

Estimating AOD and its comparison with satellite data and PM₁₀ measured in Monterrey, Mexico

A. Ipiña¹, G. López-Padilla², C. Zúñiga²

1. Instituto de Física Rosario (IFIR) – Universidad Nacional Rosario – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, 27 de Febrero 210BIS – (S2000EKF) Rosario – Argentina.
2. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas – Universidad Autónoma de Nuevo León, Pedro de Alba S/N - Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza (66451) – México.

Abstract

La profundidad óptica de aerosol a 550nm (AOD_{550nm}) es una medida empleada para conocer la cantidad de partículas suspendidas en la atmósfera, desde una dada altura hasta la superficie terrestre. El material particulado de tamaño menor o igual a 10 micrómetros se denomina PM₁₀ y su concentración es medida a nivel del suelo. Estas partículas interactúan con la radiación solar causando efectos de dispersión, scattering y absorción provocando así una disminución de intensidad con respecto a la original. Con la ayuda del modelo SMARTS (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) y mediciones de irradiancia solar VIS+NIR (285-2800nm) del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) del Estado de Nuevo León, se estimaron los valores del AOD_{550nm} para días de cielo despejado en el periodo 2016-2020. Estos resultados fueron comparados con mediciones de AOD_{550nm} (Collection 6.1) realizadas con el instrumento satelital MODIS-NASA para las mismas fechas, sobre el Área Metropolitana de Monterrey. Los valores del AOD_{550nm} derivado del modelo tienen mínimos en invierno y máximos en verano, en un rango entre 0.1 y 0.6 respectivamente. Mientras que en el caso satelital tiene el mismo comportamiento con máximos alcanzando el valor de 0.8. Además estos valores fueron correlacionados con mediciones de PM₁₀ realizadas por las mismas estaciones meteorológicas del SIMA. Se discute el origen de las fuentes de aerosol y la correlación entre ambos resultados.

1. Introduction

Particulate matter (PM), or aerosol, is the set of suspended liquid or solid particles found in the atmosphere. The most relevant to human health are the ones with a diameter smaller than 10 μm (PM₁₀) and smaller than 2.5 μm (PM_{2.5}). With these sizes PM is capable of entering our respiratory and circulatory system, causing cardiovascular, respiratory and pregnancy problems, and even can increase the risk of pulmonary cancer and mortality [Mukherjee and Agrawal, 2017]. PM can also affect visibility, cloud formation and produce damage to ecosystems and cultural sites [von Schneidemesser et al., 2015].

The Monterrey Metropolitan Area (MMA) has a severe air pollution problem, with an average annual concentration of PM higher than the Official Mexican Standard (NOM) in all stations since 2000 [Martínez-Cinco et al., 2016]. The “Sistema de Monitoreo Ambiental” (SIMA) is the institute that since 1992 reports and

shares data on air pollution over the MMA from its current 13 monitoring stations. According to its 2019 air quality report, more than half of the year the PM_{10} standard is exceeded, so it can be concluded that it is the main pollutant in the area. The same conclusion that can be reached with the results of Benítez-García [Benítez-García et al., 2014] and the National Institute of Ecology and Climate Change [INECC, 2011, INECC, 2019]. Meanwhile, $PM_{2.5}$ has data recording problems in most of the monitoring stations, even though it is known it involves higher health risks. Some of the consequences of high PM levels are already beginning to be noticed, such as the loss of visibility in the city at certain times of the day and premature deaths from PM have an average cost of 1 % of the country's gross domestic product [ITDP & ICM, 2019].

Several temporal analyses of PM have been done and also studies trying to pinpoint the sources of this pollutant, either by chemical characterization and emissions inventories analysis. However, little research has been done taking into account the Aerosol Optical Depth, that has the advantage of measuring the whole vertical area of the atmosphere, and not only near the Earth surface. That's why the aim of this study is to examine PM trends by comparing PM data measured on ground by SIMA, Aerosol Optical Depth (AOD) estimated by solar irradiance measurements and AOD data from NASA's MODIS satellite. We hope to contribute to the better understanding of the behavior of the pollutant in the complex physiographic zone of the MMA, since it is limited by the Northern Gulf Coastal Plain in the northeast and the Sierra Madre Oriental in the southwest.

