



Máster en Física

Trabajo de Fin de Máster

Impacto de las intrusiones de polvo mineral Sahariano en la calidad del aire de Valladolid durante el período 2003 - 2014

Trabajo realizado por:

Nora Tahirí Mejía Cabezas

Supervisado por:

Dr. David Mateos Villán

Dr. Roberto Román Díez

Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica

Facultad de Ciencias

Universidad de Valladolid

Valladolid, España, Marzo 2021

Agradecimientos

“Lo que hoy parece un huracán, tal vez mañana sea el viento, abriéndote un nuevo camino”

Y es así, que este camino inició hace mucho tiempo atrás, cuando a pesar de todas las circunstancias que jugaban en mi contra, decidí incursionar en una carrera poco convencional para muchas personas y aunque este parezca el final del camino, para mí es un nuevo comienzo, con más ganas de superarme y aprender día a día.

Tuve la suerte de encontrarme con personas maravillosas que me ayudaron a levantarme en cada tropiezo, a quienes les entrego mi eterna gratitud. Quisiera empezar agradeciendo a Luis Miguel Nieto, quien fue la primera persona en extenderme su mano y que a pesar de todos los inconvenientes que se fueron presentando, desde el principio, supo guiarme, motivarme y nunca dejarme desfallecer.

Gracias a mis tutores, David y Roberto. Gracias David, por ser quien día a día me ha brindado todas las herramientas necesarias para desarrollar este trabajo, por su tiempo y dedicación, pero sobre todo por su inmensa paciencia, gracias de todo corazón, mil veces gracias, porque sin tu apoyo nada de esto sería posible. Gracias Roberto por tu meticulosa revisión, para hacer que este trabajo sea presentado de la mejor manera posible

Gracias a cada uno de mis profesores, por brindarme su ayuda sin reservas y transmitir sus conocimientos de la manera en lo que hicieron, se han ganado mi respeto y admiración, por su calidad humana y su inmenso conocimiento.

Gracias a mis papás y mis hermanos, mi hermosa familia, que son mi inspiración y mi motor y que, a pesar de la distancia, estuvieron siempre cerca de mí, dándome el aliento que tanto necesitaba día a día, todos mis logros son por y para ustedes.

Gracias a mi compañero de mi vida y mejor amigo, por todo el amor que me demuestras a diario, eres mi brújula y mi ancla, eres quién me mantiene en pie cuando las fuerzas no me alcanzan y me ayuda a ver siempre la luz al final del túnel. Lo que siempre estuvo tan lejano para mí, aquí se plasma como una realidad, como la prueba fehaciente de que las adversidades están para superarlas.

Gracias a todos quienes hicieron esto posible este sueño.

Resumen

Una de las principales fuentes de material particulado del mundo es el desierto del Sahara, el cual tiene la capacidad de incidir en la calidad del aire a miles de kilómetros. Este material particulado es capaz de ingresar al organismo humano causando una serie de afecciones, por lo que su estudio y monitoreo de los niveles que presenta es de gran relevancia.

En el presente estudio, se utilizaron dos bases de datos: en la primera se dispone de la clasificación, realizada en estaciones de medida de fondo regional de la región de Castilla y León, de los días según el tipo de evento que presentan; la segunda base de datos proporciona los valores medios diarios de PM_x para una estación de fondo urbana situada en el centro de Valladolid. Al trabajar conjuntamente con ambas series de datos se va a prestar atención preferente al impacto que los eventos desérticos (DD) causan en los niveles de PM_{10} sobre la ciudad de Valladolid. Por lo tanto, se creará un nuevo inventario donde todos los valores de PM_{10} registrados en Valladolid llevan asociada la información de si proceden de un evento natural (como polvo desértico, incendio forestal, entre otros) o si no hay constancia de ningún evento natural que cause el correspondiente valor de PM_{10} en la ciudad de Valladolid.

De este nuevo inventario se realizan los análisis estadísticos correspondientes: medias mensuales, para verificar la presencia o ausencia de ciclos estacionales; y medias anuales, para determinar la variación a lo largo del período analizado para los valores de concentración de PM_{10} .

Los días se separan en días con eventos naturales y días sin eventos naturales. Con la serie sin eventos se calcula el fondo urbano de la ciudad de Valladolid mediante la aplicación del Percentil 40% a la serie de datos, obteniéndose un valor de PM_{10} de $17.17 \pm 1.65 \mu\text{g m}^{-3}$; esta desviación muestra que no hay una gran dispersión de los datos por lo que es posible asumir que este resultado es representativo del valor de fondo y que puede ser asumido como tal durante todos los meses de año.

Con este valor de fondo, se puede calcular la contribución de las intrusiones desérticas de polvo mineral sahariano en la calidad del aire de Valladolid. Para ello, se resta el valor de fondo al valor diario de PM_{10} para cada uno de los días catalogados como desérticos. Se obtiene una reducción considerable en el periodo estudiado (2003-2014), mientras que el ciclo anual muestra máximos en mayo y julio. Comparando las tendencias obtenidas en el periodo de estudio, el descenso en la contribución del aerosol desértico (ligado a una menor ocurrencia de este tipo de aerosol) puede llegar a explicar el ~ 20% de la caída total registrada en los valores de PM_{10} .

En cuanto al número de excedencias, considerando los umbrales determinados por la directiva europea 2008/50/CE, ~ 42% de ellas son atribuibles a los distintos tipos de eventos naturales que son transportados a la ciudad de Valladolid, siendo las restantes de origen antropogénico. En los primeros años de estudio, de 2003 a 2006, se obtiene un elevado número de excedencias, registrando el máximo en 2004 y 2005 con casi 90 días superando el umbral de contaminación recomendado por la Comisión Europea. A partir de 2007, con la implementación de la nueva directiva europea, se observa una evidente caída, hasta llegar prácticamente a cero.

Abstract

One of the main sources of particulate matter in the world is the Sahara Desert, which has the capacity to affect air quality thousands of kilometers away. This material is capable of entering the human body causing a series of conditions, therefore, its study and monitoring of the levels it presents is of great relevance.

In the present study, two databases were used: the first one has a classification, carried out in regional background measurement stations in the Castilla y León region, of the days according to the type of event they present; the second database provides the daily mean PM_x values for an urban background station located in the center of Valladolid. When working together with both data series, we focus on the impact that desert events (DD) cause on the levels of PM_{10} on the city of Valladolid. Therefore, a new inventory will be created, where all the PM_{10} values registered in Valladolid are associated with information on whether they come from a natural event (such as desert dust, forest fire, or others) or if there is no evidence of any natural event that causes the corresponding value of PM_{10} in the city of Valladolid.

The corresponding statistical analyzes are carried out from this new inventory: monthly averages, to verify the presence or absence of seasonal cycles; and annual averages, to determine the variation throughout the period analyzed for the PM_{10} concentration values.

The days are separated into days with natural events and days without natural events. With the series without events, the urban background of the city of Valladolid is calculated by applying the 40% Percentile to the data series, obtaining a PM_{10} value of $17.17 \pm 1.65 \mu\text{g m}^{-3}$; this deviation shows that there is not a great dispersion of the data, so it is possible to assume that this value is representative of the background value and that it can be assumed as such during all months of the year.

With this background value, we can calculate the contribution of desert intrusions Saharan mineral dust on the air quality of Valladolid. To do this, the background value is subtracted from the daily value of PM_{10} for each of the days classified as desert. A considerable reduction is obtained in the period studied (2003-2014), while the annual cycle shows maximums in May and July. Comparing the trends obtained in the study period, the decrease in the contribution of desert aerosol (linked to

a lower occurrence of this type of aerosol) may explain ~ 20% of the total fall recorded in PM₁₀ values.

Regarding the number of exceedances, considering the thresholds determined by the European directive 2008/50 / CE, ~ 42% of them are attributable to the different types of natural events that are transported to the city of Valladolid, being the rest of anthropogenic origin. In the first years of the study, from 2003 to 2006, a high number of exceedances was obtained, registering the maximum in 2004 and 2005 with almost 90 days exceeding the contamination threshold recommended by the European Commission. As of 2007, with the implementation of the new European Directive, an evident fall has been observed, reaching practically zero.

Índice General

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Calidad del aire y contaminación	2
1.2 Material Particulado.....	2
1.3 Efectos en la salud	4
1.4 Normativa Europea Vigente.....	5
1.5 Emisiones desérticas de polvo del Sahara	7
Objetivos	9
CAPÍTULO 2: INSTRUMENTACIÓN, METODOLOGÍA Y DATOS.....	10
2.1 Red de Control de la Contaminación Atmosférica del Ayuntamiento de Valladolid.....	10
2.2 Inventario de Intrusiones Desérticas	13

2.3	Aplicación del inventario de Eventos de Alta Turbiedad a los datos de la estación Arco Ladrillo II-Victoria Cachorro de pm_x	14
	CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
3.1	Estudio de la evolución anual de PM_{10}	17
3.2	Evolución anual del número excedencias.....	20
3.3	Determinación del fondo urbano de la ciudad de Valladolid.....	21
3.4	Cálculo de la contribución del aerosol desértico en la ciudad de Valladolid.....	22
	CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	25
4.1	Conclusiones.....	25
4.2	Líneas futuras.....	26
	REFERENCIAS	28

Índice de figuras

Figura 1: Contaminantes atmosféricos [4]	2
Figura 2: Comparación de tamaño de las partículas de PM [6].....	3
Figura 3: Material particulado y sus efectos en la salud [18]	5
Figura 4: Correlación entre los promedios de PM ₁₀ [18].....	7
Figura 5: Intrusión de polvo desértico procedente del Sahara (Fuente: NASA).....	7
Figura 6: Contribución másica (en $\mu\text{g m}^{-3}$) de polvo africano para PM ₁₀ correspondiente a 21 sitios de fondo regional (EMEP) en el sur de Europa [13]	8
Figura 7: Estaciones RCCAVA	11
Figura 8: Estructura de la base de datos correspondiente a la estación Arco Ladrillo-Victoria Cachorro [26].....	12
Figura 10: Estructura del inventario de Eventos de Alta Turbiedad [28]	14
Figura 11: Base de datos final con datos de PMX en la ciudad de Valladolid y la identificación de eventos en una estación de fondo regional.	15
Figura 12: Evolución de la media mensual de la serie completa y sin eventos de PM ₁₀	18
Figura 13: Evolución de la media anual de la serie completa y sin eventos de PM ₁₀	19
Figura 14: Excedencias año a año, correspondientes al período 2003-2014	20
Figura 15: Variación interanual de la contribución de los DD al valor de PM ₁₀	22
Figura 16: Estaciones de AERONET, (Quito y San Cristóbal se encuentran en Ecuador).....	27

Índice de tablas

Tabla 1: Directiva Europea 1999/30/CE valores límite y período promedio.....	6
Tabla 2: Localización de las estaciones de la RCCAVA a lo largo de la ciudad de Valladolid	11
Tabla 3: Instrumentos de monitoreo.	12
Tabla 4: Suma anual de los días con datos y sin datos de las series de PM ₁₀ y PM _{2.5} en el inventario final.....	15
Tabla 5: Suma anual de los días sin evento de la serie de datos de PM ₁₀	16
Tabla 6: Suma anual de los días con eventos, clasificados en D (Desérticos puros), DC (Desérticos mezcla) y otros eventos.....	16
Tabla 8: Medias mensuales para la serie completa y sin eventos de PM ₁₀	18
Tabla 9: Medias anuales para la serie completa y sin eventos de PM ₁₀	19
Tabla 7: Suma anual de las Excedencias.....	21
Tabla 10: Percentil 40% para la serie de datos de PM ₁₀ sin eventos (µg m ⁻³).....	21
Tabla 12: Media anual de la contribución a los valores totales de PM ₁₀ en valores absolutos (“abs.”, en µg m ⁻³) y relativos (“rel.”, en %).....	22
Tabla 13: Tendencias temporales, valores p e intervalo de confianza para la serie completa y para la contribución de los desérticos, las tendencias negativas evidencian un decrecimiento en la variable analizada.....	23
Tabla 14: Media mensual de la contribución a los valores totales de PM ₁₀ en valores absolutos (“abs.”, en µg m ⁻³) y relativos (“rel.”, en %).....	23

Capítulo 1

Introducción y objetivos

La contaminación ambiental es un factor crucial en la calidad de vida y salud de las personas, a tal punto que respirar aire puro está catalogado como un derecho humano. Muchos agentes son los responsables de la contaminación atmosférica y según su origen son conocidos como contaminantes primarios o secundarios. Los primarios son emitidos directamente a la atmósfera y se producen tanto de manera natural como antropogénica; estos últimos contribuyen de manera más desfavorable, pero pueden, hasta cierto punto, ser controlados por distintos tipos de leyes, regulaciones o acuerdos, para disminuir los niveles de contaminación debidos a grandes factorías o emisiones de tráfico rodado. Los contaminantes de origen natural provienen de erupciones volcánicas, incendios, tormentas de arena, descomposición de materia orgánica o polen. Los contaminantes secundarios se originan en las interacciones que experimentan entre sí las emisiones primarias en la atmósfera.

