



universidad
de león



AEROSOL ATMOSFÉRICO: RELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO Y LOS PARÁMETROS ÓPTICOS

ATMOSPHERIC AEROSOL: RELATIONSHIP BETWEEN SIZE AND OPTICAL PARAMETERS

Blanco Moro, Jorge

Grado en Ciencias Ambientales

Julio de 2021

Índice

1.	Introducción	1
2.	Objetivos	5
3.	Descripción de la zona de estudio	6
4.	Material y métodos	8
4.1.	Distribuciones de tamaño	8
4.2.	Parámetros ópticos.....	9
4.3.	Tratamiento de datos	9
5.	Resultados y discusión	10
5.1.	Concentración de partículas por modas	10
5.2.	Distribución de partículas por tamaños.	13
5.3.	Parámetros ópticos por estaciones	15
5.4.	Número de partículas y parámetros ópticos	18
6.	Conclusiones	19
7.	Referencias	20

Resumen

En el presente estudio se analizan las distribuciones de tamaño de aerosol atmosférico en León y los parámetros ópticos (espesor óptico -AOD-, albedo de dispersión simple -SSA- y parámetro de asimetría -g) registrados en Valladolid y Palencia. El objetivo fue estudiar su evolución desde febrero 2016 hasta marzo 2017, así como analizar las posibles relaciones entre la concentración de partículas por modas y las propiedades ópticas entre estaciones y días de la semana. Las modas de nucleación (<30 nm) y Aitken (30-100 nm) registraron las mayores concentraciones durante el verano debido a procesos de formación de partículas. Durante el invierno, principalmente durante los días laborables, se registraron elevadas concentraciones de partículas debido al tráfico y al uso de calefacciones. La aplicación del test de Kruskal-Wallis reveló la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre estaciones en los parámetros ópticos. Todos estos parámetros mostraron correlaciones significativas con el número de partículas por modas: el SSA con la moda gruesa (correlación positiva), el AOD con la moda de acumulación (positiva) y g con la de nucleación (negativa).

Palabras clave: albedo de dispersión simple, análisis temporal, distribución de tamaño de aerosol, espesor óptico, parámetro de asimetría.

Abstract

In the present study, the atmospheric aerosol size distributions in León and the optical parameters (optical thickness -AOD-, simple dispersion albedo -SSA- and asymmetry parameter -g) registered in Valladolid and Palencia are analyzed. The objective was to study its evolution from February 2016 to March 2017, as well as to analyze the possible relationships between the concentration of particles by modes and the optical properties between seasons and weekdays. The nucleation (<30 nm) and Aitken (30-100 nm) modes registered the highest concentrations during the summer due to particle formation processes. During winter, mainly on weekdays, high concentrations of particles were recorded due to traffic and the use of heaters. The application of the Kruskal-Wallis test revealed the existence of statistically significant differences between seasons in the optical parameters. All these parameters showed significant correlations with the number of particles by modes: the SSA with the gross mode (positive correlation), the AOD with the accumulation mode (positive) and g with the nucleation mode (negative).

Keywords: aerosol optical depth, aerosol size distribution, asymmetry parameter, single scattering albedo, temporal analysis.

Abreviaturas

- AERONET: Red de fotómetros solares (*Aerosol Robotic Network*)
- AOD: Espesor óptico de los aerosoles (*Aerosol Optical Depth*)
- BC: Carbono negro
- CCN: Núcleos de condensación.
- COVs: Compuestos orgánicos volátiles
- g: Coeficiente o parámetro de asimetría
- PM: Material particulado (*Particulate matter*)
- PM₁: Material particulado con diámetro aerodinámico inferior a 1 µm
- PM_{2,5}: Material particulado con un diámetro aerodinámico inferior a 2,5 µm
- PM₁₀: Material particulado con un diámetro aerodinámico inferior a 10 µm
- PCASP-X: Espectrómetro óptico de partículas de aerosol (*Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe*)
- SMPS: Espectrómetro de partículas basado en movilidad eléctrica (*Scanning Mobility Particle Sizer*)
- SSA: Albedo de dispersión simple (*Single Scattering Albedo*)

1. Introducción

En últimos 70 años, la contaminación del aire se ha convertido en uno de los principales problemas de la población, debido a que la atmósfera es el medio receptor de las emisiones derivadas del desarrollo industrial y económico. La contaminación del aire está provocada por gases y aerosoles (Dami, 2009; Fushimi *et al.*, 2021).

Los aerosoles se definen como una mezcla heterogénea de partículas en estado sólido o líquido en un medio gaseoso. El tamaño de estas partículas se sitúa entre $0,002\ \mu\text{m}$ y $100\ \mu\text{m}$, pudiendo mantenerse suspendidas en el aire durante días (Dami, 2009). Se pueden clasificar, en función de la fuente de la que provienen, en primarios y secundarios. Los primarios son todos aquellos que son emitidos de forma directa, mientras que los secundarios tienen su origen en interacciones con otros elementos atmosféricos, a través diversas reacciones químicas (Zhang *et al.*, 2000; Dami, 2009). Además, los aerosoles pueden tener fuentes naturales (grandes masas de agua, volcanes, zonas áridas, vegetación, etc.) o antropogénicas (tráfico, procesos de combustión, actividad industrial, etc.) (Fröhlich-Nowoisky *et al.*, 2016; Fushimi *et al.*, 2021).

Los aerosoles atmosféricos provocan efectos tanto en el clima como en la salud (Moreno, 2007). Respecto al ámbito de la salud, se ha de tener en cuenta que no todos los aerosoles causan los mismos efectos en el cuerpo humano. Los factores más relevantes a la hora de evaluar su efecto son su tamaño y su composición. Dependiendo del tamaño, las partículas de aerosol alcanzarán diferentes zonas del sistema respiratorio, siendo más peligrosas las más pequeñas (menores de $2,5\ \mu\text{m}$), al tener una mayor capacidad de penetración (Guilabert, 2017). Así, las partículas ultrafinas (diámetro inferior a $0,1\ \mu\text{m}$), debido a sus elevadas concentraciones en áreas urbanas, están tomando una gran relevancia. Actualmente no existe una legislación que regule su concentración y, por ello, su estudio puede ser útil para el establecimiento de una normativa venidera (Samitier, 2019; Chen *et al.*, 2021).

La Norma UNE 77213 de Calidad del aire regula el muestreo de material particulado en la atmósfera y en ella se definen diferentes fracciones en función del tamaño de los aerosoles:

- **PM₁₀**: se incluyen aquellas partículas con un diámetro aerodinámico (esfera de densidad $1\ \text{g}/\text{cm}^3$, que tiene la misma velocidad y comportamiento en el aire que la partícula a estudiar) (Olagübel, 2015), menor de $10\ \mu\text{m}$ y son las que se conocen como inhalables;

- **PM_{2,5}**: en este grupo se incluyen aquellas partículas cuyo diámetro aerodinámico es menor de 2,5 μm y representan aquellas conocidas como respirables;
- **PM₁**: engloba a las partículas cuyo diámetro aerodinámico es inferior a 1 μm .

