


Uso de imágenes satelitales MODIS-MAIAC (AOD) como indicadores cualitativos de la concentración de material particulado (PM_{2,5}) en la ciudad de Bogotá*

Juan Mauricio García-Delgadillo + 

Resumen

El material particulado es el contaminante más relacionado con enfermedades respiratorias y cardiacas del planeta. En Colombia es frecuentemente monitoreado como concentración de PM_{2,5} con estaciones de calidad del aire, que son administradas por organizaciones gubernamentales. Como complemento al monitoreo, en algunos países, se ha popularizado recientemente el uso de imágenes satelitales de AOD (Aerosol Optical Depth) para estimar PM_{2,5}; sin embargo, para Colombia, esta alternativa no ha sido explorada. El presente trabajo busca valorar el potencial que tiene el uso de imágenes MODIS-MAIAC como indicador cualitativo para PM_{2,5} con datos de dos fechas en un día laboral común y de baja movilidad asociado a la cuarentena de la Alcaldía de Bogotá por el Covid-19. Para los datos de las dos fechas se encontraron correlaciones entre el AOD y el PM_{2,5} de 0,60 y de 0,62. Se realizaron mapas de interpolación con los datos para PM_{2,5}, los cuales dieron resultados aceptables.

Palabras clave: AOD, imágenes satelitales, material particulado 2,5, MODIS-MAIAC, profundidad óptica de aerosol.

Ideas destacadas: artículo de investigación que revisa el uso potencial que tienen las imágenes MODIS-MAIAC con medidas de profundidad óptica de aerosoles como indicador cualitativo para PM_{2,5} con datos de dos fechas: en un día normal y en un día de baja movilidad asociado a la cuarentena de la Alcaldía de Bogotá por el Covid-19.



RECIBIDO: 13 DE MAYO DE 2020. | EVALUADO: 20 DE MAYO DE 2020. | ACEPTADO: 31 DE AGOSTO DE 2021.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

García-Delgadillo, Juan Mauricio. 2022. "Uso de imágenes satelitales MODIS-MAIAC (AOD) como indicadores cualitativos de la concentración de material particulado (PM_{2,5}) en la ciudad de Bogotá." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 31 (1): 211-221. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n1.87247>

* Proyecto financiado por el programa de Ingeniería Ambiental-Universidad El Bosque-Grupo Agua, salud y ambiente.

+ Universidad El Bosque, Bogotá - Colombia. ✉ jgarcia@unbosque.edu.co - ORCID: 0000-0001-7117-3302.

✉ Correspondencia: Juan Mauricio García-Delgadillo, carrera 9 #131a-20, Bogotá, Colombia

Use of MODIS-MAIAC (AOD) Satellite Images as Qualitative Indicators of the Concentration of Particulate Matter $PM_{2.5}$ in Bogota City

Abstract

Particulate matter is the most-related contaminant to respiratory and cardiac diseases in the planet. In Colombia, it is frequently monitored as concentration of $PM_{2.5}$ with air quality stations, that are run by government organizations. In addition to monitoring in some countries, the use of satellite images with AOD (Aerosol Optical Depth) has recently become popular to estimate $PM_{2.5}$; however, in Colombia, this alternative has not been explored yet. This research seeks to assess the potential use of MODIS-MAIAC images as a qualitative indicator for $PM_{2.5}$ with data of two dates on a normal day and low mobility associated to the quarantine of the Bogota mayor's office by Covid-19. For the data of the two dates, correlations were found between the AOD and the $PM_{2.5}$ of 0.60 and 0.62. Interpolation maps were made with the data for $PM_{2.5}$, which gave acceptable results.

Keywords: AOD, satellite images, particulate matter 2,5, MODIS-MAIAC, Aerosol Optical Depth.

Main ideas: Research article that reviews the potential use of MODIS-MAIAC images with measurements of aerosol optical depth as a qualitative indicator for $PM_{2.5}$ with data from two dates on a normal day and low mobility associated with the Covid-19 quarantine enacted by Bogota City Hall.

Uso de imagens de satélite MODIS-MAIAC (AOD) como indicadores qualitativos da concentração de material particulado ($PM_{2.5}$) na cidade de Bogotá

Resumo

O material particulado é o poluente mais relacionado às doenças respiratórias e cardíacas do planeta. Na Colômbia, é frequentemente monitorado como uma concentração de $PM_{2.5}$ com estações de qualidade do ar, administradas por organizações governamentais. Como complemento ao monitoramento em alguns países, o uso de imagens de satélite de AOD (Aerosol Optical Depth) para estimar $PM_{2.5}$ recentemente se tornou popular; no entanto, para a Colômbia, essa alternativa não foi explorada. Este trabalho busca avaliar o potencial do uso de imagens MODIS-MAIAC como um indicador qualitativo para $PM_{2.5}$ com dados de duas datas em um dia normal e com baixa mobilidade associada à quarentena da Prefeitura de Bogotá pelo Covid-19. Para os dados das duas datas, foram encontradas correlações entre o AOD e o $PM_{2.5}$ de 0,60 e 0,62. Mapas de interpolação foram feitos com os dados do $PM_{2.5}$, que deram resultados aceitáveis.

Palavras-chave: AOD, imagens de satélite, material particulado 2,5, MODIS-MAIAC, profundidade óptica de aerossóis.

Ideias destacadas: artigo de pesquisa que analisa o uso potencial de imagens MODIS-MAIAC com medições ópticas de profundidade de aerossóis como um indicador qualitativo para $PM_{2.5}$ com dados de duas datas em um dia normal e baixa mobilidade associada à quarentena da Prefeitura de Bogotá por Covid-19.

