

Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Contaminación del aire por partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en Morelia, Michoacán

Air pollution due to suspended particles $PM_{2.5}$ in Morelia, Michoacán

Armando Correa García

Para citar este artículo: Correa García A (2024). Contaminación del aire por partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en Morelia, Michoacán. *Ciencia Nicolaita* 90: 41-56.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.796>

Historial del artículo



Recibido: 8 de febrero de 2024

Aceptado: 8 de enero de 2024

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** cientifico148@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Contaminación del aire por partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en Morelia, Michoacán

Air pollution due to suspended particles $PM_{2.5}$ in Morelia, Michoacán

Armando Correa García*

Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Francisco J. Múgica s/n, Ciudad Universitaria, CP. 58030. Morelia, Michoacán, México.

Resumen

En este estudio se analizó la contaminación atmosférica por partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. Para evaluar la relación entre las $PM_{2.5}$ con monóxido de carbono (CO), y ozono (O_3) registrados en dos sitios de monitoreo en Morelia y uno más en la Zona Metropolitana de la ciudad de México, se realizaron análisis de varianza (ANOVA) no paramétrico y métodos de correlación y regresión. En términos generales, el centro de Morelia predominó con altas concentraciones de $PM_{2.5}$ en comparación con los observados en la ENES-UNAM, campus Morelia y la estación Merced del centro de la ciudad de México. Asimismo, la contaminación por $PM_{2.5}$ en Morelia, aumentó 53% del periodo 2015-2023. Los meses con mayor incremento fueron enero, febrero y marzo de 2023 con 84%, 65% y 106%, respectivamente. También se reporta el incremento histórico de 46 días por encima de la norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-2021, que establece como límite $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $PM_{2.5}$ como promedio diario, de los cuales ocho días fueron consecutivos, sobre todo en mayo 2023, debido en parte a las quemadas agrícolas e incendios forestales ocurridos en la periferia de Morelia. Pero el número de días, se debió al cambio del valor anterior de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ reglamentado en la NOM-025-SSA1-2014.

Palabras clave: partículas suspendidas, monóxido de carbono, ozono, quemadas agrícolas.

Abstract

In this study, air pollution by suspended $PM_{2.5}$ particles in the city of Morelia, Michoacán, Mexico was analyzed. To evaluate the relationship between $PM_{2.5}$ with carbon monoxide (CO), and ozone (O_3) recorded at two monitoring sites in Morelia, and one more in the Metropolitan Zone of Mexico City, non-parametric analysis of variance (ANOVA), correlation and regression methods were carried out. In general terms, the center of Morelia predominated with high concentrations of $PM_{2.5}$ compared to the observed in the ENES-UNAM, Morelia campus and the Merced station in the center of Mexico City. Likewise, $PM_{2.5}$ pollution in Morelia increased 53% from the period 2015-2023. The months with the greatest increase were January, February and March 2023 with 84%, 65% and 106%, respectively. In addition, the historical increase of 46 days above the official Mexican standard NOM-025-SSA1-2021 is reported, which establishes a limit of $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ of $PM_{2.5}$ as a daily average, of which eight days were consecutive, especially in May 2023 due in part to agricultural burning and forest fires that occurred on the outskirts of Morelia, but the number of days was due to the change from the previous value of $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ regulated in NOM-025-SSA1-2014.

Keywords: Suspended particles, carbon monoxide, ozone, agricultural burning

Introducción

Las partículas son cualquier sustancia, qué bajo condiciones normales, pueden estar presentes en estado sólido o líquido en la atmósfera y tienen tamaño microscópico (Whitby y Cantrell 1976, De Nevers, 1997). Se clasifican según el diámetro de las mismas en partículas suspendidas totales (PST) de hasta 100 micras; inhalables o respirables menores a 10 micras (PM_{10}), finas de menos de 2.5 micras ($PM_{2.5}$) y ultra finas con diámetro menor a 1 micra (PM_1). Las fuentes de partículas suspendidas son diversas y abarcan desde las naturales, como polvo volcánico y tolveneras, hasta de origen antropogénico, que incluyen fábricas de acero, plantas de generación de energía, cementeras, fundidoras, obras de construcción y demolición, hornos y chimeneas que utilizan madera como combustible, áreas sujetas a erosión y motores a diésel (Bravo, 1984; Báez, 1987; Wadden, 1987; Manoli *et al.*, 2004).

La composición química de las partículas se divide en dos porciones, una orgánica y otra inorgánica; la fracción orgánica contiene compuestos como el carbono elemental, carbón orgánico y material biológico que incluye endotoxinas, bacterias, esporas, alérgenos y polen. La fracción inorgánica se compone principalmente de sulfatos, amonio, nitratos, metales de transición

y metales térreos (Badillo, 2012; Mancilla *et al.*, 2014; Manzanares *et al.*, 2011). Un antecedente sobre la distribución de dichas partículas fue documentado por Chow *et al.* (2002), quienes midieron las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la ciudad de México en 1997, y descubrieron que alrededor del 50% de las $PM_{2.5}$ formaban parte de las PM_{10} . También, observaron que estas partículas contenían carbono, sulfato, nitrato y amonio.

El aumento en la concentración de partículas PM_{10} y ozono están relacionadas con el incremento en la tasa de mortalidad prematura, daño a la vegetación y edificios, así como la reducción de la visibilidad (HEI, 2000; O'Neill *et al.*, 2004 a, b; De Pablo *et al.*, 2006; Filleul *et al.*, 2006; Ritz *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2006). Las fracciones que representan un mayor riesgo para la salud son las PM_{10} y $PM_{2.5}$, las cuales por su tamaño pueden penetrar a la región torácica y ser tóxicas (Pope *et al.*, 1995). Varios estudios epidemiológicos han demostrado que existe una importante relación entre altos valores de partículas y el aumento de muertes y hospitalizaciones debidas a enfermedades pulmonares (Dockery *et al.*, 1993; Ostro *et al.*, 1999, McDonnell *et al.*, 2000, Pohjola *et al.*, 2000).

El impacto social de la contaminación atmosférica, sobre todo en la salud de las poblaciones humanas, ha dado lugar al planteamiento de

estrategias de control. Entre ellas, se encuentran Normas de Calidad del Aire, las cuáles con base en una serie de estudios, establecen concentraciones máximas permisibles de contaminantes en la atmósfera, de modo que no exista riesgo para la salud (Bravo Álvarez, en Villegas, 1986, en Correa-García, 2004) (**Tabla 1**). En México, las normas de calidad existen desde 1982 (SEDUE, 1986, en Correa-García, 2004). Por ejemplo, para PM_{10} la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, establece una concentración promedio de 24 h de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Tabla 1**). Dicho valor fue rebasado ocho días en Cunduacán, Tabasco, México. Esto ocurrió en mayo de 2023 durante la época de sequía, periodo en que se prepara la tierra para el cultivo y comúnmente se realiza la quema de pastizales, lo que causa una gran emisión de partículas (Pérez-Vidal *et al.*, 2010).

La NOM-025-SSA1-1993 citada previamente, fue modificada a un promedio diario y anual de PM_{10} : $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente (Diario Oficial de la Federación, DOF, 2005 en Correa-García, 2022). Esta norma, de nuevo fue cambiada a NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014), la cual estableció ahora una concentración media diaria y anual de PM_{10} : $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$; para $PM_{2.5}$: $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente (**Tabla 1**). Este último criterio, fue rebasado 1 día (PM_{10}) y 9 días para $PM_{2.5}$ en Morelia, Michoacán, México, el cual se debió al efecto combinado de emisión de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas, móviles, quemas agrícolas e incendios forestales que ocurrieron en la periferia de Morelia, durante la primavera de 2019 (Correa-García, 2020). Recientemente, en marzo de 2023, se reportaron al menos 3 incendios en los alrededores de esta área urbana; uno en la zona de Altozano, otro en la loma de Santa María, un tercero en un corralón

con 17 vehículos incendiados, y el último en un pastizal a la altura de la comunidad de Uruapilla, los cuales pudieron haber influido en los niveles de contaminación atmosférica (Morales-Pérez, 2023).

A mediados de abril, aumentaron los incendios forestales, sin embargo, la topografía del municipio favorece la dispersión de los contaminantes en el corto plazo, evitando así los problemas que enfrentan, por ejemplo, las ciudades de México, Monterrey o Guadalajara, derivados de la contaminación del aire según reporte recibido por Fátima-Alfaro (2023). Por todo lo anterior, en este estudio se analiza la información de las partículas suspendidas $PM_{2.5}$ registrada en el centro de Morelia, con el propósito de identificar los factores que influyeron en el aumento de la contaminación atmosférica por $PM_{2.5}$ del año 2022-2023 y evaluar la nueva norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-2021 (DOF, 2021) que fija una concentración media diaria y anual de $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Tabla 1**).