Dependiendo de la proporción que presentan estos agentes existen una serie de afecciones en la salud y en el medio ambiente, es aquí donde radica la importancia de mantener monitoreados los niveles de contaminación y poder determinar las acciones necesarias para mantener el bienestar general de la salud pública.

En este primer capítulo, se explorarán los conceptos más relevantes y se expondrán los criterios y circunstancias principales que han motivado a la realización de este trabajo, así como los objetivos planteados.

1.1 Calidad del aire y contaminación

La vida de las personas se ve afectada por la contaminación del aire de tal manera que el detrimento que ha sufrido la calidad del aire se ha catalogado como un riesgo importante para la salud. Algunos tipos de contaminantes pueden afectar al sistema respiratorio, circulatorio, cardiovascular, mientras que otros contaminantes causan enfermedades cardíacas o afectan a la piel y a las membranas mucosas [1].

Pese a que las causas de la contaminación del aire pueden ser tanto naturales como antropogénicas, son éstas últimas las que afectan de manera más desfavorable la calidad del aire e incluso son capaces de modificar la composición de la atmósfera, a la vez que pueden causar cambios en el clima por su influencia en el balance radiativo terrestre [2].

Varios estudios enfocan su atención en determinar cuán limpio o contaminado se encuentra el aire. Monitorear la calidad del aire es importante porque los niveles de contaminación inciden en la salud y el medio ambiente. En general, la contaminación del aire se define como la presencia de materias o sustancias contaminantes, generadas ya sea de manera natural o antropogénica, en concentraciones tales, y períodos de tiempo suficientemente prolongados, como para interferir en el bienestar humano y el medio ambiente [3].



Figura 1: Contaminantes atmosféricos [4]

El ozono (O₃), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el dióxido de azufre (SO₂) y el material particulado (PM) son reportados como principales contaminantes [5] (Figura 1) y son precisamente las concentraciones medias diarias o anuales de PM_x (concentración de material particulado con diámetro menor de x μm) expresadas en microgramos por metro cúbico (μg m⁻³) aquellas que determinan la calidad del aire y son causantes de distintos tipos de afecciones tanto respiratorias como cardíacas. Algunos estudios presentan una relación directa entre la exposición a altos niveles de PM_x y la carcinogénesis [6] debido a la alta capacidad de penetrar a grandes profundidades en nuestro organismo.

1.2 Material Particulado

El material particulado, PM_x por sus siglas en inglés, se define como una mezcla compleja de partículas extremadamente pequeñas y gotas de líquido presentes en suspensión en la atmósfera que ocasionan serias afectaciones en la salud, influyen en el balance radiativo, en la formación de

nubes o en la modificación del albedo. Estas partículas poseen un amplio rango de propiedades morfológicas, físicas, químicas y termodinámicas [7], [8], [9] por lo que el PM_X es ampliamente estudiado y la determinación de los niveles existentes en la atmósfera es un parámetro clave en la evaluación de la calidad del aire.

El material particulado, se clasifica como primario si es emitido directamente a la atmósfera o secundario si se forma a partir de reacciones entre contaminantes dentro de la atmósfera, o se modifica por condensación, coagulación y crecimiento. Otro parámetro de clasificación es el tamaño del diámetro aerodinámico y son dos los grupos más habituales: PM_{10} o partículas inhalables, es la fracción de partículas con diámetro aerodinámico menor a $10\ \mu m$; $PM_{2.5}$ o partículas finas, es la fracción de partículas con diámetro aerodinámico menor a $2.5\ \mu m$, $PM_{10}-PM_{2.5}$ o partículas gruesas, es la fracción de partículas con diámetro aerodinámico que varía de 2.5 a $10\ \mu m$ [10], [11].

El PM_{10} es una magnitud que generalmente se utiliza para medir la carga de aerosol presente en la atmósfera (medida de la inmisión), mientras que $PM_{2.5}$ hará referencia a las conocidas como partículas que están asociadas con efectos peligrosos para la salud humana ya que su eficiencia para penetrar en el sistema respiratorio es mayor que la de las partículas gruesas [12] [13].

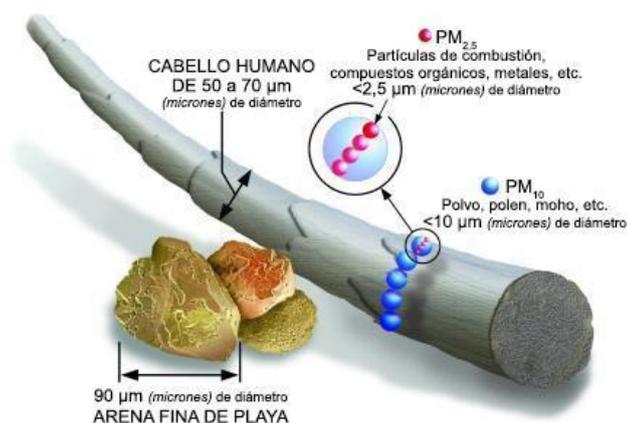


Figura 2: Comparación de tamaño de las partículas de PM [8]

Existen redes de observación de PM_X , una de las redes de referencia mundial para la monitorización de datos de aerosoles en superficie es EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), la cual es una red mundial compuesta por 852 estaciones de medida que fue creada tras la firma en 1979 de la convención de contaminación atmosférica, como medida central para la protección del medio ambiente [12].

Las concentraciones de PM_X en la atmósfera están influenciadas por varias fuentes naturales y antropogénicas, entre los procesos naturales, el transporte a larga distancia del polvo emitido desde los desiertos y otras áreas áridas puede afectar gravemente la calidad del aire [14]. Dada la probada influencia de este contaminante en la salud humana, el clima y los ecosistemas, [15] tanto las contribuciones derivadas de actividades humanas, como aquellas devenidas de fuentes naturales, se encuentran reguladas en la Normativa Europea, aunque claramente, éstas últimas pueden evaluarse, pero no controlarse.

La Normativa Europea 2008/50/CE regula los valores máximos de PM_{10} , ya que la exposición al material particulado se asocia de forma clara a una prevalencia incrementada de efectos adversos sobre la salud de las poblaciones humanas, principalmente por su incidencia en procesos cardiacos

y respiratorios. Las estadísticas de morbilidad y mortalidad pueden facilitarnos información sobre qué ocurre con las condiciones de salud si las personas se encuentran frecuentemente expuestas a material particulado.

1.3 Efectos en la salud

Existen mecanismos de defensa en el organismo que tienen la capacidad de bloquear partículas inhaladas con diámetros superiores a 10 micras, sin embargo, aquellas que presentan diámetros menores pueden ingresar y depositarse en el sistema respiratorio humano [16].

Muchos estudios científicos han demostrado los efectos adversos que los aerosoles causan en la salud. El PM ingresa al organismo a través del aparato respiratorio y la deposición de estas partículas en el organismo dependen de su tamaño, forma u densidad (Figura 3). Los efectos ocasionados dependen de la granulometría, morfología, composición química y tiempo de exposición. El PM₁₀ puede alcanzar la región traqueobronquial, mientras que el PM_{2.5} puede alcanzar la cavidad alveolar. Además, las partículas más pequeñas penetran profundamente pudiendo alcanzar el torrente sanguíneo, sirviendo como vehículo de transporte a los demás tejidos [17][16]. Las partículas más pequeñas permanecen en el aire por más tiempo, lo que aumenta la posibilidad de inhalación y el riesgo para la salud asociado.

Estudios epidemiológicos llevados a cabo a lo largo de los últimos 30 años han demostrado que los niveles elevados de PM son la causa de un aumento considerable de la mortalidad, hospitalización por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, agravamiento de los ataques de asma y funciones pulmonares adversas. La exposición a la contaminación por partículas tiende a afectar en su mayoría a personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, niños y adultos mayores [5].

En la extensa lista de efectos en la salud se mencionan:

- Mortalidad e ingreso hospitalario en pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) o enfermedades cardiovasculares (ECV)
- Exacerbación de síntomas y mayor uso de terapia en el asma
- Mortalidad e ingreso hospitalario en diabetes mellitus
- Mayor riesgo de infarto de miocardio
- Desarrollo de aterosclerosis
- Mayor incidencia de infección
- Mayor riesgo de cáncer de pulmón.
- Muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares
- Infartos de miocardio no mortales
- Latidos irregulares
- Asma agravada
- Función pulmonar reducida
- Síntomas respiratorios aumentados, como irritación en las vías respiratorias, tos o dificultad para respirar.
- Carcinogénesis

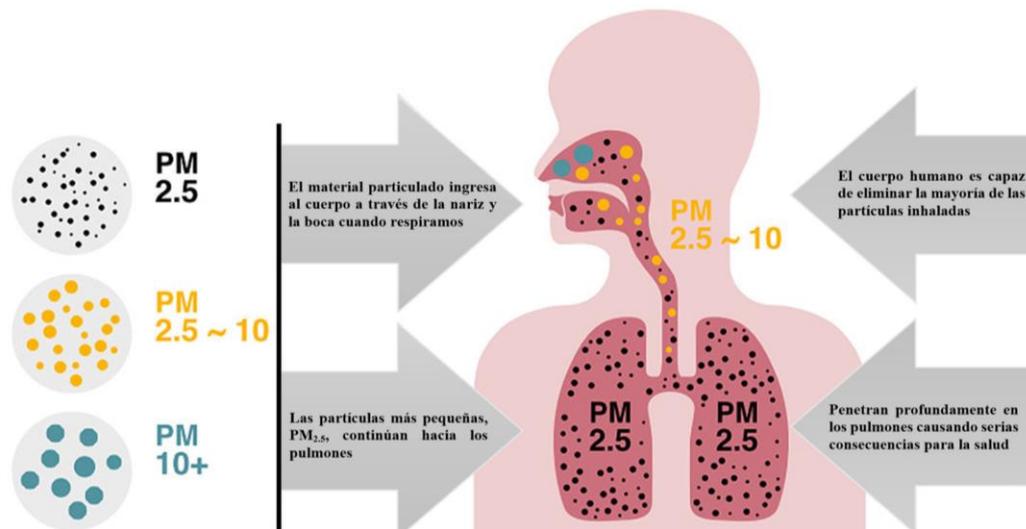


Figura 3: Material particulado y sus efectos en la salud [18]

1.4 Normativa Europea Vigente

La Directiva Europea 1999/30/CE, tiene por objeto mantener la calidad del aire del ambiente cuando esta sea buena y mejorarla en los casos contrarios utilizando técnicas normalizadas de monitoreo con resultados precisos y criterios comunes que permiten la ubicación de centros de medición importantes para una evaluación constante. Esto facilita a la población el acceso con rapidez a información actualizada sobre las concentraciones de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, partículas y plomo, con la finalidad de evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos para la salud humana y para el medio ambiente en su conjunto.

Por lo mencionado anteriormente, en la directiva se establecen los valores límite y umbral de alerta de los distintos tipos de contaminantes atmosféricos. En la Tabla 1 se encuentran los valores máximos indicados para la concentración de PM₁₀. En la Fase 1, se instituye un valor límite diario para la protección de la salud humana de $50 \mu\text{g m}^{-3}$, que no podrá superarse en más de 35 ocasiones por año. A la entrada en vigor de esta normativa se plantea un margen de tolerancia del 50%, con una reducción lineal para el 1 de enero de 2001 y a continuación cada 12 meses hasta alcanzar el 0% para el 1 de enero de 2005. El valor límite anual para la protección de la salud humana se fija en $40 \mu\text{g m}^{-3}$, con un margen de tolerancia del 20% a la entrada en vigor de la presente directiva. En la fase 2, se mantiene el valor límite diario, pero se establece que no podrá superarse en más de 7 ocasiones por año, con un margen de tolerancia que se derivará de los datos y será equivalente al valor límite de la fase 1, con fecha de cumplimiento 1 de enero de 2010. En esta fase el valor límite anual se disminuye a $20 \mu\text{g m}^{-3}$, con un margen de tolerancia del 50% el 1 de enero de 2005 y a continuación cada 12 meses en un porcentaje anual idéntico hasta alcanzar el 0% para el 1 de enero de 2010.