Introducción

En Colombia el material particulado (PM) es el tipo de contaminación atmosférica que más se monitorea (IDEAM 2012), debido a su relación con la mayoría de enfermedades respiratorias y cardíacas del planeta (Anderson, Thundiyil y Stolbach 2011; Magnani et ál. 2016). En varias ciudades de Colombia como Cali (De la Pava, Salguero y Fernández 2008), Medellín (Bedoya y Martínez 2008), Envigado (Londoño, Correa y Palacio 2011) o Bogotá (Gaitan et ál. 2007; Rincón Pérez 2015), la calidad del aire es un tema de salud bastante preocupante. El PM es un contaminante muy diverso en su composición, principalmente hollín de la combustión de diésel, polvo de vías, de agricultura y de procesos productivos (Fang et ál. 2003). Por esto, su concentración se expresa según tamaño de partícula; en PM menor a 2,5 ($PM_{2,5}$) y 10 (PM_{10}) (entre 2,5 y 10) (WHO 2005).

Como medida para manejar la contaminación del aire, Colombia ha invertido en mejorar las redes de calidad del aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial 2010), por lo que el país cuenta actualmente con 166 estaciones fijas y 38 indicativas para un total de 204 (IDEAM 2018), de las cuales Bogotá trabaja con 13 fijas y 1 móvil y publica datos espaciales de interpolación para PM_{10} , PST, $PM_{2,5}$, SO_2 , NO_2 , CO y O_3 de forma continua (Secretaría Distrital de Ambiente 2020). Aunque la escala temporal del sistema es recurrente (reporta cada hora) (Secretaría Distrital de Ambiente 2020) es valioso contar con información espacial adicional, especialmente para PM.

La *National Aeronautics and Space Administration* — en adelante, NASA—, a través de los satélites Terra y Aqua ha monitoreado, por más de veinte años, al planeta (NASA 2020b); dentro de las imágenes que producen se encuentran las MODIS, (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (NASA 2020c) con resolución temporal de 24 horas y una resolución espacial mejorada a 1 km con la implementación de MAIAC (*Multi-angle Implementation of Atmospheric Correction*) (NASA 2020d). Las imágenes pueden capturar medidas de aerosoles a partir de reflexión y absorción de la luz visible e infrarroja de la atmósfera, con lo que se desarrollan imágenes de profundidad óptica de aerosoles (AOD), representadas en píxeles que tienen valores entre 0 y 1, en las que 1 representa la mayor concentración de partículas (NASA 2020a).

Recientemente se ha popularizado el uso de imágenes satelitales de AOD (*Aerosol Optical Depth*) como variable que permite estimar $PM_{2,5}$ (Jung, Hwanga, y Chen 2018;

Zang et ál. 2018; Nabavi, Haimberger y Abbasi 2019; Ferrero et ál.; 2019; Sathe et ál. 2019; Park et ál. 2020) y, en algunos casos, PM_{10} (Ferrero et ál. 2019), sin embargo, se ha reportado que en algunos casos la relación depende de múltiples factores y no se puede identificar una asociación entre los datos satelitales y los de los laboratorios de aire (Zheng et ál. 2017).

En general, los estudios realizados globalmente tratan de establecer inicialmente si existe una correlación entre los datos de PM tomados en terreno y datos de AOD satelitales puntuales. En algunos estudios para $PM_{2,5}$ se reportan coeficientes de Pearson para aglomeración de ciudades (Chengyu y Beijing-Tianjin-Hebei) de 0,42 (Yang et ál. 2019); para ciudades como Nanjing de 0,54 (Kang et ál. 2020), Teherán de 0,6 (Nabavi, Haimberger y Abbasi 2019) y de 0,65 para Milán (Ferrero et ál. 2019). Para PM_{10} hay estudios con coeficientes de 0,2 a 0,66 (Ghotbi, Sotoudeheian y Arhami 2016; Ferrero et ál. 2019; Kang 2020). En la ciudad de Bogotá se han desarrollado Modelos Lineales Generalizados que a partir de respuestas espectrales de imágenes Landsat 5 y 8 intentan predecir PM_{10} ; sin embargo, concluyen en la necesidad de aumentar los estudios con otras variables predictoras (Ramírez 2017).

El presente trabajo busca explorar el potencial que tienen las imágenes satelitales MODIS-MAIAC (AOD) como indicadores cualitativos de la concentración de material particulado $PM_{2,5}$ en la ciudad de Bogotá, identificando si hay alguna correlación entre los datos de las imágenes y las estaciones de monitoreo de calidad del aire en dos momentos de actividad contrastante. Además, se desea comparar datos espacialmente explícitos con interpolación por distancia inversa ponderada (IDW). Esta investigación puede abrir el campo a estudios con mayor número de muestras que permitan identificar modelos matemáticos que faciliten la estimación de contaminantes sin necesidad de medirlos en campo.

