

# Memorias



Sociedad Latinoamericana en  
Percepción Remota y Sistemas  
de Información Espacial  
Capítulo Colombia

**30**  
AÑOS

Medellín, Colombia  
29 de Septiembre al 3 de Octubre de 2014



# ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES DE PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS POR MEDIO DE DATOS MODIS EN EL NORESTE DE MÉXICO

Johana Carmona<sup>1,\*</sup> Alberto Mendoza,<sup>1</sup> Fabián Lozano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Química, <sup>2</sup> Centro de Calidad Ambiental

Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey

Ave. Eugenio Garza Sada 2501, Monterrey, N.L., Mexico 64849

\*Corresponding author: [johanamargarita@gmail.com](mailto:johanamargarita@gmail.com)

**Palabras claves:** Concentración de PM<sub>10</sub>, Contaminación del aire, Espesor Óptico de Aerosoles, Modelos de Regresión.

## Resumen

El Material Particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 µm (PM<sub>10</sub>), a altas concentraciones, impacta negativamente a la salud y al medio ambiente, por lo cual se hace relevante el monitoreo rutinario. Típicamente, éste se realiza con instrumentos de medición que tienen coberturas espaciales puntuales que difícilmente son extrapolables a otras regiones. Las imágenes satelitales tienen mayor cobertura espacial y pueden ser utilizados como complemento en el monitoreo de calidad del aire.

Con el objetivo de establecer una relación entre los datos satelitales (mediciones ópticas de extinción de la luz que representan la cantidad de aerosoles en toda la columna de la atmósfera) y las mediciones de PM<sub>10</sub> (concentraciones máxicas cerca de la superficie), se realizó un estudio en el Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México para el primer trimestre de 2013. Se utilizó información local de meteorología y de calidad de aire, junto con datos satelitales de Aerosol del sensor MODIS-Aqua (MYD04). Se propusieron Modelos de Regresión donde se obtuvo una  $R^2 \approx 60\%$ . Se evidenció con un  $\alpha = 0.05$ ,

que la propiedad de Espesor Óptico de Aerosoles es una variable predictora de concentraciones de PM<sub>10</sub>.

## **PARTICULATE MATTER LEVELS ESTIMATIONS FROM MODIS DATA IN THE NORTHEASTERN AREA OF MEXICO**

Johana Carmona<sup>1,\*</sup> Alberto Mendoza,<sup>1</sup> Fabián Lozano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Chemical Engineering, <sup>2</sup> Center for Environmental Quality

Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey

Ave. Eugenio Garza Sada 2501, Monterrey, N.L., Mexico 64849

\*Corresponding author: [johanamargarita@gmail.com](mailto:johanamargarita@gmail.com)

**Key words: PM<sub>10</sub> Levels, Air Pollution, Aerosol Optical Depth, Regression models.**

Particulate Matter with aerodynamic diameter less than or equal to 10 microns (PM<sub>10</sub>) is good indicator of air quality. High PM<sub>10</sub> levels have significant adverse health and environmental impacts, so continuous monitoring is necessary. Typically, concentrations of PM are estimated using ground-based instruments that measure PM mass concentrations near to the Earth surface. These instruments have the disadvantage of possessing limited spatial coverage. However, satellite images -with greater spatial coverage than ground measurements- can be used as a complementary technique in air quality monitoring.

In this paper, different regression models are applied in order to estimate the relationship between PM<sub>10</sub> concentrations based on ground-based instruments and the aerosol optical properties retrieved from satellite data. The study was conducted for the Monterrey Metropolitan Area in Mexico for January, February and March 2013. Meteorological and air quality information was obtained from the local Atmospheric Monitoring Station Network and satellite images were acquired from the MODIS sensor on board of Aqua satellite. The MODIS product used in this analysis was MYD04 - MODIS Aerosol product-

with spatial resolutions of 3 km. Results show that the fit of the regression models is close to 60% and Aerosol Optical Depth is a good indicator for estimating PM<sub>10</sub> levels.

## **1. Introducción**

El aerosol atmosférico comprende aquellas partículas (en estado sólido o líquido) que se mantienen en suspensión en el aire y son arrastradas por éste en su movimiento (Estellés, 2006). Los aerosoles en forma de partículas con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 µm (PM<sub>10</sub>) son parte de los indicadores criterio para medir la calidad del aire en un área determinada (OMS, 2006) Estas partículas se encuentran en la fracción de aerosoles respirables, penetran a diferentes profundidades del sistema respiratorio, causando efectos adversos a la salud (Zelm *et al.* 2008; Keuken *et al.* 2011; Osornio *et al.* 2011).

Por otro lado, los aerosoles, tienen un importante rol como agentes de cambio climático. A diferencia de los gases de efecto invernadero (que calientan la superficie), los aerosoles reflejan y absorben la radiación solar, enfriando la superficie (IPCC, 2007).

