

MÉTODO DE CORRELACIÓN ENTRE EL PM CON EL AOD EN LA ZONA URBANA DE MEDELLÍN, SEGÚN OBSERVACIONES DE FOTÓMETRO SOLAR Y SENSOR DE CALIDAD DEL AIRE^a

CORRELATION METHOD BETWEEN PM AND AOD IN THE URBAN AREA OF MEDELLÍN, ACCORDING TO OBSERVATIONS OF SOLAR PHOTOMETER AND AIR QUALITY SENSOR.

ANDREA DAYANA BOTINA-TAUTÁS^{b*}

Recibido para revisar 17-10-2023, aceptado 27-06-2024, versión final 26-11-2024.

Artículo de Investigación

RESUMEN: Este artículo presenta un método de correlación entre el Material Particulado (PM) y la Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD). El estudio se fundamenta en investigaciones previas que utilizaron regresiones lineales generalizadas para determinar los factores de conversión de AOD a PM. Se recolectaron datos mediante un fotómetro solar de NASA-AERONET para medir el AOD en toda la columna de atmósfera terrestre y un equipo portátil láser, Sensor de PurpleAir, para medir la concentración de PM en la superficie de la zona urbana de Medellín, ambos equipos se instalaron en un mismo sitio y se realizaron mediciones simultáneas durante 102 días continuos, entre diciembre del 2020 y mayo de 2022. El presente trabajo identifica dos funciones de conversión: $AOD_{ModoFino}$ a $PM_{2.5}$ ($R^2 \approx 0,550$) y $AOD_{ModoTotal}$ a $PM_{10.0}$ ($R^2 \approx 0,550$). Se eligieron específicamente estas funciones debido a que tienen los coeficientes de correlación más altos. Adicionalmente, se determina que las ecuaciones de conversión deben ser ajustadas para concentraciones de $PM_{2.5}$ menores a $5,61 \mu g/m^3$ y de $PM_{10.0}$ menores a $6,06 \mu g/m^3$, debido a que los errores porcentuales superan el 100%. Finalmente, se realiza un análisis respecto a los factores de conversión, que varían según la temperatura, humedad y agua precipitable.

PALABRAS CLAVE: Fotometría solar; difracción láser; espesor óptico; material particulado; calidad del aire.

ABSTRACT: This article presents a valuation method between Particulate Matter (PM) and Aerosol Optical Depth (AOD). The study builds on previous research that used generalized linear regressions to determine conversion factors from AOD to PM. Data were collected using a NASA-AERONET solar photometer to measure AOD in the entire column of the Earth's atmosphere and a portable laser device, PurpleAir Sensor, to measure the concentration of PM on the surface of the urban area of Medellín, both devices. It was installed in the same site and simultaneous measurements were carried out for 102 continuous days, between December 2020 and May 2022. This work identifies two conversion functions: $AOD_{ModoFino}$ to $PM_{2.5}$ ($R^2 \approx 0.550$) and $AOD_{ModoTotal}$ to $PM_{10.0}$ ($R^2 \approx 0.550$). These features were specifically chosen because they have the highest rating coefficients. In addition, it is determined that the conversion equations must be adjusted for concentrations of $PM_{2.5}$ less than $5.61 \mu g/m^3$ and $PM_{10.0}$ less than

^aBotina-Tautás, A. D.(2025). Método de correlación entre el PM con el AOD en la zona urbana de Medellín, según observaciones de fotómetro solar y sensor de calidad del aire *Rev. Fac. Cienc.*, 14 (1), 6–22. DOI: <https://10.15446/rev.fac.cienc.v14n1.111367>

^bUniversidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Departamento de Física.

* Autor para correspondencia: abotinat@unal.edu.co

$6.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$, because the percentage errors exceed 100%. Finally, an analysis is carried out that indicates that the conversion factors depend on temperature, humidity and precipitable water.

KEYWORDS: Solar photometry; laser diffraction; aerosol optical depth; particulate matter; air quality.

1. INTRODUCCIÓN

Generalmente, la contaminación del aire se relaciona con el exceso de materiales tóxicos en dicho medio. De acuerdo con el Boletín de Calidad del aire del IDEAM (2021), el material particulado ($PM_{2.5}$ y $PM_{10.0}$) es nocivo para la salud, principalmente en términos de problemas respiratorios, y en el medio ambiente, puesto que puede afectar bosques y cultivos agrícolas (Nisperuza, 2015). Sin embargo, el AOD no se ha destacado tanto en estos estudios; por ello, este trabajo es una iniciativa para integrar el AOD en el análisis de la contaminación a partir de su relación con el PM.

Este artículo muestra los principales resultados de la tesis titulada “Concentración de material particulado en superficie de la zona urbana de Medellín, con base en observaciones de fotómetro solar y sensor de calidad del aire” (Botina, 2023), dicho estudio parte de la disponibilidad de un fotómetro solar y un sensor de calidad del aire en la Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín; además, se fundamenta en investigaciones de Xin *et al.* (2016), León *et al.* (2021), quienes emplearon regresiones lineales generalizadas para determinar los factores de conversión de AOD a concentraciones de PM. El objetivo principal de este artículo es presentar y analizar los resultados principales obtenidos con el fin de a bordar la capacidad de los datos de AOD para reflejar los cambios de PM en la zona urbana de Medellín y obtener una posible estimación de la calidad del aire a partir de datos de fotometría solar, lo que permite emplear un único equipo, mejora la comprensión de la dinámica de contaminación relacionada con ambas variables y tiene implicaciones significativas para el diseño de políticas públicas destinadas a gestionar y mitigar la contaminación atmosférica urbana.

La estructura de este artículo se organiza de la siguiente manera: inicialmente se muestran brevemente las técnicas de censado remoto atmosférico, fotometría solar y difracción láser; luego se presentan los equipos empleados y metodología para realizar la vigilancia remota (pasiva y activa) de la columna de atmósfera y la superficie terrestre en la zona urbana de Medellín. Se exponen los resultados más relevantes del estudio y, finalmente, se ofrecen conclusiones con las principales contribuciones e implicaciones de la investigación, además se sugieren posibles direcciones para futuras investigaciones en este campo.