En 2008 se plantea una nueva directiva, derogando a la anterior, pero sin perjuicio de las obligaciones de los estados miembro en cuanto a la incorporación o aplicación de las directivas previas. Cabe mencionar que la directiva 1999/30/CE no discrimina los aerosoles de origen natural de aquellos que son transportados desde otras regiones, los cuales no deben considerarse en la medición de emisiones en la localización de estudio. Sin embargo, la directiva europea 2008/50/CE regula los niveles de PM₁₀ debidos a fuentes naturales, incluyendo el transporte de partículas naturales procedentes de zonas áridas (ver su artículo 2.15). De manera que, teniendo identificados

los tipos de aerosoles que existen sobre una región, se podrá calcular si los niveles existentes de cada tipo cumplen la legislación [19].

Tabla 1: Directiva Europea 1999/30/CE valores límite y período promedio

Período promedio	Valor límite
	PM ₁₀
Media anual	40 $\mu\text{g m}^{-3}$
	50 $\mu\text{g m}^{-3}$
Máximo diario	(no debe ser excedido más de 35 días al año)

1.5 Percentil 40%

En la investigación llevada a cabo por Escudero et al. (2007) [20] proponen y validan una metodología para evaluar la contribución que el polvo mineral causa en los valores diarios de PM₁₀ en la Península Ibérica. Para ello, analizan 13 estaciones de medidas características del fondo regional de la Península Ibérica. Se identifican las intrusiones de masas de aire Sahariana que conllevan el transporte del polvo mineral a la península para construir una serie de datos sin dichos eventos. Para calcular el fondo regional realizan entonces un estudio de percentil móvil a 30 días de esa serie sin eventos con los valores de PM₁₀ registrados durante influencia atlántica sobre la Península Ibérica (asociada con baja turbiedad). Se realiza el estudio para distintos percentiles: 5%, 10%, 30%, 40% y 50%. La aplicación de los percentiles 5% y 10% subestiman los niveles de fondo regional en comparación con los resultados de la especiación química después de considerar sólo los días con la advección atlántica (ver Figura 4). Por el contrario, el uso del percentil 50% produjo una sobreestimación de los niveles fondo regional (ver Figura 4). Así, después de este análisis empírico, los percentiles 30% y 40% resultaron ser los más adecuados. En un primer momento, se recomendó el uso del Percentil 30% para dicho cálculo, pero en estudios posteriores, como por ejemplo Viana et al (2010) se emplea y recomienda el Percentil 40%.

Por lo tanto, el Percentil 40% es un indicador específico que reproduce la concentración de fondo existente en la Península Ibérica durante los días con condiciones atmosféricas advectivas atlánticas. Con este procedimiento, el fondo regional puede caracterizarse como el Percentil 40% de la serie de datos sin incluir los eventos desérticos.

Una vez obtenido el valor del fondo regional, dicho valor puede substraerse al valor diario de PM₁₀ registrado durante un día que presente intrusión de polvo mineral en cada estación de medida, obteniéndose entonces la contribución neta del aerosol desértico diaria en los niveles de PM₁₀ [20].

Esta metodología fue adoptada por la Comisión Europea para el cálculo del fondo regional y la evaluación de la contribución del aerosol desértico en los niveles de PM₁₀ [30].

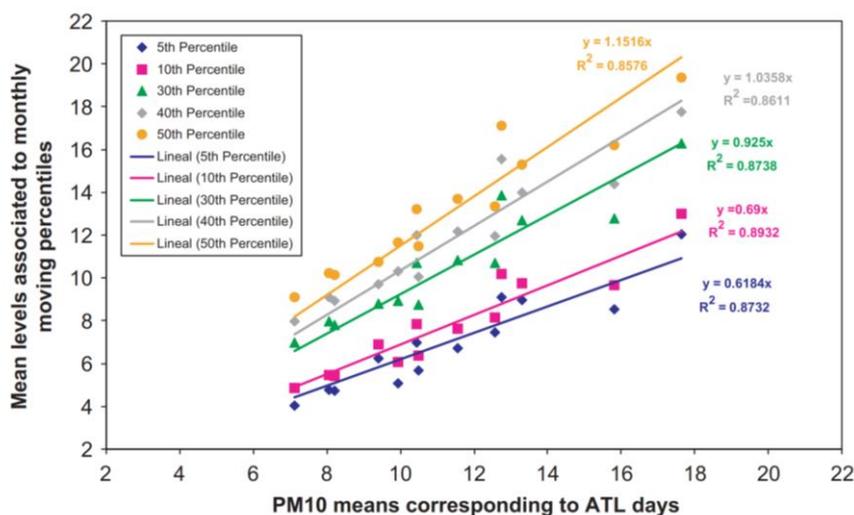


Figura 4: Correlación entre los promedios de PM_{10} calculados solo para los días con advección atlántica (ATL) y las medias de las series de tiempo obtenidas aplicando distintos percentiles (5%, 10%, 30%, 40% y 50%) a los datos de PM_{10} de las 13 estaciones de fondo regional de la Península Ibérica para el periodo 2001-2003 [21]

1.6 Emisiones desérticas de polvo del Sahara

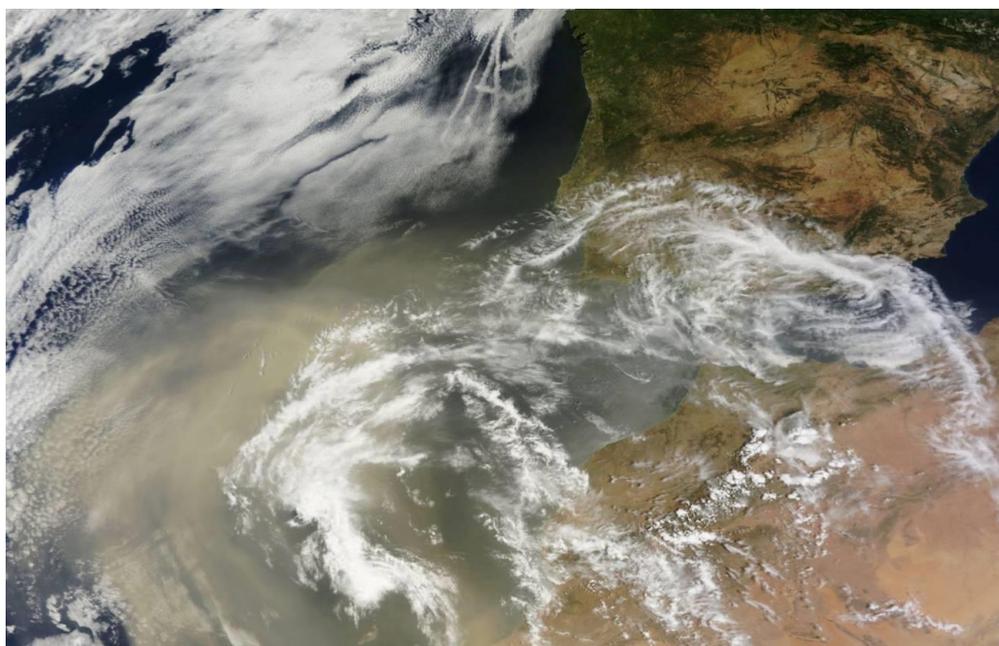


Figura 5: Intrusión de polvo desértico procedente del Sahara (Fuente: NASA)

El Sahara es la mayor fuente de polvo desértico del mundo [22] y una de las principales de material particulado (Figura 5). El aerosol desértico tiene la capacidad de afectar la calidad del aire a miles de kilómetros de la fuente, generando efectos sobre la radiación solar [23]. Por su gran cercanía con la Península Ibérica, incide de manera directa en los niveles de PM_{10} que son estudiados en el presente trabajo, generando una contribución en ciertos días que sobrepasa los niveles permitidos por la normativa europea.

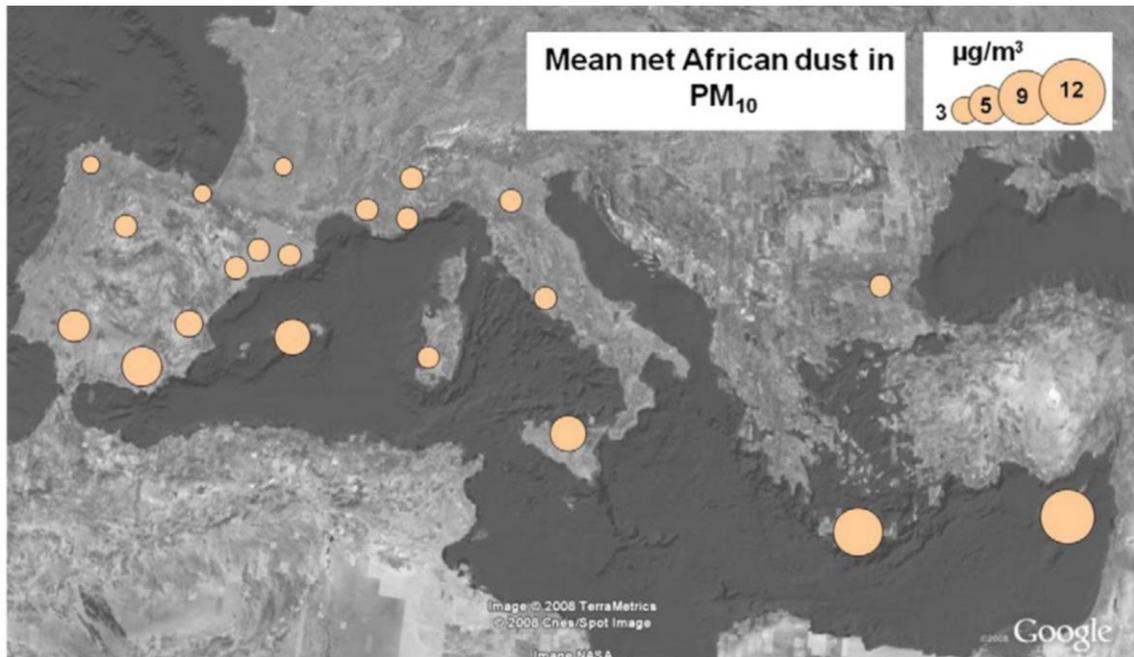


Figura 6: Contribución másica (en $\mu\text{g m}^{-3}$) de polvo africano para PM_{10} correspondiente a 21 sitios de fondo regional (EMEP) en el sur de Europa [15]

Existe una clara estacionalidad en el transporte de polvo sahariano hacia Europa, siendo más frecuente de febrero a junio y a finales de otoño, principios de invierno [24], aunque estos eventos desérticos pueden distribuirse a lo largo de todo año. Son los países Mediterráneos los que se ven afectados mayormente por este tipo de episodios [25] debido a las bajas precipitaciones en la cuenca mediterránea que favorece el largo tiempo de permanencia de PM_x en la atmósfera con el consecuente impacto en la calidad del aire. Además, más del 70% de las excedencias del valor límite diario de PM_{10} , regulado por la directiva europea 2008/50/CE, en la mayoría de las estaciones de fondo de EMEP se han atribuido a intrusiones de polvo desértico. La Figura 6 muestra el número de superaciones del valor límite de PM_{10} de la UE en 21 sitios regionales de fondo en Europa calculado a partir de campañas de muestreo a largo plazo [15].

Los niveles de PM_{10} de fondo regional en todo el Mediterráneo muestran claras tendencias crecientes de Norte a Sur y de Oeste a Este de la cuenca. Estas tendencias revelaron una mayor probabilidad de aparición de niveles elevados de material particulado en la Cuenca del Mediterráneo Oriental que en la Cuenca del Mediterráneo Occidental debido a la mayor ocurrencia e intensidad de las intrusiones de polvo africanas. La composición química del polvo está dominada principalmente por SiO_2 (60%), Al_2O_3 (14%), Fe_2O_3 (7%), CaO (4%), MgO (2,6%) y K_2O (2,4%) [26] mineralógicamente, esta composición se relaciona con la dominancia de cuarzo, magnetita / hematita y carbonatos [27].