Métodos

Área de estudio

Bogotá es la capital de Colombia, cuenta con una amplia zona rural, pero solo la porción urbana de la ciudad presenta estaciones de monitoreo de calidad del aire, cubriendo un área de 379.72 km² de extensión que representa un 23,2 % del territorio (Alcaldía de Bogotá 2019). Se divide administrativamente en veinte localidades: Chapinero, Usaquén, Santa Fe, San Cristóbal, Tunjuelito, Bosa, Kennedy, Fontibón, Engativá, Suba, Rafael Uribe

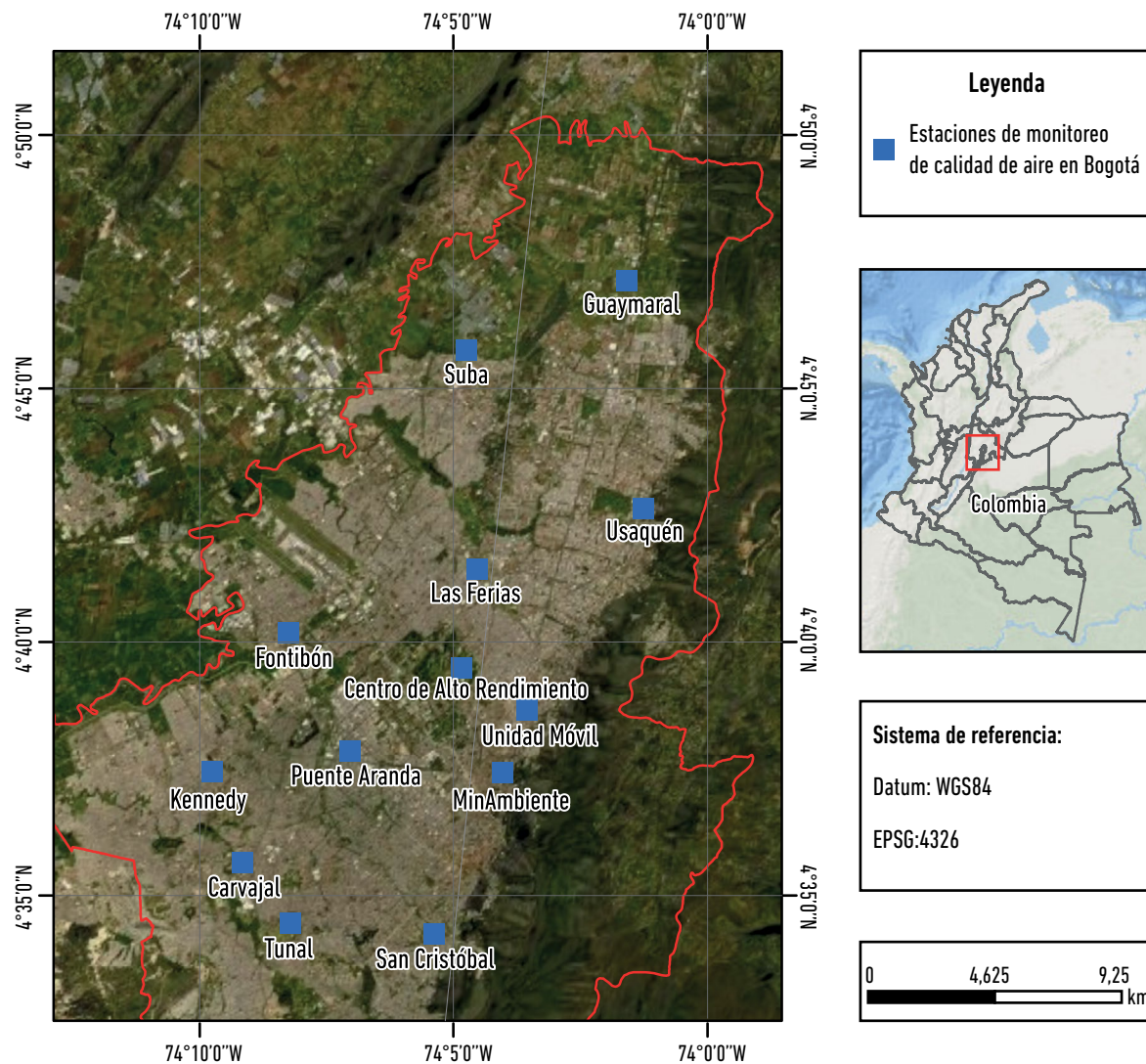


Figura 1. Área de estudio. Bogotá y red de calidad.

Datos: Esri y ubicación estaciones calidad de la página web de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (2020).

Nota: ubicación de la red de calidad del aire en Bogotá.

Uribe, Barrios Unidos, Teusaquillo, Los Mártires, Usme, Antonio Nariño, Puente Aranda, La Candelaria, Ciudad Bolívar y Sumapaz. Debido a la distribución de las estaciones solo se evaluó información de la zona urbana (Figura 1).

Obtención y manejo de datos.

De acuerdo con la disponibilidad de imágenes satelitales se descargaron datos de $PM_{2,5}$, de las trece estaciones de calidad del aire de la ciudad en la Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá —en adelante, RMCAB— (RMCAB 2020) (véase figura 1) correspondientes a un día de actividad normal de la ciudad y uno en el cual la movilidad se encontraba restringida por

la cuarentena preventiva ante el Covid-19 (Tabla 1). Para la misma fecha y hora se descargaron de la página web de la *United States Geological Survey* (USGS) (USGS 2020) imágenes satelitales MODIS-MAIAC MCD19A2 Versión 6 de 1 km de resolución espacial (Tabla 1). Cabe aclarar que la elección de imágenes se realizó después de revisar diariamente (durante marzo y algunos días abril) la disponibilidad de imágenes que cumplieran con los siguientes requisitos: ser temporalmente cercanas (esto para controlar diferencias asociadas a estacionalidad climática), que presenten datos completos de la ciudad y que hayan sido tomadas antes y después de las medidas de contención de la Alcaldía de Bogotá.