2. PROPIEDADES ÓPTICAS DEL AEROSOL ATMOSFÉRICO

La atmósfera es una capa fina que cubre la tierra y la protege de la radiación nociva y meteoros. En la atmósfera hay gases con concentración permanente como el nitrógeno, oxígeno, argón, entre otros, que corresponden el 99.03 % de la atmósfera; y gases con concentración variables tales como: ozono, vapor de agua, dióxido de carbono, monóxido de carbono, ácido nítrico, amoníaco y similares, que pueden ser causa de preocupación debido a sus efectos reactivos y nocivos para la salud. Adicionalmente, hay partículas suspendidas en la atmósfera, entre las cuales están: gotitas de agua, nubes, neblina, aerosoles, moléculas de aire; que dispersan la luz de manera dependiente de su composición química y tamaño. (Nisperuza, 2015; Rocadenbosch, 1996; Smith, 1978).

Por otra parte, el estudio completo de la interacción luz-atmósfera resulta muy complejo, por tal motivo se desarrolló un modelo estándar atmosférico que se caracteriza por sus propiedades relacionadas con la dispersión de la luz y se emplea para estudiar la troposfera, que es fundamental debido a que la mayor parte de la vida humana se desarrolla en ella y presenta una interacción significativa entre la atmósfera y la superficie, especialmente en la capa límite atmosférica (Botina, 2023; Molina, 2013; Nisperuza, 2015; Rocadenbosch, 1996; Wallace & Hobbs, 2006).

3. FOTOMETRÍA SOLAR

La fotometría solar es una técnica para detectar y estudiar diversas longitudes de onda, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano, que interactúan con la atmósfera. Este método proporciona información detallada sobre las propiedades atmosféricas. (Alegría, 2015; Botina, 2023; Liou, 2002; Nisperuza, 2015; Silva, 2011).

Esta técnica utiliza la luz colimada dirigida hacia un detector, comunmente un fotodiodo, para transformar la energía luminosa en una señal digital $V(\lambda)$, que es proporcional a la radiación solar. Después se calibran los valores numéricos mediante el método de Langley, para calcular el coeficiente de calibración $V_0(\lambda)$, que representa el punto donde la masa óptica del aire es cero en la parte alta de la atmósfera. Este coeficiente se utiliza para reescribir la ley de Beer-Lambert-Bouguer en términos de conteos digitales medidos por los equipos, como se ve en la ecuación (1) (Botina, 2023; Giles, 2019; Nisperuza, 2015).

$$V(\lambda) = \left(\frac{z_0}{z}\right)^2 V_0(\lambda) \exp[-\tau_{tot}(\lambda)m(\theta_0)] \quad (1)$$

Respectivamente, z y z_0 es la distancia real y media entre el sol y la tierra, $\tau_{tot}(\lambda)$ es la profundidad óptica atmosférica, constituida por $\tau(\lambda)_{aerosoles}$, $\tau(\lambda)_{Rayleigh}$, $\tau(\lambda)_{O_3}$ y $\tau(\lambda)_{NO_2}$, entre otros. Finalmente, $m(\theta_0)$ es el factor de masa óptica que depende del ángulo solar cenital θ_0 . Estos parámetros permiten determinar el AOD ($\tau(\lambda)_{aerosoles}$) en la atmósfera (Alegría, 2015; Giles, 2019; Liou, 2002; Nisperuza, 2015; Silva, 2011).

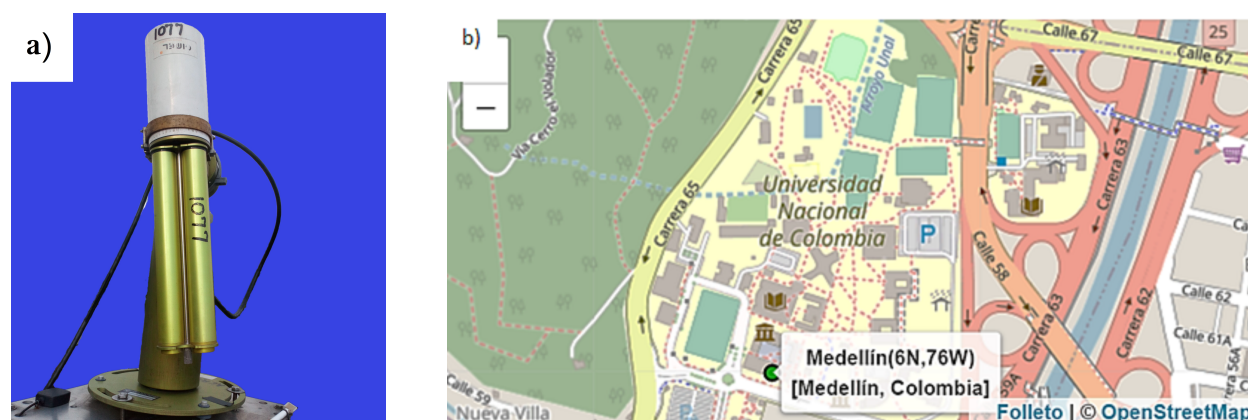


Figura 1: a.) Fotómetro solar CIMEL, modelo CE-318, fuente: Botina (2023); b.) Ubicación del Fotómetro en la Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, fuente: mapa de Aeronet (2024).

3.1. Fotómetro solar

El Grupo de Investigación en Láseres y Espectroscopia Óptica (GLEO) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, firmó una alianza con AERONET, una red robótica de la NASA, para adquirir un fotómetro solar modelo CE-318 (ver Figura 1a), fabricado en París por CIMEL. Este equipo, de vigilancia pasiva, utiliza radiación solar directa para calcular el AOD, estimar el agua precipitable y el tamaño de los aerosoles en función de su radio, clasificando las distribuciones de partículas en modo fino, grueso y total, este último resulta de sumar ambas categorías. Además, determinar propiedades microfísicas y radiativas a partir de mediciones de radiancia del cielo (Botina, 2023; AERONET, 2109; AERONET, s.f.).

El fotómetro solar se encuentra ubicado en el Laboratorio de Láseres y Espectroscopia de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, latitud: 6.26067° Norte, longitud: 75.57791° Oeste y elevación: 1471,0 metros. Sus datos se almacenan en la red de AERONET y pueden ser visualizados en su mapa por medio del enlace <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>, ver Figura 1 b).

4. TÉCNICA DE DIFRACCIÓN LASER

La técnica de difracción láser tiene diferentes aplicaciones, para emplearla en la detección y análisis de partículas se debe estudiar la dispersión producida por la interacción entre luz y partículas, las cuales son consideradas esferas y sus tamaños son comparables a la longitud de onda (λ) del haz incidente. Por un lado, la teoría de Mie describe la dispersión de luz desde la refracción, reflexión y absorción, mientras que la teoría de Fraunhofer abarca los patrones de difracción (Botina, 2023).