Objetivos

Una vez descritas las bases teóricas sobre las que se fundamenta este trabajo, el objetivo principal es analizar el impacto que las intrusiones de polvo desértico de origen Sahariano causan en el nivel de contaminación de la ciudad de Valladolid, durante el período 2003-2014. Este objetivo general conlleva a una serie de objetivos específicos que también serán abordados en este trabajo:

- Evaluar los niveles de fondo urbano que presenta la ciudad de Valladolid, determinando las excedencias que se producen por causas naturales transportadas a la región.
- Determinar la contribución de las intrusiones desérticas en los niveles de PM_{10} y estudiar su evolución anual.
- Comparar los resultados de este trabajo con los obtenidos en una estación de fondo regional en ausencia de grandes núcleos industriales.

Capítulo 2

Instrumentación, metodología y datos

2.1 Red de Control de la Contaminación Atmosférica del Ayuntamiento de Valladolid

La RCCAVA [10] es la Red de Control de Contaminación Atmosférica del Ayuntamiento de Valladolid, la cual integra un conjunto de cinco estaciones (Figura 7) con distintos instrumentos totalmente automáticos que realizan medidas de los contaminantes más relevantes presentes en la atmósfera de Valladolid de forma continuada. Estos instrumentos de medida se encuentran unidos a un sistema de adquisición de datos (SAD) que, de forma instantánea captura la información y la incorpora a su base de datos propia, obteniendo cada 15 minutos un valor medio de todas las medidas captadas, que será transmitido como histórico al centro de proceso de datos, la cual recibe la información generada en todas las estaciones, permitiendo un monitoreo constante de la contaminación, esta red cumple las condiciones de implantación que describen tanto las Directivas Europeas de gestión como el RD 102/2011, de 28 de enero, relativo a la calidad del aire, que trasponen todas estas normas al Derecho positivo Español.

Estas estaciones se encuentran distribuidas a lo largo de Valladolid, como se muestra en la Figura 7 y su localización exacta dentro del entramado urbano de cada una de ellas se presenta Tabla 2.

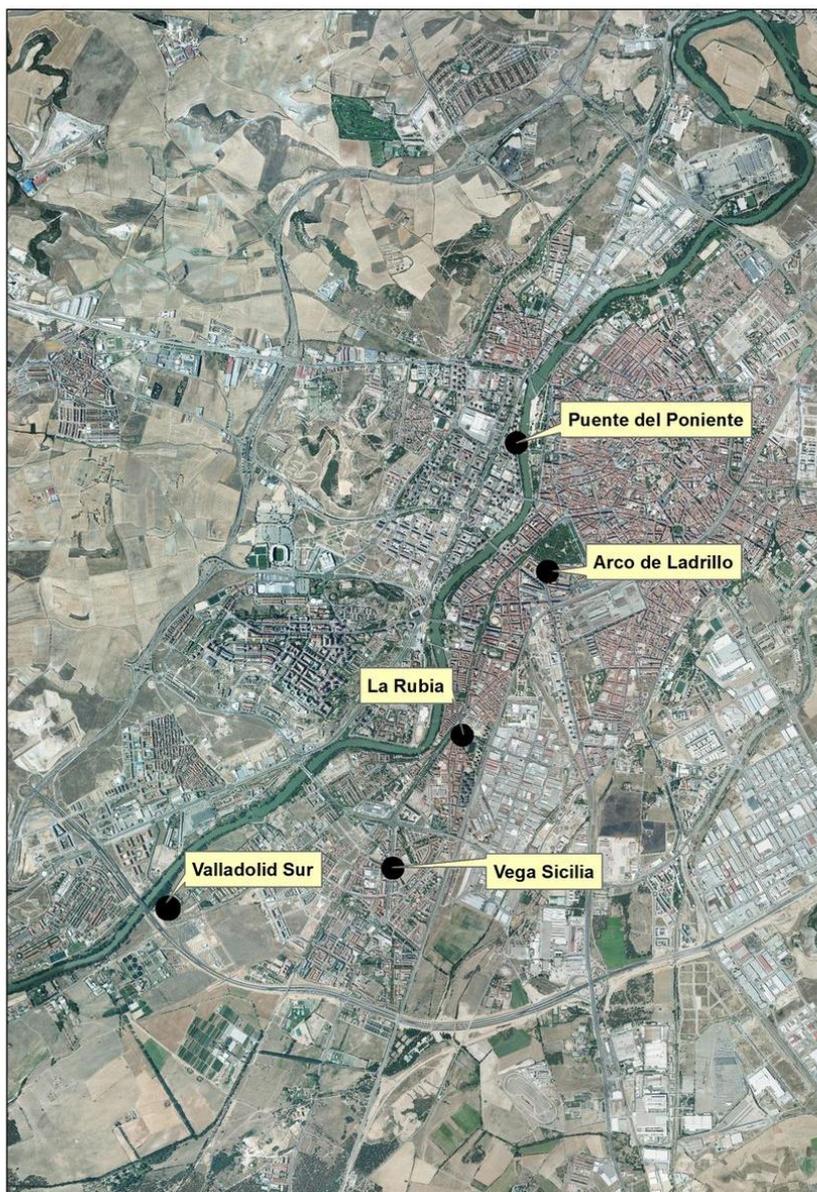


Figura 7: Estaciones RCCAVA

Tabla 2: Localización de las estaciones de la RCCAVA a lo largo de la ciudad de Valladolid

Estación	Calle
Arco Ladrillo II - Victoria Cachorro	Arco Ladrillo, 3
Rubia II	Daniel del Olmo s/n
Vega Sicilia	Paseo de Zorrilla, 191
Puente del Poniente - M ^a Luisa Sánchez	Juana de Castilla, 6
Valladolid Sur	Olimpiadas, 40

Dentro de este conjunto de estaciones se integran los diferentes instrumentos que monitorizan los contaminantes atmosféricos más relevantes en la atmósfera de Valladolid. En la Tabla 3 se muestra el conjunto instrumental para cada una de las estaciones en aplicación del RD 102/2011.

Tabla 3: Instrumentos de monitoreo.

Estación	Instrumento					
	SO ₂	PM ₁₀ /PM _{2.5}	NO/NO ₂	CO	O ₃	BTX
Arco Ladrillo II- Victoria Cachorro		x	x	x		x
Rubia II	x	x	x			
Vega Sicilia		x	x		x	
Puente del Poniente-M ^a Luisa Sánchez		x	x		x	
Valladolid Sur			x		x	

La comunicación entre las estaciones y el centro de proceso de datos se verifica a través de una red propietaria de fibra óptica que garantiza la máxima disponibilidad de datos e inmunidad frente a posibles ataques externos, un conocimiento en tiempo real de la evolución de un episodio y una inmunidad a fallos muy superior que la dependencia de una red pública de telecomunicaciones; también un coste de operación casi nulo comparado con otras opciones comerciales dedicadas punto a punto.

Los datos a utilizar en la presente investigación fueron obtenidos de la estación Arco Ladrillo II-Victoria Cachorro. La estructura de los datos se muestra en la Figura 8, en cual se encuentran presentes los valores correspondientes a PM₁₀ y PM_{2.5}, junto con el día, mes y año desde el 2003 al 2014.

```

pmX_ARCO_LADRILLO_DAY: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Dia Mes Anno Jday pm10 sd n pm25 sd n Year_frac
1 1 2003 1 14.83 39.15 24 -99 -99 -9 2003.00273972603
2 1 2003 2 11.58 9.31 24 -99 -99 -9 2003.00547945205
3 1 2003 3 16.83 11.68 24 -99 -99 -9 2003.00821917808
4 1 2003 4 16.12 12.28 24 -99 -99 -9 2003.01095890411
5 1 2003 5 15.96 10.7 24 -99 -99 -9 2003.01369863014
6 1 2003 6 13.5 10.95 24 -99 -99 -9 2003.01643835616
7 1 2003 7 19.67 11.1 24 -99 -99 -9 2003.01917808219
8 1 2003 8 14.12 9.5 24 -99 -99 -9 2003.02191780822
9 1 2003 9 18.29 13.2 24 -99 -99 -9 2003.02465753425
10 1 2003 10 33.83 15.91 24 -99 -99 -9 2003.02739726027
11 1 2003 11 21.79 12.94 24 -99 -99 -9 2003.0301369863
12 1 2003 12 30.08 15.27 24 -99 -99 -9 2003.03287671233
13 1 2003 13 33.62 15.04 24 -99 -99 -9 2003.03561643836
14 1 2003 14 70.38 70.68 24 -99 -99 -9 2003.03835616438
15 1 2003 15 111.79 31.84 24 -99 -99 -9 2003.04109589041
16 1 2003 16 78.17 50.14 24 -99 -99 -9 2003.04383561644
17 1 2003 17 67.96 19.33 24 -99 -99 -9 2003.04657534247
18 1 2003 18 27.62 16.85 24 -99 -99 -9 2003.04931506849
19 1 2003 19 15.38 8.77 24 -99 -99 -9 2003.05205479452
20 1 2003 20 18.38 9.02 24 -99 -99 -9 2003.05479452055
21 1 2003 21 17.38 9.15 24 -99 -99 -9 2003.05753424658
22 1 2003 22 22.75 13.22 24 -99 -99 -9 2003.0602739726

```

Figura 8: Estructura de la base de datos correspondiente a la estación Arco Ladrillo-Victoria Cachorro [28].

2.2 Inventario de Intrusiones Desérticas

Este trabajo va a utilizar el inventario de intrusiones desérticas publicado por Cachorro et al. (2016) en el que se propone y aplica una metodología para obtener una identificación fiable de las intrusiones del polvo del desierto (DD, desert dust) en la zona Centro-Norte de la Península Ibérica.

Para la realización del inventario se utilizan dos bases de datos pertenecientes a la Comunidad Autónoma de Castilla y León, situadas en: Peñausende (41.24 N, 5.910 O, 750 m s.n.m.) y Palencia (41.99 N, 4.52 O, 750 m s.n.m.). La particularidad tanto de Peñausende como de Palencia es que se encuentran alejadas de grandes núcleos urbanos e industriales, con características idóneas para ser consideradas como estaciones de fondo regional y sirven de base para estudiar los episodios desérticos [29].

La estación de Peñausende se utiliza como referencia con datos de aerosol en superficie, mientras que la estación de Palencia es la referencia usada para datos de aerosol atmosférico en toda la columna, ya que dispone de un fotómetro solar.

Los datos tomados en consideración en la fotometría solar son el Espesor Óptico de Aerosoles (AOD, Aerosol Optical Depth, en inglés), utilizado para medir la carga en columna del aerosol, el cual se determina a partir de la ley de Beer-Bouguer-Lambert con las medidas de irradiancia a nivel del suelo, irradiancia extraterrestre y la masa óptica. El AOD se obtiene a diferentes longitudes de onda y describe la extinción que sufre la radiación solar al atravesar la columna atmosférica debido a la presencia de aerosoles. Esta metodología se basa en la interacción radiación-partícula. De la dependencia espectral del AOD se puede derivar información sobre el tamaño de las partículas presentes en la atmósfera. Así, el exponente de Ångström (AE) puede ser utilizado para la distinción de partículas según su tamaño. Su rango varía entre 0 (partículas más gruesas) y 4 (partículas más finas).

Las medidas de AOD y AE en la estación de Palencia son proporcionadas por la red AERONET (Aerosol RObotic NETwork) [30]. Se van a utilizar los datos de máxima calidad asegurada de los que dispone la red, el nivel 2.0.

Las diversas fracciones de Materia Particulada (PM_x , $x=10$ o $2.5 \mu m$) obtenidas de la red EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), en la estación de Peñausende, constituyen la segunda base de datos utilizada para llevar a cabo el inventario de intrusiones desérticas.

Combinando los valores instantáneos de AOD_{440nm} y AE, así como datos diarios de PM_{10} y de $PM_{2.5} / PM_{10}$ para la detección de intrusiones de polvo desértico (DD), se realizó una inspección manual de la evolución de estas cuatro cantidades junto con el origen de las masas de aire en los tres niveles de altitud a 500, 1500 y 3000 m s.n.m. y el material auxiliar de mapas MODIS AOD, modelos de aerosoles y escenarios sinópticos.