El monitoreo de concentraciones de PM es indispensable para verificar el cumplimiento de la normatividad de calidad del aire pertinente (p. ej., NOM-025-SSA1-1993 Salud ambiental, México donde se establece un nivel máximo permisible de 120 µg/m<sup>3</sup> promedio de 24 horas; Resolución 0610 de 2010, Min Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia donde se establece un nivel máximo permisible de 100 µg/m<sup>3</sup> promedio de 24 horas), así como para el estudio de los efectos causados sobre el sistema climático de la tierra y la salud humana.

Las concentraciones de PM se suelen monitorear a través de estaciones terrestres de medición de calidad del aire que tienen una representatividad espacial que va desde los 500 m a 4 km de diámetro (INE, 2010). Sin embargo, en muchas regiones las mediciones terrestres son escasas o inexistentes lo que dificulta determinar el comportamiento y distribución de los aerosoles a escala local o regional.

Por su parte, los datos de satélite proporcionan una perspectiva regional amplia y han sido considerados como un medio para hacer frente a las limitaciones de cobertura espacial de las estaciones de monitoreo en tierra (Gupta *et al.* 2006). Por ejemplo, El sensor MODIS *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* a bordo del satélite Terra y Aqua de *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2003) cuenta con cobertura global y proporciona información de 36 bandas espectrales entre 0.405 y 14,385  $\mu\text{m}$ . De las imágenes MODIS se derivan productos para el estudio de cambios globales. En aplicaciones de calidad de aire, se ha utilizado la propiedad de Espesor Óptico de Aerosoles (AOD: *Aerosol Optical Depth*) para la estimación de concentraciones de PM (p. ej., Wang & Christopher, 2003; Chu *et al.* 2003; Engel -Cox *et al.* 2004). El AOD es la integral de la extinción atmosférica desde la superficie hasta la parte superior de la atmósfera, entendiéndose como extinción atmosférica: la suma de la absorción y dispersión de la radiación electromagnética.

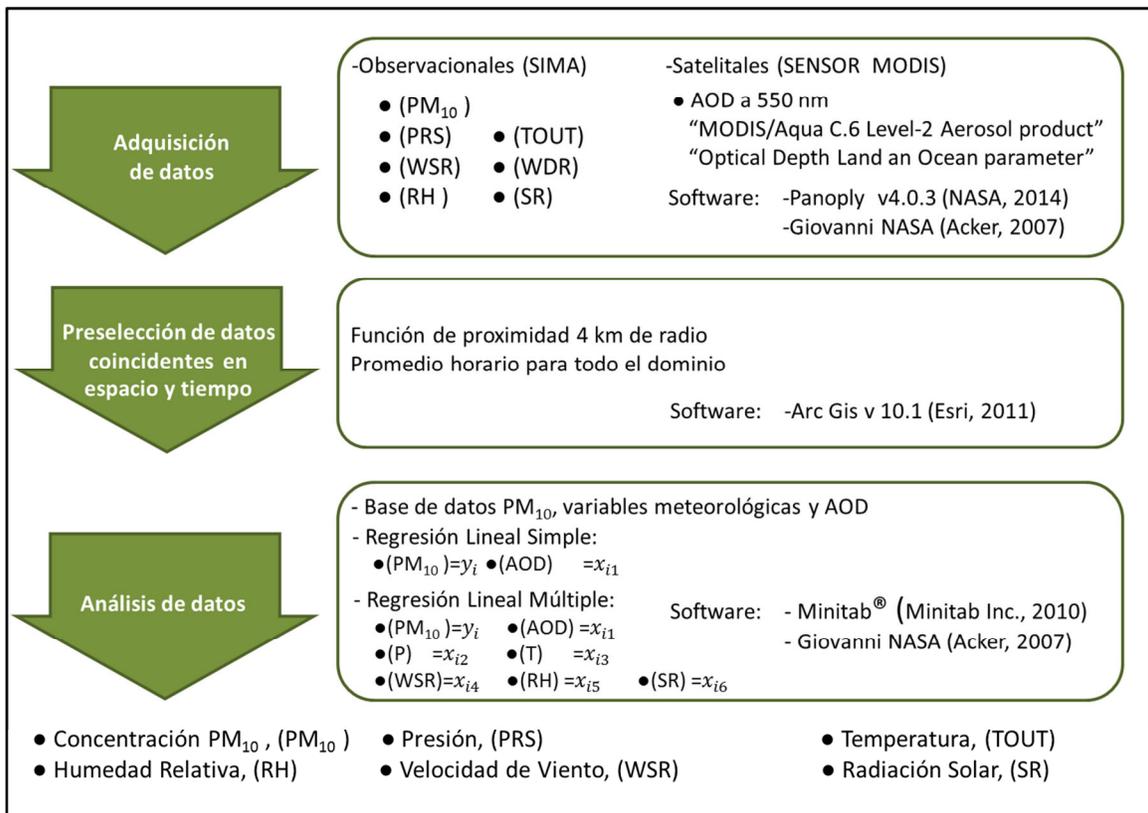
El AOD estimado a partir de datos satelitales representa información de columna, mientras que las mediciones de  $\text{PM}_{10}$  son representaciones de concentraciones máxicas cerca de la superficie. Las tendencias en los estudios que relacionan la información satelital y los datos observacionales de  $\text{PM}_{10}$ , son entonces, analizar y aprovechar el potencial de uso de datos

satelitales para describir el fenómeno de la contaminación del aire en la parte baja de la atmósfera, con el fin de maximizar la información disponible de las estaciones fijas de monitoreo e incluso estimar/predecir la contaminación en lugares donde no se dispone de este tipo de estaciones.