Inicialmente, el tratado del físico Gustav Mie (1908) establece que la intensidad de la luz dispersada (I) por la partícula depende del ángulo de dispersión (θ), el número de onda (k) y la intensidad del haz incidente (I_0), tal como se observa en la ecuación (2) (Redmond *et al.*, 2010; SYMPATEC, 2016; Young *et al.*, 2013).

$$I = I_0 [i_{\parallel}(\theta) + i_{\perp}(\theta)] / (2k^2 R^2) \quad (2)$$

Donde i_{\parallel} e i_{\perp} son las funciones de intensidad de luz dispersada paralela y perpendicular, respectivamente, y R es la distancia entre la partícula y el punto donde se evalúa la intensidad I (Beckman, sf; Rocadenbosch, 1996; Young *et al.*, 2013).

Asimismo, la capacidad de una partícula para dispersar la luz en comparación con su tamaño se denomina factor de eficiencia de dispersión ($Q_{sca} = I/I_0$), que está determinado por el radio (a) de la partícula y la sección transversal de dispersión (σ_{sca}), como se señala en la ecuación (3). Además, la ecuación (4) evidencia su relación con los factores de eficiencia de absorción (Q_{abs}) y extinción (Q_{ext}) (Redmond *et al.*, 2010; Rocadenbosch, 1996; Young *et al.*, 2013):

$$Q_{sca} = \sigma_{sca} / (\pi a^2) \quad (3)$$

$$Q_{ext} = \sigma_{ext} / (\pi a^2) = (\sigma_{abs} + \sigma_{sca}) / (\pi a^2) = Q_{abs} + Q_{sca} \quad (4)$$

Adicionalmente, existe retrodispersión si se observa dispersión desde un ángulo de 180° . Su factor de eficiencia depende de la función de amplitud de dispersión de Mie paralela $S_{\parallel}(\pi)$ y el parámetro de tamaño (x), ver ecuación (5) (Rocadenbosch, 1996):

$$Q_{back} = 4|S_{\parallel}(\pi)|^2 / x^2 \quad (5)$$

Por otro lado, la teoría de Fraunhofer explica la creación de patrones de luz y sombra que se generan alrededor de la partícula. Para ello, se asumen las consideraciones planteadas inicialmente; además, se debe tener en cuenta que la distancia entre la partícula y el plano de observación (z) debe ser relativamente grande ($z \gg a^2$) y que los ángulos de difracción (θ) deben ser pequeños. A partir de estas condiciones, se determina la función que describe la distribución de la intensidad de luz difractada por la partícula, correspondiente a la ecuación (6) (Botina, 2023; Ersoy, 2007; Gante, 2014; SYMPATEC, 2016; Vargas, 2007; Liou, 2002; Videla, 2011)

$$I(\theta, a) = I_0 (\pi^2 a^4) / (\lambda^2 z^2) [(2J_1(ka\theta)) / ka\theta]^2 \quad (6)$$

Donde $J_1(ka\theta)$ corresponde a función de Bessel de orden uno, la cual obedece al número de onda (k), radio de la partícula (a) y al ángulo de dispersión (θ).

En relación con lo anteriormente expuesto, ambas teorías proporcionan información sobre el tamaño de las partículas en función de su interacción con la luz. Por lo tanto, los equipos de difracción láser emplean ambos métodos para clasificar las partículas según su tamaño y medir su concentración en una muestra.



Figura 2: a) Sensor PA; b) Contadores láser PMSX003. Fuente: Botina (2023); c) Ubicación del Sensor PA en la Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín. Fuente: mapa de PurpleAir (2024).

Para la dispersión de Mie, estos instrumentos utilizan detectores de ángulo grande dispuestos en ángulos “ θ ” y distancias “ R ” concretos. También cuentan con un detector de plano focal, ubicado a una distancia “ z ” de la muestra, con el fin de capturar y analizar los patrones de difracción de las partículas más grandes. Además, disponen de contadores que permiten medir la concentración de cada tipo o conjunto de partículas. Para ello, los sensores suelen emplear un láser cuya longitud de onda está condicionada al tamaño de las partículas que se van a analizar, aunque algunos mecanismos utilizan dos láseres, uno para cada método (Malvern Panalytical, 2016; Shimadzu, s.f.; SYMPATEC, 2016).

4.1. Sensor de Calidad del Aire tipo PA-II-SD de PurpleAir

El Grupo de Investigación en Láseres y Espectroscopia Óptica (GLEO) adquirió un sensor de calidad del aire PA-II de PurpleAir (Figura 2 a) mediante un intercambio con la Universidad de Florida en Estados Unidos. Este sensor, de vigilancia activa, mide en tiempo real partículas con diámetros de 0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 y 10 μm y calcula la concentración de masa de $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ y $PM_{10.0}$ en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mediante tecnología de difracción láser. Emplea un rayo láser de clase IIIa/3R que incide sobre las partículas, y está equipado con contadores láser PMSX003, los cuales se muestran en la Figura 2b (Purple Air, 2022; Dybwad, 2022).

El dispositivo se encuentra en el mismo lugar que el fotómetro solar, como se indica en la Figura 2c. Su conectividad WiFi permite transmitir datos al mapa oficial de PurpleAir, accesible en <https://map.purpleair.com>. Allí, la información se almacena y puede ser visualizada por cualquier dispositivo conectado a internet. Además, el sensor también mide presión, humedad y temperatura (PurpleAir, s.f.; PurpleAir, 2022).