Metodología

Los datos del año 2022-2023 de las partículas suspendidas $PM_{2.5}$, las variables meteorológicas: temperatura (Temp), humedad relativa (HR), radiación solar (RAD), presión atmosférica (BP), precipitación pluvial (Lluvia), velocidad (WS) y dirección del viento (WD) de la caseta ubicada en la azotea de Palacio Municipal de Morelia (PMN) (**Figura 1A**), se obtuvieron del Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA) adscrita al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en <https://www.sinaica.inecc.gob.mx>, del Gobierno de México.

Los datos de monóxido de carbono (CO), ozono

Tabla 1. Norma oficial mexicana vigente en materia de salud para partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$.

Fuente: <http://186.96.0.232/aire/descargas/monitoreo/normatividad/nom-025-ssa1-2021.pdf>.

Año de publicación	Norma	Años de vigencia	PM ₁₀		PM _{2.5}	
			Promedio 24 hrs	Promedio anual	Promedio 24 hrs	Promedio anual
	NOM-025-SSA1-1993		$150 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$		
2005	NOM-025-SSA1-1993		$120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$		
2014	NOM-025-SSA1-2014	2015-2021	$75 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$45 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$12 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2021	NOM-025-SSA1-2021	2022-2023	$70 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$36 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$41 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
		2024-2025	$60 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$28 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$33 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
A partir del 2026			$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

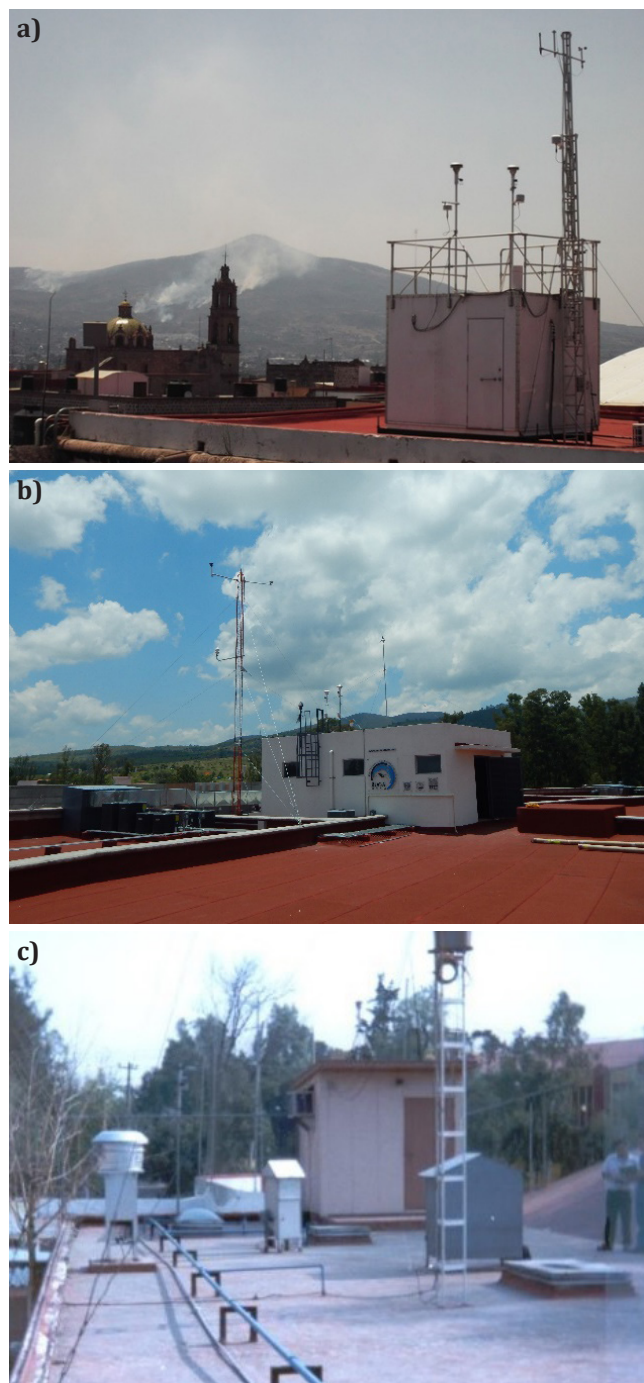


Figura 1. Estaciones de monitoreo atmosférico en Morelia, Michoacán y México Distrito Federal. En a) Palacio Municipal del centro de Morelia, b) ENES-UNAM, al suroeste en las inmediaciones de Morelia y c) Merced cercana al centro histórico de la ciudad de México.

(O₃) y PM_{2.5} del 2022-2023 de la estación situada en las instalaciones de la Escuela Nacional de Estudios Superiores de la Universidad Nacional Autónoma de México (ENES-UNAM) sede Morelia (**Figura 1B**) se adquirieron de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM (RUOA)

disponible en <https://www.ruoa.unam.mx>. Esta información, se empleó para sustituir la falta de datos del centro de la ciudad en PMN; incluso, se tiene reportado que la caseta de la ENES-UNAM es una guía de referencia, para diferenciar los cambios en la contaminación atmosférica y meteorología, entre el medio ambiente urbano y campestre de Morelia (Correa-García, 2022), misma que se localiza alrededor de 15 Km., al suroeste del centro, hacia las afueras de la ciudad de Morelia.

Asimismo, los datos de PM_{2.5} perteneciente a mayo de 2022 y de enero-marzo de 2023 de la estación de monitoreo Merced (MER) que se ubica en las instalaciones del edificio principal del centro de salud Luis E. Ruíz” Alcaldía Venustiano Carranza en el centro de la ciudad de México (**Figura 1C**) se consiguieron de la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal (SMADF) disponible en <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27YqBhnmI=%27>. Esta información se empleó para evaluar los cambios en las concentraciones de PM_{2.5} entre la ciudad de Morelia y México, Distrito Federal.

El área de estudio es el centro histórico de Morelia (**Figura 1A**), la información se organizó en una hoja de cálculo por mes y día del año, bajo el criterio del 75% de suficiencia diaria; es decir, los días que reunieron 18 de 24 registros por día, y una muestra total esperada de 744 datos por mes (31 días *24horas = 744 datos; 30* 24 = 720; 28* 24= 672). Después, se realizaron análisis de correlación y regresión para indagar la relación entre las partículas suspendidas y las variables meteorológicas ya mencionadas, y de esta forma proponer un modelo de regresión lineal que permita describir los factores que influyeron en los niveles de PM_{2.5} registrados en la primavera de 2022-2023. En seguida se puntualizan algunos principios básicos de esta metodología (Balzarini *et al.*, 2008). El coeficiente de correlación de Pearson es un índice adimensional acotado entre -1,0 y 1,0, el cual refleja el grado de dependencia lineal entre dos conjuntos de datos. Su fórmula se escribe como:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots (1)$$

Por otra parte, si X e Y son dos variables en cuestión, un diagrama de dispersión muestra la

localización de los puntos (X, Y) sobre un sistema rectangular de coordenadas. Si todos los puntos del diagrama parecen estar en una recta, la correlación es lineal entre las variables; sin embargo, aunque las variables estén relacionadas, no siempre se extienden sobre una línea recta y se dice que es una relación no lineal. Una línea recta, es el tipo más sencillo de una curva de ajuste (Spiegel, 1991) y su ecuación puede escribirse:

$$Y = a_0 + a_1X \quad \text{..... Ecuación (2)}$$

Dados cualesquiera dos puntos (X_1, Y_1) y (X_2, Y_2) sobre la recta, se pueden determinar las constantes. La ecuación así obtenida se puede expresar.

Donde:

$$Y - Y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X - X_1)$$

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

Se llama la pendiente de la recta y representa el cambio en Y dividido por el correspondiente cambio en X. Cuando la ecuación se escribe en la forma (2), la constante es la pendiente m. La constante a_0 , que es el valor de Y cuando $X = 0$, se nombra la Y-intersección.

Los problemas que involucran más de tres variables, se tratan de manera análoga a las descritas previamente de dos variables y pueden escribirse:

$$X_1 = b_{1.234} + b_{12.34}X_2 + b_{13.24}X_3 + b_{14.23}X_4 \quad \text{Ecuación (3)}$$

En donde Y representa un hiperplano en el espacio de cuatro dimensiones. Multiplicando ambos miembros de la ecuación (3) por 1, X_2 , X_3 y X_4 sucesivamente y sumando se llega a las ecuaciones normales para determinar $b_{1.234}$, $b_{12.34}$, $b_{13.24}$ y $b_{14.23}$ sustituyendo estas en la ecuación (3) nos da la ecuación de regresión de mínimos cuadrados de X_1 sobre X_2 , X_3 y X_4 .