Según su propia definición, PM₁ está incluido en PM_{2,5} y estas dos fracciones forman parte de PM₁₀. Habitualmente se identifican diferentes rangos de tamaño de partícula denominados modas (Dami, 2009; Dumka *et al.*, 2021) (Figura 2), que están relacionados, en su mayoría, con el mecanismo que rige su evolución (Aldabe, 2011; Nøjgaard *et al.*, 2012) y son:

- **Moda de nucleación**: se incluyen las partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 0,03 μm (presenta un máximo en los diámetros entre 5 y 15 nm). Son partículas generadas principalmente por H₂SO₄, NH₃ y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Su vida media es de horas, ya que coagulan con otras partículas, aumentando de tamaño rápidamente (Aldabe, 2011).
- **Moda Aitken**: se corresponde con las partículas que tienen un diámetro entre 0,03 y 0,1 μm . Pueden ser naturales, si provienen de eventos de formación de nuevas partículas, o antrópicas, características de zonas urbanas con gran afluencia de tráfico, derivadas de procesos de combustión (Zhang *et al.*, 2021)
- **Moda de acumulación**: comprende aquellas que tienen un diámetro entre 0,1 y 1 μm . Son partículas de origen natural (intrusiones de polvo del desierto, sales marinas...), partículas provenientes de la moda Aitken y partículas primarias emitidas por el ser humano.
- **Moda gruesa**: engloba las partículas con un diámetro superior a 1 μm . Incluye, principalmente, a los aerosoles marinos (Alastuey *et al.*, 2005), a las partículas que provienen de la actividad industrial y las procedentes de largas distancias, tal y como sucede con las originarias del desierto del Sahara en la Península Ibérica.

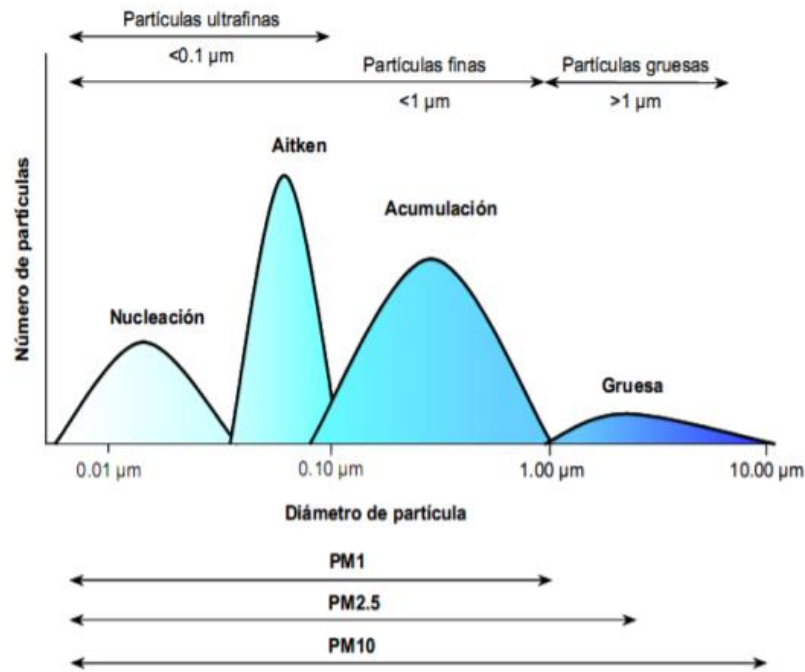


Figura 1: Distribución del número de partículas respecto al diámetro, identificación de las modas y diferentes clasificaciones por tamaño (EPA, 2004).

La composición de las partículas es otro de los parámetros de gran relevancia a la hora de evaluar el impacto de los aerosoles. Pueden estar constituidos tanto de elementos orgánicos como inorgánicos, siendo la composición mineral, con un 44%, la de mayor relevancia (Samitier, 2019). Los elementos mayoritarios del aerosol atmosférico son los compuestos de azufre, nitrógeno y carbono. Esta composición está condicionada por el origen de las partículas (Samitier, 2019; Chen *et al.*, 2021).

Según la Organización Mundial de la Salud, alrededor de 7 millones de personas mueren en el mundo debido a este tipo de partículas contenidas en el aire contaminado. Las personas afectadas presentan problemas como afecciones cerebrovasculares, cardiopatías, cáncer de pulmón, así como neumopatía (Samitier, 2019). Además, en episodios graves de contaminación, se han observado aumentos significativos en el número de hospitalizaciones, así como un incremento en el número de decesos derivados de problemas respiratorios y cardiovasculares (Alhogbi, 2017; Fushimi *et al.*, 2021).

El otro de los factores más afectados por los aerosoles es el clima, el cual es alterado por los siguientes efectos:

- i) efectos directos: los aerosoles atmosféricos provocan cambios en el flujo radiativo por dispersión y absorción de la luz. El enfriamiento o calentamiento depende de las características de los aerosoles y de las condiciones ambientales (Lohmann and Feichter, 2005).
- ii) efectos indirectos: los aerosoles modifican las propiedades y abundancia de las nubes, puesto que actúan como núcleos de condensación (CCN) (Toledano, 2008).
- iii) efectos semidirectos: relacionados con la reducción de la cobertura nubosa y del contenido de agua líquida presente en la columna atmosférica debido a la presencia de aerosoles capaces de absorber radiación, como el carbono negro (BC) (Hansen et al., 1997; Ackerman *et al.*, 2000; Zhang and Wang, 2011).

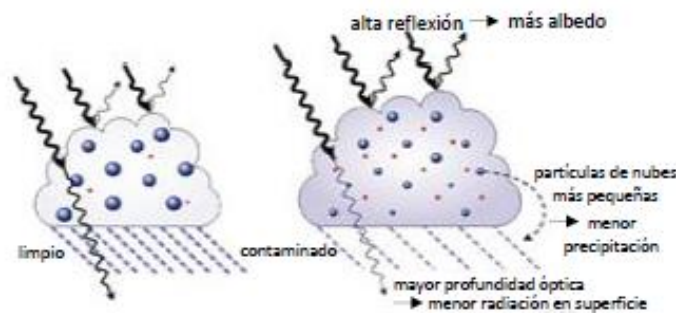


Figura 2: Representación del efecto directo e indirecto de aerosoles en las nubes (Guilabert, 2017).

Así pues, en función del tamaño y la composición, los aerosoles presentarán unas propiedades ópticas características, evaluadas principalmente por los siguientes parámetros:

- **Espesor óptico de los aerosoles (AOD, del inglés *Aerosol Optical Depth*):** este representa la extinción de la radiación debido a las partículas de aerosoles en la columna vertical atmosférica. De hecho, según algunos autores, se puede definir como el poder de los aerosoles para minimizar la radiación en una longitud de onda concreta (Obregón, 2012). Es, además, un indicador de la carga de aerosoles en la atmósfera, es decir, actúa como un índice de turbiedad (Cachorro, 2014; Guilabert, 2017)

• **Albedo de dispersión simple (SSA, del inglés *Single Scattering Albedo*):** su valor se encuentra entre 0 y 1 y actúa como referente de la cantidad de luz que se dispersa respecto al total que entra en interacción con los aerosoles (Guilabert, 2017). Por ejemplo, si su valor es cercano a 1, indica que no se da absorción y la radiación extinta es por acción de dispersión.

• **Parámetro de asimetría (g):** su rango de valores se encuentra entre -1 y 1 (Guyon *et al.*, 2003; Filonchik *et al.*, 2021) y refleja el grado de perturbación en el equilibrio electromagnético debido a la acción de una onda incidente. Debido a esta incidencia, se producirá tanto difusión, generando nuevas ondas, como reflexión, dándose las siguientes situaciones en función del valor de dicho parámetro (Guyon *et al.*, 2003; Filonchik *et al.*, 2021): i) $g = -1$, significa que el aerosol tiene difusión en la misma dirección que la onda incidente; ii) $g = 0$, se tiene en cada dirección la misma intensidad y iii) $g = 1$, es indicativo de que existe retrodispersión.

En base a esta información, en el presente trabajo se presenta una caracterización física (distribuciones de tamaño y propiedades ópticas) de los aerosoles muestreados en León, Palencia y Valladolid a lo largo del 2016 y parte de 2017.

2. Objetivos

Los principales objetivos de este trabajo son:

- Estudiar la evolución de la concentración de aerosoles por tamaños en la ciudad de León desde febrero de 2016 hasta marzo de 2017.
- Analizar la evolución de las propiedades ópticas de los aerosoles de dos estaciones de la red AERONET -*Aerosol Robotic Network*- ubicadas en Palencia y Valladolid.
- Estudiar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre la concentración de partículas por modas y los parámetros ópticos entre las estaciones y días de la semana.
- Determinar las relaciones existentes entre los parámetros ópticos de los aerosoles y el número de partículas por modas.