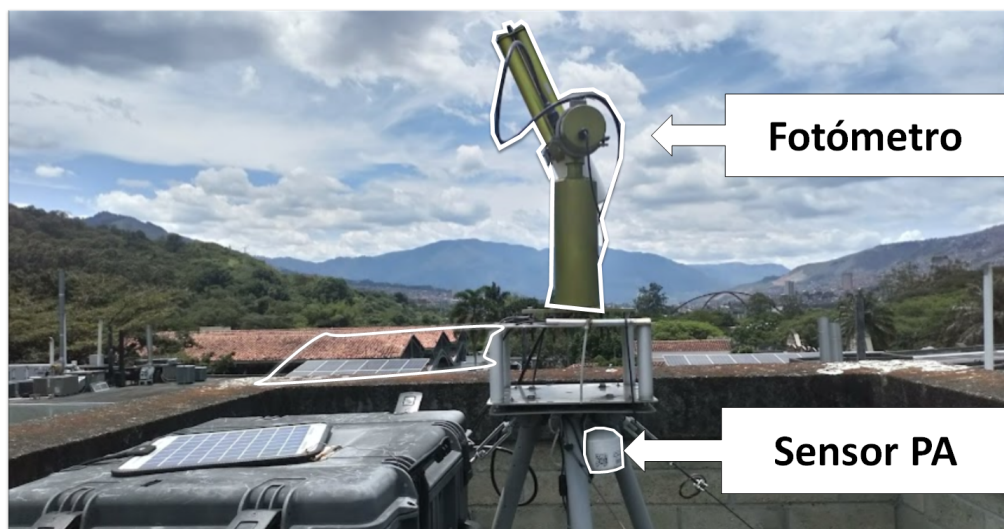


Figura 3: Disposición de fotómetro y Sensor PA. Fuente: Botina (2024)

5. DATOS Y CORRELACIÓN AOD-PM

Los datos recolectados en esta investigación incluyen mediciones de PM, obtenidas mediante un sensor de calidad del aire, y de AOD, medurado con un fotómetro solar. Generalmente, el PM sirve como indicador de la calidad del aire, mientras que el AOD mide la extinción de la radiación electromagnética causada por los aerosoles en la atmósfera (Chudnovsky *et al.*, 2012; Weichenthal *et al.*, 2014).

Aunque el PM y el AOD se miden y emplean de manera diferente, están interrelacionados, ya que los aerosoles, que afectan la visibilidad y el clima, incluyen el PM, compuesto por partículas de tamaño respirable que tienen efectos negativos en la salud y la calidad del aire (Alegría, 2015; IDEAM, 2021).

5.1. Recolección de datos

Se instaló el fotómetro y el sensor PA en la misma ubicación, tal como se muestra en las Figuras 1b y 2c; la disposición para la toma de datos se evidencia en la Figura 3. Ambos equipos operaron de forma simultánea por 102 días, durante los meses de diciembre del 2021 hasta principios de mayo del 2022.

5.2. Resultados

La información que se proporciona a continuación corresponde al promedio diario de las mediciones realizadas. Se trabajó exclusivamente con estos promedios debido a la alta cantidad de datos recopilados.

La Figura 4 a) muestra la evolución del material particulado $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Debido a problemas eléctricos, no se lograron mediciones con el fotómetro ni con el sensor PA en varios días, especialmente

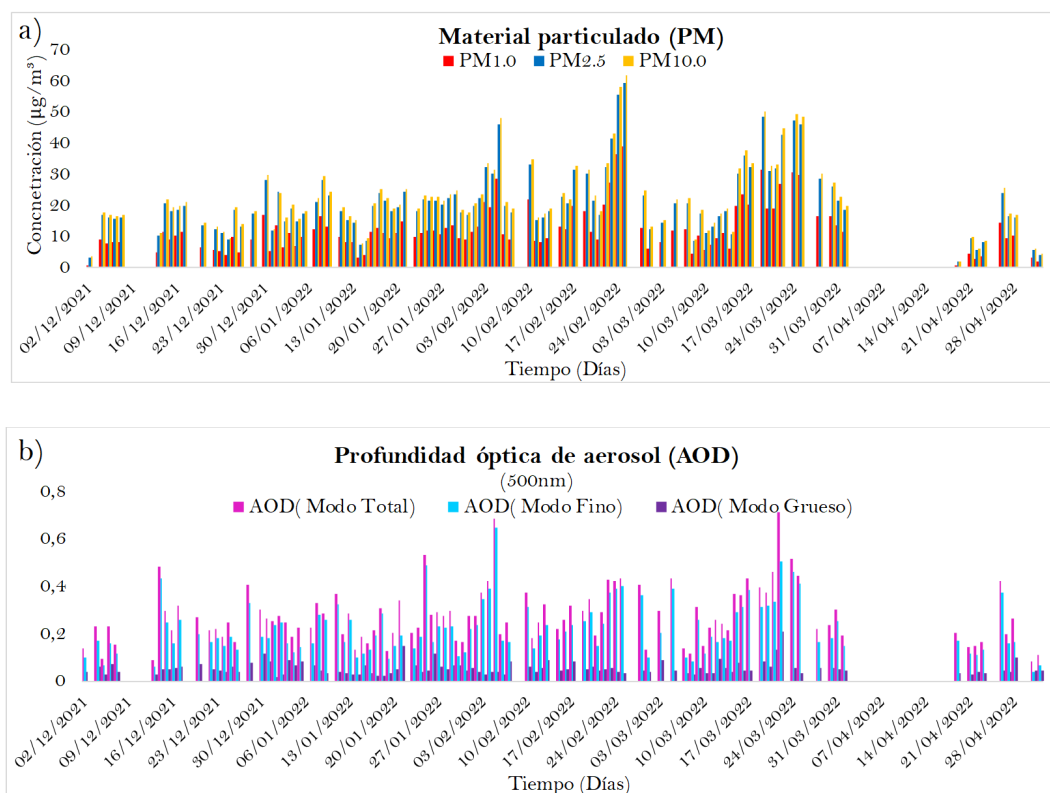


Figura 4: Gráfica de la variación en el tiempo de: a) Concentración de PM y b) AOD. Fuente: Elaboración propia.

durante abril de 2022, ya que este último depende exclusivamente de la conexión a la red eléctrica del laboratorio. Por lo tanto, para correlacionar el material particulado en la atmósfera con el residual a nivel del suelo, en este estudio se utilizaron únicamente datos de días con mediciones simultáneas. La Figura 4 b) muestra los datos de AOD para la radiación solar con longitud de onda de 500 nm, que es considerada central en el espectro visible y asegura una mejor transmisión de la luz solar en la atmósfera.

5.3. Tratamiento y análisis de datos

Para determinar la correlación entre PM y AOD, se aplicó una regresión lineal a los pares de datos. Se evaluó la asociación y relación mediante los coeficientes de correlación de Pearson (r) y de determinación (R^2). Los resultados mostraron una mayor correlación entre $PM_{2.5}$ y $PM_{10.0}$ con $AOD_{ModoFino}$ y $AOD_{ModoTotal}$, mientras que $AOD_{ModoGrueso}$ presentó correlaciones y asociaciones débiles ($r \approx 1,9$ y $R^2 \approx 0,036$) con cualquier tipo de PM. Además, se analizó PM_{Total} , correspondiente a la suma los tres PM, y los datos combinados de $PM_{10.0}+PM_{2.5}$, los resultados de esta correlación fueron similares a los mencionados anteriormente: se observó una mayor correlación con $AOD_{ModoFino}$ y el $AOD_{ModoTotal}$ y una menor con $AOD_{ModoGrueso}$.