A partir de una capa de puntos de la RMCAB y las imágenes MODIS, se realizó la extracción de datos con el comando “extraer por puntos” de ArcMAP 10.4, obteniendo datos puntuales de AOD y PM_{2,5} correspondientes a cada estación.

Tabla 1. Imágenes satelitales utilizadas

Misión	Sensor	Fecha y hora de captura
Terra-Aqua	MODIS-MAIAC	5 de abril de 2020 15:00
Terra-Aqua	MODIS-MAIAC	3 de marzo de 2020 15:00

Fuente: imágenes satelitales USGS (2020).

En el programa estadístico Infostat (InfoStat 2017) se realizó una prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para los datos obtenidos y se confirmó normalidad en la distribución (Tabla 2), posterior a esto se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson para cada día estudiado.

Cabe aclarar que los datos de la RMCAB son puntuales, por lo cual los reportes del portal de la Secretaría Distrital de Ambiente surgen de una interpolación IDW (Secretaría Distrital de Ambiente 2019), la cual asigna valores a las celdas, partiendo de datos puntuales con valores conocidos y los pondera en una función inversa con su distancia (Watson y Philip 1985). Al contar con datos puntuales de la red y para utilizar información validada se realizó interpolación IDW con ArcMAP 10.4 de AOD y PM_{2,5} (Figura 2 y 3). Como criterios generales, para las dos fechas de estudio se seleccionaron las potencias y el número de sectores que menor error representaron (Anexo 1). la escala de valores numéricos se realizó con el método de clasificación natural de Jenks en las dos cartografías, sin embargo, para facilitar la comparación del comportamiento entre fechas, se ejecutó una clasificación del 5 de abril con intervalos similares a los del 3 de marzo (Figura 4). Estas imágenes permitieron comparar de forma cualitativa la representación de dos momentos de actividad en Bogotá.

Resultados y discusión

Para los datos de PM_{2,5} de las estaciones y los de AOD de las imágenes MODIS se halló normalidad en la distribución a partir de la prueba de Shapiro-Wilks (Tabla 2):

Tabla 2. Prueba Shapiro-Wilks para los datos recolectados

Variable	Shapiro-Wilks 3 de marzo de 2020		Shapiro-Wilks 5 de abril de 2020	
	n	P	n	P
AOD	13	0,06	13	0,08
PM _{2,5}	13	0,38	13	0,17

Fuente: imágenes satelitales USGS y Secretaría de Medio Ambiente de Bogotá (2020).

En los datos de las dos fechas (3 de marzo-5 de abril) se encontró una correlación de Pearson entre el AOD y el PM_{2,5} de 0,60 y 0,62 respectivamente (Tabla 3), lo cual coincide con los valores observados para ciudades como Nanjing de 0,54 (Kang 2020), Beijing de 0,58 (Kong et al. 2016) Teherán de 0,6 (Nabavi, Haimberger y Abbasi 2019) y para Milán de 0,65 (Ferrero et al. 2019). En zonas más amplias los coeficientes pueden bajar, como en aglomeraciones de ciudades (Chengyu y Beijing-Tianjin-Hebei) de 0,42 (Yang et al. 2019) o regiones como el este de los Estados Unidos de 0,52 (Goldberg et al. 2019).

Tabla 3. Coeficiente de correlación de Pearson para los datos recolectados

	Coeficiente Correlación de Pearson datos 3 de marzo de 2020		Coeficiente Correlación de Pearson datos 5 de abril de 2020	
	PM _{2,5}	P	PM _{2,5}	P
AOD	0,602	0,03	0,623	0,021

Fuente: imágenes satelitales USGS y Secretaría de Medio Ambiente de Bogotá (2020).

En las interpolaciones del 3 de marzo con PM_{2,5} y AOD se puede ver cómo el norte presenta menos contaminación que la zona centro y sur de la ciudad, lo cual es un comportamiento registrado desde 2007 (Gaitán, Cancino y Behrentz 2007); de igual manera, en las dos imágenes el suroccidente de la ciudad se ve más afectado en la zona centro, Suroccidental y Sur-centro, allí la contaminación se puede considerar en una escala media. Esto representa un resultado bastante aceptable para la interpolación hecha con el AOD en esta fecha como una imagen cualitativa de la contaminación por PM_{2,5} (Figura 2).

En las imágenes del 5 de abril de 2020 se detecta que el norte de la ciudad tiene mayor contaminación por PM_{2,5} y en la zona centro y Suroccidente es media, lo cual concuerda con el AOD (Figura 3). Se observan diferencias en las estaciones Tunal, Unidad Móvil y Usaquén, las cuales representan cambios en los resultados de la interpolación, sin embargo, en la imagen que tiene intervalos comunes a la del 3 de marzo hay una coincidencia mayor (Figura 4), se puede decir que, en general, los resultados son aceptables.