3. Descripción de la zona de estudio

Este estudio tiene lugar en la ciudad de León, ubicada en la comunidad autónoma de Castilla y León, que cuenta con un total de 124048 habitantes (INE, 2020).

El instrumental utilizado se encontraba instalado en la terraza de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de León, en el campus de Vegazana (42° 36' 45.980" N, 5° 33' 29.123" W) (Figura 3). La campaña de muestreo tuvo lugar entre el 12/02/2016 y 16/03/2017. Las principal fuentes de contaminación en la ciudad de León es el tráfico (Oduber *et al.*, 2021a).

León tiene un clima mediterráneo continental, con temperaturas medias anuales cercanas a los 11 °C, con inviernos muy fríos, que alcanzan una temperatura mínima media de -0,7 °C, y veranos cálidos, con una temperatura máxima media de 27,4 °C. En promedio hay 2673 horas de sol al año, 75 días de lluvia y 16 días de tormenta (AEMET, 2021) .

Valladolid y Palencia distan entre sí unos 45 km y tienen una población de 299265 y 78144 habitantes, respectivamente (INE, 2020). Ambas ciudades cuentan con un clima cálido y templado y registran temperaturas medias anuales de 12,5 °C y 11,9 °C, respectivamente. Sus inviernos son fríos (temperaturas mínimas medias de 0,2 °C y 0,4 °C en Valladolid y Palencia, respectivamente) y las temperaturas máximas medias alcanzadas en verano son 30,7 °C en Valladolid y de 28,6 °C en Palencia. En Valladolid hay un promedio de 2624 horas de sol al año, 68 días de lluvia y 17,5 días de tormenta y en Palencia 67 días con lluvia (AEMET, 2021).

CIUDADES ÁMBITO DE ESTUDIO Y ZONAS DE UBICACIÓN DEL INSTRUMENTAL

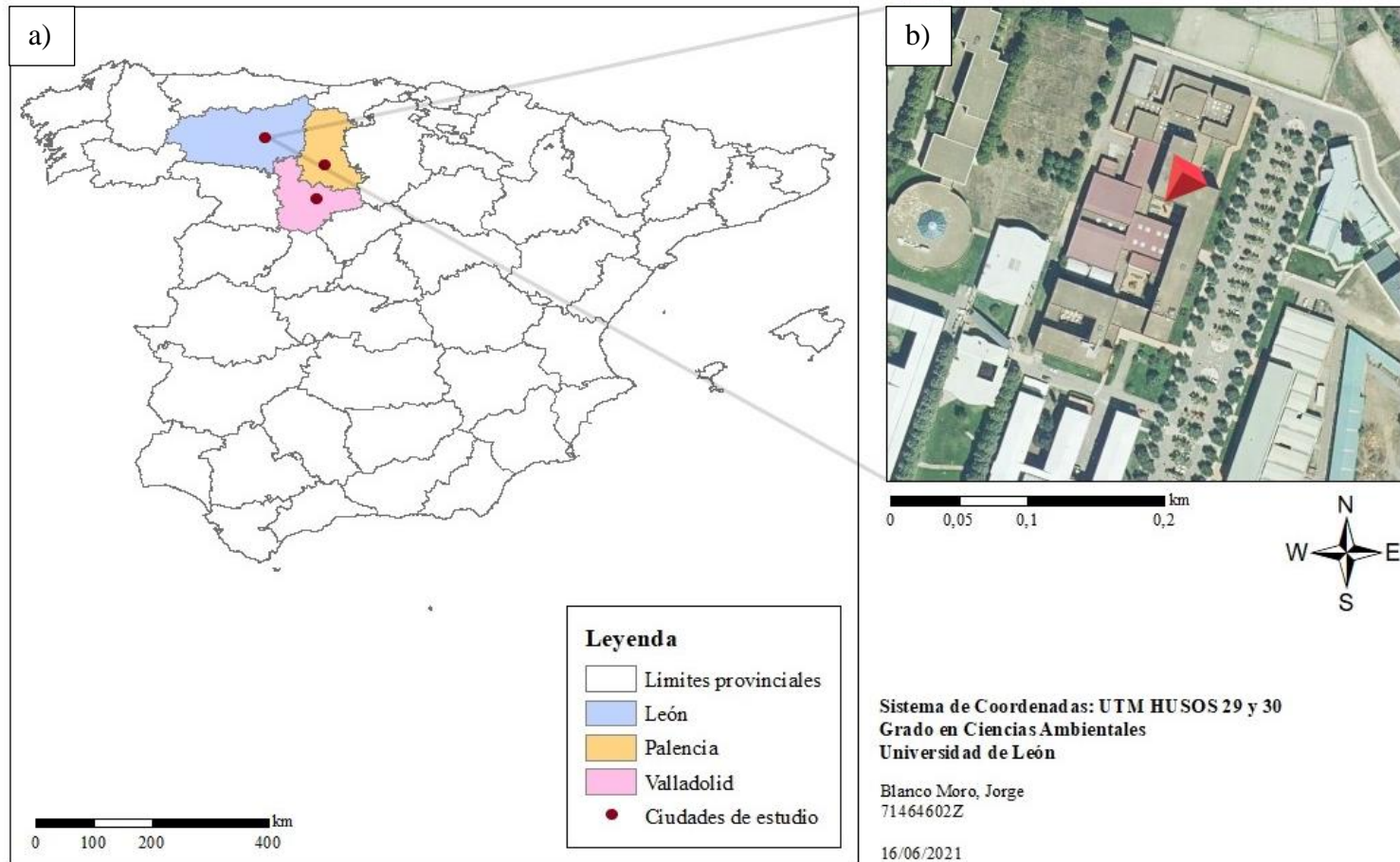


Figura 3: a) Ubicación de las ciudades de estudio (León, Valladolid y Palencia); b) Ubicación del instrumental utilizado en el estudio en la Facultad de Veterinaria de la Universidad de León (Ref. Elaboración Propia).

4. Material y métodos

Se ha realizado un estudio sobre los aerosoles presentes en la ciudad de León, Palencia y Valladolid, centrándonos en las distribuciones de tamaño de los aerosoles y en los parámetros ópticos.

4.1. Distribuciones de tamaño

La distribución de tamaños de partículas de aerosol entre 14 nm y 10 μm se registró en la ciudad de León mediante dos equipos de medida (Figura 4):

-SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*): es un espectrómetro de partículas submicrométricas que registra continuamente, en base a su movilidad eléctrica, aquellas partículas con un diámetro aerodinámico entre 14 nm y 1 μm . El modelo utilizado fue el TSI-3938. Una descripción detallada del equipo se encuentra en Alonso-Blanco (2019).

-PCASP-X (*Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe*): es un contador óptico de partículas que mide la distribución de tamaños de los aerosoles cuyos diámetros ópticos nominales están comprendidos entre 0,1 y 10 μm en 31 canales discretos. Una descripción detallada del equipo, así como de las correcciones necesarias y de la incertidumbre de las medidas puede encontrarse en Calvo (2009).