El objetivo de esta investigación es proponer modelos de estimación de concentraciones de  $PM_{10}$  en el Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México (AMM), para el primer trimestre de 2013, a partir de la propiedad óptica AOD. Se utilizaron Modelos de Regresión que relacionaron datos observacionales de concentraciones y meteorología de nueve estaciones de monitoreo de calidad del aire con datos AOD, recuperados de datos satelitales del producto MYD04-MODIS Aerosol Product, con resolución espacial de 3 km.

## **2. Metodología**

El esquema metodológico seguido en este estudio se ilustra en la **Figura 1**



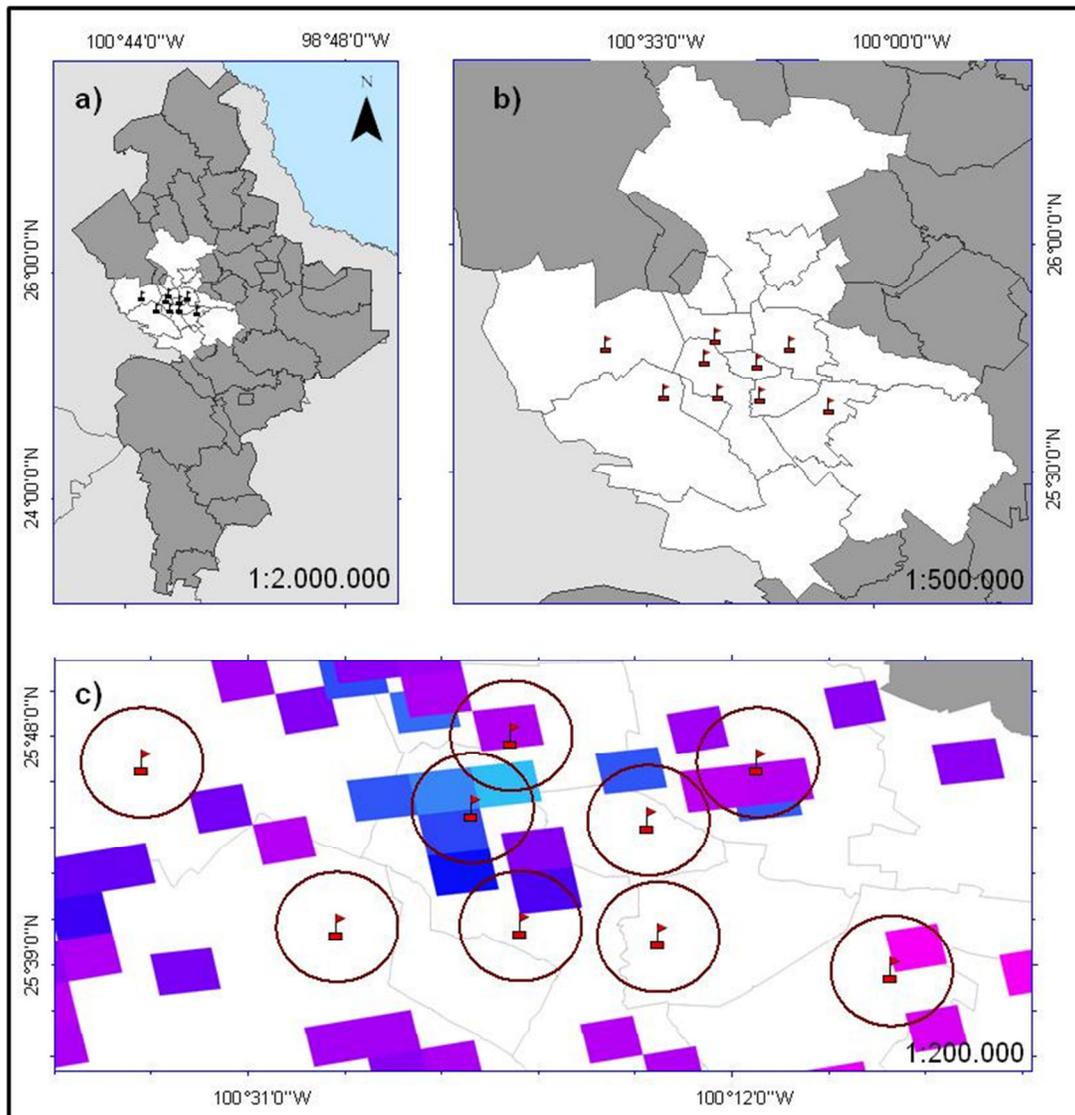
**Figura 1. Esquema Metodológico**

## 2.1 Área de estudio

El área de estudio en esta investigación es el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) ubicada en la zona central del estado de Nuevo León (**Figura 2a**) y donde se concentra casi el 88% de la población del estado. Con respecto a niveles de PM<sub>10</sub>, el AMM aún no cumple con la norma de este contaminante, siendo la tercer Área Metropolitana del país, más contaminada por partículas (INE -SEMARNAT, 2011).