Después de considerar estos hallazgos, tener en cuenta la distribución del tamaño de las partículas y la necesidad de evitar la propagación de errores, se analizaron los casos de las variables $x = AOD_{ModoFino}$ con $y = PM_{2.5}$ y $x = AOD_{ModoTotal}$ con $y = PM_{10.0}$. La Figura 5 presenta las gráficas que ilustran la distribución de los datos y el ajuste lineal, donde los coeficientes r y R^2 indican correlación considerable y una asociación media, ambas positivas, entre $x = AOD_{ModoFino}$ y $y = PM_{2.5}$; así como entre $x' = AOD_{ModoTotal}$ y $y' = PM_{10.0}$. Además, las ecuaciones (7) y (8), correspondientes al ajuste del modelo de regresión lineal, explican el 55 % de la variabilidad en PM a partir de la variabilidad en AOD.

$$y = (72 \pm 7)x + (5 \pm 2) \text{ ó } PM_{2.5} = (72 \pm 7)AOD_{ModoFino} + (5 \pm 2) \quad (7)$$

$$y' = (71 \pm 6)x' + (3 \pm 2) \text{ ó } PM_{10.0} = (71 \pm 6)AOD_{ModoTotal} + (3 \pm 2) \quad (8)$$

Con estas ecuaciones se busca obtener los valores promedios diarios de $PM_{2.5}$ a partir de los datos experimentales de $AOD_{ModoFino}$ y los valores promedios diarios de $PM_{10.0}$ a partir del registro experimental de $AOD_{ModoTotal}$. En las gráficas de la Figura 6 se muestran los puntos de $PM_{2.5}$ y $PM_{10.0}$, calculados mediante las ecuaciones (7) y (8), los cuales están próximos a los puntos realmente medidos por el sensor PA-II.

Durante el análisis de estos resultados, se promedió el error porcentual relativo de los datos, con un 38 % para el $PM_{2.5}$ y un 36 % para el $PM_{10.0}$. Al examinar estos errores, se identificaron datos cuyo error supera el 100 % y se encontró una relación entre el error porcentual relativo y la concentración de PM: se deduce que, para las concentraciones especificadas en la Tabla 1, a menor concentración hay mayor error porcentual relativo. En particular, para concentraciones de $PM_{2.5}$ inferiores a $5,61 \mu g/m^3$ y para concentraciones de $PM_{10.0}$ menores a $6,06 \mu g/m^3$, el error porcentual relativo aumenta.

Tabla 1: Datos de concentración de PM con errores relativos porcentuales mayores al 100 %

	Concentración ($\mu g/m^3$)	Error relativo porcentual(%)		Concentración ($\mu g/m^3$)	Error relativo porcentual(%)
$PM_{2.5}$	1.82	849	$PM_{10.0}$	2.00	747
	3.27	273		3.52	254
	3.98	145		4.31	146
	5.61	133		6.06	117

Al excluir estos cuatro valores, el error porcentual relativo promedio se reduce al 26 % para $PM_{2.5}$ y al 25 % para $PM_{10.0}$. Además, se realizaron mediciones similares durante un periodo adicional de 61 días, entre marzo y principios de junio de 2023, empleando el mismo procedimiento. Con las ecuaciones (7) y (8), se calcularon las nuevas concentraciones de $PM_{2.5}$ y $PM_{10.0}$ a partir de los promedios diarios de $AOD_{ModoFino}$ y $AOD_{ModoTotal}$, medidos con el fotómetro. Estos datos se compararon luego con los obtenidos mediante el sensor PA durante el mismo periodo. Los errores porcentuales promedio resultantes fueron del 15 % para