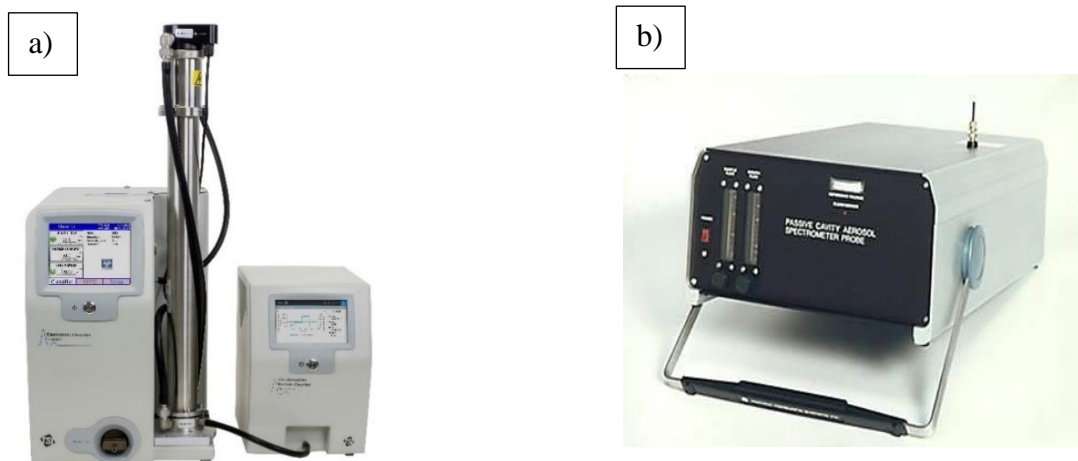


Figura 4: a) SMPS (TSI, 2007), b) PCASP - X.

4.2. Parámetros ópticos

Se utilizaron los datos de la plataforma AERONET, que consiste en una red de fotómetros solares dedicada a la recogida y tratamiento de datos de aerosoles, tanto a nivel local como global (Holben *et al.*, 1998) y que permite su posterior descarga a lo largo de diferentes años. Su funcionamiento se basa en las más de 400 estaciones que tiene distribuidas por todo el mundo, desde las que se realizan mediciones de la irradiancia solar directa y la radiación difusa del cielo. Su objetivo es registrar datos de las propiedades de los aerosoles durante largos periodos de tiempo, pudiendo establecer una base de datos a nivel mundial.

En este estudio se utilizarán los siguientes parámetros ópticos evaluados a una longitud de onda de 870 nm: espesor óptico atmosférico (AOD), albedo de dispersión simple (SSA) y el coeficiente de asimetría (g), correspondientes a Valladolid y Palencia, que son las dos estaciones más cercanas a León.

4.3. Tratamiento de datos

Los datos a tratar se categorizaron en distintas franjas horarias: i) 06:00-09:00 h; ii) 09:00-12:00 h; iii) 12:00-15:00 h; iv) 15:00-18:00 h; v) 18:00-21:00 h. Se utilizaron tablas dinámicas en Excel con el fin de obtener los promedios de cada uno de los parámetros estudiados, tanto del número de partículas analizadas en cada uno de los canales de medición, como de los parámetros ópticos resultantes del análisis de Valladolid y Palencia.

Haciendo uso del paquete estadístico SPSS, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Kruskall and Wallis, 1952), seguida de la prueba de Dunn (1964), con la finalidad de encontrar diferencias significativas por pares con un nivel de significación de $p < 0,05$.

Para determinar correlaciones entre los parámetros ópticos y las concentraciones por tamaños de los aerosoles, se determinó el coeficiente de correlación de Pearson con un nivel de significación $p < 0,05$.

5. Resultados y discusión

5.1. Concentración de partículas por modas

En el presente estudio se analizó la concentración de partículas existentes en la ciudad de León durante los años 2016 y 2017, obteniendo una concentración promedio de 3709 ± 2781 partículas cm^{-3} , encontrando un máximo de 19298 partículas cm^{-3} el 19/02/2016, entre las 18:00 y las 21:00 h. Este máximo es probablemente debido a la baja temperatura media registrada ese día (1,3 °C), que provocó el uso de calefacciones domésticas y una mayor utilización de los vehículos particulares (Viana *et al.*, 2006).

Analizando la concentración de partículas estacionalmente y por días (Figura 5) se observa como verano (4917 ± 3009 partículas cm^{-3}) y primavera (3866 ± 2583 partículas cm^{-3}) presentan los valores más altos, lo que puede ser atribuible, en parte, a la ocurrencia de eventos de formación de nuevas partículas (Blanco-Alegre *et al.*, 2021).

Además, por modas, la moda de Aitken es la que contiene un mayor número de partículas, especialmente durante el verano y la primavera (debido a los eventos de formación de partículas) y durante el invierno de 2016 (por las emisiones derivadas del tráfico y las calefacciones). Los resultados obtenidos respecto a la moda de nucleación, están relacionados con la definición de este tipo de partículas, las cuales suelen durar unas horas ya que pasan rápidamente a la moda de Aitken, explicando su menor valor. La moda de acumulación es característica por tener partículas mayor tamaño, principalmente de origen natural por intrusiones, lo cual, junto a la baja actividad industrial de León explicaría los menores valores registrados para esta moda.

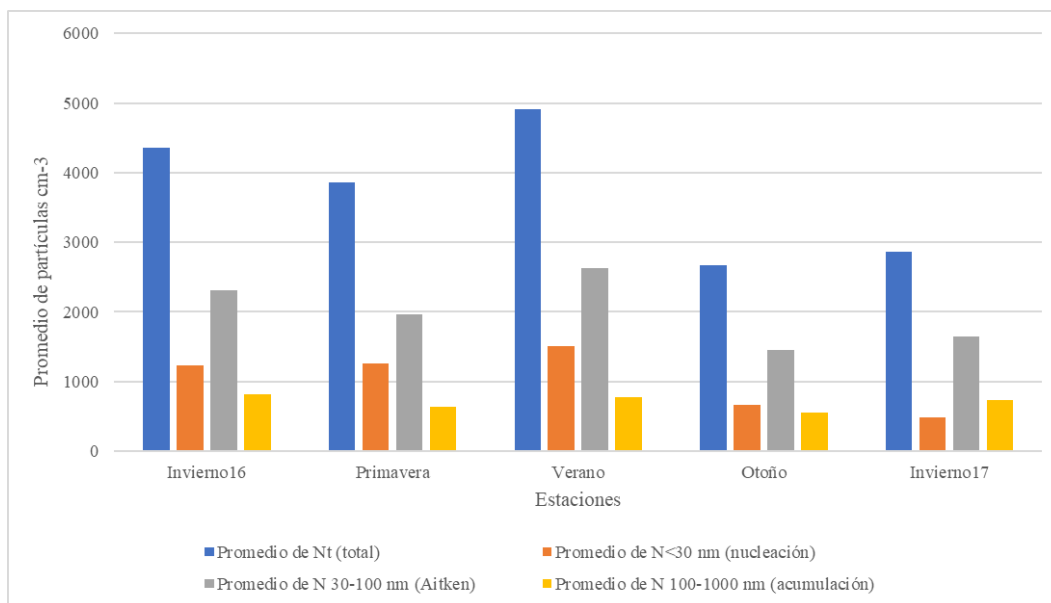


Figura 5: Concentración media de partículas por modas y estaciones en León

Se han observado diferencias estadísticamente significativas en la concentración de partículas en las distintas modas a lo largo de las estaciones ($p < 0,05$). Se observaron diferencias estadísticamente significativas entre el invierno de 2016 y 2017, debido probablemente a una mayor quema de combustibles producida durante el invierno de 2016 (Oduber *et al.*, 2021b), y a las menores temperaturas registradas, que fomentan el uso de vehículos y calefacciones. También se dieron diferencias significativas entre el verano y el invierno de 2017, y entre la primavera y el invierno de 2017, en todas las modas analizadas, presumiblemente por el efecto de los eventos de formación de partículas en primavera y verano.

Por otra parte, si se estudia lo que sucede en cada día de la semana durante el periodo de estudio (Figura 6), el máximo valor de concentración de partículas se da los miércoles con 4153 ± 3216 partículas cm^{-3} . Por otra parte, se registra un mínimo de 2972 ± 2390 partículas cm^{-3} los domingos. Estos máximos y mínimos están relacionados con la actividad laboral desarrollada durante cada día de la semana.