En los mapas con intervalos comunes (Figura 4) se ven los efectos que ha tenido la cuarentena en la contaminación por PM_{2,5} para la ciudad de Bogotá. Entre las dos fechas se presentó una inversión en el comportamiento de la contaminación, en donde en el aislamiento preventivo el norte se ve más afectado que el centro y el sur; contrario a lo que es común en un día hábil (3

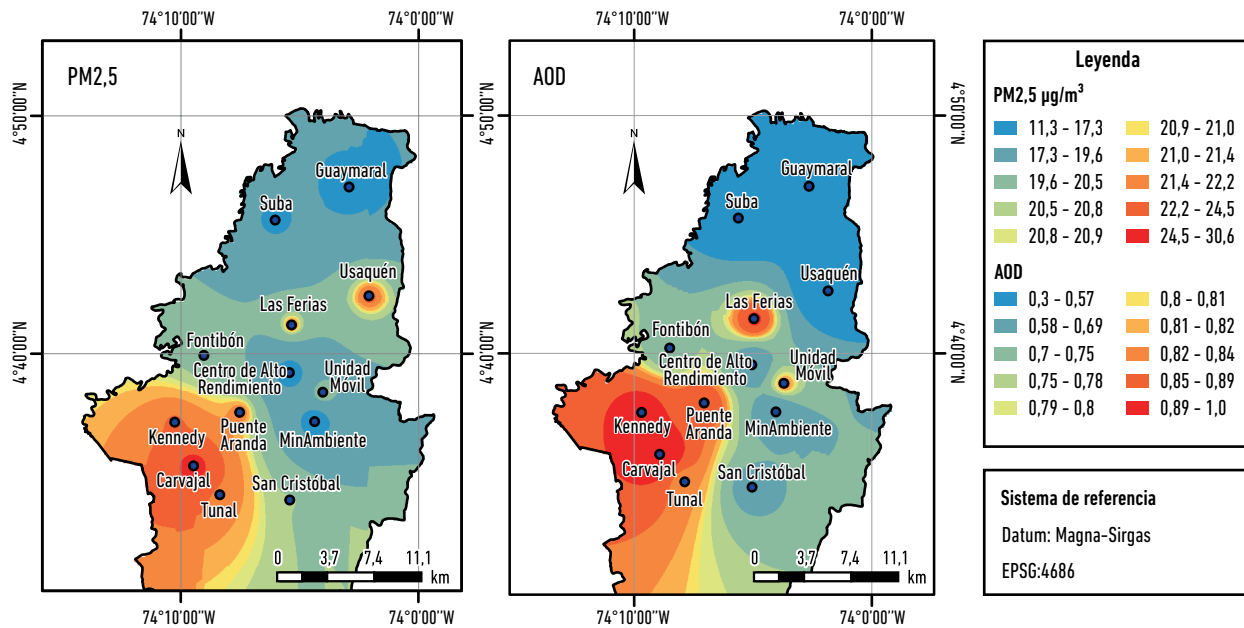


Figura 2. Mapa de interpolación de $PM_{2,5}$ y AOD para el 3 de marzo de 2020.

Datos: imágenes satelitales USGS y Secretaría de Medio Ambiente de Bogotá (2020).

Nota: para el 3 de marzo se ven comportamientos muy similares entre el mapa hecho con AOD y los datos de las estaciones de la Secretaría de Medio Ambiente de Bogotá.