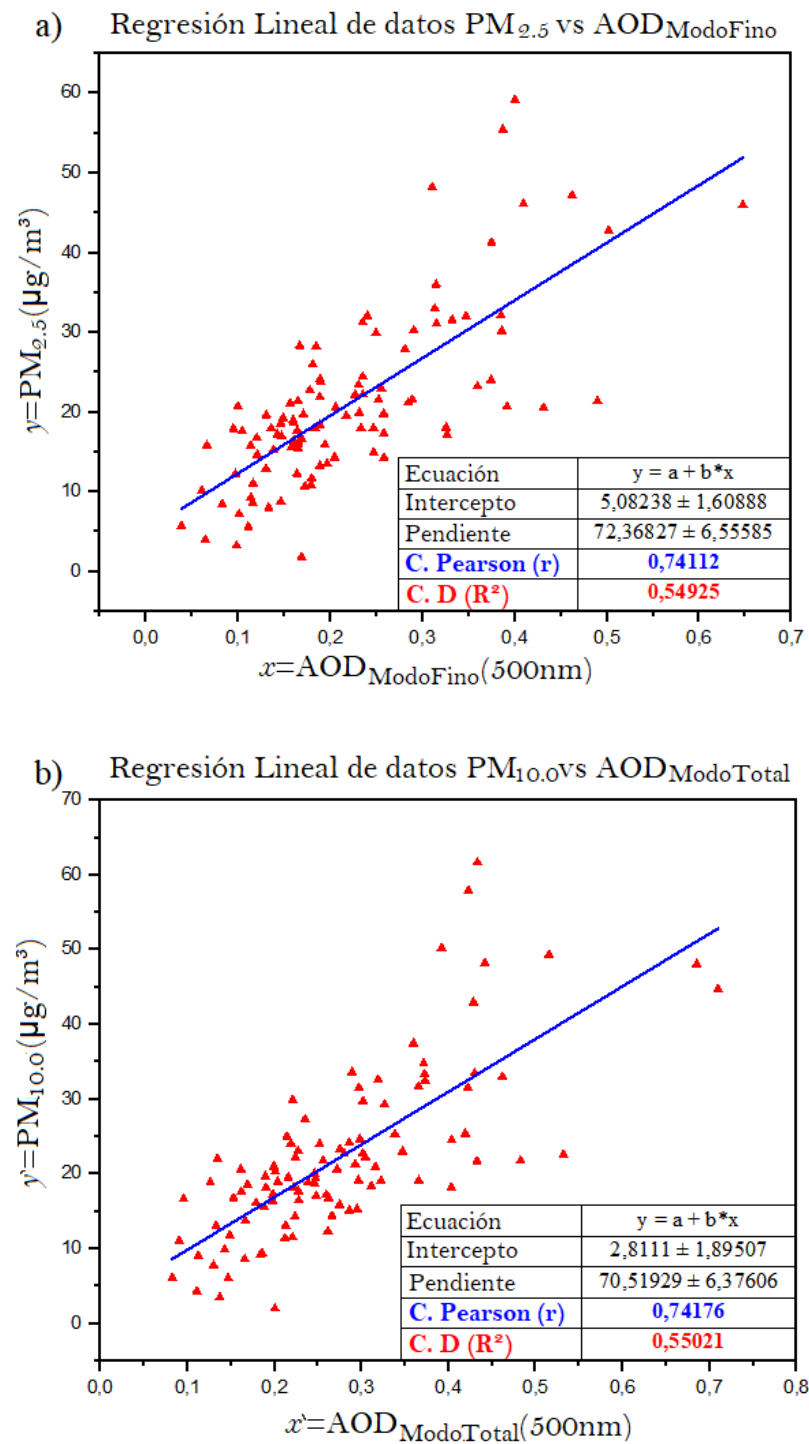


Figura 5: a) Diagramas de dispersión: $PM_{2.5}$ vs $AOD_{ModoFino}$ y b) $PM_{10.0}$ vs $AOD_{ModoTotal}$. Fuente: Botina (2024).

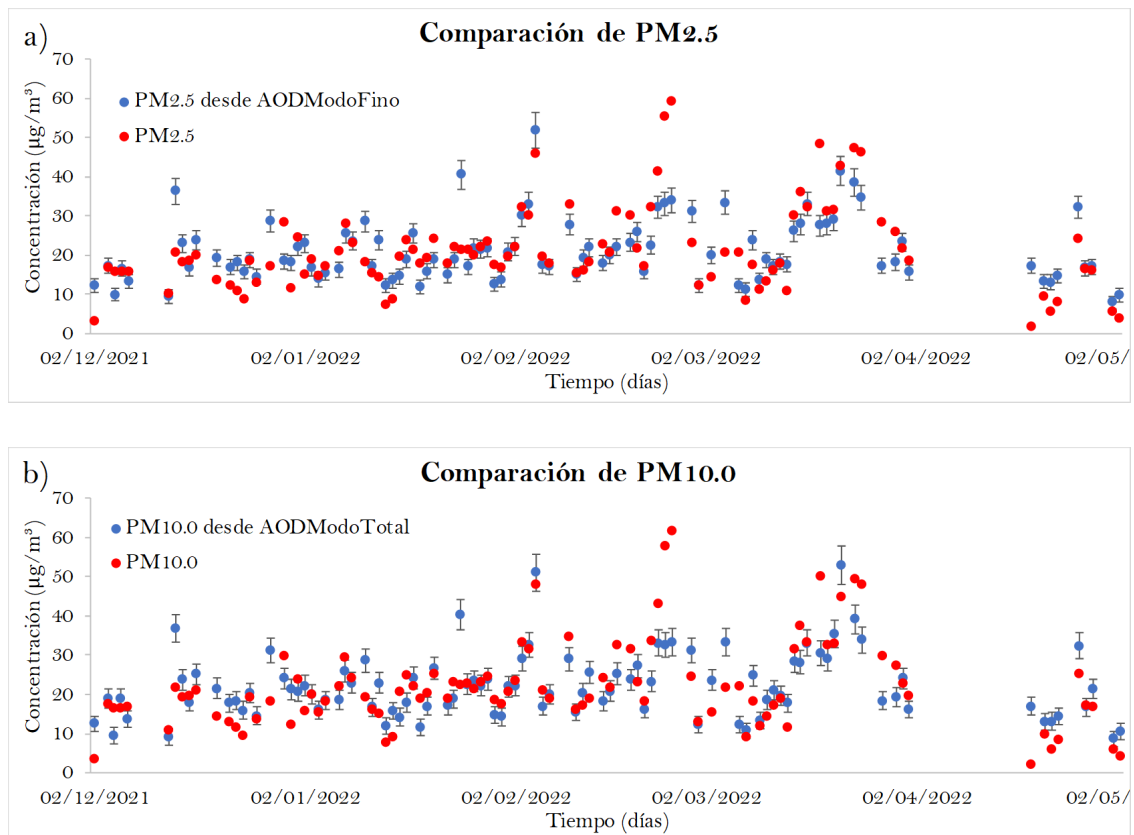


Figura 6: Comparación: a) $PM_{2.5}$ medido con el Sensor PA y $PM_{2.5}$ calculado a partir del $AOD_{ModoFino}(500nm)$ y b) $PM_{10.0}$ medido con el Sensor PA y $PM_{10.0}$ calculado a partir del $AOD_{ModoTotal}(500nm)$. Fuente: Elaboración propia.

$PM_{2.5}$ y del 16 % para $PM_{10.0}$. Cabe destacar que ninguno de los errores supera el 100 %, dado que ningún valor fue inferior a $5,62\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ o menor a $6,06\mu g/m^3$ para $PM_{10.0}$.

Estos resultados indican la validez del método para generar datos de material particulado a partir de los datos experimentales de AOD proporcionados por la técnica de fotometría solar, aunque es necesario considerar que los errores porcentuales aumentan a bajos niveles de concentración y que la humedad, la temperatura y el agua precipitable pueden tener efectos significativos.

5.4. Influencias en el ajuste lineal

De acuerdo con Seinfeld y Pandis (2006), la concentración de PM y el AOD están influenciados por diversas condiciones meteorológicas y variables térmicas, como los componentes del aire, la humedad, la temperatura, la presión, el agua precipitable y los vientos, entre otros. Por lo tanto, su correlación también puede verse afectada, como señalan León *et al.* (2021) y Xin *et al.* (2016) en sus investigaciones, específicamente por la precipitación y la humedad.

Para llevar a cabo un análisis exhaustivo de los efectos de las variables meteorológicas y térmicas sobre la correlación de las regresiones lineales desarrolladas, se incorporan las medidas de temperatura, humedad relativa y agua precipitable, las cuales fueron simultáneamente registradas con el PM y el AOD mediante el fotómetro solar y el sensor PA-II. Con este propósito, se realizó una regresión lineal del PM en función del AOD para diferentes intervalos de temperatura, humedad relativa y agua precipitable, con el objetivo de examinar las variaciones en las pendientes, los interceptos y la asociación de estos parámetros.