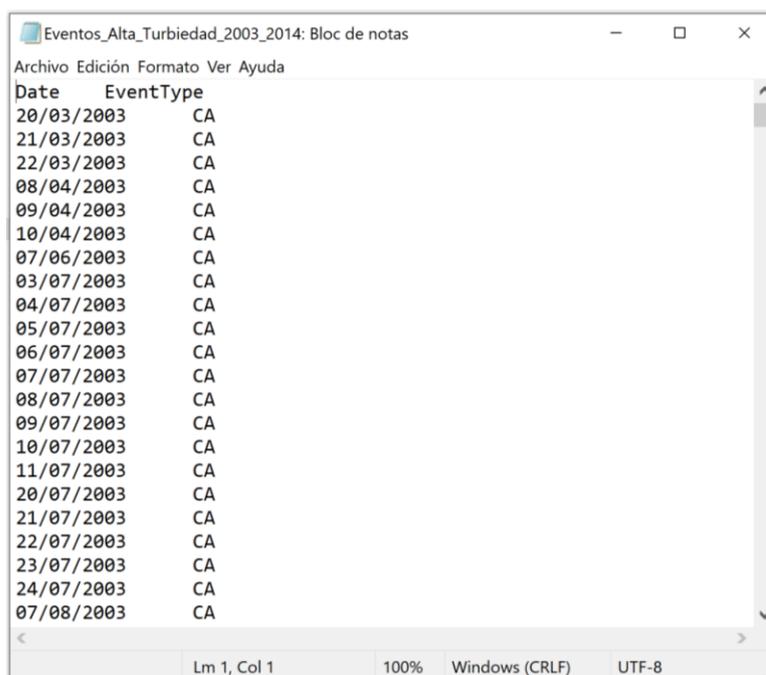
La metodología desarrollada cuenta con la ventaja de que permite la clasificación de los días con intrusión de aerosol desértico en dos grupos, el “D” que corresponde a aquellos con un fuerte carácter desértico y el “DC”, en los que el aerosol desértico presenta mezcla, en mayor o menor medida, con otros tipos de aerosoles.

En el artículo de Mateos et al. (2020) [31] se amplía esta metodología para catalogar otros tipos de eventos, denominados como “CA” y “CHT”, en los que se incluyen principalmente aerosoles finos resultantes de la combustión de combustibles fósiles de la industria o la contaminación urbana, aerosoles de quema de biomasa/incendios forestales y otros procesos atmosféricos, principalmente

de origen antropogénico. El tipo “CA” hace referencia al carácter más dominante de los aerosoles del modo fino, mientras que “CHT” es la categoría que indica un carácter de mezcla del aerosol fino con otros tipos.

La estructura del inventario que incluye todos los episodios naturales en los que se ha producido transporte de aerosoles desde sus fuentes a la región de Castilla y León se presenta en la Figura 9.

Esta organización de los días por eventos es la que permitirá determinar el impacto de las intrusiones de polvo mineral Sahariano en la calidad del aire de Valladolid, puesto que al examinar los datos se extraerá información que permita definir tanto el nivel de fondo que existe en la ciudad, como la contribución de los episodios desérticos y de esta manera cuantificar las excedencias presentes a lo largo del período analizado, el interés del presente estudio se centra en los días denominados como D y DC.



Date	EventType
20/03/2003	CA
21/03/2003	CA
22/03/2003	CA
08/04/2003	CA
09/04/2003	CA
10/04/2003	CA
07/06/2003	CA
03/07/2003	CA
04/07/2003	CA
05/07/2003	CA
06/07/2003	CA
07/07/2003	CA
08/07/2003	CA
09/07/2003	CA
10/07/2003	CA
11/07/2003	CA
20/07/2003	CA
21/07/2003	CA
22/07/2003	CA
23/07/2003	CA
24/07/2003	CA
07/08/2003	CA

Figura 9: Estructura del inventario de Eventos de Alta Turbiedad [30]

2.3 Aplicación del inventario de Eventos de Alta Turbiedad a los datos de la estación Arco Ladrillo II-Victoria Cachorro de PM_x

Se procede ahora a combinar la base de datos de PM_x en la ciudad de Valladolid (Figura 8) con el inventario de eventos de alta turbiedad (Figura 9). El resultado se muestra en la Figura 10, donde a cada día en la estación de Valladolid se le añade un ‘flag’ para indicar si se corresponde con un evento o no de alta turbiedad en la estación de fondo regional. Se distingue entre los cuatro tipos de eventos descritos en la sección anterior: D, DC, CA y CHT.

Por tanto, si se quiere estudiar la influencia de los días que presentan influencia de aerosol desértico se deben de seleccionar los días que tengan como ‘flag’ las categorías ‘D’ o ‘DC’.

EVENT	Dia	Mes	Anno	pm10	sd	pm25	sd
	1	1	2003	14.83	39.15	-99	-99
	2	1	2003	11.58	9.31	-99	-99
	3	1	2003	16.83	11.68	-99	-99
	4	1	2003	16.12	12.28	-99	-99
	5	1	2003	15.96	10.7	-99	-99
	6	1	2003	13.5	10.95	-99	-99
	7	1	2003	19.67	11.1	-99	-99
	8	1	2003	14.12	9.5	-99	-99
	9	1	2003	18.29	13.2	-99	-99
	10	1	2003	33.83	15.91	-99	-99
	11	1	2003	21.79	12.94	-99	-99
	12	1	2003	30.8	15.27	-99	-99
	13	1	2003	33.62	15.4	-99	-99
	14	1	2003	70.38	70.68	-99	-99
CHT	15	1	2003	111.79	31.84	-99	-99
CHT	16	1	2003	78.17	50.14	-99	-99
CHT	17	1	2003	67.96	19.33	-99	-99
	18	1	2003	27.62	16.85	-99	-99
	19	1	2003	15.38	8.77	-99	-99
	20	1	2003	18.38	11.69	-99	-99
	21	1	2003	17.38	12.29	-99	-99
	22	1	2003	22.75	10.183	-99	-99

Figura 10: Base de datos final con datos de PM_X en la ciudad de Valladolid y la identificación de eventos en una estación de fondo regional.

Para mostrar la fiabilidad y representatividad de la base de datos final usada en este trabajo, en la Tabla 4 se muestra una descripción del número de días con medida para PM_{2.5} y PM₁₀ durante el período 2003-2014. De manera global, para la serie de PM_{2.5} solo se dispone de un 61.3% de los datos, en 2003, 2004, 2006 y 2007 no existen medidas y en 2008 solo hay un 59.3% de las mismas. En contraste, PM₁₀ presenta una cobertura total con el 98.5% de las medidas, prácticamente no existen faltantes en la base los datos. El año que presenta un muestreo más bajo es 2004, con un 96.7% de las medidas implicando entonces, solo 11 días faltantes.

Tabla 4: Suma anual de los días con datos y sin datos de las series de PM₁₀ y PM_{2.5} en el inventario final

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Total
	Todos los días												
Muestra PM _{2.5}	0	0	299	0	0	217	356	365	362	359	365	364	2687
%	0	0	81.9	0	0	59.3	97.5	100	99.2	98.1	100	99.7	61.3
Muestra PM ₁₀	360	354	363	354	364	361	360	365	351	359	362	365	4318
%	98.6	96.7	99.5	97.0	99.7	98.6	98.6	100	96.2	98.1	99.2	100	98.5

En la Tabla 5 se encuentra la suma anual de los días sin eventos de la serie de datos de PM₁₀, siendo el año 2003 el que presenta menor cantidad con un 71.1%, mientras que el año 2013 con un 89% posee un total de 322 días sin eventos, de la serie de datos para PM₁₀ se determina que un 80.5% de los días no presentan ningún tipo de evento, es decir de los 4318 días, un total de 840 días presentan eventos. En esta tabla ya se puede ver una tendencia a la reducción del número de eventos a medida que avanza el periodo de tiempo estudiado.

Tabla 5: Suma anual de los días sin evento de la serie de datos de PM₁₀

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Total
	Días sin evento												
Muestra PM ₁₀	256	271	278	244	276	311	295	327	282	309	322	307	3478
%	71.1	76.6	76.6	68.9	75.8	86.1	81.9	89.6	80.3	86.1	89.0	84.1	80.5

En la Tabla 6 se presentan los valores correspondientes a los días con algún tipo de evento, de los cuales un 28.4% son catalogados como desérticos puros D, un 20.4% como desérticos mezcla DC y un 51.2% muestran otro tipo de eventos (CA, CHT). En lo que respecta al aerosol de origen desértico: existen 418 días con intrusiones desérticas, es decir, del inventario completo, un ~ 10%.

Tabla 6: Suma anual de los días con eventos, clasificados en D (Desérticos puros), DC (Desérticos mezcla) y otros eventos

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Total
	Días con evento												
Total	104	86	85	115	89	50	66	38	75	51	40	58	857
D (Desértico puro)	27	23	25	42	20	12	18	11	17	17	7	24	243
%	26,0	26.7	29.4	36.5	22.5	24,0	27.3	28.9	22.7	33.3	17.5	41.4	28.4
DC (Desértico mezcla)	17	21	16	26	24	19	6	8	15	12	7	4	175
%	16.3	24.4	18.8	22.6	27,0	38,0	9.1	21.1	20,0	23.5	17.5	6.9	20.4
Otros eventos	60	42	44	47	45	19	42	19	43	22	26	30	439
%	57.7	48.8	51.8	40.9	50.6	38,0	63.6	50,0	57.3	43.1	65.0	51.7	51.2

Capítulo 3

Resultados y discusión

3.1 Estudio de la evolución anual de PM_{10}

En la Figura 11, se muestra el ciclo anual de la media mensual de la serie de datos del total de la serie de PM_{10} con junto con su respectiva desviación estándar. Los valores numéricos de esta evolución se presentan en la Tabla 8. Como puede comprobarse, hay dos épocas bien diferenciadas a lo largo del año, los valores de PM_{10} desde septiembre hasta marzo presentan un comportamiento estable (en torno a $30 \mu\text{g m}^{-3}$) y destacan sobre los valores obtenidos desde abril hasta agosto (en torno a unos $25 \mu\text{g m}^{-3}$). El valor mensual más alto ocurre en febrero ($32 \mu\text{g m}^{-3}$) mientras que el más bajo se registra en abril ($24 \mu\text{g m}^{-3}$). La desviación estándar también es notablemente más baja en los meses desde abril hasta agosto, lo que indica una menor dispersión de los valores en estos meses. Queda patente como los meses de temporada invernal (con mayor necesidad de calefacción, transporte, ...) presentan un valor mayor de PM_{10} en superficie que los meses estivales. El mínimo de abril también puede explicarse por la mayor ocurrencia de precipitación que normalmente suele darse en primavera.

En la Figura 12 se muestra además el ciclo anual para la serie de datos de PM_{10} sin tener en cuenta los eventos de turbiedad identificados en el Inventario descrito en el Capítulo 2. Los resultados numéricos se pueden encontrar también en la Tabla 8. La evolución mensual de la serie sin eventos es totalmente análoga a la descrita anteriormente, registrándose un descenso en torno a 4 y $8 \mu\text{g m}^{-3}$ en los valores medios de PM_{10} al no considerarse los eventos de transporte en la serie de datos.

En la Figura 12 se puede notar claramente un decrecimiento significativo a lo largo de los años, siendo 2014 el año con el nivel más elevado y a partir de 2005 se puede ver una significativa reducción en los valores existentes. El análisis de la evolución temporal de la carga de aerosol durante las últimas décadas resulta vital para poder comprender fenómenos como el decrecimiento o aumento en los niveles de contaminación atmosférica y la calidad de aire en la ciudad de Valladolid.