También se realizaron pruebas estadísticas para detectar, si los lotes de datos pertenecen a

una distribución normal, y en su caso efectuar el análisis de varianza (ANOVA). Para lograr lo anterior, se utilizó el estadístico Shapiro-Wilks (W); el cual se obtiene en función del valor medio y desviación estándar, calculados a partir de una muestra de datos. Si el estadístico es significativo, entonces la probabilidad de que los datos resulten de una distribución normal, podría rechazarse. A la inversa, si no es significativo, se acepta la hipótesis y se efectúa el análisis de varianza (ANOVA) paramétrico. Las medidas de tendencia central que utilizan estos dos análisis son la media aritmética y la mediana respectivamente. Cuando la muestra de los datos no procede de una población con curva normal, se puede aplicar la prueba (H) de Kruskal-Wallis (Kruskal and Wallis, 1952). El software estadístico Infostat versión libre 2008 usado este estudio, tiene los módulos que efectúan los análisis mencionados anteriormente.

Resultados

La **Tabla 2** indica que la asociación de las $PM_{2.5}$ en el Palacio Municipal de Morelia, con la temperatura fue positiva al principio de la primavera, sobre todo en marzo con valor de 0.73. En tanto que, con la humedad relativa, la relación fue positiva y negativa con valores bajos en un rango de -0.09 a -0.34. La velocidad del viento fue negativa, principalmente en enero-febrero con un valor de -0.55, y la asociación con la presión atmosférica fue positiva y negativa, sobre todo al inicio de la primavera en un rango de -0.32 a -0.18. Asimismo, la relación de las $PM_{2.5}$ con el CO de la ENES-UNAM fue positiva en febrero y mayo con 0.77 y 0.83. En el caso de O_3 , también fue positiva sobre todo en enero y marzo con 0.79 y 0.63, respectivamente. En cambio, la relación de las $PM_{2.5}$ de Palacio Municipal con el sitio Merced fue positiva en un rango de 0.27 a 0.55, sin embargo, esta dependencia fue mayor con la estación ENES-UNAM en abril y mayo con cifras de 0.90 (**Tabla 2**).

A partir de los valores de asociación descritos previamente, la **Figura 2A** presenta el promedio horario de las $PM_{2.5}$ de mayo de 2022 registradas entre el centro de la ciudad de Morelia, y la caseta Merced ubicada cerca del centro histórico de la ciudad de México. El promedio mensual más alto de $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se presentó en Morelia con una muestra de 55%, y Merced con 82%,

respectivamente. El valor máximo correspondió a Morelia con $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alrededor de las 04:00 h del lunes 02 de mayo, mientras que la **Figura 2B** demuestra una contaminación mayor en Morelia durante la primera quincena de mayo, que en la ciudad de México. También se observa que la norma NOM-025-SSA1-2021 (**Tabla 1**) se rebasó del 02 al 04 de mayo con $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente (**Figura 2B**); incluso, el promedio diario más alto de $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ coincidió con el día 02 de mayo, en que se registró el valor máximo de $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, los cambios en la concentración promedio diaria de $\text{PM}_{2.5}$ en la capital de Michoacán, podrían atribuirse al incremento de CO registrado en la ENES-UNAM con factor de determinación $R = 0.80$, un ajuste $R^2 = 0.79$ y nivel de confianza $p < 0.0001$ (**Figura 2C**). Este modelo puede ser correcto, porque el humo en realidad son emisiones en las que se hallan tanto partículas sólidas como líquidas. Estas últimas son, con frecuencia los condensados de procesos incompletos de combustión, como son los gases azulados provenientes del escape del transporte vehicular (Chovin y Roussel, 1970), el cual podría transitar en los alrededores de la caseta de monitoreo de PMN, o bien a la incorporación de CO, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y dióxido de azufre (SO_2), derivados de los incendios forestales (Chow, 1995).

La **Figura 3A** presenta la media aritmética horaria de las $\text{PM}_{2.5}$, de enero 2023 registradas en las mismas estaciones de monitoreo referidas previamente. El promedio mensual más alto de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se presentó en Morelia con una muestra de 100% (**Figura 3D**) y Merced con 97%. El valor máximo de $166 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se registró otra vez en Morelia el jueves 05 de enero alrededor de las 22:00 h, pero en la ciudad de México el valor máximo de $146 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aconteció el domingo 01 de enero alrededor de las 10:00 h, precedido de altas concentraciones, cercanas a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en horas de la madrugada del mismo día. Asimismo, la **Figura 3B**, demuestra nuevamente, que la contaminación fue mayor en Morelia, y la norma oficial se rebasó el día 5, 7 y 10 con $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, del 13 al 16 con $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En total 7 días, de los cuales 4 fueron consecutivos, mientras que, en el Distrito Federal, el criterio se rebasó el 01 de enero con $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el día 20 con $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, presentándose en esta última zona urbana el promedio más alto de

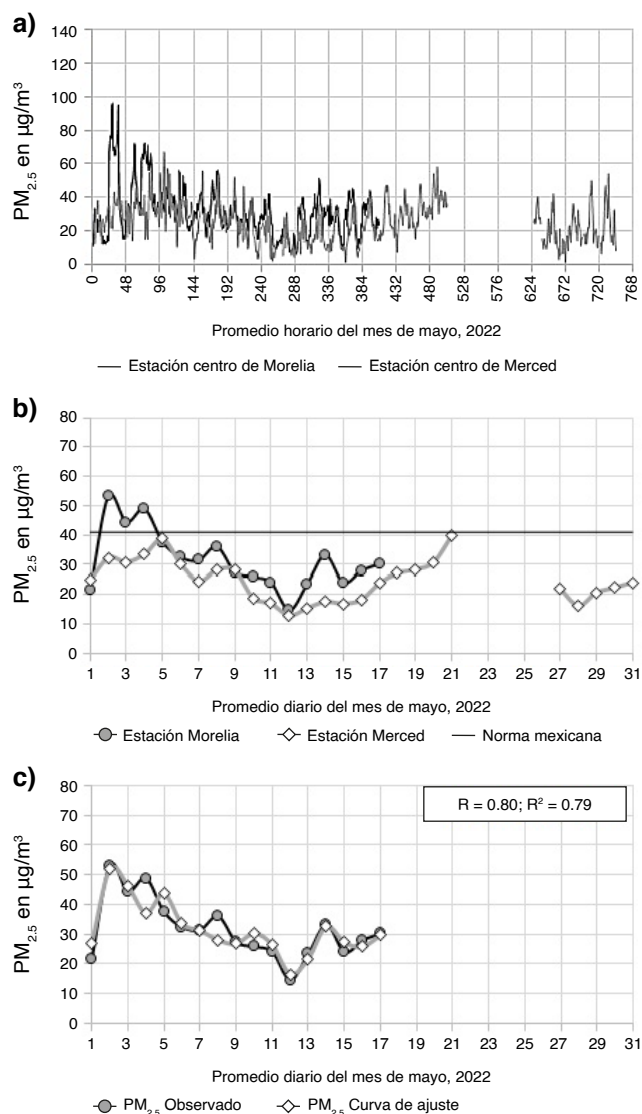


Figura 2. Promedio horario mensual y por día del mes de mayo 2022 de las $\text{PM}_{2.5}$ registradas en 2 sitios de monitoreo de México. En **a)** Promedio horario, **b)** Promedio diario y **c)** Modelo de regresión para la ciudad de Morelia.

$61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual coincidió con el 01 de enero, en que se registró el valor máximo de $146 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, los cambios en la concentración diaria de $\text{PM}_{2.5}$ en Morelia, podrían atribuirse al efecto combinado del aumento de CO y O_3 registrados en la estación ENES-UNAM con factor de determinación $R = 0.60$, un ajuste $R^2 = 0.57$ y nivel de confianza $p < 0.0001$ (**Figura 3C**). Este modelo podría considerarse, adicional al descrito anteriormente, pues el aporte de CO en la producción de O_3 está documentado (Caselli, 1992) mediante la siguiente reacción química:

Tabla 2. Matriz de correlación entre los contaminantes del aire y meteorología registradas en dos sitios de monitoreo atmosférico de la ciudad de Morelia y uno de México, Distrito Federal, año 2023.