El AMM cuenta con el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA), que es una red de nueve estaciones de monitoreo atmosférico (**Figura 2b**) manejada por la Subsecretaría de Protección al Medio Ambiente y Recursos Naturales del gobierno del estado de Nuevo

León. El SIMA monitorea concentraciones de contaminantes criterio:  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ . Particularmente, los equipos de medición de  $PM_{10}$  utilizados por el SIMA son monitores de partículas por atenuación de rayos Beta (BAM) y pesado continuo con microbalanza que provee medida automática, continua y registro de concentraciones.



**Figura 2. Contexto geográfico de aplicación. a)** Ubicación del Área Metropolitana de Monterrey (AMM) en la zona central del estado de Nuevo León. **b)** Ubicación de nueve

estaciones de monitoreo atmosférico del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) dentro del AMM. c) Zona de influencia directa de las estaciones con dominio limitado por las coordenadas geográficas  $25^{\circ}50'06\text{N} - 100^{\circ}37'08\text{W}$  y  $25^{\circ}35'64\text{N} - 100^{\circ}03'00\text{W}$ . Se observa un radio de influencia de 4 km de las estaciones (círculos) y un ejemplo de valores AOD (cuadrículas) recuperados de datos satelitales.

## **2.2 Adquisición de datos**

Los datos observacionales utilizados se tomaron de los promedios horarios de concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  así como de variables meteorológicas de Presión, Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad de Viento y Radiación Solar reportados por el SIMA, para cada una de las estaciones.

Los datos satelitales considerados hacen parte del producto “MODIS/Aqua Collection 6 Level-2 Aerosol”, de donde se recupera el parámetro AOD a 550 nm, del conjunto de datos “Optical Depth Land an Ocean: AOT at 0.55 micron for both ocean (Average) and land (corrected)”. El tipo de archivo manejado como dato fuente fue MYD04\_3K, con resolución espacial de 3 x 3 de 1 km (en el nadir), que fue diseñado para estudios locales de calidad del aire (Remer *et al.* 2013).

Los datos observacionales y los datos satelitales corresponden a los meses de enero, febrero y marzo de 2013 (90 días). El horario de toma de imágenes del sensor para el dominio fue desde las 19:00 UTC hasta las 20:30 UTC, es decir, un horario local de invierno comprendido entre las 13:00 horas y las 14:30 horas (huso horario UTC-6 invierno). Se creó una base de datos para este período con el promedio horario de las variables:  $\text{PM}_{10}$ ,

meteorológicas y de AOD, para todo el dominio y representativos de la hora de paso del satélite.

### 2.3 Relación entre datos observacionales y datos satelitales

Para garantizar coincidencia espacial y temporal en el análisis cuantitativo y comparativo, se establecieron promedios horarios de todas las variables, de tal manera que el horario de adquisición de datos observacionales concuerden con la hora de toma de imagen del sensor.

Se seleccionó una zona de influencia directa de los datos observacionales, se realizó un cálculo de proximidad entre las estaciones de monitoreo y los píxeles MODIS, utilizando información de latitud y longitud. Todos los píxeles MODIS que cayeron dentro de un radio de influencia de 4 km de las estaciones fueron promediados para obtener un único valor AOD correspondiente a la estación (**Tabla 1**), luego estos valores de AOD resultantes, fueron promediados para dejar un solo dato AOD horario para todo el dominio. El criterio de decisión para el uso de datos satelitales es que cuando menos un dato AOD se encuentre dentro del radio de influencia de al menos una estación de monitoreo (Figura 2c).

**Tabla 1.** Medias AOD y PM<sub>10</sub>\* por estación

No	Estación	Latitud	Longitud	AOD±STD	PM <sub>10</sub> ±STD
1	Sureste (La Pastora)	25.668N	-100.248E	0.07±0.02	64.26±37.29
2	Noreste (San Nicolás)	25.745N	-100.255E	0.11±0.07	52.76±23.32
3	Centro (Obispado)	25.676N	-100.338E	0.10±0.05	61.39±25.51
4	Noroeste (San Bernabé)	25.753N	-100.370E	0.18±0.15	74.91±28.2
5	Suroeste (Santa Catarina)	25.675N	-100.458E	0.11±0.07	84.63±27.97
6	Noroeste 2 (García)	25.783N	-100.586E	0.15±0.1	109.06±102.27
7	Norte (Escobedo)	25.801N	-100.344E	0.14±0.12	69.32±25.84
8	Noreste 2 (Apodaca)	25.783N	-100.183E	0.12±0.09	55.09±27.17
9	Sureste 2 (Juárez)	25.646N	-100.096E	0.08±0.08	81.13±55.99

\* Promedios horarios al tiempo de adquisición de imágenes MODIS.