En la Tabla 2 se observa que el valor de la pendiente aumenta con la temperatura hasta llegar a 28 °C. Por otro lado, la asociación de PM y AOD es positiva en cada regresión lineal, aunque es menor en los intervalos de temperatura superiores e inferiores.

En contraste, la Tabla 3 muestra que las pendientes incrementan a medida que la humedad relativa disminuye hasta alcanzar el 45 %. Además, al igual que con la temperatura, la asociación entre el PM y el AOD es positiva; sin embargo, es menor en los rangos extremos, siendo más débil cuando la humedad relativa es alta.

Tabla 2: Regresión lineal de PM en función de AOD para diferentes intervalos de temperatura

Temperatura	Regresión lineal	Pendiente	Intercepto	R ²	Regresión lineal	Pendiente	Intercepto	R ²
28°C-32°C	PM _{2.5} vs. AOD _{ModoFino}	41,96	8,97	0,37	PM _{10.0} vs. AOD _{ModoTotal}	45,21	6,93	0,44
27°C-28°C		103,55	-1,86	0,61		110,88	-8,17	0,59
26°C-27°C		97,29	1,86	0,57		76,28	3,00	0,51
25°C-26°C		64,335	6,56	0,76		67,38	4,03	0,77
24°C-25°C		16,47	16,96	0,11		18,49	16,82	0,13

Tabla 3: Regresión lineal de PM en función de AOD para diferentes intervalos de humedad relativa

Humedad	Regresión lineal	Pendiente	Intercepto	R ²	Regresión lineal	Pendiente	Intercepto	R ²
39%-45%	PM _{2.5} vs. AOD _{ModoFino}	45,37	7,99	0,46	PM _{10.0} vs. AOD _{ModoTotal}	48,55	5,92	0,47
45%-48%		88,58	3,47	0,54		89,26	-0,51	0,51
48%-53%		88,03	0,65	0,61		83,50	-1,64	0,59
53%-58%		73,12	7,85	0,55		66,86	6,74	0,55
58%-65%		25,14	16,16	0,22		26,83	15,67	0,24

Tabla 4: Regresión lineal de PM en función de AOD para diferentes intervalos de agua precipitable

Agua precipitable	Regresión lineal	Pendiente	Intercepto	R ²	Regresión lineal	Pendiente	Intercepto	R ²
1,5cm-2,1cm	PM _{2.5} vs. AOD _{ModoFino}	58,60	8,13	0,64	PM _{10.0} vs. AOD _{ModoTotal}	55,57	6,95	0,57
2,1cm-2,4cm		128,42	-4,50	0,74		133,73	-9,81	0,75
2,4cm-2,6cm		73,61	5,92	0,26		81,22	0,38	0,32
2,6cm-2,8cm		63,22	5,90	0,654		68,01	2,20	0,69
2,8cm-3,1cm		69,64	4,62	0,55		58,93	4,44	0,56

Asimismo, la Tabla 4 también revela que las pendientes aumentan cuando el agua precipitable disminuye, esto sucede hasta 2,1 cm. Al igual que en los casos anteriores, la asociación entre el PM y el AOD es positiva; sin embargo, a diferencia de los otros casos, se observa que la relación es débil en la zona intermedia y se fortalece en los tramos de 2,1 cm a 2,4 cm y de 2,6 cm a 2,8 cm.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo ha logrado presentar los resultados claves del estudio titulado “Concentración de material particulado en superficie de la zona urbana de Medellín, con base en observaciones de fotómetro solar y sensor de calidad del aire” (Botina, 2023).

Se ha avanzado en la comprensión de la operatividad de dos instrumentos de medida, enfocándose en la fotometría solar y la difracción láser, en relación con las mediciones de las propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos en Medellín, con el objetivo de relacionar y entender las mediciones de la concentración de PM y AOD, así como las limitaciones y problemas que pueden surgir al medir.

Este estudio analiza principalmente las variables: PM y AOD obtenidas mediante distintas técnicas y equipos: el Sensor PA-II para PM y el Fotómetro solar para AOD. Ambas variables se midieron simultáneamente bajo las mismas condiciones meteorológicas lo que garantiza una comparabilidad adecuada. Dado que estas mediciones se realizaron a cielo abierto, los errores entre los datos de PM calculados a partir del AOD y los

PM medidos directamente a nivel del suelo se consideran aceptables. Por lo tanto, la información obtenida es valiosa para interpretar el AOD en términos de PM, especialmente en situaciones donde no se dispone de un sensor de PM en superficie.

Este trabajo demuestra exitosamente que la regresión lineal generalizada es un método eficaz para asociar el AOD con el PM. A pesar de la variabilidad en los parámetros térmicos y meteorológicos, se logró un seguimiento y análisis adecuado, permitiendo obtener estimaciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} con márgenes de error del 15 % y 16 %, respectivamente.

Se observó que las variables meteorológicas influyen significativamente en la correlación entre PM y AOD. Específicamente, la relación entre estas dos variables aumenta hasta temperaturas de 26°C-27 °C, después de las cuales comienza a disminuir. De manera análoga, la asociación crece con la humedad relativa hasta alcanzar entre 48 % y 53 %, para luego decrecer. En cuanto al agua precipitable, la asociación muestra una variabilidad notable, siendo más débil en el rango de 2,4 cm a 2,5 cm.

Adicionalmente, se concluye que un ambiente seco afecta la correlación entre AOD y PM. Los coeficientes de determinación muestran que la asociación es débil a moderada con baja humedad (39 %-45 %), pero se vuelve moderadamente fuerte con precipitaciones menores (1,5 cm-2,1 cm). Sin embargo, la correlación se vuelve extremadamente débil cuando la humedad es alta (58 %-65 %) y cuando el agua precipitable está en un intervalo intermedio (2,4 cm- 2,6 cm).

