

Aproximación Psicosocial al estudio de la calidad del aire:

Ambiente, Salud y Sociedad
de tres zonas de la Megalópolis

Karina Landeros Mugica. Editora





Sociedad Mexicana de Psicología Social, A. C. (SOMEPSO)

Héctor Manuel Cappello García
Presidente Honorario

Manuel González Navarro
Presidente

Ma. Irene Silva Silva
Secretaria de Finanzas

Salvador Arciga Bernal
Secretario de Organización

Jorge Mendoza García
Secretario de Relaciones Públicas

Juan Soto Ramírez
Secretario de Publicaciones

CONSEJO ACADÉMICO, DE INVESTIGACIÓN y ESTUDIOS PROFESIONALES

Salvador Iván Rodríguez Preciado
Pablo Fernández Christlieb
J. Octavio Nateras Domínguez

Aproximación psicosocial al estudio de la calidad del aire: ambiente, salud y sociedad de tres zonas de la Megalópolis



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



Somepso®



Los derechos exclusivos de la presente edición quedan reservados para todos los países de habla hispana. Queda prohibida su reproducción, parcial o total, por cualquier medio conocido o por conocerse sin el consentimiento por escrito de los legítimos poseedores de derechos.

Sello editorial: Sociedad Mexicana de Psicología Social (SOMEPSO)

Primera edición: abril, 2025

D. R. © 2025 Karina Landeros Mugica

D. R. © 2025 Sociedad Mexicana de Psicología Social (SOMEPSO)

Altar 55, Col. Prados de Coyoacán, Delegación Coyoacán, C.P. 04810, Ciudad de México, México

Diseño editorial e impresión: TINTA NEGRA EDITORES

Formación: Héctor Astorga

Corrección: Ana M. Cadena

Supervisión de producción: Ernesto Iván Mendoza

Avenida del taller 96-28 Col. Tránsito, Alcaldía Cuauhtémoc, C.P. 06820 Ciudad de México

tneditores@gmail.com

ISBN libro impreso 978-607-98044-5-9

ISBN libro digital 978-607-98044-6-6

El presente libro ha sido dictaminado de manera positiva por pares académicos ciegos y externos a través del comité editorial de la Sociedad Mexicana de Psicología Social, quien lo liberó para su publicación al cumplir a cabalidad con los requerimientos académicos establecidos en sus Lineamientos Editoriales.

Fecha de recepción: 20 de enero de 2025
Aprobado para publicación: 24 de abril de 2025

Impreso y encuadernado

Hecho en México

Contenido

Presentación	11
Introducción <i>Karina Landeros Mugica</i>	15
SECCIÓN I	
LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN TRES ZONAS METROPOLITANAS DE LA MEGALÓPOLIS: CARACTERÍSTICAS, QUÍMICA ATMOSFÉRICA, PROBLEMÁTICA ACTUAL E IMPACTO A LA SALUD	
1. Contaminantes atmosféricos y gestión de la calidad del aire en México <i>Violeta Mugica Álvarez</i>	21
2. Tres zonas metropolitanas de la Megalópolis: Valle de México, Valle de Toluca y Cuernavaca <i>Alma Angélica Neria Hernández, Fernando Millán Vázquez y Alhelí Brito Hernández</i>	57
3. Epidemiología. Padecimientos asociados a la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca <i>Víctor Manuel Torres Meza, Ignacio Miranda Guzmán, María de Jesús Mendoza Sánchez, Luis Esteban Hoyo García de Alba y Marco Antonio Montes de Oca González</i>	89

4. Enfoques metodológicos para el estudio de la contaminación del aire y la salud poblacional: aplicaciones en la Megalópolis 123
Magali Hurtado Díaz, Eunice E. Félix Arellano, Pamela E. Zúñiga Bello, Julio C. Cruz de la Cruz y Horacio Riojas Rodríguez