Para estimar la relación entre concentraciones de  $PM_{10}$  y la propiedad óptica AOD, se buscó el planteamiento de expresiones matemáticas que describieran el comportamiento de la variable dependiente  $PM_{10}$  ( $y$ ), por medio de Modelos de Regresión Lineal. Se definió como variable de respuesta: Concentración  $PM_{10}$  en  $\mu g m^{-3}$  ( $PM_{10}$ ) y se consideraron como variables predictoras: AOD a 550 nm, Presión en mmHg (PRS), Temperatura en  $^{\circ}C$  (TOUT), Humedad Relativa en porcentaje (RH), Velocidad de Viento en  $km hr^{-1}$  (WSR) y Radiación Solar en  $kw m^{-2}$  (SR). Se utilizó la técnica de reducción de variables de mejores subconjuntos utilizando el método de  $C_p$  de Mallows (Mallows, 1973) para obtener el mejor modelo posible.

### **3. Resultados y discusión**

La eficiencia de disponibilidad de datos fue del 37%, es decir, de los 90 días de estudio, solo 34 días cumplieron con el criterio de decisión establecido. La disponibilidad de datos estuvo limitada, en primer lugar, porque cada 16 días la órbita del satélite no coincidió en ningún momento del día con el dominio de estudio, concordando con el ciclo de repetición del satélite y conllevando a que no hubiera captura de imagen para 5 días en el área de interés. En segundo lugar, se presentó el caso (41 días) que a pesar que se disponía de imagen en el dominio, el algoritmo del producto MYD04 no aportaba información AOD para el pixel coincidente con las estaciones.

Para esos 41 días de datos faltantes, se realizó una comparación visual utilizando el parámetro AOD del producto MYD04 y la imagen en color real (RGB: Red, Green and Blue, bandas 1, 3, 4) del producto MYD02HKM -MODIS/Aqua Calibrated Radiances 5-Min L1B Swath 500m- (Gumley *et al.* 2010), donde se observó que la presencia de nubes

fue el factor limitante en la adquisición de datos (**Figura 3**). Estos resultados son similares a Zhang *et al.* (2005) quienes precisan que aunque las imágenes satelitales son representaciones de grandes áreas espaciales, están sujetas a ruido por nubes que elevan la incertidumbre en la estimación de AOD.

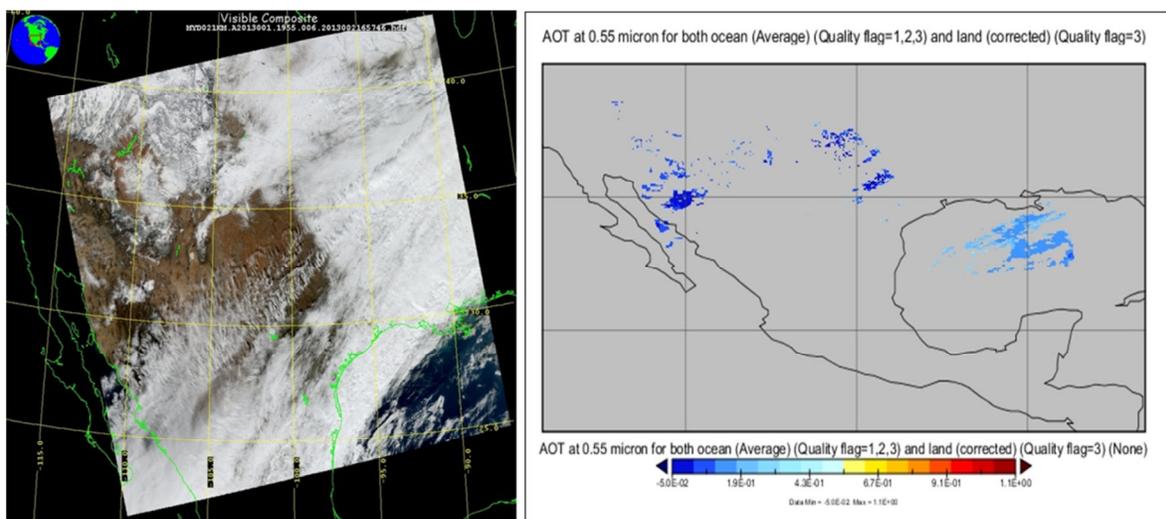
Se seleccionaron entonces 34 conjuntos de datos (días con datos disponibles), representativos del promedio horario de todo el dominio. El comportamiento de los datos se observa en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Estadísticas para toda la red de estaciones\*

	AOD	PM <sub>10</sub>	PRS	RH	SR	TOUT	WSR
MÍNIMO	0.004	7.00	310.50	2.00	0.32	8.62	1.20
MÁXIMO	0.527	974.00	732.90	68.00	1.03	36.87	25.70
MEDIA	0.125	88.38	712.66	30.08	0.71	25.08	9.55
STD	0.101	105.05	24.72	16.82	0.12	5.07	4.15