Tabla 7: Medias mensuales para la serie completa y sin eventos de PM₁₀

Mes	Serie completa	Sin eventos
	PM ₁₀ (μg m ⁻³)	
	Media ± STD	Media ± STD
Enero	29.77 ± 23.09	27.22 ± 20.52
Febrero	31.73 ± 24.33	27.84 ± 20.79
Marzo	30.79 ± 22.74	26.35 ± 16.7
Abril	23.52 ± 14.41	21.03 ± 12.82
Mayo	24.07 ± 14.45	19.89 ± 11.76
Junio	25.33 ± 14.75	20.51 ± 11.79
Julio	27.25 ± 18.41	21.67 ± 10.27
Agosto	25.25 ± 13.38	21.57 ± 10.73
Septiembre	29.67 ± 17.07	26.17 ± 16.48
Octubre	28.86 ± 17.53	25.41 ± 14.23
Noviembre	27.91 ± 23.69	25.36 ± 20.37
Diciembre	28.25 ± 20.75	27.97 ± 20.6
Total	27.7 ± 18.72	24.25 ± 15.59

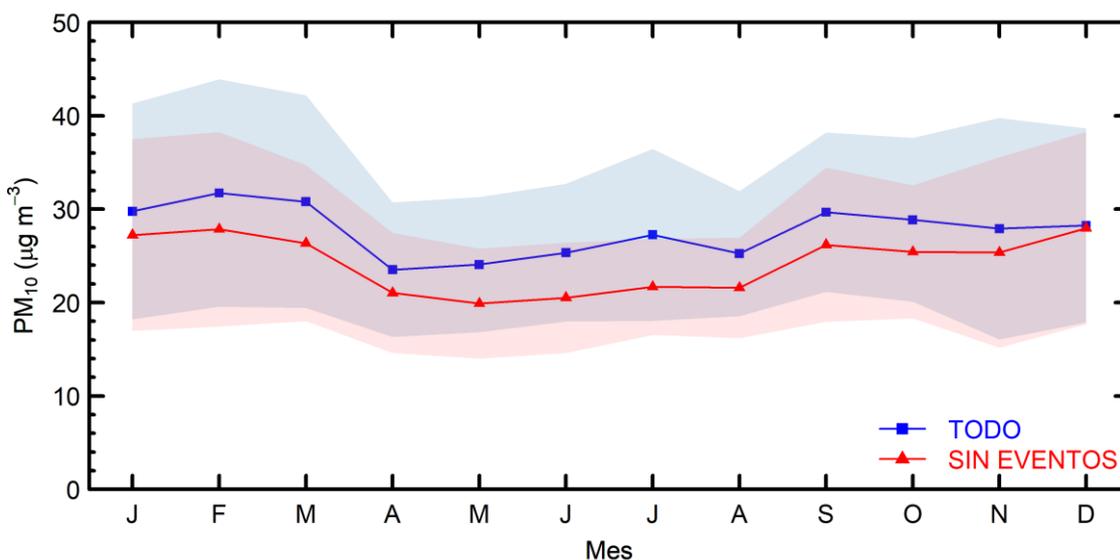


Figura 11: Evolución de la media mensual de la serie completa y sin eventos de PM₁₀.

La Figura 12 presenta su respectiva variabilidad interanual; los valores estadísticos asociados se notifican en la Tabla 7 y Tabla 8, determinando que en Valladolid el valor medio y la desviación estándar de PM₁₀ es de $27.74 \pm 13.2 \mu\text{g m}^{-3}$ para la serie completa y de $25.27 \pm 11.04 \mu\text{g m}^{-3}$ para la serie sin eventos. Es fácil notar como los valores correspondientes a PM₁₀ han ido disminuyendo

a lo largo de los años; esta clara reducción se relaciona con la forma que presentan las curvas correspondientes a la contribución de los desérticos, las cuales se presentan más adelante con su respectivo análisis.

Tabla 8: Medias anuales para la serie completa y sin eventos de PM₁₀

Año	Serie completa	Sin eventos
	PM ₁₀ (µg m ⁻³)	
	Media ± STD	Media ± STD
2003	37.85 ± 18.01	34.04 ± 15.43
2004	51.68 ± 25.56	48.04 ± 21.67
2005	48.6 ± 19.07	45.69 ± 16.27
2006	41.32 ± 19.17	35.79 ± 16.2
2007	27.63 ± 9.86	25.68 ± 8.2
2008	21.92 ± 9.13	20.35 ± 7.42
2009	20.18 ± 10.78	18.54 ± 9.53
2010	18.77 ± 9.55	17.64 ± 8.55
2011	19.7 ± 10.23	17.66 ± 8.76
2012	17.9 ± 10.26	15.84 ± 7.5
2013	13.43 ± 7.82	12.4 ± 6.94
2014	13.95 ± 8.77	11.58 ± 6.02
Total	27.74 ± 13.2	25.27 ± 11.04

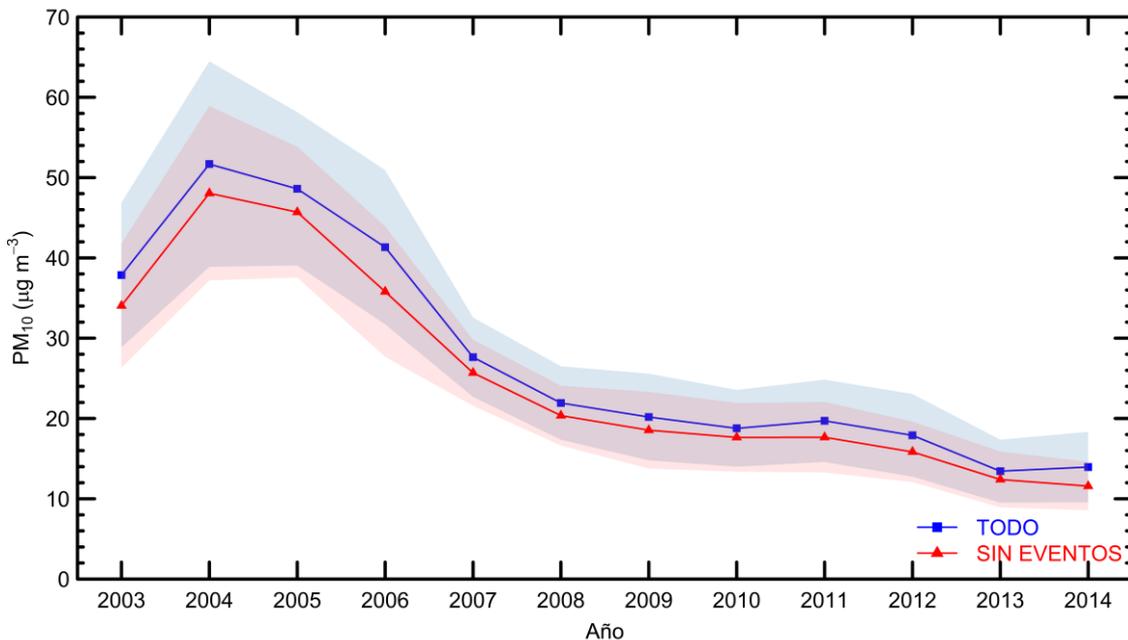


Figura 12: Evolución de la media anual de la serie completa y sin eventos de PM₁₀

En la Figura 12 y en la Tabla 8 se presenta la evolución anual para la serie completa y sin eventos de PM₁₀, siendo 2004 el año con la concentración más alta, mientras 2013 y 2014 muestran las concentraciones más bajas. Es notorio que de 2003 al 2006 existen altos valores para las series de PM₁₀ y de 2007 en adelante se observa un claro declive, esta evolución decreciente está

directamente relacionada con la implementación de la Normativa Europea y se corrobora con la tendencia obtenida de $-2.95 \mu\text{g m}^{-3}$ por año.

En general, ambas curvas muestran la misma evolución anual, no existe una diferencia significativa, pero si se evidencia claramente la contribución de los DD en los valores de PM_{10} .

3.2 Evolución anual del número excedencias

En España, las excedencias se encuentran reguladas por la normativa europea, en la que se determinan los valores máximos que pueden alcanzar los distintos tipos de contaminantes, para los valores de PM_{10} se establece un valor máximo diario de $50 \mu\text{g/m}^3$, que no debe ser excedido más de 35 días al año. En el análisis llevado a cabo, es notorio que desde el 2003 al 2006 estos valores fueron ampliamente superados, puesto que en año 2003 existieron un total de 40 excedencias, en 2004, 87 excedencias, en 2005, 89 excedencias, en 2006, 43 excedencias, luego de este año existe una caída abrupta, puesto que a partir del 2007 el número de excedencias ya nunca superan un conteo de 10, siendo algunos años de cero. Estos resultados van de la mano con el valor de la tendencia calculada para la serie de datos de PM_{10} , en la que se obtuvo un valor negativo de $-2.95 \mu\text{g m}^{-3}$ por año.

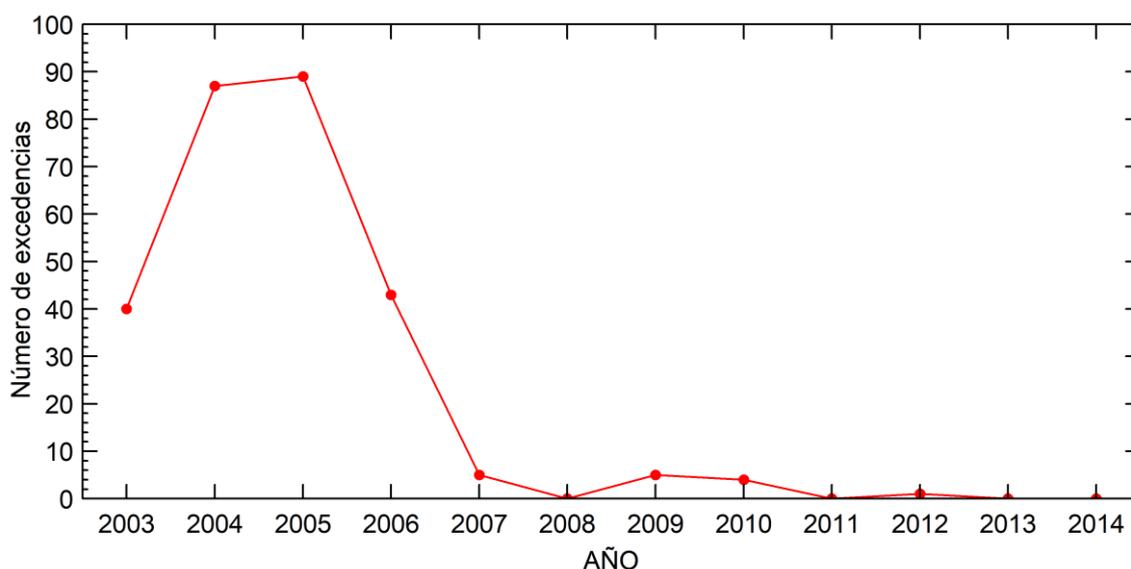


Figura 13: Excedencias año a año, correspondientes al período 2003-2014

Cabe mencionar que las excedencias presentadas en la Figura 13 fueron establecidas luego de haber examinado los días que presentan influencia de algún tipo de evento contaminante (D, DC, CA, CHT), estos días se excluyeron, ya que la Normativa Europea, a pesar de no discriminar los aerosoles de origen natural de aquellos que son transportados desde otras regiones, menciona que no deben considerarse en la medición de emisiones en la localización de estudio.

Utilizando la metodología descrita sobre el Percentil 40%, al restar el valor de fondo de la serie de datos de PM_{10} , se determinaron las excedencias existentes en los inventarios, ya que la estimación obtenida para cada día permite precisar los días con eventos que puedan ser atribuidos a las contribuciones desérticas o que deban ser contabilizados como excedencia de origen antropogénico, teniendo así una perspectiva más amplia sobre las fuentes de contaminación presentes en Valladolid.

La suma anual de las excedencias se presenta en la Tabla 9, siendo 472 en total, de estas un 29.2% provienen de los días que presentan intrusiones desérticas y un 58.1% de las excedencias se muestran en los días sin evento. En este caso al examinar los días sin evento, según la directiva europea (2008/50/CE) que regula los niveles de PM₁₀, del 2003 al 2006 y en los años 2009 y 2010 se estaría incumpliendo la normativa, puesto que el parámetro plantea que no se debe exceder más de 35 días al año un valor máximo diario de 50 µg/m³.