The MMA is an industrial power in Northeast Mexico and the third largest urban area in the country. Given this and the way the urban area developed, the distribution of the PM sources is not homogeneous. The MMA includes the municipalities of Apodaca, Cadereyta, Escobedo, García, Guadalupe, Juárez, Monterrey, San Nicolás de los Garza, San Pedro, Santa Catarina and begins to extend towards Santiago with an area of 7,657 km² in 2015 [SEDATU, CONAPO & INEGI, 2015]. They all are limited by the Northern Gulf Coastal Plain in the northeast and the Sierra Madre Oriental in the southwest, which causes a downward flow of air from the mountains at night and in the early morning [Centro Mario Molina, 2019]. However, the predominant direction of the wind is from east to west and this transports the PM to the mountains, which acts as a barrier by accumulating the particles [González-Santiago et al., 2011]. A combination of the increase in wind speeds, high temperatures and humidity, is what makes PM concentrations drop in summer [González-Santiago et al., 2011, SIMA, 2019].

2. Material and methods

2.1. Study Area

El área metropolitana de Monterrey (MMA) se encuentra en la parte noreste de México, con una población de 4.7 millones de personas distribuidas 18 municipios que en total abarcan 7,657 m² [SEDATU, CONAPO & INEGI, 2015]. Las principales

actividades económicas se encuentran comercio, servicios inmobiliarios, construcción y fabricación de maquinaria y equipo, el estado de Nuevo León concentra 213 grupos industriales, la mayoría con sede en el MMA. El MMA está rodeado por la Sierra Madre Oriental, el Cerro de la Silla, el Cerro de las Mitras y el Cerro del Topo Chico (figura 1), las cuales crean una barrera física natural para la circulación del viento que impiden el desalojo del aire contaminado hacia el exterior de la zona. [ProAire, 2012]

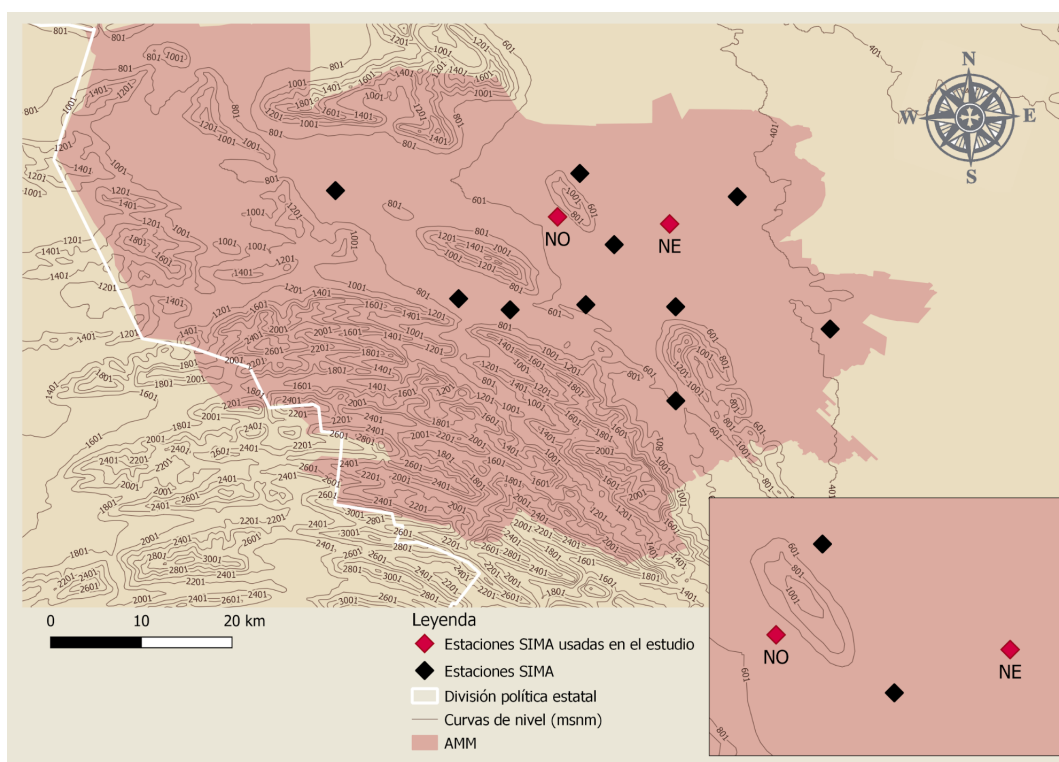


Figura 1: Área Metropolitana de Monterrey con sus principales cerros y sierras.

El Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) inició sus operaciones en el año 1992 con cinco estaciones de monitoreo , para el año 2017 el número de estaciones en operación aumentó a 13, siendo las estaciones Universidad, Serena y Cadereyta las últimas construidas en este año [SIMA, 2015]. La localización geográfica y clasificación de las estaciones de monitoreo se encuentran en la tabla 1. La clasificación de las estaciones está dada por la descripción dada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). [ProAire Nuevo León, 2016]

Station name	Code	Altitude (masl)	Latitude	Longitude	Classification
Obispado	CE	560	25.67	-100.34	Mixed
Escobedo	N	528	25.80	-100.34	Mixed
Universidad	N2	520	25.73	-100.31	University city
San Nicolás	NE	476	25.75	-100.26	Industrial
Apodaca	NE2	432	25.78	-100.19	Industrial
San Bernabé	NW	571	25.76	-100.37	Residential
García	NW2	716	25.78	-100.59	Industrial
Serena	S	630	25.57	-100.25	Residential
Pastora	SE	492	25.67	-100.25	Residential
Juárez	SE2	387	25.65	-100.10	Residential
Cadereyta	SE3	340	25.36	-100.00	Residential
Santa Catarina	SW	694	25.68	-100.46	Industrial
San Pedro	SW2	636	25.66	-100.41	Residential

Tabla 1: Localización geográfica y clasificación según las actividades que se realizan en la zona.

2.2. Meteorology, solar irradiance and PM₁₀ measurements

En la tabla 2 se muestra el porcentaje de mediciones anuales en cada estación de la red del SIMA, se relleno en rojo las estaciones que tienen un porcentaje menor a 75 %, ya que con esto se considera que las mediciones no son representativas [Centro Mario Molina, 2019].

Code	2015		2016		2017		2018		2019		2020	
	PM ₁₀	SR	PM ₁₀	SR	PM ₁₀	SR	PM ₁₀	SR	PM ₁₀	SR	PM ₁₀	SR
CE	94.6	95.8	97.0	97.7	96.8	98.2	94.8	99.1	95.1	94.5	92.8	96.5
N	76.8	98.8	98.1	97.9	93.0	96.6	94.1	97.6	96.3	99.9	73.7	84.3
N2	-	-	-	-	20.9	25.1	94.3	98.6	94.4	98.8	92.3	99.1
NE	93.9	83.9	98.3	96.9	98.1	99.2	97.4	99.8	98.5	99.5	92.8	89.3
NE2	89.9	98.3	93.7	99.9	96.3	99.8	96.1	99.4	94.5	99.1	91.1	98.1
NW	95.3	99.3	98.1	94.9	98.5	99.7	94.9	99.5	90.9	94.4	96.5	98.7
NW2	83.8	97.7	84.3	88.5	95.7	99.0	96.6	99.5	95.8	98.2	96.4	99.4
S	-	-	-	-	22.8	23.7	92.9	99.4	96.7	99.6	94.8	99.9
SE	92.8	98.6	97.2	99.0	98.4	99.1	94.3	98.5	95.9	98.4	94.1	99.1
SE2	95.9	99.6	99.1	100.0	95.7	97.4	92.4	99.6	95.8	64.2	90.3	99.7
SE3	-	-	-	-	37.1	38.6	95.1	99.1	98.3	99.8	94.1	99.7
SW	92.3	97.2	96.9	98.7	97.9	99.6	92.6	99.2	97.9	99.6	97.0	99.6
SW2	88.4	96.5	96.8	98.6	93.6	98.1	95.1	99.5	96.7	99.7	90.8	99.9

Tabla 2: Porcentaje anual de las mediciones de PM₁₀ e irradiancia solar de las estacion del SIMA en el periodo 2015-2020.