\* Promedios horarios al tiempo de adquisición de imágenes MODIS

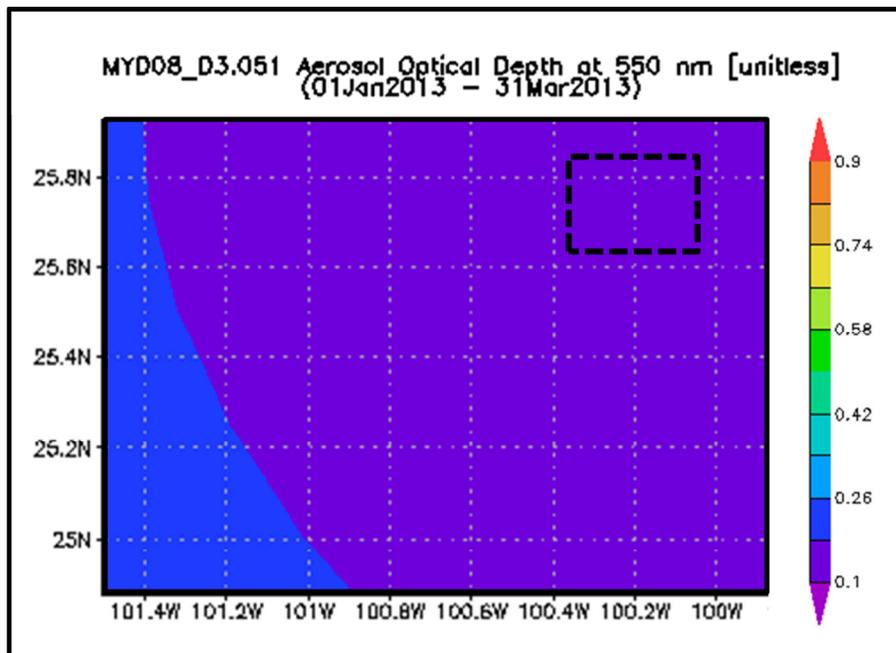
La desviación estándar (STD) de AOD y PM10 refleja la alta variabilidad en los datos, esto evidencia que el comportamiento de los aerosoles es complejo, con sustanciales variaciones en el tiempo y el espacio (Gong *et al.* 2007).



**Figura 3. Comparación de Imagen Satelital en RGB y Datos AOD faltantes.** Izquierda: ejemplo de un día donde no se dispone de datos AOD en el producto MYD04 (visualización en panoply). Derecha: Su correspondiente imagen en RGB del producto MYD02HKM donde se evidencia que la presencia de nubes limitó la adquisición de datos.

En general, las desviaciones estándar en el análisis por estaciones (**Tabla 1**) son menores a las desviaciones reportadas para todo el dominio, siendo la estación Noroeste 2 (García) la que presentó mayor variabilidad. Cabe anotar, que esta estación reportó 12 eventos de concentración de  $PM_{10}$  mayores a  $120 \mu g m^{-3}$  y dentro de ellos un evento que sobrepasó los  $500 \mu g m^{-3}$  de  $PM_{10}$ , por lo que se puede inferir que existe un efecto de esta estación en los resultados promedios.

Las medias AOD por estaciones calculadas en este estudio van desde 0.07 hasta 0.18 (**Tabla 1**) y son comparables con la información de medias AOD suministrada por la herramienta Giovanni Air Quality de NASA (Acker & Leptoukh, 2007). A partir del producto MYD08\_D3.051 (Optical Depth Land And Ocean Mean) con resolución de 10 km, para el período y área de estudio, se observa el predominio del rango de medias AOD que van desde 0.10 a 0.20 (**Figura 4**).



**Figura 4. Comparación de datos AOD calculados por estaciones y medias calculadas con la herramienta Giovanni Air Quality.** En Giovanni Air Quality rango de Medias AOD desde 0.1 a 0.2. Rango de medias AOD calculadas en este estudio entre 0.07 y 0.18 (cuadrícula oscura y punteada).

Para estimar la relación entre datos observacionales y datos satelitales, se probaron cinco modelos de regresión para todo el dominio. El rendimiento global de cada modelo se resume en la **Tabla 3**. La medida de bondad de ajuste se expresa en términos de coeficiente de correlación ajustada (**R<sup>2</sup> ajustada**), así mismo, se presentan los p-valor de las variables predictoras que influyeron significativamente en el modelo con un nivel de confianza del 95%.