Referente a cada una de las modas, tanto la de nucleación, Aitken como la de acumulación, comparten valores elevados durante los días laborales. Sin embargo, esto no sucede con la moda gruesa (Figuras 7 y 8), la cual a pesar de que sí que se dan mayores valores los días laborables, tiene valores distribuidos de una forma más aleatoria a lo largo de la semana debido principalmente al origen de estas partículas (aerosol marino, polvo sahariano, etc.), por lo que no son tan dependientes de la actividad industrial.

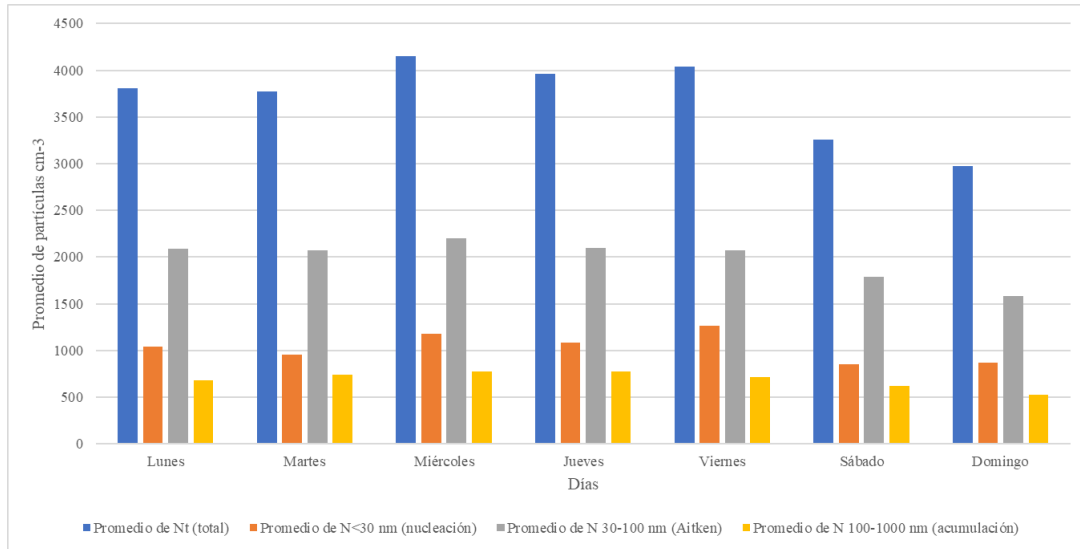


Figura 6: Promedio de la concentración de partículas por modas y días de la semana a lo largo del periodo de muestreo.

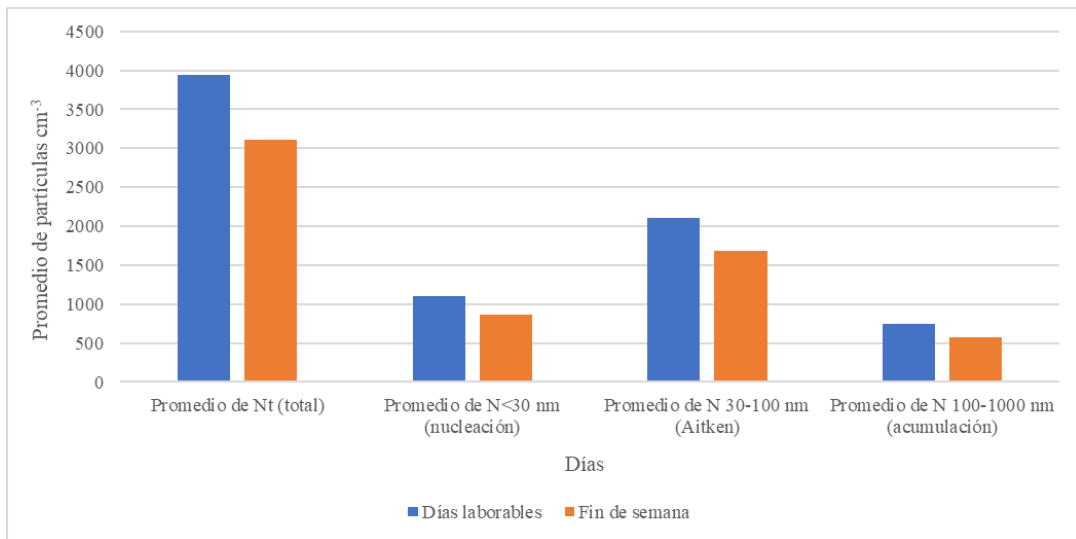


Figura 7: Promedio de la concentración de partículas por modas en días laborables y fin de semana.

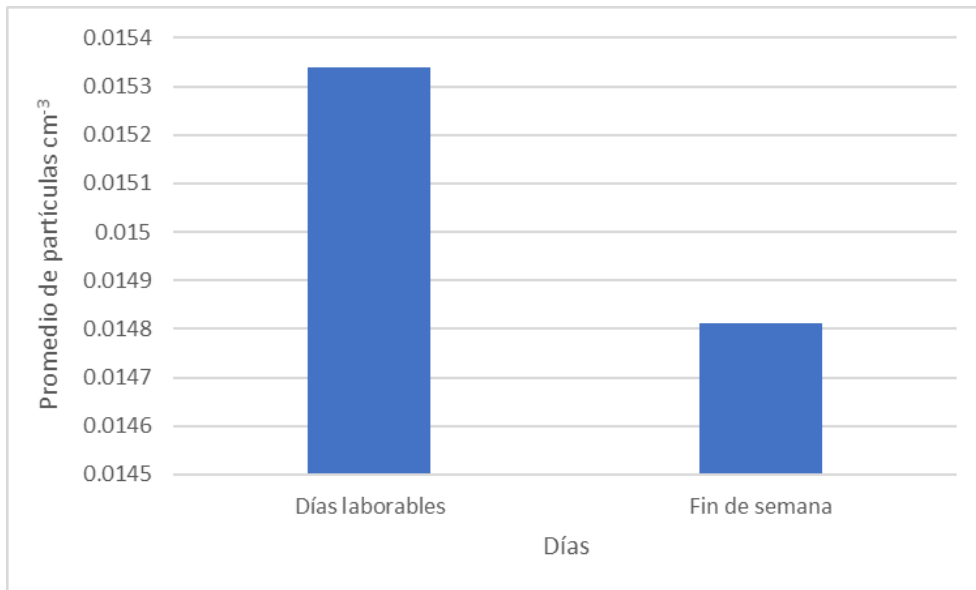


Figura 8: Promedio de la concentración de partículas en la moda gruesa en días laborables y fin de semana.

A continuación, se desarrollan los datos analizados durante los días de diario y fin de semana, así como las diferencias existentes para cada una de las modas. En la Figura 8, se observa que la concentración de partículas es mayor en los días laborables (3947 ± 2834 partículas cm^{-3}) que durante los fines de semana (3115 ± 2552 partículas cm^{-3}). Por modas, este patrón se mantiene, lo que indica que los desplazamientos y la actividad laboral realizada entre lunes y viernes provoca un aumento del 21 % en la concentración total de partículas. Para cada una de las modas, también se observan variaciones significativas: en la moda de nucleación se registra una variación del 22 %, en la de Aitken del 20 %, y en la de acumulación del 22 %. Tal como se puede observar, no existen grandes variaciones entre las distintas modas, pero en todas ellas sus valores son más altos los días laborales, siendo estas diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

5.2. Distribución de partículas por tamaños

Las Figuras 9 y 10 muestran la distribución de partículas existente en la ciudad de León para los diferentes rangos de tamaño estudiados. Los mayores valores se registraron entre los 20 y los 60 nm durante el verano, relacionado con la generación de nuevas partículas durante los eventos de nucleación. El máximo en verano está relacionado con una mayor intensidad solar, originando una mayor actividad fotoquímica y, con ello, un aumento en la formación de partículas. Los menores valores en la moda de nucleación y Aitken se registraron durante el

invierno de 2017, ya que, en este invierno, las emisiones de tráfico, así como el uso de calefacciones no fue tan elevado como en el invierno anterior. A partir de los 1000 nm (Figura 10), las concentraciones de partículas son bajas, encontrando los máximos valores en la primavera.