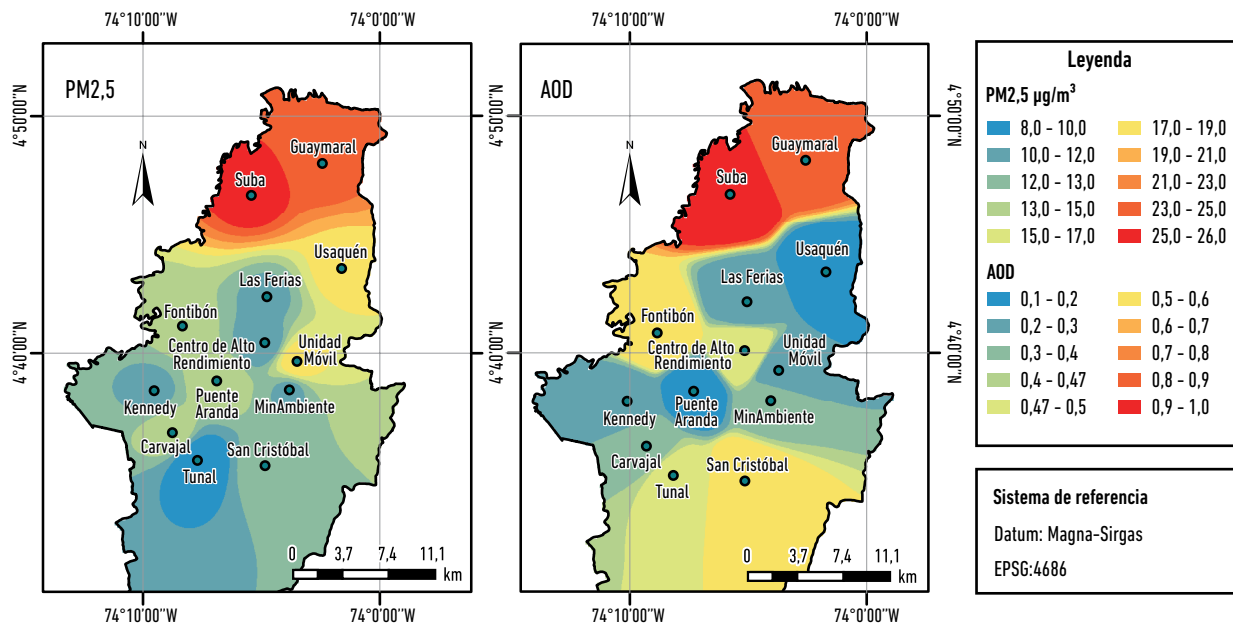
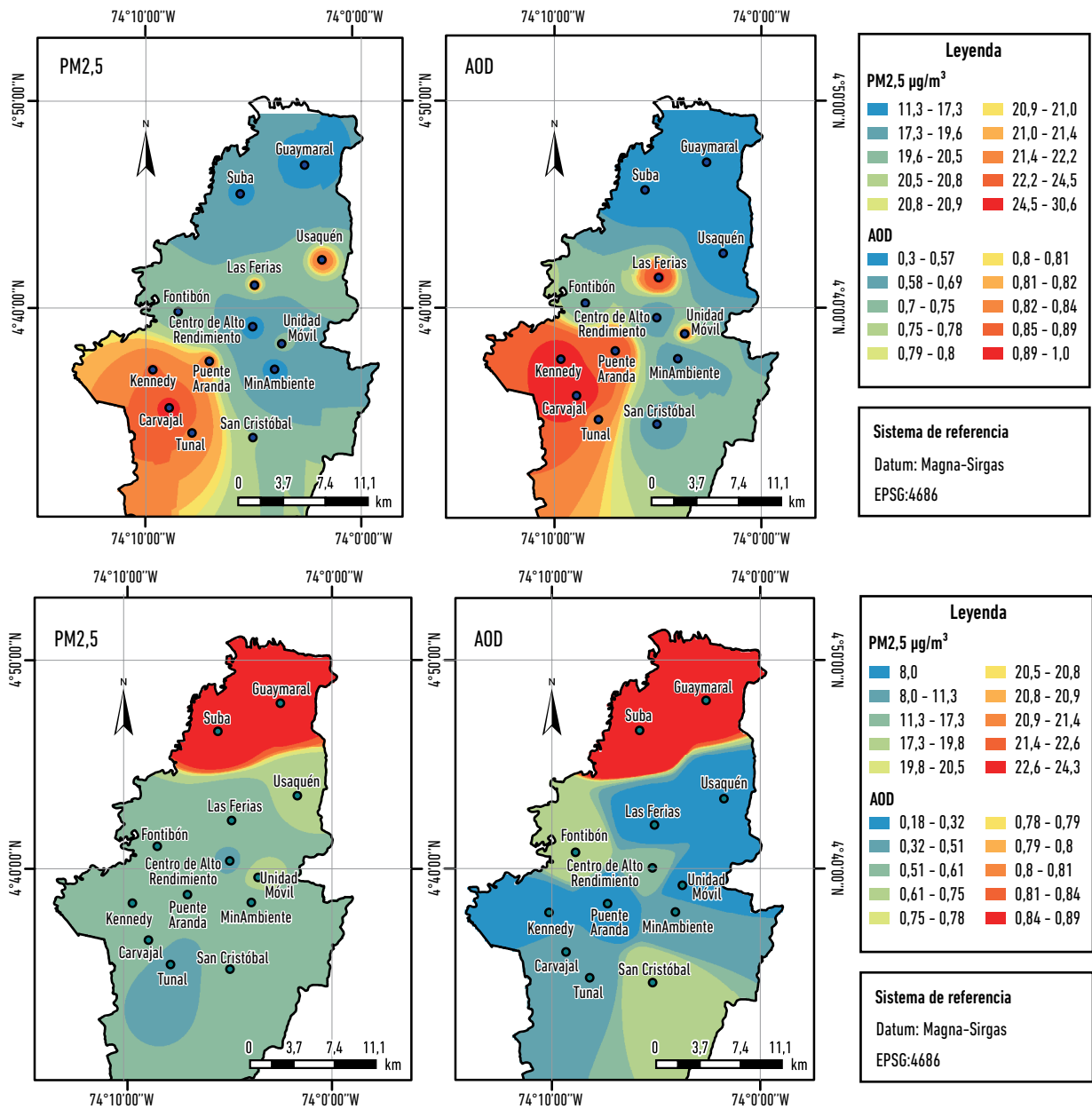


Figura 3. Mapa de interpolación de $PM_{2,5}$ y AOD para el 5 de abril de 2020.

Datos: imágenes satelitales USGS y Secretaría de Medio Ambiente de Bogotá (2020).

Nota: para el 5 de abril se ven comportamientos muy similares entre el mapa hecho con AOD y los datos de las estaciones de la Secretaría de Medio Ambiente de Bogotá.



de marzo). Aunque no existen estudios detallados que expliquen esto, posiblemente debido a la dificultad para detectar tendencias en la dirección de los vientos en la ciudad (Hernández González 2016), para el mes de abril la Secretaría de Ambiente de Bogotá informó que la calidad del aire en la ciudad se ha visto seriamente afectada por incendios en los llanos orientales y Venezuela

(Sabogal 2020). Se puede especular que el material de combustión proveniente del este ingrese a la ciudad por la zona que menos altitud tiene, la cual se encuentra al norte de la ciudad en los barrios Codito y Santa Bárbara. Cabe resaltar que este comportamiento es detectado en la imagen creada con AOD, lo cual muestra sensibilidad para fenómenos particulares (Figura 4).

Conclusiones

Los datos de $PM_{2,5}$ de las estaciones de calidad del aire en las dos fechas contrastantes presentaron correlación con los valores de AOD obtenidos en las imágenes MODIS, lo cual es coherente con estudios realizados en otras ciudades del planeta, y muestra su potencial para ser utilizadas como indicadores cualitativos de contaminación en la ciudad de Bogotá.

Es importante realizar estudios con más datos para tratar de establecer modelos que permitan obtener predicciones y simulaciones de fenómenos de contaminación a partir de imágenes MODIS y que puedan usar otras variables que ayuden a definir un modelo aceptable que dé información cuantitativa o, incluso, que permita hacer predicciones.