**Tabla 3.** Modelos de Regresión

MODELOS	R <sup>2</sup> ajustada	p-valor
1. PM10 = - 1.1 + 0.635 AOD	46.1%	AOD 0.000

2.	$PM_{10} = 984 + 0.586 AOD - 1.29 PRS - 1.73 RH - 146 SR + 1.61 TOUT + 6.05 WSR$	56.3%	AOD 0.000 RH 0.027
3.	$PM_{10} = 76 + 0.576 AOD - 1.79 RH - 106 SR + 6.36 WSR$	56.7%	AOD 0.000 RH 0.021
4.	$PM_{10} = 52.7 + 0.687 AOD - 2.03 RH$	57.2%	AOD 0.000 RH 0.025
5.	$PM_{10} = 7.8 + 0.624 AOD - 1.72 RH + 4.63 WSR$	57.7%	AOD 0.000 RH 0.023

Partiendo de un modelo de regresión univariado se obtuvo un  $R^2_{aj}$  de 46.1%. En el segundo modelo, se explora un modelo multivariado donde se incluye además, todas las variables observacionales, lográndose un aumento en la bondad de ajuste ( $R^2_{aj}$  56.3%). En estudios similares, aplicados a otras regiones del mundo, se ha estimado la relación AOD y  $PM_{10}$  obteniendo una bondad de ajuste entre 68% y 80% (p. ej. Péré *et al.* 2009 en Francia y Nordio, *et al.* 2013 en Italia), esto da a una idea de que los resultados de estudio conservan un orden de magnitud comparable.

Explorando la reducción de variables, el método de  $C_p$  de Mallows sugiere que para obtener el mejor modelo se deben usar las variables predictoras: AOD, RH, SR y WSR. Se plantearon tres modelos de regresión (modelo 3, 4 y 5 en **Tabla 3**) con solo estas variables y se logra en el quinto modelo una mejora en la calidad de ajuste ( $R^2_{aj}$  57.7%). Este modelo excluye la variable SR, que se podría estar comportando como covariable de AOD. Finalmente, se observa que las variables AOD y RH influyen significativamente en todos los modelos. Se aprecia que AOD es la variable con mayor significancia, por lo que se infiere que la relación entre concentraciones de  $PM_{10}$  y la propiedad óptica AOD sí está presente. Con respecto a la influencia de la humedad relativa (RH), Malm *et al.* (2000) han evidenciado que RH es un factor clave en la relación AOD-PM debido a que los

componentes higroscópicos de los aerosoles como el nitrato de amonio, sulfato de amonio y carbono orgánico pueden crecer en tamaño en condiciones de alta RH, por consiguiente aumentan su eficiencia en extinción de luz. No obstante, se requiere un análisis más riguroso en la zona de estudio para determinar la relación de la humedad relativa, el contenido de agua de las PM y su influencia en la eficiencia de extinción de luz.

#### **4. Conclusiones**

La presencia de nubes fue un factor restrictivo en la adquisición de datos limitando la eficiencia de disponibilidad de datos a un 37%.

El promedio horario altamente variable de AOD y  $PM_{10}$  evidenció el comportamiento complejo de los aerosoles en el tiempo y el espacio. Se infiere un efecto de la estación Noroeste 2 (García) en los resultados promedios. Se requiere hacer estudios de residuales en los modelos para determinar si los resultados de esta estación se comportan como puntos de palanca o influencia.

Las medias AOD por estaciones se calcularon en el rango de 0.07 a 0.18, se aprecia que aplicando la metodología de promedios propuesta en este estudio, se logró conservar las proporciones de los datos de origen, al ser comparables con la herramienta Giovanni para el período y dominio de estudio.

El modelo de regresión univariado tuvo la calidad de ajuste más pobre ( $R^2_{aj}$  46.1%). Se evidenció una mejora al llevar a cabo la regresión multivariada con todas las variables disponibles (56.3%). No obstante, el mejor ajuste se logró en el modelo sugerido por la  $C_p$  de Mallows donde se toman como variables predictoras: AOD, RH, y WSR ( $R^2_{aj}$  57.7%).

Aunque la bondad de ajuste es moderada, el resultado relevante es que la variable AOD siempre fue predictora de  $PM_{10}$  con un nivel de significancia del 5%, lo que quiere decir que si hay una relación entre las concentraciones de  $PM_{10}$  y la propiedad óptica AOD.

La Humedad Relativa también influye significativamente en los modelos, se requieren estudios adicionales para determinar si los componentes higroscópicos de los aerosoles están siendo afectados por la RH influyendo en la eficiencia en extinción de luz de los aerosoles.

Se sugiere que en otra etapa de la investigación, se tome en cuenta una mayor resolución temporal (años) donde se puedan analizar comportamientos estacionales. Igualmente, se sugiere cambiar el criterio de decisión de zonas de influencia y tomar datos con base en distancias ponderadas.

## **5. Referencias.**

1. Acker, J. G. & Leptoukh, G. *Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data*. Eos, Trans. AGU, Vol. 88, No. 2 (9 January 2007), pages 14 and 17. Giovanni [Plataforma interactiva de visualización y análisis]. Recuperado de <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>
2. Chu, D.A., Kaufman, Y.J., Zibordi, G., Chern, J.D., Mao, J., Li, C., Holben, B.N., 2003. *Global monitoring of air pollution over land from the Earth observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*. Journal of Geophysical Research 108, D21
3. Engel-Cox, J.A., Christopher, H.H., Coutant, B.W., Hoff, R.M., 2004. *Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality*. Atmospheric Environment 38, 2495–2509.