Palacio municipal PM _{2.5} Enero		Palacio municipal PM _{2.5} Febrero		Palacio municipal PM _{2.5} Marzo		Palacio municipal PM _{2.5} Abril		Palacio municipal PM _{2.5} Mayo	
PM _{2.5}	1	PM _{2.5}	1	PM _{2.5}	1	PM _{2.5}	1	PM _{2.5}	1
Temp	-0.07	Temp	0.02	Temp	0.73	Temp	0.47	Temp	0.50
HR	-0.09	HR	0.2	HR	-0.21	HR	0.02	HR	-0.34
WS	-0.55	WS	-0.55	WS	-0.30	WS	-0.12	WS	-0.23
BP	0.36	BP	0.32	BP	-0.32	BP	-0.22	BP	-0.18
CO*	0.24	CO*	0.77	CO*	0.24	CO*	0.47	CO*	0.83
O3*	0.79	O3*		O3*	0.63	O3*	0.27	O3*	0.00
PM _{2.5} **	0.27	PM _{2.5} **	0.55	PM _{2.5} **	0.35	PM _{2.5} **	0.88	PM _{2.5} **	0.90

Nota:

* Estación de monitoreo ENES-UNAM, sede Morelia

** Estación de monitoreo Merced, Cd. de México

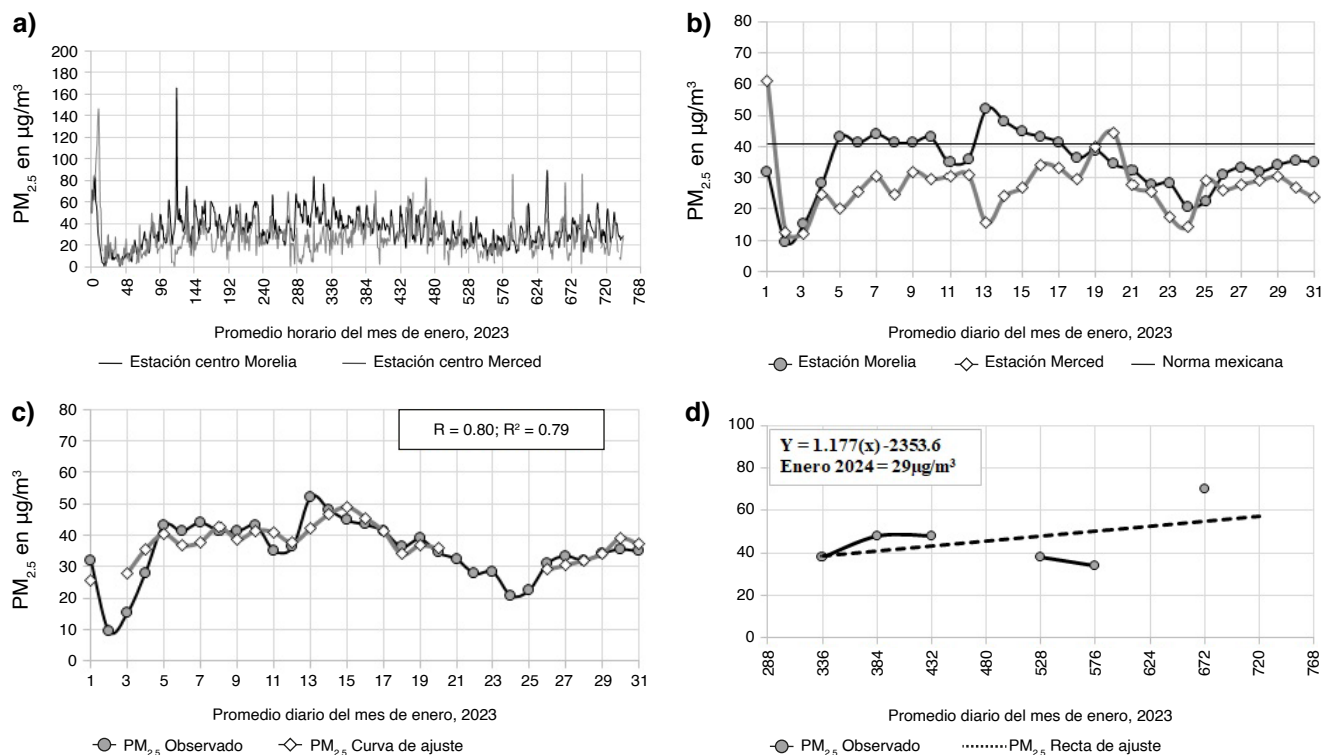
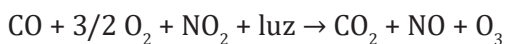


Figura 3. Promedio horario mensual y por día del mes de enero 2023 de las PM_{2.5} registradas en 2 sitios de monitoreo de México. En b) Promedio horario, b) Promedio diario, c) Modelo de regresión para la ciudad de Morelia y d) Valor estimado para enero, 2024 en Morelia.



De esta forma, los niveles de contaminación por PM_{2.5} observados en enero, 2023 puede atribuirse otra vez a las emisiones de CO por fuentes móviles y en consecuencia mayor cantidad de O₃. Además,

de un posible aporte de PM_{2.5} derivado del siniestro ocurrido en una recicladora de llantas; pues dos días antes, durante y después del incendio ocurrido el sábado 7 de enero en dicho predio ubicado en la salida a Salamanca, en <https://www.morelia.gob.mx/2023/01/09/>.

La norma oficial mexicana como ya se mencionó fue rebasada; incluso, en presencia de lluvia el 10 de enero con 0.13 mm . Por otra parte, en enero de 2023 las $\text{PM}_{2.5}$ alcanzaron el promedio más alto de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con respecto de los $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrado en 2016 (**Figura 3D**); un aumento de 80% que podría amortiguarse en el 2024, utilizando el tipo más sencillo de una curva de ajuste, el cual predice un valor de $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

De igual forma la **Figura 4A**, presenta el promedio horario de las $\text{PM}_{2.5}$ de febrero de 2023 registradas en los mismos sitios de monitoreo descritos anteriormente. El promedio mensual más alto de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se presentó en Morelia con un muestreo de 87%, y Merced con 71%; el valor máximo de $84 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se registró otra vez en Morelia el viernes 24 de febrero alrededor de las 13:00 h, pero el promedio diario más alto de $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ocurrió el 18 de febrero (**Figura 4B**). Otros valores menores a dicho promedio, pero por encima de la norma mexicana acontecieron en los días 3-4 con $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el 07-08 con $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 24-25 con $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, y el 28 de febrero con $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en total ocho días. Asimismo, en la ciudad de México, el valor máximo de $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ocurrió el viernes 17 de febrero alrededor de las 12:00 h, y ningún día por arriba de la norma. Por otra parte, los cambios en la concentración diaria de $\text{PM}_{2.5}$ en el centro de Morelia, podrían atribuirse al aumento de CO registrado en la estación ENES-UNAM con factor de correlación $R = 0.59$, un ajuste $R^2 = 0.57$ y nivel de confianza $p < 0.0001$ (**Figura 4C**). Este modelo es similar al propuesto en mayo de 2022 y la explicación al respecto es la misma que se abordó en dicho mes.

Para febrero de 2023 alcanzó la concentración media más alta de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en relación con los $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrados en 2016 (**Figura 4D**); un aumento de 65 %, el cual podría bajar a $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el 2024.

Por último, en la **Figura 5A** se presenta el promedio horario de las $\text{PM}_{2.5}$ de marzo de 2023 registradas en las mismas estaciones de monitoreo descritas en los párrafos anteriores. El promedio mensual más alto de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aconteció en Morelia con un muestreo de 97% y Merced con 92%. El valor máximo de $87 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se registró de nuevo en Morelia el viernes 10 de marzo alrededor de las 23:00 h, pero el promedio diario más alto de $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ocurrió el 11 de marzo (**Figura 5B**).