Referencias

AERONET(2019). AEROSOL OPTICAL DEPTH - Direct Sun Measurements. Obtenido de https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/aerosols.html

AERONET. (2024). Interfaz de visualización de datos AERONET - Disponibilidad de datos AERONET. Obtenido de https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/bamgomas_maps_index_v3?long1=-180&long2=180&lat1=-90&lat2=90&multiplier=2&what_map=4&formatter=0&level=1&place_code=10&data_type=aeronet&nachal=1

AERONET. (s.f.). AERONET Inversion Products. Obtenido de chrome-extension: //efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/Documents/inversions.pdf

Alegría Campo, D. L. (2015). Propiedades microfísicas de los aerosoles troposféricos derivadas de medidas de fotómetro solar y Lidar en el Valle de Aburrá. [Tesis de maestría, Univesidad Nacional de Colombia-Sede Medellín]. Obtenido de Repositorio Universidad Nacional de Colombia: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54614>

- Beckman Coulter. (s.f.). Teorías de la difracción de Mie y Fraunhofer. Obtenido de <https://www.beckman.es/resources/technologies/laser-diffraction/mie-fraunhofer-theories>
- Botina Tautás, A. D. (2023). Concentración de material particulado en superficie de la zona urbana de Medellín, con base en observaciones de fotómetro solar y sensor de calidad del aire. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Medellín.
- Chudnovsky, A. A., Lee, H. J., Kostinski, A., Kotlov, T. & Koutrakis, P. (2012). Prediction of daily fine particulate matter concentrations using aerosoloptical depth retrievals from the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES). *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(9), 1022–1031. doi:10.1080/10962247.2012.695321
- Dybwad, A. (2022). ¿Qué es el material particulado (PM)? Obtenido de Purple Air: <https://www2.purpleair.com/blogs/blog-home/what-is-particulate-matter-pm>
- Ersoy, O. (2007). Diffraction, Fourier optics and imaging. Canada: Jhon Wiley & Sons.
- Gante, C. D. (2014). Generación y comparación de patrones de difracción de aberturas poligonales e hipocicloides. [Tesis de pregrado, Benemérita Universidad Autónoma De Puebla]. Obtenido de Facultad de Ciencias Físico Matemáticas: <https://www.fcfm.buap.mx/assets/docs/docencia/tesis/fisica/2014/DeGanteGonzalezCesar.pdf>
- Giles, D., Sinyuk, A., Sorokin, M., Schafer, J., Smirnov, A., Slutsker, I., . . . Lyapustin, A. (2019). Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database - automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, (12), 169-209. Obtenido de <https://doi.org/10.5194/amt-12-169-2019>
- IDEAM. (2021). Boletín de calidad del aire del IDEAM. Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023897/BOL3_CALIDAD_AIRE.pdf
- Léon, J.-F., Akpo, A. B., Bedou, M., Djossou, J., Bodjrenou, M., Yoboué, V., & Liousse, C. (2021). $PM_{2.5}$ surface concentrations in southern West African urban areas based on sun photometer and satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(3), 1815-1834. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-21-1815-2021>
- Liou, K. (2002). An introduction to atmospheric radiation (2 ed.). USA: Elsevier Science.
- Malvern Panalytical. (2016). Difracción láser. Obtenido de <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/light-scattering/laser-diffraction>
- Molina, P. (2013). Simulación numérica de un problema de contaminación atmosférica. Madrid, [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Obtenido de Archivo Digital UPM: <https://oa.upm.es/30472/>

- Nisperuza, D. J. (2015). *Propiedades Ópticas de los Aerosoles Atmosféricos en la Región Andina Colombiana Mediante Análisis de Mediciones Remotas: LIDAR, Fotométricas y Satelitales*. Medellín, [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. Obtenido de Repositorio Universidad Nacional de Colombia: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/53803>
- Purple Air. (2022). *Our technology*. Obtenido de <https://www2.purpleair.com/pages/technology>
- Purple Air. (s.f.). *PurpleAir Classic Air Quality Monitor*. Obtenido de <https://www2.purpleair.com/products/purpleair-pa-ii?variant=40067691708513>
- Purple Air (2024). *Real-Time Interactive Map by PurpleAir*. Obtenido de Purple Air: <https://map.purpleair.com/air-quality-standards-us-epa-aqi?opt=%2F1%2F1p%2Fa10%2Fp604800%2Fc0#1/52.4/-82.2>
- Redmond, H., Kathy, D., & Jhonathan, T. (2010). Light scattering and absorption by wind blown dust: Theory, measurement, and recent data. *Aeolian Research*, 2(1), 5-26.
- Rocadenbosch, F. (1996). *LIDAR sensing of the atmosphere: Receiver design an inversion algorithms for an elastic system*. Barcelona, [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña]. Obtenido de Repositorio Universidad Politécnica de Cataluña: <https://www.tesisenred.net/handle/10803/6909#page=1>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Hoboken, Nueva Jersey: Wiley-Interscience.
- Shimadzu. (s.f.). *Particle Size Distribution Calculation Method*. Obtenido de Shimadzu: <https://www.shimadzu.com/an/service-support/technical-support/analysis-basics/lesson22.html>
- Silva, F. D. (2011). *Validação dos dados do satélite CALIPSO utilizando um sistema lidar de retroespalhamento elástico e o fotômetro solar da rede AERONET*. São Paulo: [Tesis doctoral, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares]. Obtenido de Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-28092011-103209/pt-br.php>
- Smith, F. (1978). *Atmospheric propagation of radiation (Vol. 2)*. Michigan: Infrared Information Analysis Center.
- SYMPATEC. (2016). *Difracción láser*. Obtenido de <https://www.sympatec.com/en/particle-measurement/glossary/laser-diffraction/>
- Vargas, J. (2007). *Métodos numéricos de inversión en el problema de estimación de tamaño de partículas a partir de la difracción láser*. [Tesis doctoral, Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica]. Obtenido de INAOE: <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/669>

- Videla, F. (2011). Desarrollo de técnicas de espectroscopía de scattering óptico y de resonancia plasmónica para la determinación de tamaño de micro y nanopartículas . [Tesis doctoral, Universidad Nacional de la Plata].
- Wallace, J. & Hobbs, P. (2006). Atmospheric scienc: an introductory survey (Segunda ed., Vol. 93). Whashington: Elsevier.
- Weichenthal, S., Hatzopoulou, M., & Goldberg, M. S. (2014). Exposure to traffic-related air pollution during. *Part Fibre Toxicol*, 11(**70**). doi:<https://doi.org/10.1186/s12989-014-0070-4>
- Xin , J., Gong, C., Liu, Z., Cong, Z., Gao, W., Song, T., . . . Wang, Y. (2016). The observation-based relationships between $PM_{2.5}$ and AOD over China. *East Asian Study of Tropospheric Aerosols and Impact on Cloud and Precipitation*, 121(**18**), 10,701-10,716. doi:<https://doi.org/10.1002/2015JD024655>
- Young, D., Garza , M., Cantú, M., & Pérez, P. (2013). Factores de eficiencia definidos por dispersión de Mie ante partículas y factores ambientales. *Revista Mexicana de Física*, 59(**1**), 69-76.