4. ESRI, (2011). ArcGIS Desktop: Release 10. [Software de procesamiento digital de imágenes]. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, Inc
5. Estellés L.V. (2006). *Tesis Doctoral “Caracterización de los aerosoles atmosféricos en Valencia mediante fotometría solar”*. Valencia, España UNIVERSITAT DE VALENCIA
6. Gong, W., Yingying, M., Zhongmin, Z., Pingxiang, L., Shalei, S., Mengyu, L., Zhongyu, H., and Jun, L. (2007). *CALIPSO-AERONET Combined Application for Weather and Climate Research*. Geoscience and Remote Sensing Simposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International
7. Gumley, L., Descloitres, J., Schmaltz, J. (2010). *Creating Reprojected True Color MODIS Images: A Tutorial Version 1.0.2* Recuperado el 10 de Julio de 2014, de [https://earthdata.nasa.gov/sites/default/files/field/document/MODIS\\_True\\_Color.pdf](https://earthdata.nasa.gov/sites/default/files/field/document/MODIS_True_Color.pdf)
8. Gupta, P., Christopher, S., Wang, Jun., Gehrig, R., Lee, Y., and Kumar N. (2006). *Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities*. Atmospheric Environment. Volume 40, Issue 30, pages 5880-5892
9. Keuken, M., Zandveld, P., Eshout, S., Janssen, N., and Hoek, G., (2011) *Air quality and health impact of PM10 and EC in the city of Rotterdam, the Netherlands in 1985–2008*. Atmospheric Environment. Volume 45, Issue 30, pages 5294-5301
10. INE –SEMARNAT. Instituto Nacional de Ecología-Secretaría De Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011). *Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas* (2000, 2009).
11. INE, Instituto Nacional de Ecología (2010). *Manual 3. Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire*. México

12. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
13. Mallows C.L., (1973) *Some Comments on CP.* Technometrics 15 (4), pages 661-675
14. Malm, W.C., Day, D.E. and Kreidenweis, S.M., (2000). *Light scattering characteristics for aerosols as a function of relative humidity: part I: a comparison of measured scattering and aerosol concentrations using the theoretical models.* Journal of the Air and Waste Management Association 50, 686–700
15. Minitab Inc. (2010). Minitab® Statistical Software. [Software de análisis estadístico]
16. NASA, National Aeronautics and Space Administration.(2003), *MODIS Atmosphere.* Recuperado el 25 de Julio de 2014, de <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/>
17. NASA, National Aeronautics and Space Administration (2014). Panoply netCDF, HDF and GRIB Data Viewer [Plataforma de visualización de archivos netCDF, HDF y GRIB]. Goddard Institute for Space Studies. Recuperado el 10 de julio de 2014 de <http://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>
18. Nordio, F., Kloog, I., Coull, B., Chudnovsky, A., Grillo, P., Bertazzi, P., Andrea, A., Baccarelli, A., and Schwartz, J. (2013). *Estimating spatio-temporal resolved PM10 aerosol mass concentrations using MODIS satellite data and land use regression over Lombardy, Italy.* Atmospheric Environment 74 (2013) 227e236
19. OMS, Organización Mundial de la Salud (2006). *Guías de Calidad del aire de la OMS, relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.* OMS, pp. 7-12. Ginebra, Suiza.

20. Osornio, A., Serrano, J., Rojas, L., Miranda, J., García, C., Reyna, M., Flores, G., Zuk, Miriam., Quintero, M., Vázquez, I., Sánchez, Y., López, T. and Rosas, I. (2011). *In vitro biological effects of airborne PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> from a semi-desert city on the Mexico–US border*. Chemosphere. Volume 83, Issue 4, pages 618-626
21. Péré J-C., Pont, V., Mallet, M., and Bessagnet, B. (2009). *Mapping of PM<sub>10</sub> surface concentrations derived from satellite observations of aerosol optical thickness over South-Eastern France*. Atmospheric Research 91. Pages 1–8
22. Remer, L. A., Mattoo, S., Levy, R. C., and Munchak, L. A. (2013). *MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective*. Atmos. Meas. Tech., 6, 1829–1844, 2013. doi:10.5194/amt-6-1829-2013
23. Wang, J., and Christopher, S.A., (2003). *Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass: implications for air quality studies*. Geophysical Research Letters 30 (21), 2095.
24. Zelm., R., Huijbregts, M., Hollander, H., Jaarsveld, H., Sauter, F., Struijts, J., Wijnen, H., and Meent, D., (2008). *European characterization factors for human health damage of PM<sub>10</sub> and ozone in life cycle impact assessment*. Atmospheric Environment. Volume 42, Issue 3, pages 441-453
25. Zhang, J., Reid, J.S., and Holben, B.N., (2005). *An analysis of potential cloud artifacts in MODIS over ocean aerosol optical thickness products*. Geophysical Research Letters 32, L15803.