Se seleccionaron las estaciones de San Nicolas y San Bernabé ya que estas contaban con una mayor cantidad de datos disponibles y los radiómetros usados para las mediciones de irradiancia solar se sabían concretamente que miden en el rango 285-2800 nm. Realizando una visualización de los datos, se seleccionaron los días de cielo despejado usando el criterio () como los que se muestran en la figura 2.

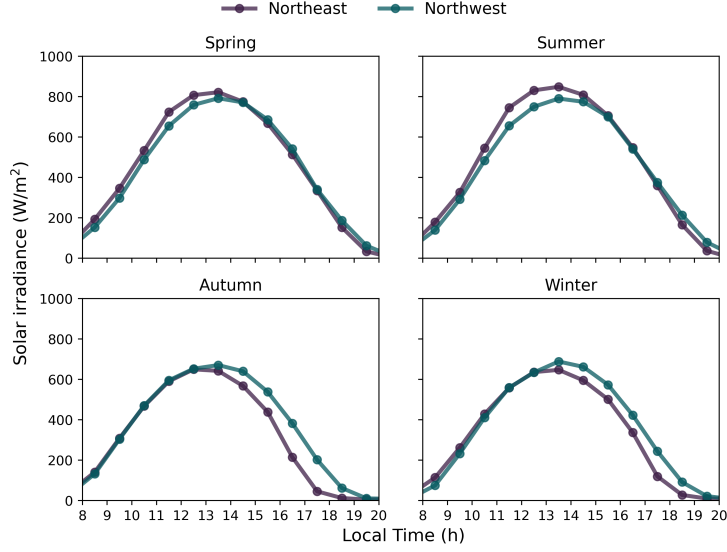


Figura 2

2.3. Satellite measurements

2.3.1. OMI-NASA Ozone Data

Se utilizaron los datos de la columna total de Ozono (TOC) en Dobson Units del satélite OMI de la NASA. Los datos fueron medidos diariamente con una resolución espacial de 0.25° Deg. Tomamos el producto OMI/Aura Ozone DOAS Total Column L3 1 day V3 (OMDOAO3e) [Pawan K. Bhartia, 2012], con un código escrito en *Python* obtuvimos las mediciones diarias para el píxel correspondiente al área metropolitana de Monterrey, el valor que asigna el producto a cada píxel que no realizó una medición es $-1,267650600 \times 10^{30}$, es por ello que a cada vez que se no se tenía una medición se le asignaba el promedio mensual del año correspondiente.

2.3.2. OMI-NASA AOD Data

Del producto OMI/Aura Near UV Aerosol Optical Depth and Single Scattering Albedo L3 1 day 1.0 degree x 1.0 degree V3 (OMAERUVd) [Omar O. Torres, 2008] se aprovecharon los datos del Aerosol Optical Depth 500nm (AOD500nm), con un código escrito en *Python* se obtuvieron las mediciones diarias para el píxel correspondiente al área metropolitana de Monterrey.

2.3.3. MODIS-NASA Data

We download the data of Aerosol Optical Depth at 550 nm (AOD_{550nm}) from NASA's satellite MODIS. The data is taken daily and with a spatial resolution of 1 Deg. We used the product MODIS-Aqua Aerosol Cloud Water Vapor Ozone Daily L3 Global 1Deg CMG (MYD08_D3) and looked at two data sets: Deep Blue Combined Mean and Land and Ocean Mean.[Platnick, S., et al., 2015]

2.4. SMARTS Model

El *Simple Model of the Atmosphere Radiative Transfer of Sunshine* (SMARTS 2.9.5) es un modelo de transferencia radiativa escrito en el lenguaje *Fortran* [Gueymard, 1995], el cual calcula la irradiancia solar directa, difusa y la global en cualquier ángulo en la superficie de la Tierra. Se creó un código en *Python* que realizó la lectura de los parámetros de la tabla 3 y escribe los datos de entrada en el formato del modelo SMARTS.