Los mapas construidos a partir de AOD y de las estaciones muestran comportamientos muy similares para las dos fechas dando resultados cualitativos bastante aceptables (con un coeficiente de correlación de 0,62). Estas imágenes pueden representar la posibilidad para desarrollar cartografías con datos cualitativos en varios espacios del país que no cuentan con un sistema de monitoreo del aire, lo cual se relaciona con la gobernanza del aire al ser datos gratuitos, independientes y espacialmente explícitos.

Referencias

- Alcaldía de Bogotá. 2019. Todo lo que debes saber sobre Bogotá en 2019. Consultado el 10 de marzo de 2020. <http://www.sancristobal.gov.co/noticias/todo-lo-debes-saber-sobre-bogota-2019>
- Anderson, Jonathan O., Josef G. Thundiyil, y Andrew Stolbach. 2011. "Clearing the Air: A Review of The Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health." *Journal of Medical Toxicology*, no. 8, 166-175. <https://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>
- Bedoya, Julian, y Elkin Martínez 2009. "Calidad del aire en el Valle de Aburrá Antioquia-Colombia." *Dyna* 76 (158): 7-15.
- De la Pava, Elmer, Beatriz Salguero, y Óscar Fernández. 2008. "Modelación matemática de la relación partículas pm_{10} -enfermedades pulmonares en la ciudad de Cali." *Scientia et Technica* 1 (38): 347-352. <https://doi.org/10.22517/23447214.3777>
- Fang, Guor-Cheng, Cheng-Nan Chang, Chia-Chium Chu, Yuh-Shen, Wu, Peter Pi-Cheng Fu, I-Lin Yang, y Ming-Hsiang Chen. 2003. "Characterization of particulate, metallic elements of TSP, $PM_{2,5}$ and $PM_{2,5-10}$ aerosols at a farm sampling site in Taiwan Taichung." *The Science of the Total Environment* 308 (1-3): 157-166. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00648-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00648-4)
- Ferrero L., A. Riccio, B.S. Ferrini, L. D'Angelo, G. Rovelli, M. Casati, F. Angelini, F. Barnaba, G.P. Gobbi, M. Cataldi, y E. Bolzacchini. 2019. "Satellite AOD Conversion into Ground PM_{10} , $PM_{2,5}$ and PM_1 Over the Po Valley (Milan, Italy) Exploiting Information on Aerosol Vertical Profiles, Chemistry, Hygroscopicity and Meteorology." *Atmospheric Pollution Research* 10 (6): 1895-1912. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.08.003>
- Gaitán, Mauricio, Juliana Cancino, y Eduardo Behrentz. 2007. "Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá." *Revista de Ingeniería*, no. 26, 81-92.
- Ghotbi, Saba, Saeed Sotoudeheian, y Mohammad Arhami. 2016. "Estimating Urban Ground-Level PM_{10} Using MODIS 3 km AOD Product and Meteorological Parameters from WRF Model." *Atmospheric Environment* 141: 333-346. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.057>
- Goldberga, Daniel L., Pawan Guptac, Kai Wange, Chinmay Jenae, Yang Zhange, Zifeng Lua, y David G. Streetsa. 2019. "Using Gap-Filled MAIAC AOD and WRF-Chem to Estimate Daily $PM_{2,5}$ Concentrations At 1 km Resolution in The Eastern United States." *Atmospheric Environment* 199: 443-452. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.049>
- Hernández González, Luis Álvaro. 2016. "Caracterización de la Contaminación por material particulado en Bogotá mediante fotometría solar." Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2012. "Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010." Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM. Consultado el 9 de marzo de 2020. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/68521396/5.+Informe+del+estado+de+la+calidad+del+aire+2007-2010.pdf/52d841b0-afdo-4b8e-83e5-444c3d17ed29?version=1.0>
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2018. *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2017*. Bogotá: IDEAM.
- InfoStat. 2017. InfoStat versión 2017. Consultado el 10 de marzo de 2020. <https://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=46>
- Jung, Chau-Ren, Bing-Fang Hwanga, y Wei-Ting Chen. 2018. "Incorporating Long-Term Satellite-Based Aerosol Optical Depth, Localized Land Use Data, and Meteorological Variables To estimate Ground-Level $PM_{2,5}$ Concentrations in Taiwan from 2005 to 2015." *Environmental Pollution* 237: 1000-1010. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.016>
- Kang Na, Farong Deng, Rehana Khan, Kanike Raghavendra Kumar, Kang Hu, Xingna Yu, Xuelian Wang, y Latha Devi.