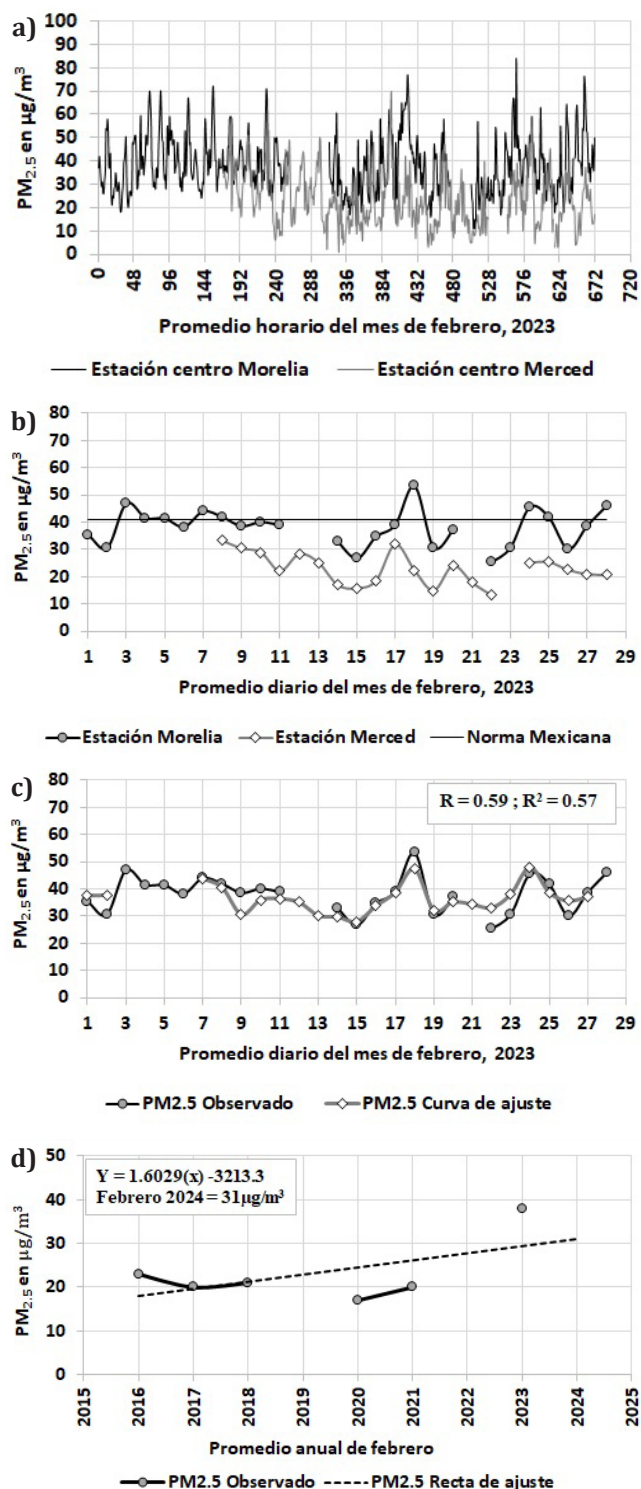


Figura 4. Promedio horario mensual y por día del mes de febrero de 2023 de las $\text{PM}_{2.5}$ registradas en dos sitios de monitoreo de México. En a) Promedio horario, b) Promedio diario, c) Modelo de regresión para la ciudad de Morelia y d) Valor estimado para febrero de 2024 en Morelia.

Otros valores menores a dicho promedio, pero por encima de la norma mexicana, se registraron del 6 al 10 de marzo con $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El día 12 con $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y del 28-29 de marzo con $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En total nueve días, de los cuales siete fueron consecutivos. En tanto que, en la ciudad de México, el valor máximo de $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se presentó el lunes 27 de marzo, alrededor de las 13:00h y ningún día por encima de la norma. Por otra parte, los cambios en la concentración diaria de $\text{PM}_{2.5}$ en Morelia, se debió al aumento de la temperatura y descenso de la humedad relativa registrada en el centro de la ciudad con factor de determinación $R = 0.65$, un ajuste $R^2 = 0.62$ y nivel de confianza $p < 0.0001$ (Figura 5C).

Este modelo podría ser correcto, debido a que las $\text{PM}_{2.5}$ aumentaron al inicio de marzo por los incendios ocurridos en la periferia de la ciudad (Morales-Pérez, 2023) y a fines de marzo, subieron otra vez junto con el calor y descenso de la humedad relativa, por la proximidad de la primavera y quemas agrícolas ocurridas al final del mes. Por otra parte, en marzo de 2023 fue el mes con el mayor promedio de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con respecto de los $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrados en 2016 (Figura 5D); un aumento de 106 %, el cual podría bajar a $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2024.

Para el mes de abril de 2023 la (Figura 6A) presenta la media aritmética horaria de las $\text{PM}_{2.5}$ registradas ahora en la estación PMN del centro urbano y la ENES-UNAM al suroeste en la periferia de Morelia. El promedio mensual más alto de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aconteció en PMN con un muestreo de 90% y ENES-UNAM con 97%, respectivamente. El valor máximo de $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ocurrió en la ENES-UNAM el jueves 27 de abril alrededor de las 4:00 h, y ningún día por arriba de la norma, mientras que en PMN el valor máximo de $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se registró el martes 04 de abril alrededor de las 10:00 h. Pero el promedio diario más alto de $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se presentó el 1 y 22 de abril (Figura 6B). Otros valores menores a dicho promedio, pero por encima del criterio oficial, acontecieron del 02-04 de abril, con $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El día 11 con $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el día 17 con $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, del 27-28 con $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En total nueve días, de los cuales cuatro fueron continuos; incluso, en los días 11 y 22 de abril se presentó lluvia con 0.11 mm y 0.40 mm, respectivamente.

Por otra parte, los cambios en la concentración

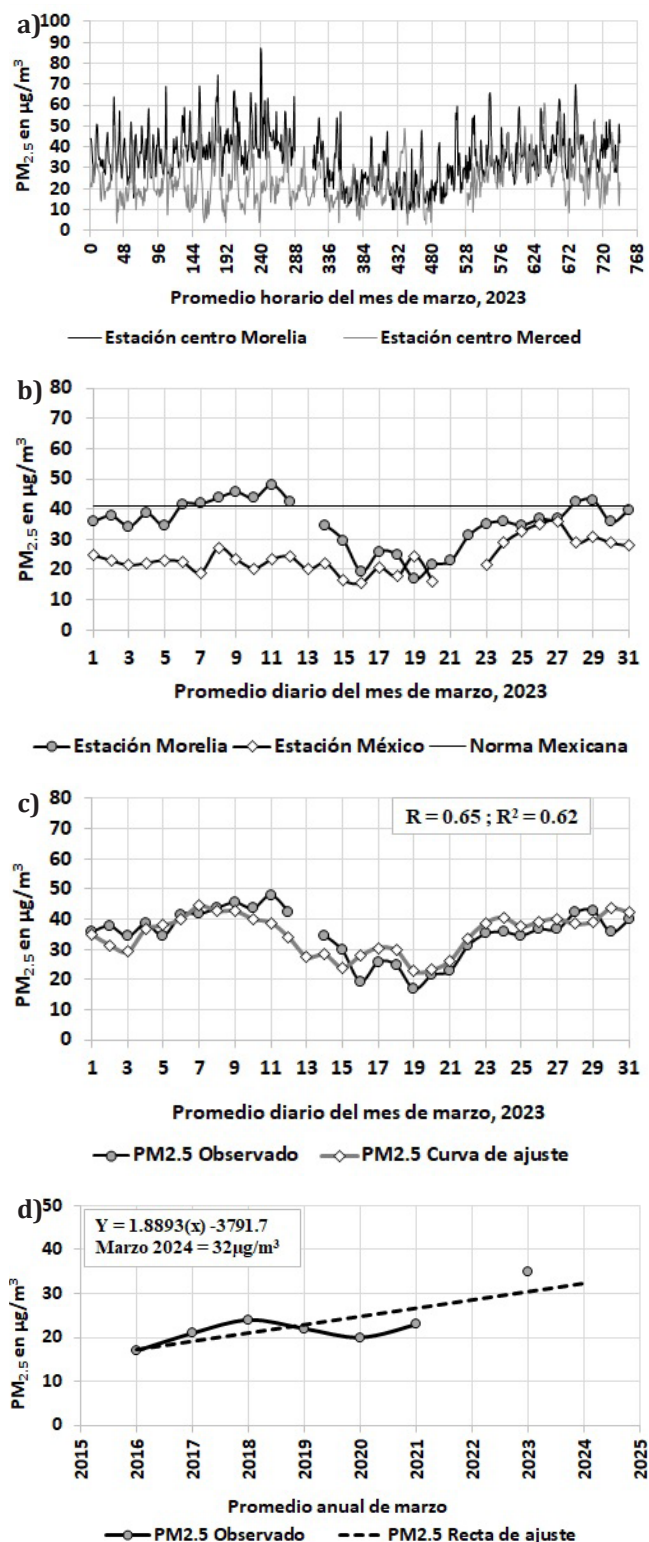


Figura 5. Promedio horario mensual y por día del mes de marzo 2023 de las $\text{PM}_{2.5}$ registradas en 2 sitios de monitoreo de México. En a) Promedio horario, b) Promedio diario, c) Modelo de regresión para la ciudad de Morelia y d) Valor estimado para marzo, 2024 en Morelia.