Parameters	Stage			
	Pristine	Moderate	SSA Pristine	SSA Moderate
α_1	0.8565	0.8565	1.0	1.0
α_2	1.2037	1.2037	1.0	1.0
SSA ₅₀₀	0.6536	0.6536	0.8	0.8
g ₅₀₀	0.6783	0.6783	0.68	0.68
CH ₂ O	-0.003	0.007	-0.003	0.007
CH ₄	0	0.3	0	0.3
CO	-0.1	0.35	-0.1	0.35
HNO ₃	0	0.005	0	0.005
NO	0	0.2	0	0.2
NO ₂	0	0.02	0	0.02
O ₃	-0.007	0.053	-0.007	0.053
SO ₂	0	0.05	0	0.05

Tabla 3: α_1 : Ångström for $\lambda < 500\text{nm}$, α_2 : Ångström for $\lambda > 500\text{nm}$, SSA₅₀₀: Single scattering Albedo at 500nm, g₅₀₀: Asymmetry factor at 500nm.

2.4.1. Algoritmo para determinar el AOD correspondiente a la medición

En cada estación de monitoreo no necesariamente miden sin nubosidad al mismo tiempo, esto provoca que la selección de días de cielo despejado no sea la misma en todas las estaciones. A partir de la selección de los días de cielo despejado se creó una base de datos que contiene: día, mes y año en formato yymmdd y el TOC. Se escribió un código en el lenguaje *Python*, el cual crea el archivo de input para el modelo SMARTS haciendo uso de la base de datos de días de cielo despejado usando un AOD de 0.5 ($AOD = 0.5$), enseguida ejecutará el modelo para obtener como resultado una matriz de espectros solares por cada minuto entre las 9 y 16 horas, para calcular la irradiancia solar con base a la ecuación 1.

$$I(t) = \int_{285}^{2800} E(\lambda, t) d\lambda \quad (1)$$

Al tener la irradiancia solar diaria, se establece el valor máximo de irradiancia solar y se calcula el promedio centrado en 1 hora. Se obtiene la diferencia relativa entre el promedio de la irradiancia solar máxima medida y la irradiancia solar obtenida con el modelo por medio de la ecuación 2.

$$RD = \left(\frac{Model - Measurement}{Measurement} \right) * 100 \% \quad (2)$$

Inicialmente el límite inferior y superior en la búsqueda del AOD es de 0 y 1 respectivamente ($AOD_i = 0, AOD_f = 1$), dependiendo del valor de la diferencia relativa se calcula un valor al AOD y de los límites de la búsqueda, este procedimiento realiza el siguiente algoritmo:

1. Si la diferencia relativa tiene un valor mayor a 11 % ($RD > 11$), entonces el límite inferior de la búsqueda es el AOD con el cual se produjo esa diferencia relativa ($AOD_i = AOD$).
2. Si la diferencia relativa tiene un valor menor a 9 % ($RD < 9$), entonces el límite superior de la búsqueda es el AOD con el cual se produjo esa diferencia relativa ($AOD_f = AOD$).

En cualquiera de los dos casos, el valor de AOD de la siguiente iteración se calcula de la siguiente manera:

$$AOD = \frac{AOD_i + AOD_f}{2}$$

Este proceso termina cuando se obtiene una diferencia relativa entre 9 % y 11 % y el valor de AOD se guarda en la base de datos de días de cielo despejado.

3. Results

The efficiency of data availability in the four years was very different for PM_{10} and $PM_{2.5}$; with 96.9 % and 27.3 % respectively. $PM_{2.5}$ wasn't measured for more than two years in the middle of the time period that was taken for the study, and that is why PM_{10} is used to compare it with AOD.

The behavior of PM_{10} and $PM_{2.5}$ was observed both during the year and the day. We found there is an annual trend (Fig. 2), in the driest months (December to February) the PM levels are the highest, whereas in the month where maximum precipitation is reached (September) PM is at its minimum. This can also be seen in Figure 3, where we can see the behaviour during an average day of each season. It is in winter when the average day for the four years far exceeds the Mexican norm standard of PM_{10} in the peak hours of activity. It should also be noted that the peaks in July of both 2015 and 2018 are due to sandstorms that came from the Sahara desert.