Tabla 9: Suma anual de las Excedencias

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Total
	Excedencias												
Total	67	134	137	94	13	4	7	7	3	5	0	1	472
Días sin evento	40	87	89	43	5	0	5	4	0	1	0	0	274
%	59.7	64.9	65.0	45.7	38.5	0	71.4	57.1	0	20	0	0	58.1
Desérticos	19	31	36	34	3	4	1	3	2	4	0	1	138
%	28.4	23.1	26.3	36.2	23.1	100	14.3	42.9	66.7	80	0	100	29.2
Otros	8	16	12	17	5	0	1	0	1	0	0	0	60
%	11.9	11.9	8.8	18.1	38.5	0	14.3	0	33.3	0	0	0	12.7

3.3 Determinación del fondo urbano de la ciudad de Valladolid

Con la base de datos final, en el que cada uno de los días se encuentra catalogado con un determinado evento (D, DC, CA, CHT) y su correspondiente valor de PM₁₀, se tomaron en consideración los días en los que no existe contribución desértica ni contaminación de origen antropogénico, es decir los datos de PM₁₀ sin eventos, puesto que, al excluir estos valores, la serie es capaz de reproducir los valores de fondo regional para la ciudad de Valladolid.

Para la cuantificación de esta fracción se determina el Percentil 40% mensual para la serie de datos, y los resultados se detallan en la Tabla 10. No hay un ciclo estacional marcado, siendo el valor mínimo en marzo con 14 µg m⁻³ y el máximo en septiembre con 20 µg m⁻³. Haciendo la media de estos valores se obtiene un valor de 17.17 ± 1.65 µg m⁻³, representando la desviación estándar menos del 10% del valor promedio. Por tanto, se determina que el valor del fondo urbano de PM₁₀ en la ciudad de Valladolid es de 17 µg m⁻³, asumiendo este valor como constante para todos los meses del año.

Tabla 10: Percentil 40% para la serie de datos de PM₁₀ sin eventos (µg m⁻³)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Media
17.04	18.29	18.7	15.69	14.33	15.21	17.58	16.96	19.67	19.25	15.95	17.41	17.17±1.65

3.4 Cálculo de la contribución del aerosol desértico en la ciudad de Valladolid

Con la base datos final, se consideran todos los días que presentan aerosol desértico sobre la región (tipos D y DC en el inventario). Se calcula de forma diaria la contribución de estos eventos desérticos una vez descontado del valor diario el fondo urbano para la estación de Valladolid, tal y como recomienda la normativa europea [30]. Con todos los valores diarios podemos establecer una evolución estacional y anual de la contribución del aerosol desértico en Valladolid. De esta forma podremos comparar nuestros resultados con los obtenidos en la estación de Peñausende por Cachorro et al. (2016) [28].

Conviene hacer mención de cómo se calculan los promedios de la contribución en escala mensual o anual, ya que si solo hacemos la media de los valores de la contribución diaria estamos dando la “intensidad media” que los eventos de polvo desértico tienen sobre los valores de PM_{10} . Por tanto, se necesita hacer la media considerando todos los días que presenten contribución desértica pero también considerando como cero el resto de los días. Por ejemplo: en el cálculo del promedio anual de 2003 se realiza la suma de los 44 días que presentan aerosol desértico y esa suma se divide entre 365 para obtener el valor de la contribución en la escala anual.

Esta variación año a año para el número de días con aerosol desértico se reporta en la Tabla 11 y se ilustra en la Figura 14. Se observa un gran cambio interanual, con una clara tendencia decreciente durante el período analizado.

Tabla 11: Media anual de la contribución a los valores totales de PM_{10} en valores absolutos (“abs.”, en $\mu g m^{-3}$) y relativos (“rel.”, en %)

		2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Total
PM_{10}	abs.	4.48	6.62	5.79	6.75	2.15	1.45	0.94	0.71	1.21	1.34	0.19	1.19	2.74
	rel.	11.83	12.81	11.91	16.32	7.77	6.6	4.68	3.79	6.12	7.51	1.43	8.55	8.28

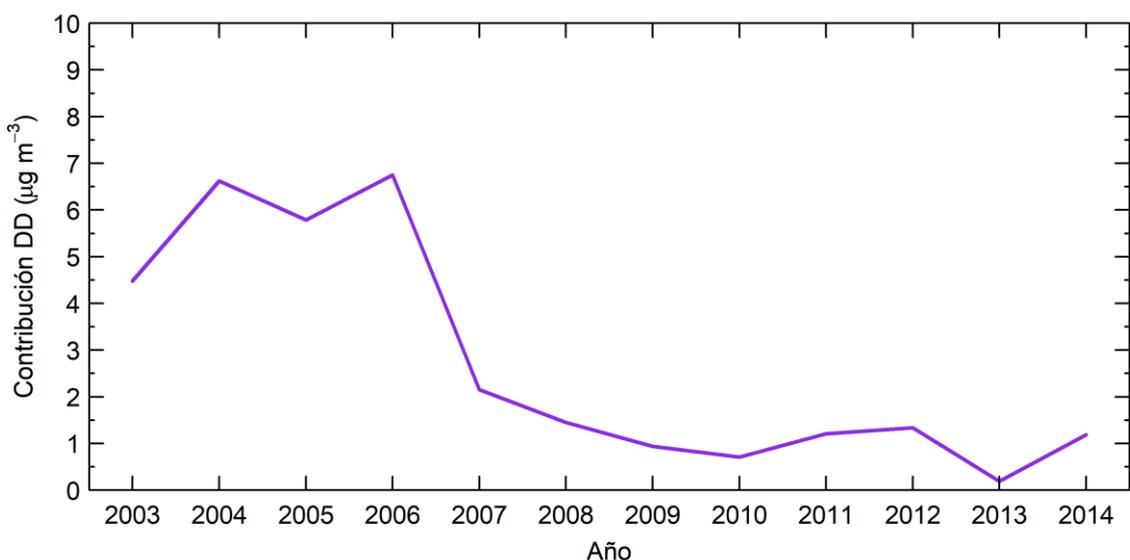


Figura 14: Variación interanual de la contribución de los DD al valor de PM_{10}

La Tabla 13 muestra las tendencias para la serie total de PM_{10} y la contribución anual del aerosol desértico en la ciudad de Valladolid. Se calcula el p-valor siguiendo la estadística de Mann-Kendall. El PM_{10} registra una caída de $-3 \mu g m^{-3}$ por año, siendo estadísticamente significativa. Este valor contrasta con el obtenido en la estación de Peñausende para el mismo periodo de -0.46

$\mu\text{g m}^{-3}$ por año [28]. Con lo que la reducción en los valores en una estación de fondo es un 15% del valor observado en la ciudad de Valladolid.

El valor de la tendencia de la contribución en el PM_{10} de la ciudad de Valladolid resulta ser de $-0.51 \mu\text{g m}^{-3}$ por año. Con lo que la reducción de PM_{10} en la superficie de Valladolid puede explicarse en un $\sim 20\%$ por la disminución de la contribución del aerosol desértico. Si bien es cierto que el resultado de la tendencia no es estadísticamente significativo, la menor ocurrencia de eventos desérticos tiene asociada una parte de la reducción en los niveles de PM_{10} en la superficie de Valladolid.

Los resultados se presentan en la Tabla 13 y a pesar de que el valor p para la contribución de los DD no es estadísticamente significativo, al comparar las tendencias de ambas variables ($-0,51 \mu\text{g m}^{-3}$ con respecto a $-2,95 \mu\text{g m}^{-3}$) se obtiene que el aproximadamente 20% de la disminución de los valores para PM_{10} se da en torno a la baja año a año que se evidencia en la Figura 14

Tabla 12: Tendencias temporales, valores p e intervalo de confianza para la serie completa y para la contribución de los desérticos, las tendencias negativas evidencian un decrecimiento en la variable analizada

Variable	Tendencia ($\mu\text{g m}^{-3}/\text{año}$)	p-value	Intervalo de confianza
PM_{10}	-2.95	0.0081	[-4.4; -1.81]
Contribución DD	-0.51	0.2129	[-0.76; -0.16]

La clara tendencia decreciente en el número de eventos desérticos muestra una disminución de aproximadamente 3 días por año desde 2003 a 2014, cifra que corrobora una disminución significativa en los eventos de DD observados en la zona centro-norte de la Península Ibérica durante la última década.

A su vez, el ciclo anual muestra dos máximos, uno en marzo y otro en julio, con un mínimo marcado en abril y diciembre con el nivel más bajo; es decir, la mayor contribución se observa en los meses de verano, de mayo a julio ($3.64 \mu\text{g m}^{-3}$ o 16.20%). El mes de abril presenta un claro descenso con respecto a marzo ($1.46 \mu\text{g m}^{-3}$ o 3.52%). Al final de verano, en el mes de agosto se presenta una caída ($2.84 \mu\text{g m}^{-3}$ o 15.12%) y más allá de septiembre una disminución progresiva durante los meses de invierno (DJF), que conduce hasta al efecto más débil presente en diciembre ($0.47 \mu\text{g m}^{-3}$ o 3.34%). Comparando los ciclos estacionales de contribución de DD a PM_{10} en esta última área con respecto al centro-norte de la Península Ibérica, aparecen algunas características comunes (máximo de marzo, disminución de abril-mayo, aumento de verano y caída de septiembre).

Tabla 13: Media mensual de la contribución a los valores totales de PM_{10} en valores absolutos (“abs.”, en $\mu\text{g m}^{-3}$) y relativos (“rel.”, en %)

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
PM_{10}	abs.	1.87	2.23	4.35	1.46	3.08	3.50	4.34	2.84	3.14	3.00	2.50	0.47	2.73
	rel.	4.94	4.31	8.95	3.52	11.13	15.94	21.52	15.12	15.93	16.76	18.63	3.34	11.68

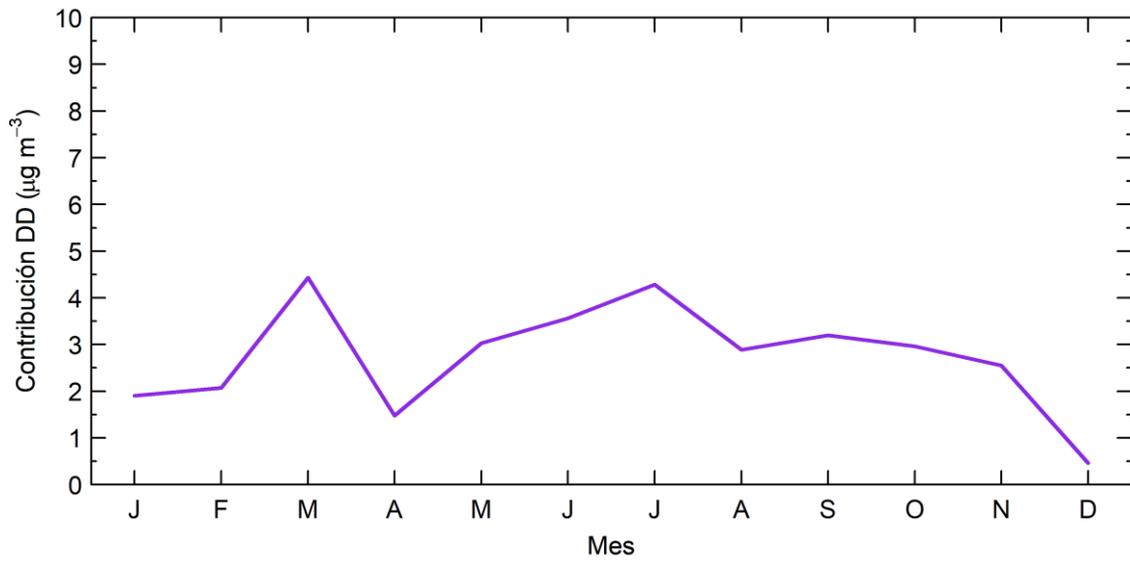


Figura 14: Variación interanual de la contribución de los DD al valor de PM10

Capítulo 4

Conclusiones y líneas futuras

4.1 Conclusiones

En este estudio se han utilizado dos bases de datos. La primera, es un inventario de intrusiones desérticas obtenido a partir de dos estaciones de la Comunidad Autónoma de Castilla y León situadas en Peñausende y Palencia, considerando medidas en superficie y columnares de aerosol, y diversa información auxiliar. La segunda base de datos corresponde a la estación Arco Ladrillo II-Victoria Cachorro de la RCCAVA ubicada en la ciudad de Valladolid, en la cual se registran los datos correspondientes de PM_{10} estudiados en este trabajo,

Se ha construido una base de datos final, partiendo de las dos anteriores, en la que a cada día de medidas de PM_{10} en la ciudad se le asocia si hay un episodio desértico o no que afecte a toda la región. Con esta base de datos final se puede abordar el cálculo de la contribución del aerosol desértico y estudiar su impacto en la calidad del aire de la ciudad. Las principales conclusiones obtenidas en este trabajo se muestran a continuación:

1. Una vez separados los días catalogados como desérticos de la serie completa de PM_{10} , se evaluó el Percentil 40% siguiendo la metodología de Escudero et al. (2007) [21] aceptada por la Comisión Europea, notando que no existe un ciclo estacional marcado oscilando entre 14 y 19 $\mu\text{g m}^{-3}$, por lo que el valor promedio de 17 $\mu\text{g m}^{-3}$ se considera como representativo del fondo urbano de PM_{10} para la ciudad de Valladolid.