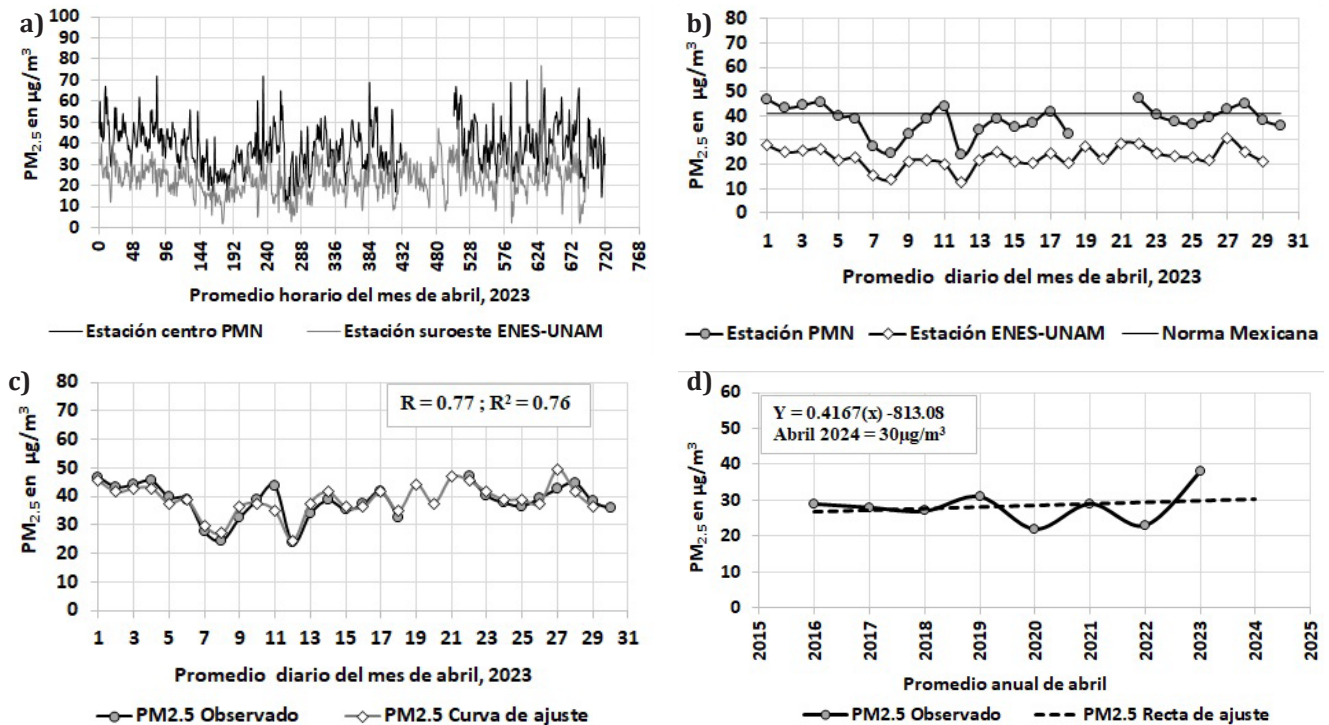


Figura 6. Promedio horario mensual y por día del mes de abril de 2023 de las PM_{2.5}, registradas en dos sitios de monitoreo de Morelia. En a) Promedio horario, b) Promedio diario, c) Modelo de regresión para la ciudad de Morelia y d) Valor estimado para abril de 2024.

diaria de PM_{2.5} en Morelia, se debió al aumento de las PM_{2.5} registradas en la ENES-UNAM con factor de correlación $R = 0.77$, un ajuste $R^2 = 0.76$ y nivel de confianza $p < 0.0001$ (Figura 6C). Este modelo podría ser válido, porque a mediados de abril aumentaron los incendios forestales (Fátima-Alfaro, 2023), o bien al exceso de PM_{2.5} transportadas por el viento desde el sitio ENES-UNAM que se localiza al suroeste de Morelia. Esto podría ser un indicador del impacto que también tienen las actividades agrícolas, de rosa tumba y quema en esta zona alejada, unos 15 km de la ciudad (Figura 6B). Por otra parte, abril de 2023 fue el mes con el mayor promedio, con 38 µg/m³, respecto de los 29 µg/m³ registrados en 2016 (Figura 6D); un aumento de 31 %, el cual podría bajar a 30 µg/m³ en el 2024.

Igualmente, para el mes de mayo de 2023, la Figura 7A presenta el promedio horario de las PM_{2.5}, registradas en las mismas estaciones de monitoreo referidas en los párrafos anteriores. El promedio mensual más alto de 41 µg/m³ y 30 µg/m³ aconteció en PMN con un muestreo de 100 % y ENES-UNAM con 77%, respectivamente. El valor máximo de 112 µg/m³ se presentó en PMN el domingo 07 de mayo alrededor de las 15:00 h. Dicho valor, coincidió

con el promedio diario más alto de 56 µg/m³, el domingo 07 y lunes 08. Otros valores, menores de dicho promedio, pero por arriba del criterio oficial sucedieron del 03-06 con 48 µg/m³, 53 µg/m³, 52 µg/m³ y 52 µg/m³, respectivamente. Del 09-10 con 50 µg/m³ y 55 µg/m³, respectivamente, el 12 con 46 µg/m³, el 18 con 44 µg/m³, el 22-23 con 42 µg/m³ y 47 µg/m³, y 31 con 42 µg/m³; en total 13 días. De estos, ocho fueron consecutivos; incluso, en los días 12 y 23 de mayo se registró lluvia con 0.030 mm y 0.13 mm, respectivamente, mientras que en la ENES-UNAM el valor máximo de 93 µg/m³, se registró el domingo 07 de mayo alrededor de las 14:00hrs. Pero el promedio diario más alto de 43 µg/m³ se presentó el 10 de mayo (Figura 7B); teniendo en consecuencia, un día por encima del criterio oficial.

Por otra parte, los cambios en la concentración diaria de PM_{2.5} en Morelia, se debió al aumento de las PM_{2.5} registradas en la ENES-UNAM con factor de correlación $R = 0.81$, un ajuste $R^2 = 0.81$ y nivel de confianza $p < 0.0001$ (Figura 7C). Este modelo es similar al referido anteriormente y la explicación al respecto es la misma que se abordó para el mes de abril. Por otra parte, mayo 2023 fue el mes con el mayor promedio de 41 µg/m³ con respecto de

los 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ registrados en 2016 (**Figura 7D**); un aumento de 21 %, el cual podría estabilizar la pendiente al aumento en 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 2024.

Discusión

Los resultados obtenidos del ANOVA no paramétrico, podrían confirmar que la contaminación por $\text{PM}_{2.5}$ fue más alta en el centro, que en la periferia de Morelia (**Tabla 3:1-2**) esta diferencia, está documentada en (Correa-García, 2022), quien reportó 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ en PMN y ENES-UNAM, respectivamente, en mayo 2016. Mientras que el valor de la mediana de las $\text{PM}_{2.5}$, también fue mayor en la capital de Michoacán, con respecto del sitio Merced de la ciudad de México (**Tabla 3:3-6**). Esto podría deberse a la exposición más inmediata del centro de Morelia con las actividades agrícolas, situación que no es común que suceda, como actividad en los alrededores de la estación Merced, o bien, que esta discrepancia, podría atribuirse a varios factores: La distancia en kilómetros entre ambos sitios, altitud sobre el nivel del mar, el tamaño del parque vehicular, las industrias, los servicios públicos, la población, etc.

Por otra parte, la sustitución de los datos de monóxido de carbono (CO) y ozono (O_3) de la estación ENES-UNAM, debido a la falta de datos en la estación de PMN, proporcionaron curvas de ajuste muy estrechas, en donde los valores estimados lograron describir adecuadamente los promedios diarios observados de las $\text{PM}_{2.5}$ en el centro de la ciudad. De hecho, los valores residuales (valor estimado menos el observado) cumplieron con el principio de normalidad. Además, la incorporación de las $\text{PM}_{2.5}$ de la ENES-UNAM, sobre todo en abril y mayo de 2023, para explicar los niveles de $\text{PM}_{2.5}$ en PMN, demuestra que la alta correlación hallada entre ambos sitios, se debe al tamaño de su diámetro y la distancia en kilómetros entre las casetas. Sin embargo, la diferencia hallada (**Tabla 3:1-2**) podría atribuirse a la naturaleza y composición química de las partículas, la cual depende del entorno físico y tipos de fuentes de emisión. Esto último, también puede ser válido para la estación Merced del centro de la ciudad de México (**Tabla 3:3-6**).