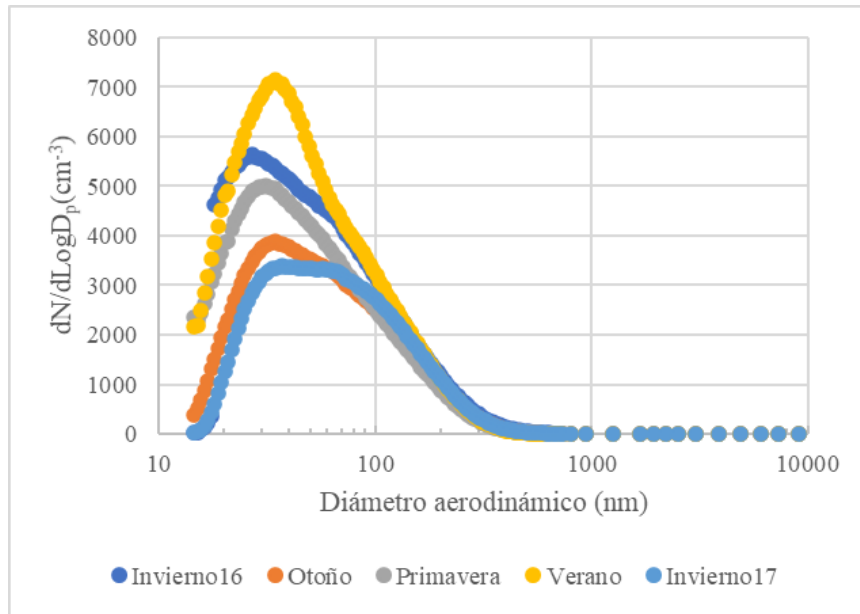


Figura 9: Distribución del número de partículas en función del diámetro aerodinámico y estaciones.

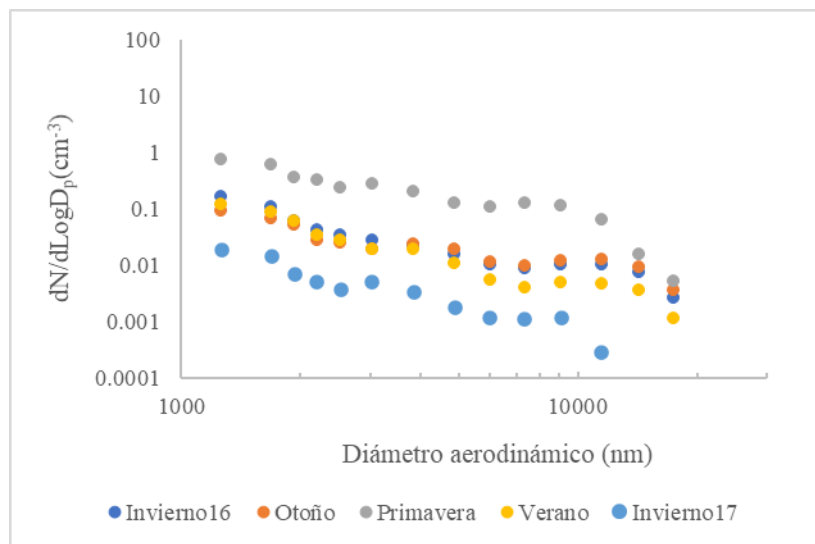


Figura 10: Distribución del número de partículas en función del diámetro aerodinámico y estaciones

5.3. Parámetros ópticos por estaciones

La Tabla 1, incluye los valores de los parámetros ópticos analizados durante el estudio (AOD, SSA y g) para todas las estaciones registrados en Valladolid y Palencia.

Tabla 1: Valores de los parámetros ópticos de Valladolid y Palencia por estaciones.

	Valladolid			Palencia		
	g	AOD	SSA	g	AOD	SSA
Invierno16	0,65	0,066	0,89	0,63	0,045	0,81
Primavera	0,63	0,040	0,93	0,63	0,041	0,84
Verano	0,63	0,062	0,96	0,63	0,070	0,87
Otoño	0,63	0,034	0,90	0,65	0,029	0,85
Invierno17	0,63	0,086	0,91	0,64	0,078	0,83
Promedio	0,63	0,057	0,92	0,64	0,056	0,84

El parámetro de asimetría registró valores entre 0,63 y 0,65 para las distintas estaciones del año en ambas localidades, lo que indica que se dio retrodispersión, es decir, las ondas se reflejaban de nuevo con un ángulo similar al de incidencia. Este parámetro presentó un máximo en Valladolid, con un valor de 0,65 en el invierno de 2016. Los valores del parámetro de asimetría que se encuentren entre 0,6 y 0,7, son representativos de ciudades con una contaminación moderada (Lyamani, 2002). Por ejemplo, Shaocai et al. (2000), en el Noroeste de California (EEUU), obtuvieron valores entre 0,61 y 0,75.

Existen diferencias significativas ($p < 0,05$) en el parámetro de asimetría registrado en Valladolid por estaciones (Tabla 2). Se produjeron entre el invierno de 2016 y el resto de estaciones. Las diferencias con el invierno 2017 pueden explicarse atendiendo a los valores de Tabla 1, donde el invierno de 2016 registra un mayor valor que en el 2017, significando esto que, en el primero de los inviernos, los aerosoles interactuaron en menor medida. Asimismo, en la primavera y el verano, los aerosoles no presentan prácticamente BC (Blanco-Alegre *et al.*, 2019), sino que son aerosoles con gran dispersión, como los provenientes de las intrusiones saharianas (Mona *et al.*, 2006).

En cuanto a Palencia, el análisis estadístico no determinó diferencias significativas en el parámetro de asimetría entre estaciones (Tabla 3), esto se debe principalmente a que, en esta ciudad, no se registraron valores de este parámetro muy diferenciados entre las estaciones.

Semanalmente, en Valladolid se dan diferencias significativas entre días laborables y fin de semana, mientras que en Palencia esto se rechaza. El motivo puede ser la diferencia de actividad laboral que se da en las dos ciudades, ya que Valladolid tiene una mayor actividad, la

cual genera más partículas de mayor tamaño, lo que implica una mayor afección al parámetro de asimetría.

El AOD en Valladolid presenta un máximo en el invierno de 2017 (0,086). Es necesario recordar que este parámetro representa la carga de aerosoles en la atmósfera, así como el grado de turbidez. Esto se debe a que la ciudad analizada no soporta una actividad muy elevada en comparación con otras grandes ciudades en las que se registran valores mayores debido a la cantidad de aerosoles emitidos por las diversas actividades llevadas a cabo, entre ellas, el uso de los vehículos, así como una mayor actividad industrial.

En Palencia sucede algo similar; se obtiene un máximo en el invierno de 2017 (0,078), algo esperable, ya que es cuando se producen mayor quema de combustibles. Sin embargo, debido al volumen de actividad de esta ciudad, tampoco se dan valores muy elevados, por lo que la turbidez en dicho lugar es más baja.

El análisis estadístico realizado de este parámetro por estaciones en Valladolid refleja diferencias significativas (Tabla 2), por lo que se procedió a realizar comparaciones por parejas entre dichas estaciones. El invierno de 2016, arrojaba diferencias respecto al resto de estaciones, confirmando lo mencionado anteriormente. Esto se debe a que la quema de combustibles, así como la actividad llevada a cabo en la ciudad, causan un mayor número de partículas en la moda de acumulación, lo que implica un aumento de la turbidez del entorno, algo que disminuye en el resto de estaciones. Esto también sucede en Palencia (Tabla 3). Sin embargo, en este caso, es el invierno del 2017 el que presenta estas diferencias con el resto de estaciones, posiblemente derivado de las condiciones climáticas de la zona, que se agudizaron más durante este invierno, provocando que se generase un mayor número de partículas y, con ello, una mayor turbidez respecto al resto de estaciones.