The analysis of the average behavior during a day allows us to observe the effect that human activity has on pollution. In Figure 3 and 4, the maximums of the curves correspond with the automobile traffic activity and work hours in the city. When making the distinction by weekday (Fig. 4) it can be noted that Sunday has the least concentration of PM, Thursday has the mornings maximum and Saturday is the afternoons. This accurately reflects the weekly anthropogenic activity in the AMM.

4. Conclusion

Referencias

- [Benítez-García et al., 2014] Benítez-García, S.-E., Kanda, I., Wakamatsu, S., Okazaki, Y., and Kawano, M. (2014). Analysis of criteria air pollutant trends in three mexican metropolitan areas. *Atmosphere*, 5(4):806–829.
- [Centro Mario Molina, 2019] Centro Mario Molina (2019). Análisis de la contaminación por $\text{pm}_{2.5}$ en la ciudad de monterrey, nuevo león, enfocado a la identificación de medidas estratégicas de control.
- [González-Santiago et al., 2011] González-Santiago, O., Badillo-Castañeda, C. T., Kahl, J. D., Ramírez-Lara, E., and Balderas-Renteria, I. (2011). Temporal analysis of pm_{10} in metropolitan monterrey, méxico. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61(5):573–579.
- [Gueymard, 1995] Gueymard, C. A. (1995). SMARTS2: a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment. *Report No. FSEC-PF-270-95*, pages 1–84.
- [INECC, 2011] INECC (2011). El estado de la calidad del aire en méxico: 18 ciudades.
- [INECC, 2019] INECC (2019). Informe nacional de la calidad de aire méxico.
- [ITDP & ICM, 2019] ITDP & ICM (2019). Externalidades negativas asociadas al transporte terrestre.
- [Martínez-Cinco et al., 2016] Martínez-Cinco, M., Santos-Guzmán, J., and Mejía-Velázquez, G. (2016). Source apportionment of $\text{pm}_{2.5}$ for supporting control strategies in the monterrey metropolitan area, mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(6):631–642. PMID: 26950193.
- [Mukherjee and Agrawal, 2017] Mukherjee, A. and Agrawal, M. (2017). World air particulate matter: sources, distribution and health effects. *Environmental Chemistry Letters*, 15(2):283–309.
- [Omar O. Torres, 2008] Omar O. Torres (2008). Omi/aura near uv aerosol optical depth and single scattering albedo l3 1 day 1.0 degree x 1.0 degree v3. Accessed: 6 marzo 2020, [10.5067/Aura/OMI/DATA3003](https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3003).
- [Pawan K. Bhartia, 2012] Pawan K. Bhartia (2012). Omi/aura toms-like ozone and radiative cloud fraction l3 1 day 0.25 degree x 0.25 degree v3. Accessed: 6 marzo 2021, [10.5067/Aura/OMI/DATA3002](https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3002).
- [Platnick, S., et al., 2015] Platnick, S., et al. (2015). Modis atmosphere l3 daily product. http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD08_D3.061.
- [ProAire, 2012] ProAire (2018-2012). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del Área metropolitana de monterrey 2008-2012.

- [ProAire Nuevo León, 2016] ProAire Nuevo León (2016). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de nuevo león. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/250974/ProAire_Nuevo_Leon.pdf.
- [SEDATU, CONAPO & INEGI, 2015] SEDATU, CONAPO & INEGI (2015). Delimitación de las zonas metropolitanas de México.
- [SIMA, 2015] SIMA (2015). Sistema integral de monitoreo ambiental (sima) nuevo león. <http://aire.nl.gob.mx/>.
- [SIMA, 2019] SIMA (2019). Estadística 2018 sobre calidad del aire en la zona metropolitana de Monterrey.
- [von Schneidmesser et al., 2015] von Schneidmesser, E., Monks, P. S., Allan, J. D., Bruhwiler, L., Forster, P., Fowler, D., Lauer, A., Morgan, W. T., Paasonen, P., Righi, M., Sindelarova, K., and Sutton, M. A. (2015). Chemistry and the linkages between air quality and climate change. *Chemical Reviews*, 115(10):3856–3897. PMID: 25926133.