La evaluación de la norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-2021 mostró que Morelia en el 2023, contabilizó 46 días por encima de la

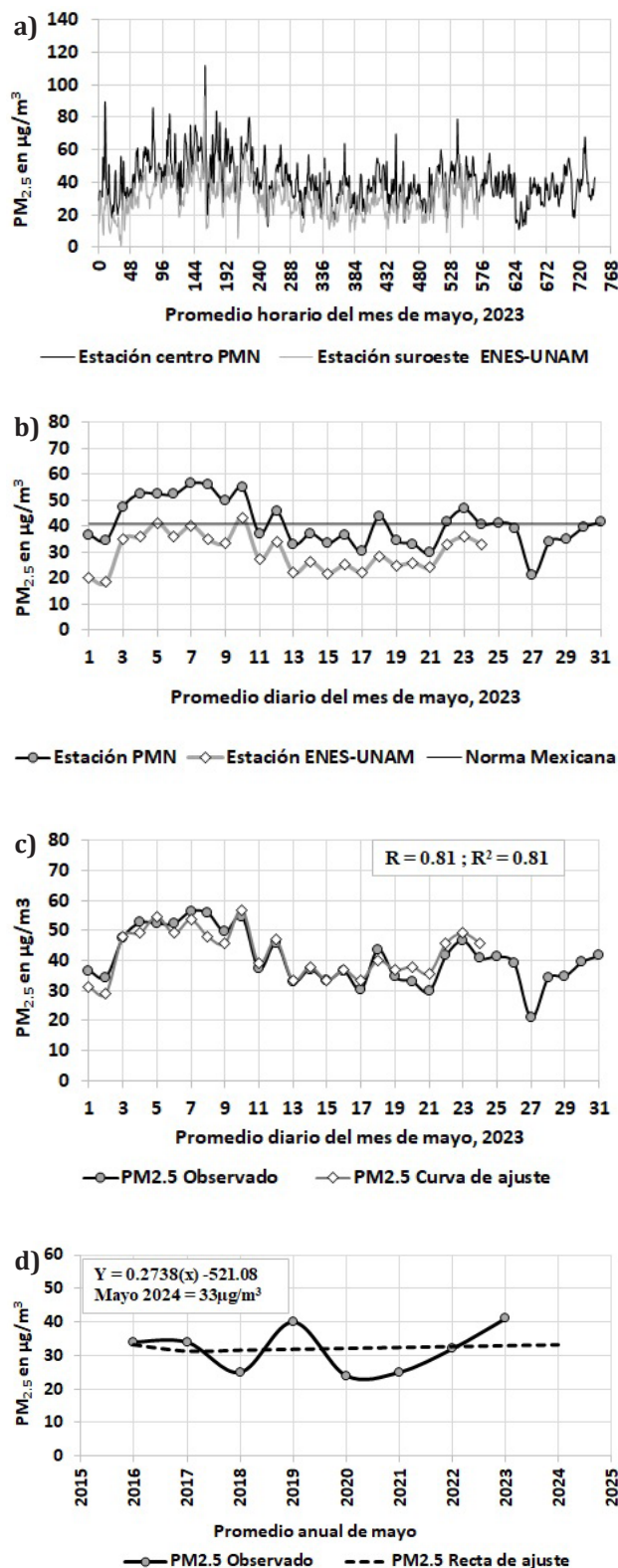


Figura 7. Promedio horario mensual y por día del mes de mayo de 2023 de las $\text{PM}_{2.5}$ registradas en dos sitios de monitoreo de Morelia. En a) Promedio horario, b) Promedio diario, c) Modelo de regresión para la ciudad de Morelia y d) Valor estimado para mayo, 2024.



Tabla 3. Resumen ANOVA no paramétrico Kruskal-Wallis para detectar cambios en la mediana mensual de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en $\mu g/m^3$ entre sitios de muestreo en Morelia y la ciudad de México. Los sitios en diferentes casillas, son distintos con nivel de significación mínimo de 99%.

1	Año- mes	Sitio de muestreo	1 ENES-UNAM	2 PMN	2	Año- mes	Sitio de muestreo	1 ENES-UNAM	2 PMN
	2023	Contaminante	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$		2023	Contaminante	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$
	abril	Mediana	$23\mu g/m^3$	$38\mu g/m^3$		mayo	Mediana	$30\mu g/m^3$	$40\mu g/m^3$
		Mediana global					Mediana global		
			$29\mu g/m^3$					$35\mu g/m^3$	
		Número de datos	696	648			Número de datos	576	743
	Muestra en %	97%	90%		Muestra en %	77%	100%		
3	Año- mes	Sitio de muestreo	1 Cd. México	2 Cd. Morelia	4	Año- mes	Sitio de muestreo	1 Cd. México	2 Cd. Morelia
	2022	Contaminante	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$		2023	Contaminante	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$
	mayo	Mediana	$25\mu g/m^3$	$30\mu g/m^3$		enero	Mediana	$25\mu g/m^3$	$34\mu g/m^3$
		Mediana global					Mediana global		
			$27\mu g/m^3$					$30\mu g/m^3$	
		Número de datos	607	408			Número de datos	719	744
	Muestra en %	82%	55%		Muestra en %	97%	100%		
5	Año- mes	Sitio de muestreo	1 Cd. México	2 Cd. Morelia	6	Año- mes	Sitio de muestreo	1 Cd. México	2 Cd. Morelia
	2023	Contaminante	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$		2023	Contaminante	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$
	febrero	Mediana	$21\mu g/m^3$	$36\mu g/m^3$		marzo	Mediana	$23\mu g/m^3$	$35\mu g/m^3$
		Mediana global					Mediana global		
			$30\mu g/m^3$					$29\mu g/m^3$	
		Número de datos	476	587			Número de datos	682	720
	Muestra en %	71%	87%		Muestra en %	92%	97%		

norma; cifra que representa cerca de 120% más, en comparación con los 21 días computados con la NOM-025-SSA1-2014. Este porcentaje de incremento parece enorme, pero los 21 días también constituyen alrededor de 130% más, con respecto de los 9 días reportados en 2019 con la misma NOM-025-SSA1-2014 (Correa-García, 2020). En el año 2020, no hubo ningún registro por encima del reglamento, y para el año 2021, el criterio fue superado el 23 y 24 de abril con $47 \mu g/m^3$ y $51 \mu g/m^3$, respectivamente (Correa-García, 2022). Esta última descripción, demuestra que las $PM_{2.5}$ alcanzaron por primera vez concentraciones con tendencia al aumento en el promedio mensual y anual, sobre todo, en los primeros cinco meses de 2023, aún con el cambio de $12 \mu g/m^3$ a $10 \mu g/m^3$ del promedio anual. La experiencia enseña otra vez, una diferencia grande entre el valor reglamentado,

y el obtenido del 2015 al 2023 (Tabla 4). Pese a esto, parece evidente que Morelia enfrenta hoy un problema de contaminación por $PM_{2.5}$, debido en parte a las quemadas agrícolas e incendios forestales. Sin embargo, una limitación al respecto, es la falta de información de PM_{10} en los dos últimos años.

Por otra parte, según el (DOF, 2021) los cambios de la NOM-025-SSA1-2021, se hicieron porque los valores fijados en la NOM-025-SSA1-2014, eran ampliamente mayores a las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) [PM_{10} : $50 \mu g/m^3$ y $PM_{2.5}$: $25 \mu g/m^3$], y la nueva norma, tiene como objetivo alcanzar gradualmente la recomendación de la OMS, con el fin de proteger la salud de la población. Pero este argumento, tiene limitaciones porque el establecimiento de una norma, no tiene su base en una recomendación, sino en una serie de estudios

Tabla 4. Resumen de las concentraciones promedio anual y mensual de las partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en $\mu g/m^3$ registradas en el centro de la ciudad de Morelia. Periodo 2015-2023. Fuente: Periodo 2015-2021 reproducido de (Correa-García, 2022). El tono gris, indica muestreo suficiente $\geq 50\%$ y $< 75\%$.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio año
2015							16	17	12	14	21	21	17
2016	19	23	17	29	34	18	16	16	14	16	19	21	20
2017	24	20	21	28	34	18	18	13	11	14	22	28	21
2018	24	21	24	27	25	13	19	14	13	12	14		19
2019			22	31	40	16	15	15	15	13	18	22	21
2020	19	17	20	22	24	14	11	10	11	15	16	17	16
2021	17	20	23	29	25	12	14	13	10	12			17
2022				23	32					15	22	20	
2023	35	38	35	38	41	21	15	15	18	15	19	20	26
2024													
% de aumento	84	65	106	31	21	17	-6	-12	50	7	-10	-5	53

que ajustan concentraciones máximas permisibles de contaminantes en la atmósfera. De modo que no exista riesgo para la salud de las poblaciones, humanas, sobre todo porque en Morelia no se tienen estudios epidemiológicos al respecto. Por otra parte, las expectativas para el 2024 con base en la información de la **Tabla 4** y la función lineal correspondiente [$Y = 0.4787(x) - 946.68$] indican un descenso mínimo del promedio anual a $22 \mu g/m^3$. Pero debido a lo extenso de este estudio el gráfico no se exhibe en ningún apartado. Mientras que, para los primeros cinco meses del año, los valores estimados también disminuirán, pero la pendiente seguirá hacia arriba. Los pronósticos aquí mostrados, no están exentos de fallar, debido a los procesos de operación, calibración y mantenimiento de los equipos de monitoreo de $PM_{2.5}$, así como la entrada en vigor de la NOM-025-SSA1-2021 para el 2024 que fija un valor de $33 \mu g/m^3$ y $10 \mu g/m^3$ de promedio diario y anual. Significa rebasar el límite establecido con mayor frecuencia, lo cual es tema de preocupación, ya que esta norma es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional, para las autoridades federales y locales que tengan a su cargo la vigilancia y evaluación de la calidad del aire.