Tabla 2: Diferencias significativas entre los parámetros ópticos por estaciones en Valladolid.

	Invierno 2016	Primavera	Verano	Otoño	Invierno 2017
Invierno 2016		AOD, g, SSA	AOD, g, SSA	g	g
Primavera			AOD, SSA	SSA	AOD, SSA
Verano				AOD, SSA	AOD, SSA
Otoño					
Invierno 2017					

Tabla 3: Diferencias significativas entre los parámetros ópticos por estaciones en Palencia.

	Invierno 2016	Primavera	Verano	Otoño	Invierno 2017
Invierno 2016			AOD, SSA		
Primavera			AOD, SSA	AOD	AOD
Verano				AOD	AOD, SSA
Otoño					
Invierno 2017					

Por otra parte, este mismo análisis, vinculado a los días de la semana, arroja diferencias entre Valladolid y Palencia, ya que en la primera sí que se dan diferencias para los valores del AOD si se estudia durante días de diario o si es en fin de semana, algo que no ocurre en Palencia, ya que presumiblemente, en esta última, no haya tanta diferencia de actividad laboral entre los distintos días.

Por último, se encuentran los valores del SSA de Valladolid. Los datos registrados son muy cercanos a 1, lo que significa que no se produjo absorción de la radiación por parte de los aerosoles, sino que se dio mayormente dispersión. En Palencia sucede lo mismo con este parámetro, ya que se mantienen valores similares en todas las estaciones, obteniendo un promedio de 0,84, el cual también se encuentra cercano a 1. En ambas ciudades se han encontrado diferencias estadísticamente significativas respecto a las estaciones, pero no con los días de la semana. En Valladolid, se determinó que existen diferencias entre el invierno de 2016, frente a la primavera y el verano, algo que concuerda con lo descrito con anterioridad, ya que esta estación presenta los menores valores de SSA, relacionado probablemente con una mayor emisión de BC, partículas con gran poder absorbente. Lo mismo sucede con el otoño, ya que también se muestran diferencias estadísticamente significativas con el resto de estaciones, derivado de su menor valor en este parámetro comparado con el resto de estaciones. El caso de Palencia, es parecido al de Valladolid, ya que aquí también se dan diferencias significativas en el SSA por estaciones. Con ello, se realizaron comparaciones por parejas, resultando que tanto el invierno de 2016 como el de 2017 presentaron diferencias significativas con el verano, lo que resulta razonable, debido a la mayor emisión de BC producida durante el invierno derivado de la quema de combustibles.

5.4. Número de partículas y parámetros ópticos

Por último, se realizó el estudio de correlación de Pearson para cada uno de los parámetros ópticos registrados en Valladolid y Palencia respecto al promedio de partículas existentes por cada moda de León, siempre teniendo en cuenta que se estaban analizando datos del mismo periodo, pero de distintas ciudades.

El parámetro de asimetría en Valladolid confirmó correlaciones negativas con la moda de nucleación. Esta moda registra un gran número de partículas, mostrando como a mayor concentración, menores serán los valores registrados en este parámetro óptico. En Palencia no se dieron correlaciones significativas para este parámetro, presumiblemente por la estabilidad en los valores de este parámetro y el menor número de partículas registradas en esta ciudad.

El AOD en Valladolid presenta una correlación positiva con la moda de acumulación. Esta moda registra partículas de mayor tamaño respecto a las partículas de las modas anteriores, lo que permite explicar esta correlación con el parámetro, ya que, a mayor tamaño y número de partículas, mayor atenuación de la radiación por parte de los aerosoles. En Palencia este parámetro no se correlaciona significativamente con ninguna de las modas.

El SSA en Valladolid se correlaciona significativamente de forma positiva con la moda gruesa, indicando que un mayor número de partículas gruesas (principalmente sales marinas y polvo de intrusiones saharianas) está relacionado con una mayor dispersión de la luz incidente. Por otra parte, en Palencia se registra una situación diferente, los valores del SSA son menores que los de Valladolid. Teniendo en cuenta las propiedades de este parámetro, cuanto más cercanos a 0, mayor absorción se dará por parte de los aerosoles. Existen correlaciones negativas significativas con la moda de nucleación y Aitken, tamaños en donde se incluye el BC de gran capacidad absorbente y por lo tanto provoca un menor valor de SSA.

6. Conclusiones

Las principales conclusiones de este estudio son:

- Las máximas concentraciones de partículas en la moda de nucleación y Aitken se dieron durante el verano, debido a la mayor actividad fotoquímica que favoreció la ocurrencia de procesos de formación de partículas. Las bajas temperaturas durante las estaciones más frías provocaron una mayor quema de combustibles en calefacciones y con ello una mayor emisión de partículas incluidas en la moda de acumulación. Independientemente de la estación del año, la concentración de partículas fue superior entre semana que en los fines de semana debido al mayor uso de los vehículos y a la actividad laboral.
- Los parámetros ópticos, dependientes principalmente del tipo de aerosol presente, g (0,63-0,65) y SSA (0,89-0,96) mostraron valores estables a lo largo de todas las estaciones. Sin embargo, el AOD, más dependiente de la concentración de partículas, mostró variaciones estacionales debido a la actividad laboral, los desplazamientos y el uso de combustibles.
- Se han encontrado diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de partículas en todas las modas por estaciones y por días laborables/fin de semana. Respecto a los parámetros ópticos, destaca el AOD, que presentó diferencias significativas entre el invierno 2016 en Valladolid y el resto de estaciones, debido a la actividad industrial y al tráfico en la ciudad.
- Se han determinado correlaciones estadísticamente significativas entre los parámetros ópticos en Valladolid y el número de partículas por modas en León: el SSA con la moda gruesa (correlación positiva), el AOD con la moda de acumulación (positiva) y g con la de nucleación (negativa).

7. Referencias

- Alastuey, A., Querol, X., Castillo, S., Escudero, M., Avila, A., Cuevas, E., Torres, C., Romero, P. M., Exposito, F., García, O., Diaz, J. P., Van Dingenen, R. and Putaud, J. P. (2005) "Characterisation of TSP and PM_{2.5} at Izaña and Sta. Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain) during a Saharan Dust Episode (July 2002)", *Atmospheric Environment*, 39(26), pp. 4715–4728. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.04.018.
- Aldabe, J. (2011) "Caracterización físico-química del material particulado en la comunidad foral de Navarra", p. 306. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Caracterización-físico-química-del-material-en-la-Salinas/fb0fc8af0457b7ce1f70f0a62c3df88ca7ba2073>.
- Alhogbi, B. G. (2017) "Consecuencias of aerosol in atmosphere", *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), pp. 21–25. Available at: <http://www.elsevier.com/locate/scp>.
- Alonso-Blanco, E. (2019) *Caracterización de la distribución de tamaños y propiedades higroscópicas del aerosol atmosférico en España mediante Analizadores de Movilidad Diferencial (DMA)*. Alcalá de Henares.
- Blanco-Alegre, C., Calvo, A. I., Castro, A., Oduber, F., Alonso-Blanco, E. and Fraile, R. (2021) "Scavenging of submicron aerosol particles in a suburban atmosphere: the raindrop size factor", *Environmental Pollution*. Elsevier Ltd, 285(April), p. 117371. doi:10.1016/j.envpol.2021.117371.
- Blanco-Alegre, C., Calvo, A. I., Coz, E., Castro, A., Oduber, F., Prévôt, A. S. H., Močnik, G. and Fraile, R. (2019) "Quantification of source specific black carbon scavenging using an aethalometer and a disdrometer", *Environmental Pollution*, 246, pp. 336–345. doi:10.1016/j.envpol.2018.11.102.
- Cachorro, V. (2014) "Los aerosoles atmosféricos y el vapor de agua en la fotometría solar", in, p. 55. Available at: https://ephyslab.uvigo.es/old-site/files/5814/7920/4013/Conferencia_Orense.pdf.
- Castro, A., Alonso-Blanco, E., González-Colino, M., Calvo, A. I., Fernández-Raga, M. and Fraile, R. (2010) "Aerosol size distribution in precipitation events in León, Spain", *Atmospheric Research*, 96(2–3), pp. 421–435. doi:10.1016/j.atmosres.2010.01.014.
- Chen, C., Liu, S., Dong, W., Song, Y., Chu, M., Xu, J., Guo, X., Zhao, B. and Deng, F. (2021) "Increasing cardiopulmonary effects of ultrafine particles at relatively low fine particle concentrations", *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 751, p. 141726. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141726.
- Dami, M. (2009) *Aerosoles: Características y transporte de partículas*. Available at: <https://docplayer.es/22626076-Marino-damian-tesis-doctoral-marzo-de-2009-2-introduccion.html>.
- Dumka, U. C., Kaskaoutis, D. G., Mihalopoulos, N. and Sheoran, R. (2021) "Identification of key aerosol types and mixing states in the central Indian Himalayas during the GVAX campaign: the role of particle size in aerosol classification", *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 761, p. 143188. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143188.
- EPA, 2004. Particulate Matter (PM) Air Quality Standards.