2. Se encontraron un total de 472 excedencias a lo largo del período estudiado, de las cuales, 138 son atribuidas a eventos desérticos, 60 a otros eventos y 274 excedencias podrían tener su origen en la contaminación local (industrias, tráfico rodado, ...). Por tanto, las intrusiones de aerosol desértico han causado cerca del 30% del total de excedencias.
3. En base a los niveles establecidos por la Directiva Europea, durante el periodo 2003-2006 se superaron los límites permitidos y aconsejables para la salud humana. Cabe destacar que desde el año 2007 hay una drástica reducción en el número de excedencias, llegándose a un valor de cero para algunos años.
4. La variación interanual de la contribución del aerosol desértico en el periodo 2003-2014 presenta una tendencia decreciente. De forma general, esta reducción consigue explicar hasta un 20% de la variación observada en el total de PM_{10} en la ciudad de Valladolid. Aunque hay que mencionar que el valor de la tendencia de la contribución resulta ser no estadísticamente significativo.

Por tanto, los niveles de la calidad del aire en la ciudad de Valladolid muestran niveles más críticos cuando suceden eventos como las intrusiones de aerosol desértico, ocasionando daños en la salud y en el balance radiativo, motivo por el que estudios sobre el monitoreo de los distintos tipos de aerosoles se vuelven imprescindibles para favorecer el bienestar general.

4.2 Líneas futuras

Como se ha mencionado a lo largo de la presente investigación, la contaminación por material particulado surge de actividades tanto antropogénicas, como naturales, tales como: incendios forestales, cenizas volcánicas y tormentas de polvo, etc. El país de Ecuador, ubicado en la línea ecuatorial en la sección noroccidente de América del Sur, está atravesado por la Cordillera de los Andes y contiene uno de los sistemas volcánicos más extensos del mundo. Por ello, Ecuador es uno de los países que presenta una mayor influencia volcánica. Según información del Global Volcanism Program de la Smithsonian Institution (GVP-SI), el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) y la Secretaría de Gestión de Riesgos, existen 98 volcanes en la nación, de los cuales 31 están activos. Asimismo, Ecuador, forma parte del denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, conformado por una larga serie de volcanes que, en su mayoría, de igual forma, están activos [31].

Quito al ser la capital del Ecuador, presenta altos niveles de contaminación debido a la existencia de un parque automotor extenso, pero por su ubicación geográfica, una fracción de la contaminación existente puede deberse a erupciones volcánicas, y así como las intrusiones desérticas del Sahara tienen gran influencia en la Península Ibérica, estas emisiones de material piroclástico y cenizas presentan gran influencia en la mitad del mundo y pueden participar en gran medida en la dinámica de la calidad ambiental, haciendo de esta situación un tema interesante para ser estudiado.

Quito cuenta con redes de monitoreo ambiental, que podrían ser usadas para llevar a cabo una investigación de estas características. Una de ellas es la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ), la cual posee nueve estaciones remotas de monitoreo con capacidad para analizar continua y automáticamente monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO, NO₂ y NO_x), ozono (O₃) y material particulado.

Además, en Ecuador también es posible obtener datos de AERONET, puesto que existen dos estaciones, una en Quito y una en Galápagos, a cargo de la Universidad San Francisco de Quito, las cuales se encuentran en funcionamiento desde 2016 y 2017 respectivamente, siendo los puntos de monitoreo:

- EMA USFQ, campus principal Quito, con coordenadas 0.19°S, 78.43°W y 2414 msnm: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/photo_db/Quito_USFQ.html
- USFQ Extensión Galápagos, con coordenadas 0.89°S, 89.61°W, 22 msnm: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/photo_db/San_Cristobal_USFQ.html



Figura 15: Estaciones de AERONET, (Quito y San Cristóbal se encuentran en Ecuador)

Siguiendo la metodología descrita en esta investigación es posible caracterizar eventos, que podrían denominarse como volcánicos y determinar su contribución a los niveles de fondo de Quito, o de distintas ciudades del Ecuador.

Referencias

- [1] L. Han, W. Zhou, S. T. Pickett, W. Li and Y. Qian, "Multicontaminant air pollution in Chinese cities," *Bull World Health Organ*, vol. 96, no. 4, pp. 233-242, 2018.
- [2] X. Querol, "Calidad del aire, partículas en suspensión y metales," *Revista Española de Salud Pública*, vol. 82, no. 5, pp. 447-454, 2008.
- [3] Ecologistas en Acción, "La calidad el aire en el Estado español," Ecologistas en Acción, Madrid, 2014.
- [4] Futuro sostenible, "Principales contaminantes del aire," Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019. [Online]. Available: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Generalidades/Principales-contaminantes.aspx>. [Accessed 17 Marzo 2021].
- [5] World Health Organization Regional Office for Europe, "Air quality guidelines for Europe, 2nd ed.," WHO Regional Publications, European Series, N° 91, Copenhagen, 2000.
- [6] S. Chen, D. Li, H. Zhang, D. Yu, R. Chen and B. Zhang, "The development of a cell-based model for the assessment of carcinogenic potential upon long-term PM2.5 exposure," *Environment International*, vol. 131, no. 104943, pp. 1-13, 2019.
- [7] J. Pizzorno and W. Crinnion, "Particulate Matter Is a Surprisingly Common," *Integrative Medicine*, vol. 14, no. 4, pp. 8-12, 2017.

- [8] US Environmental Protection Agency (EPA), "Particulate matter (PM) pollution," EPA, 2 Diciembre 2021. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/pm-pollution>. [Accessed 26 Febrero 2021].
- [9] E. Meszaros, *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*, Budapest: Akademiai Kiado, 1999.
- [10] Red de Control de la Contaminación Atmosférica del Ayuntamiento de Valladolid, "Material particulado PM10/PM2,5," Ayuntamiento de Valladolid, 2020. [Online]. Available: <https://www.valladolid.es/es/rccava/contaminantes/material-particulado-pm10-pm2-5>. [Accessed 1 Marzo 2021].
- [11] Y. Bennouna, V. Cachorro, D. Mateos, M. Burgos, C. Toledano, B. Torres and M. Frutos, "Long-term comparative study of columnar and surface mass concentration aerosol properties in a background environment," *Atmospheric Environment*, vol. 140, pp. 261-272, 2016.
- [12] Norwegian Meteorologic Institute, "EMEP Co-operative Programme for Monitoring and Evaluating of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe," w3.css, 2011. [Online]. Available: <https://www.emep.int/mscw/index.html#>. [Accessed 26 Febrero 2021].
- [13] M. Burgos, *Estudio de las propiedades en columna y superficie del aerosol atmosférico en la zona centro-norte de la Península Ibérica: énfasis en aerosol desértico*, Valladolid: Universidad de Valladolid, 2016.
- [14] S. Chatoutsidou, I. Kopanakis, K. Lagouvardos, N. Mihalopoulos, Tørseth, Kjetil and M. Lazaridis, "PM10 levels at urban, suburban, and background locations in the eastern Mediterranean: local versus regional sources with emphasis on African dust," *Air Quality, Atmosphere & Health*, vol. 12, p. 1359–1371, 2012.
- [15] X. e. a. Querol, "African dust influence on ambient PM levels in South-Western Europe (Spain and Portugal): A quantitative approach to support implementation of Air Quality Directives," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Barcelona, 2009.
- [16] T. Godish, *Air Quality*, Washington D.C.: Lewis Publishers, 2004.
- [17] C. Pope and D. D.W., "Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect," *Journal of the Air & Waste Magazine Association*, vol. 56, no. 6, pp. 709-742, 2006.
- [18] Z. Yongming, "Hablemos de material particulado," 04 Julio 2015. [Online]. Available: <http://www.masters.tw/39411/%E6%B7%BA%E8%AB%87pm2-5>. [Accessed 17 Marzo 2021].
- [19] E. Comision, *Air Quality Legislation*, Sec. 3, 2008.
- [20] M. Escudero, S. Castillo, X. Querol, A. Avila, M. Alarcon and M. Viana, "Wet and dry African dust episodes over Eastern Spain," *J Geophys Res*, 2005.
- [21] European Commission, "Establishing guidelines for demonstration and subtraction of exceedances attributable to natural sources under the Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe," Commission Staff Working Paper, Bruselas, 2011.

- [22] M. Escudero, X. Querol, A. Alastuey, N. Perez, S. Alonso, S. Rodriguez and E. Cuevas, "A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks," *Atmospheric Environment*, no. 41, p. 5516–5524, 2007.
- [23] L. Schutz, R. Jaenicke and H. Pietrek, " Saharan dust transport over the North Atlantic Ocean," *Desert Dust. Geological Society of America*, vol. 186, pp. 87-100, 1981.
- [24] J. Méndez, L. Pinto and L. Belalcázar, "Estudio de una intrusión de polvo sahariano en la atmósfera de Colombia," *Revista Ingenierías*, vol. 17, no. 32, 2017.
- [25] C. Mitsakou, G. Kallos, N. Papantoniou, C. Spyrou, S. Solomos and M. Astitha, "Saharan dust levels in Greece and received inhalation doses.," *Atmospheric Chemistry*, no. 8, pp. 11967-11996, 2008.
- [26] A. Goudie and N. Middleton, "Saharan dust storms: nature and consequences," *Earth Sci Rev*, no. 56, p. 179–204, 2001.
- [27] A. Karanasiou, N. Moreno, T. Moreno, M. Viana, F. de Leeuw and X. Querol, "Health effects from Sahara dust episodes in Europe: Literature review and research gaps," *Environment International*, no. 47, pp. 107-114, 2012.
- [28] V. Cachorro, M. Burgos, D. Mateos, C. Toledano and Y. Bennouna, "Inventory of African desert dust events in the north-central Iberian Peninsula in 2003–2014 based on sun-photometer–AERONET and particulate-mass–EMEP data," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 16, pp. 8227-8248, 2016.
- [29] M. Á. Burgos, Estudio de las propiedades en columna y superficie del aerosol atmosférico en la zona centro-norte de la Península Ibérica: énfasis en aerosol desértico, Tesis Doctoral, vol. Universidad de Valladolid, Valladolid: Universidad de Valladolid, 2016.
- [30] Holben et al., "AERONET," 1998. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425798000315?casa_token=gTsR-grPIOYAAAAA:IWASOhBylcN-sVz0okNX8UZaxOBmbhlz1t0h63lpb704Zm5fI3v3B9j-4Xue6UyWjtCo5MTNe8Q.
- [31] D. Mateos, V. Cachorro, C. Velasco-Merino, N. O'Neil and M. Burgos, "Comparison of three different methodologies for the identification of high atmospheric turbidity episodes," *Atmospheric Research*, vol. 237, no. 104835, pp. 1-10, 2020.
- [32] D. Garcés, "Sociedad de las catástrofes," *Enfoque*, no. 38, pp. 1-4, 2017.
- [33] M. Viana, P. Salvador, B. Artíñano, X. Querol, Alastuey and Andres, "Assessing the Performance of Methods to Detect and Quantify African Dust in Airborne Particulates," *Environmental Science & Technology*, vol. 44, no. 23, p. 8814–8820, 2021.
- [34] F. Zereini and C. Wiseman, *Urban Airborne Particulate Matter*, Berlin: Springer, 2021.
- [35] R. Rodríguez, "Contaminación por material particulado, estrés oxidativo e inflamación," *Perspectivas en Asuntos Ambientales*, vol. 4, pp. 58-65, 2015.