Conclusiones

En el año 2023 la contaminación atmosférica por partículas suspendidas $PM_{2.5}$, se incrementó 53%

en la ciudad de Morelia, con respecto al 2015. Enero, febrero, marzo y septiembre, fueron los meses con mayor incremento, 84%, 65%, 106% y 50%, respectivamente. Por lo tanto, se recomienda, a las autoridades encargadas del tema, elaborar políticas encaminadas a reducir la tendencia actual de estos contaminantes. Actualmente la ciudad de Morelia, puede alcanzar concentraciones de $PM_{2.5}$ más altas que en la ciudad de México, al menos respecto a la estación Merced, que se ubica cerca del centro histórico del Distrito Federal. La evaluación de la norma mexicana vigente en materia de salud NOM-025-SSA1-2021 para $PM_{2.5}$, contabilizó 46 días por encima de esta norma, y la comparación con la NOM-025-SSA1-2014 dio como resultado 21 días fuera del criterio. En cualquier caso, el número de eventos registrados en el 2023 es histórico y tema de preocupación. Los modelos propuestos en este estudio, sugieren que el monóxido de carbono (CO) y ozono (O_3) contribuyen a la contaminación atmosférica por partículas suspendidas $PM_{2.5}$, como resultado de las quemadas agrícolas que ocurren en la periferia de la ciudad de Morelia.

Dedicatoria

Este estudio está dedicado en memoria de Miguel Agustín Chapela Mendoza, del Departamento de Difusión y Divulgación de la Facultad de Biología, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, fallecido en enero de 2024.

Referencias

- Badillo Castañeda CT (2012). Caracterización del Contenido de Metales en Partículas $PM_{2.5}$ en dos zonas del Área Metropolitana de Monterrey. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León. Pp. 114.
- Báez A (1987). La calidad del aire serie Medio Ambiente en Coahuila Volumen II. Centro de Eco-desarrollo. México D.F. Pp. 56.
- Balzarini MG, González L, Tablada M, Casanoves F, Di Rienzo JA, Robledo CW (2008). Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Bravo AH (1984). La contaminación del aire en México. Fundación Universo Veintiuno, México D.F. 64 pp.
- Caselli M (1992). La contaminación atmosférica. Causas y fuentes. Efectos sobre el clima la vegetación y los animales. Siglo XXI Editores, México. Pp. 192.
- Correa-García A (2022). Contaminación atmosférica y meteorología en Morelia Michoacán, México. Una década evaluando la atmosfera urbana de la ciudad de Morelia. Publicado en noviembre 14, 2022. Pp. 228. Editorial Académica Española. ISBN 978-620-2-25130-3
- Correa-García A (2020). Contaminación atmosférica por incendios forestales en Morelia, Michoacán. Ciencia Nicolaita. Número 80, Pp. 56-75. Agosto de 2020. Publicado el 04 de diciembre de 2020. <https://cic.cn.umich.mx>.
- Correa-García A (2004). Contaminantes atmosféricos en la zona metropolitana de la ciudad de México. Universidad Autónoma Metropolitana-Instituto Politécnico Nacional. Pp. 280. Impreso en México. Primera edición 2004., Primera reimpresión 2009. ISBN 970-36-0349-2; ISBN 970-36-0199-5. <http://www.publicaciones.ipn.mx>.
- Chow JC, Watson JG, Edgerton SA, Vega E (2002). Chemical composition of PM_{10} in Mexico City during winter 1997. *Sci. Total Environ.* 287(3): 177-201.
- De Nevers (1997). Ingeniería y Control de la Contaminación del Aire, Editorial Mc Graw Hill, México D.F. Pp. 546.
- De Pablo F, López A, Rivas Soriano L, Tomás C, Diego L, González M, Barrueco M. (2006). Relationships of daily mortality and hospital admissions to air pollution in Castilla-León Spain. *Atmósfera* 19: 23-39.
- Diario Oficial de la Federación. (DOF, 2021). NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Publicado el miércoles 27 de octubre, 2021.
- Dockery DW, Pope III CA, Xu MD, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG, Speizer FE (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N. Engl. J. Med.* 329: 1753-1759.
- Fátima-Alfaro (2023). Calidad del aire en Morelia sin afectaciones por incendios forestales. Agencia Quadratín. Publicado el 18 de abril, 2023. <https://www.quadratin.com.mx/municipios/morelia/calidad-del-aire-en-morelia-sinafectaciones-por-incendios-forestales/>
- Filleul L, Cassadou S, Medina S, Fabres P, Lefranc A, Eiltein D, Le Tertre A, Pascal L, Chardon B, Blanchard M, Declercq C, Jusot JF, Prouvost H, Ledrans M (2006). The relation between temperature, ozone, and mortality in nine French cities during the heat wave of 2003. *Env. Health Pers.* 114: 1344-1347.
- Gobierno Municipal monitorea calidad del aire debido a incendio registrado en Tarímbaro. Publicado en enero 09, 2023 en <https://www.morelia.gob.mx/2023/01/09/>.
- Health Effects Institute (HEI, 2000). Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality. Synopsis of the Particle Epidemiology Reanalysis Project. Health Effects Institute.
- Mancilla Y, Mendoza A, Herckes P y Fraser M (2014). Source Apportionment of $PM_{2.5}$ based on molecular organic marker in Monterrey, Mexico. En: A&WMA's 107th Annual Conference & Exhibition. 24-27 de Junio de 2014. California, Estados Unidos. Paper 33604.
- Manoli E, Kouras A, Samara C (2004). Profile analysis of ambient and source emitted particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from three sites in northern Greece. *Chemosphere* 56: 867-878.
- Manzanares L, Echániz G, López MA, Pérez IK y Garibay V (2011). Guía metodológica para la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$. INE, México. 103 pp.
- McDonnell WF, Nishino-Ishikawa N, Peterson FF, Chen LH, Abbey DE (2000). Relationship of mortality with the fine and coarse fraction of long term ambient PM_{10} concentrations in nonsmokers. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 10: 427-436.

- Morales-Pérez U (2023). Reportan a Morelia con calidad del aire extremadamente mala. Agencia Quadratín. Publicado el 07 de marzo, 2023. <https://www.quadratin.com.mx/principal/reportan-a-morelia-con-calidad-del-aire-extremadamente-mala/>
- Ostro BD, Eskeland GS, Sánchez JM, Feyzioglu T (1999). Air Pollution and health effects: a study of medical visits among children in Santiago, Chile. *Environmental Health Perspective* 107: 69-73.
- O'Neill MS, Loomis D, Borja-Aburto VH (2004a). Ozone, area social conditions, and mortality in Mexico City. *Environ. Res.* 94: 234-242.
- O'Neill MS, Loomis D, Borja-Aburto VH, Gold D, Hertz-Picciotto I, Castillejos M (2004b). Do associations between airborne particles and daily mortality in Mexico City differ by measurement method, region, or modeling strategy? *J. Exp. Anal. Environ. Epidemiol.* 14: 429-439.
- Ritz B, Wilhelm M and Zhao Y (2006). Air Pollution and infant death in southern California, 1989-2000. *Pediatrics* 118: 493-502.
- Pérez-Vidal H, Lunagómez-Rocha MA, Acosta-Pérez Ll (2010) Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM10), en Cunduacán, Tabasco. *Universidad y ciencia* 26(2): 151-162
- Pohjola M, Kousa A, Aarnio P, Koskentalo T, Kukkonen J, Harkonen J, Karppinen A (2000). Meteorological interpretation of measured urban PM2.5 and PM10 concentrations in the Helsinki Metropolitan Area. *Air Pollution VIII* 689-698.
- Pope CA, Thun MJ, Namboodiri MM, Dockery DW, Evans JS, Speizer FE, Heath CW (1995). Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults. *Am. J. Respir. Crit. Care. Med.* 151: 669-674.
- Spiegel, Murray R (1991). Estadística. Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill. Impreso en España.
- Wadden AR, Scheff A (1987). Contaminación del aire en interiores, editorial Limusa, México D.F. 67 pp.
- Whitby K, Cantrell B (1976). Fine particles. In International conference on environmental sensing and assessments, Las Vegas, NV, Institute of Electric and Electronic Engineers.
- Zhang Y, Huang W, London SJ, Song G, Chen G, Jiang I, Zhao N, Chen B, Kan H (2006). Ozone and daily mortality in Shanghai, China. *Environ. Hel. Persp.* 114: 1227-1232.