Filonchik, M., Peterson, M., Yan, H., Yang, S. and Chaikovsky, A. (2021) "Columnar optical characteristics and radiative properties of aerosols of the AERONET site in Minsk, Belarus", *Atmospheric Environment*. Elsevier Ltd, 249(January), p. 118237. doi:10.1016/j.atmosenv.2021.118237.

Fröhlich-Nowoisky, J., Kampf, C. J., Weber, B., Huffman, J. A., Pöhlker, C., Andreae, M. O., Lang-Yona, N., Burrows, S. M., Gunthe, S. S., Elbert, W., Su, H., Hoor, P., Thines, E., Hoffmann, T., Després, V. R. and Pöschl, U. (2016) "Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions", *Atmospheric Research*. The Authors, 182, pp. 346–376. doi:10.1016/j.atmosres.2016.07.018.

Fushimi, A., Nakajima, D., Furuyama, A., Suzuki, G., Ito, T., Sato, K., Fujitani, Y., Kondo, Y., Yoshino, A., Ramasamy, S., Schauer, J. J., Fu, P., Takahashi, Y., Saitoh, K., Saito, S. and Takami, A. (2021) "Source contributions to multiple toxic potentials of atmospheric organic aerosols", *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 773, p. 145614. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145614.

Guilabert, P. M. (2017) *Caracterización de parámetros ópticos del aerosol atmosférico en un enclave de alta montaña*. Universidad Miguel Hernández. Available at: http://dspace.umh.es/bitstream/11000/4295/1/TFG_Mas_Guilabert%2C_Pablo.pdf.

Guyon, P., Boucher, O., Graham, B., Beck, J., Mayol-Bracero, O. L., Roberts, G. C., Maenhaut, W., Artaxo, P. and Andreae, M. O. (2003) "Refractive index of aerosol particles over the Amazon tropical forest during LBA-EUSTACH 1999", *Journal of Aerosol Science*, 34(7), pp. 883–907. doi:10.1016/S0021-8502(03)00052-1.

Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y. J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I. and Smirnov, A. (1998) "AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization", *Remote Sensing of Environment*, 66(1), pp. 1–16. doi:10.1016/S0034-4257(98)00031-5.

INE, 2020. Instituto Nacional de Estadística

Lohmann, U. and Feichter, J. (2005) "Atmospheric Chemistry and Physics Global indirect aerosol effects: a review", *Atmos. Chem. Phys*, 5, pp. 715–737. Available at: www.atmos-chem-phys.org/acp/5/715/SRef-ID:1680-7324/acp/2005-5-715EuropeanGeosciencesUnion.

Lyamani, H. (2002) *Estudio de las propiedades de los aerosoles atmosféricos en Armilla*. Universidad de Granada. Available at: <https://digibug.ugr.es/handle/10481/37570>.

Mona, L., Amodeo, A., Pandolfi, M. and Pappalardo, G. (2006) "Saharan dust intrusions in the Mediterranean area: Three years of Raman lidar measurements", *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(16), pp. 1–13. doi:10.1029/2005JD006569.

Moreno, T. (2007) "Aerosoles atmosféricos: Problemas ambientales", pp. 1–3. Available at: http://www.aulados.net/Temas_ambientales/Particulado_aereo/Particulado_aereo.pdf.

Nøjgaard, J. K., Nguyen, Q. T., Glasius, M. and Sørensen, L. L. (2012) "Nucleation and Aitken mode atmospheric particles in relation to O₃ and NO_x at semirural background in Denmark", *Atmospheric Environment*. Elsevier Ltd, 49(3), pp. 275–283. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.11.040.

Obregón, M. Á. (2012) *Estudio de los aerosoles en columna sobre Cáceres a partir de*

medidas radiométricas. Universidad de Extremadura. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/72043232.pdf>.

Oduber, F., Calvo, A. I., Castro, A., Blanco-Alegre, C., Alves, C., Calzolari, G., Nava, S., Lucarelli, F., Nunes, T., Barata, J. and Fraile, R. (2021a) "Characterization of aerosol sources in León (Spain) using Positive Matrix Factorization and weather types", *Science of The Total Environment*, 754, p. 142045. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142045.

Oduber, F., Calvo, A. I., Castro, A., Blanco-Alegre, C., Alves, C., Calzolari, G., Nava, S., Lucarelli, F., Nunes, T., Barata, J. and Fraile, R. (2021b) "Characterization of aerosol sources in León (Spain) using Positive Matrix Factorization and weather types", *Science of the Total Environment*, 754. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142045.

Olaguíbel, J. (2015) "Características físicas y depósito pulmonar de las partículas inhaladas", *Monografías en Neumología*, pp. 14–28.

Samitier, S. I. (2019) *Niveles y evolución de las partículas ultrafinas del aerosol atmosférico en un entorno suburbano con influencia atlántica*. Universidad de La Coruña. Available at: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/24362>.

Toledano, C. (2008) "Los aerosoles atmosféricos y su influencia en la Península Ibérica", *Manuales Formativos de ACTA*, 48, pp. 9–20.

TSI (2007) "Scanning Mobility Particle Sizer TM", pp. 239–253. Available at: http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Bibliography/SMPS_Emissions_SMPS_Bib.pdf.

Viana, M., Chi, X., Maenhaut, W., Querol, X., Alastuey, A., Mikuška, P. and Večeřa, Z. (2006) "Organic and elemental carbon concentrations in carbonaceous aerosols during summer and winter sampling campaigns in Barcelona, Spain", *Atmospheric Environment*, 40(12), pp. 2180–2193. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.12.001.

Zhang, Q., Jia, S., Yang, L., Krishnan, P., Zhou, S., Shao, M. and Wang, X. (2021) "New particle formation (NPF) events in China urban clusters given by severe composite pollution background", *Chemosphere*. Elsevier Ltd, 262, p. 127842. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127842.

Zhang, Y., Seigneur, C., Seinfeld, J. H., Jacobson, M., Clegg, S. L. and Binkowski, F. S. (2000) "A comparative review of inorganic aerosol thermodynamic equilibrium modules: Similarities, differences, and their likely causes", *Atmospheric Environment*, 34(1), pp. 117–137. doi:10.1016/S1352-2310(99)00236-8.

