad de dispersar (como la materia mineral o el aerosol marino) no ha podido ser evaluada. Un trabajo más exhaustivo trataría de integrarlos en el análisis mediante el uso de técnicas estadísticas (como transformaciones de variables...).

7. Bibliografía

Bernabé, G. Aerosol atmosférico y dispersión de radiación: un estudio de higroscopicidad. Trabajo Fin de Grado 2023. Universidad Miguel Hernández.

Boucher, O. D., Randall, P., Artaxo, C., Bretherton, G., Feingold, P., Forster, et al. (2013). Clouds and aerosols, in Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. chap. 7, pp. 571-658.

Chen, D., Zhao, Y., Zhang, J., Yu, H., Yu, X. (2020). Characterization and source apportionment of aerosol light scattering in a typical polluted city in the Yangtze River Delta, China. Atmos. Chem. Phys. 20, 10193-10210. <https://doi.org/10.5194/acp-20-10193-2020>

Esteve, A.R; Estellés, V; Utrillas, M.P; Martínez-Lozano, J.A. (2012). In-situ integrating nephelometer measurements of the scattering properties of atmospheric aerosols at an urban coastal site in western Mediterranean. Atmos. Environ. 47, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.043>

Galindo, N., Yubero, E., Clemente, A., Nicolás, J.F., Varea, M., Crespo, J. (2020). PM events and changes in the chemical composition of urban aerosols: A case study in the western Mediterranean. Chemosphere 244, 125520. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125520>

Gómez-Sánchez, N., Galindo, N., Alfosea-Simón, M., Nicolás, J.F., Crespo, J., Yubero, E. (2024). Chemical composition of PM₁₀ at a rural site in the western Mediterranean and its relationship with the oxidative potential. Chemosphere 363, 142880. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142880>

Hand, J. L., & Malm, W. C. (2007). Review of aerosol mass scattering efficiencies from ground-based measurements since 1990. *J. Geophys. Res.* 112(D16). <https://doi.org/10.1029/2007JD008484>

He, L., Chen, H., Rangognio, J., Yahyaoui, A., Colin, P., Wang, J., Daële, V., Mellouki, A.

(2018). Fine particles at a background site in Central France: chemical compositions, seasonal variations and pollution events. *Sci. Total Environ.* 612, 1159-1170. [10.1016/j.scitotenv.2017.08.273](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.273)

INE: Instituto Nacional de Estadística. (s.f.). Población por municipios. INE. Recuperado el día 31 de enero de 2025 de https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2856_tabs-tabla

Li, J., Carlson, B.E., Yung, Y.L., Lv, D., Hansen, J., Penner, J.E., Liao, H., Ramaswamy, V., Kahn, R.A., Zhang, P., Dubovik, O., Ding, A., Lacis, A.A., Zhang, L., Yueming Dong, Y. (2022). Scattering and Absorbing Aerosols in the Climate System. *Nat. Rev. Earth Environ.* 3, 363-379. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00296-7>

López-Caravaca, A., Castañer, R., Clemente, A., Yubero, E., Galindo, N., Crespo, J., Nicolás, J.F. (2021). The Impact of intense winter saharan dust events on PM and optical properties at urban sites in the southeast of the Iberian Peninsula. *Atmosphere* 12, 1469. <https://doi.org/10.3390/atmos12111469>

Pandolfi, M., Alados-Arboledas, L., Alastuey, A., Andrade, M., Angelov, C., Artiñano, B., Backman, J., Baltensperger, U., Bonasoni, P., Bukowiecki, N., Collaud Coen, M., Conil, S., Coz, E., Crenn, V., Dudoitis, V., Ealo, M., Eleftheriadis, K., Favez, O., Fetfatzis, P., Fiebig, M., Flentje, H., Ginot, P., Gysel, M., Henzing, B., Hoffer, A., Holubova Smejkalova, A., Kalapov, I., Kalivitis, N., Kouvarakis, G., Kristensson, A., Kulmala, M., Lihavainen, H., Lunder, C., Luoma, K., Lyamani, H., Marinoni, A., Mihalopoulos, N., Moerman, M., Nicolas, J., O'Dowd, C., Petäjä, T., Petit, J.-E., Pichon, J. M., Prokopciuk, N., Putaud, J.-P., Rodríguez, S., Sciare, J., Sellegri, K., Swietlicki, E., Titos, G., Tuch, T., Tunved, P., Ulevicius, V., Vaishya, A., Vana, M., Virkkula, A., Vratolis, S., Weingartner, E., Wiedensohler, A. Laj, P. (2018). A European

aerosol phenomenology – 6: scattering properties of atmospheric aerosol particles from 28 ACTRIS sites. *Atmos. Chem. Phys.* 18, 7877-7911. <https://doi.org/10.5194/acp-18-7877-2018>

Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N.: Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change, 2nd Edition. ISBN: 978-0-471-72018-8, September 2006.

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3rd ed.). ISBN: 978-1-118-94740-1, April 2016.

Titos, G., Foyo-Moreno, I., Lyamani, H., Querol, X., Alastuey, A., Alados-Arboledas, L. (2012). Optical properties and chemical composition of aerosol particles at an urban location: an estimation of aerosol mass scattering and absorption efficiencies. *J. Geophys. Res.* 117, D04206. <https://doi.org/10.1029/2011JD016671>

Titos, G., Lyamani, H., Cazorla, A., Sorribas, M., Foyo-Moreno, I., Wiedensohler, A., & Alados-Arboledas, L. (2014). Study of the relative humidity dependence of aerosol light-scattering in southern Spain. *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 66(1). <https://doi.org/10.3402/tellusb.v66.24536>

Turpin, B.J., Lim, H.O. (2001). Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass. *Aerosol Sci. Technol.* 35, 602-610. <https://doi.org/10.1080/02786820119445>

Velázquez-García, A., Crumeyrolle, S., de Brito, J.F., Tison, E., Bourrienne, E., Chiapello, I., Riffault, V. (2023). Deriving composition-dependent aerosol absorption, scattering and extinction mass efficiencies from multi-annual high time resolution observations in Northern France. *Atmos. Environ.* 298, 119613. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119613>