2020. "Temporal Variations of PM Concentrations, and Its Association with AOD and Meteorology Observed in Nanjing During the Autumn and Winter Seasons of 2014-2017." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 203: 105273. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105273>
- Kong Lingbin, Xin Jinyuan, Zhang Wenyu, y Wang Yuesi. 2016. "The Empirical Correlations Between PM_{2,5}, PM₁₀ and AOD in the Beijing Metropolitan Region and the PM_{2,5}, PM₁₀ Distributions Retrieved by MODIS." *Environmental Pollution* 216: 350-360. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.085>
- Londoño, James, Mauricio Andrés Correa, y Carlos Alberto Palacio. 2011. "Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia." *Revista EIA*, no. 16, 149-162.
- Magnani, Natalia D., Ximena M. Muresan, Giuseppe Belmonte, Franco Cervellati, Claudia Sticozzi, Alessandra Pecorelli, Clelia Miracco, Timoteo Marchini, Pablo Evelson, y Giuseppe Valacchi. 2016. "Skin Damage Mechanisms Related to Air Borne Particulate Matter Exposure." *Toxicological Sciences* 149 (1): 227-236. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv230>
- Nabavi, Seyed Omid, Leopold Haimberger, y Esmail Abbasi. 2019. "Assessing PM_{2,5} Concentrations in Tehran, Iran, From Space Using MAIAC, Deep Blue, and Dark Target AOD and Machine Learning Algorithms." *Atmospheric Pollution Research* 10 (3): 889-903. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.12.017>
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2020a. Aerosol Optical Depth. Consultado el 14 de marzo de 2020. https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MODAL2_M_AER_OD
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2020b. Terra Satellite. Consultado el 14 de marzo de 2020. <https://terra.nasa.gov/>
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2020c. MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Consultado el 14 de marzo de 2020. <https://modis.gsfc.nasa.gov/>
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2020d. MCD19A2V006. Consultado el 12 de marzo de 2020. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd19a2v006/>
- Park Seohui, Junghee Lee, Jungho Im, Chang-Keun Song, Myungje Choi, Kim Jhoon, Seungun Lee, Park Rokjin, Sang-Min Kim, Jongmin Yoon, Dong-Won Lee, y Lindi J. Quackenbush. 2020. "Estimation of Spatially Continuous Daytime Particulate Matter Concentrations Under All Sky Conditions Through the Synergistic Use of Satellite-Based AOD and Numerical Models." *Science of The Total Environment* 713: 136-516. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136516>
- Qianqian, Yang, Yuan Qiangqiang, Yue Linwei, Li Tongwen, Shen Huanfeng, y Zhang Liangpei. 2019. "The Relationships Between PM_{2,5} and Aerosol Optical Depth (AOD) in Mainland China: About and Behind the Spatio-Temporal Variations." *Environmental Pollution* 248: 526-535. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.071>
- Ramírez Gutiérrez, Miguel Ángel. 2017. "Uso de Modelos Lineales Generalizados (MLG) para la interpolación espacial de PM₁₀ utilizando imágenes satelitales Landsat para la ciudad de Bogotá, Colombia." *Perspectiva Geográfica* 22 (2): 105-121. <https://doi.org/10.19053/01233769.5600>
- Rincón Pérez, Mauricio Alexander. 2015. "Simulación regional de contaminantes atmosféricos para la ciudad de Bogotá." Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- RMCAB (Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá). 2020. Datos calidad aire. Consultado el 8 de marzo de 2020. <http://201.245.192.252:81/Report/stationreport>
- Sabogal, Julián. 2020. "Incendios en Llanos Orientales y en Venezuela afectan aire en Bogotá." Caracol Radio. Consultado el 17 de abril de 2020. https://caracol.com.co/emisora/2020/04/17/bogota/1587152623_497066.html
- Sathe Yogesh, Santosh Kulkarni, Pawan Gupta, Akshara Kagnalkar, Sahidul Islam, y Prashant Gargava. 2019. "Application of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aerosol Optical Depth (AOD) and Weather Research Forecasting (WRF) Model Meteorological Data for Assessment of Fine Particulate Matter (PM_{2,5}) Over India." *Atmospheric Pollution Research* 10 (2): 418-434. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.08.016>
- Secretaría Distrital de Ambiente. 2019. Conoce cómo se comporta la calidad del aire en Bogotá. Consultado el 11 de agosto de 2021. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/como-se-comporta-la-calidad-del-aire-en-bogota>
- Secretaría Distrital de Ambiente. 2020. Datos abiertos calidad aire. Consultado el 15 de marzo de 2020. <http://www.ambientebogota.gov.co/calidad-del-aire>
- USGS (United States Geological Survey). 2020. Imágenes satelitales MODIS MAIAC 2020. Consultado el 7 de abril de 2020. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Watson, D. F., y G. M. Philip. 1985. "A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation." *Geoprocessing* 2 (4): 315-327.
- WHO (World Health Organization). 2005. WHO air quality guidelines global update published by World Health Organization on the internet. Consultado el 13 de marzo de 2020. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf

Zang, Lin, Feiyue Mao, Jianping Guo, Wei Gong, Wei Wang, y Zengxin Pan. 2018. "Estimating Hourly PM₁ Concentrations from Himawari-8 Aerosol Optical Depth in China." *Environmental Pollution* 241: 654-663. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.100>

Zheng, Caiwang, Chuanfeng Zhao, Yannian Zhu, Yang Wang, Xiaoqin Shi, Xiaolin Wu, Tianmeng Chen, Fang Wu, and Yanmei Qiu. 2017. "Analysis of Influential Factors for The Relationship Between PM_{2,5} and AOD in Beijing." *Atmospheric Chemistry and Physics* 17 (21): 13473-13489. <https://doi.org/10.5194/acp-17-13473-2017>

Juan Mauricio Garcia-Delgadillo

Ingeniero Ambiental y Biólogo, especialista en Docencia Universitaria, magíster en Ciencias Biológicas, estudiante doctoral de Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas. Docente-Investigador Universidad El Bosque. Líder del grupo Agua, Salud y Ambiente, investigador en biología de la conservación, calidad y planificación ambiental.

Anexos

Anexo 1. Error, sectores y potencia utilizados para la interpolación IDW

Cartografía	Error, sectores y potencia datos 3 de marzo de 2020				Error, sectores y potencia 5 de abril de 2020			
	Error medio	Error cuadrático medio	Potencia	Sectores	Error medio	Error cuadrático medio	Potencia	Sectores
AOD	0,042	0,197	1.992	1	-0,017	0,208	10,354	1
$PM_{2,5}$	0,208	6.028	1	1	-0,551	4.455	3.631	4

Fuente: imágenes satelitales USGS y Secretaría de Medio Ambiente de Bogotá 2020.