SECCIÓN II

DIMENSIONES PSICOSOCIALES DE LA CALIDAD DEL AIRE: PERCEPCIÓN DEL RIESGO, ATRIBUCIÓN CAUSAL, POLÍTICAS PÚBLICAS Y PARTICIPACIÓN CIUDADANA

5. Percepción del riesgo como construcción social. Una mirada a la contaminación ambiental 151
Laura Andrea Sánchez de Jesús
6. Diseño, construcción y aplicación de un instrumento de medición para la percepción social de la calidad del aire 179
Karina Landeros Mugica
7. Percepción psicosocial de la contaminación del aire en tres zonas metropolitanas de la Megalópolis: un estudio aplicado 221
Diana I. Angeles Hernández, Saúl O. Sánchez Carmona, José Manuel Meza Cano y Karina Landeros Mugica
8. De la percepción a la conciencia. Construyendo ciudadanía ambiental ante la contaminación 257
Manuel González Navarro y Javier Rincón Salazar

SECCIÓN III

COMUNICACIÓN Y PARTICIPACIÓN COMUNITARIA: ACCIONES DE MITIGACIÓN Y PROTECCIÓN A LA SALUD FRENTE A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

9. Elementos de comunicación para promover conductas responsables por la calidad del aire en la Megalópolis del Valle de México 291
Javier Urbina Soria e Isaías Lara Klahr

10. Comunicación digital para una vida mejor en la Megalópolis: calidad del aire y salud	327
<i>Yadira Alatraste Martínez, Miguel Torres Rodríguez, Óscar Hernández Castillo y María Elena Chávez Solís</i>	
11. La promoción de la salud ante la contaminación atmosférica: una propuesta de diseño participativo de materiales con especialistas de salud de la ZMVT	355
<i>Mario Castillo González, Karina Landeros Mugica y Josue Chispán Ornelas</i>	
12. Enseñanza y divulgación de la ciencia: una experiencia educativa en torno al tema de la contaminación atmosférica en el bachillerato	387
<i>Martha Elena Díaz Murillo y Karina Landeros Mugica</i>	
13. La calidad del aire como punto de encuentro entre el derecho a un ambiente sano y el bienestar en infancias y adolescencias de Toltenco	413
<i>Leslie Alicia González Martínez, Leticia Báez Pérez y Karina Landeros Mugica</i>	
Aprendizajes y conclusiones	445

SECCIÓN I

La contaminación atmosférica en
tres zonas metropolitanas de la
Megalópolis: características, química
atmosférica, problemática actual e
impacto a la salud



Fotografía: Karina Landeros Mugica

CAPÍTULO 2

Tres zonas metropolitanas de la Megalópolis: Valle de México, Valle de Toluca y Cuernavaca

Alma Angélica Neria Hernández

Universidad Autónoma del Estado de México

Fernando Millán Vázquez

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

Alhelí Brito Hernández

Universidad Autónoma del Estado de Morelos

INTRODUCCIÓN

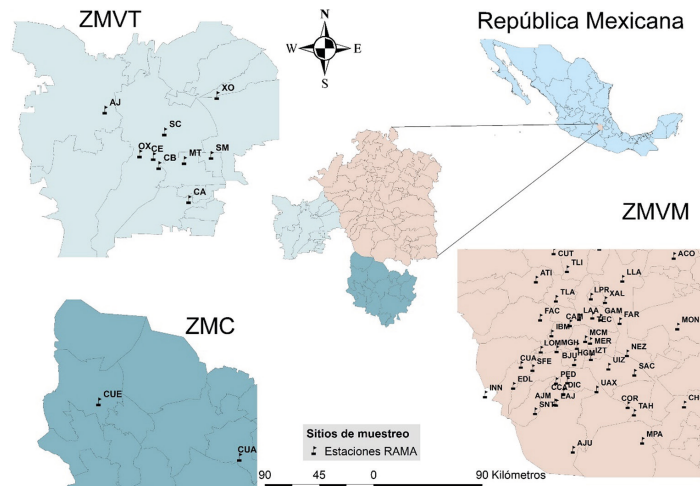
En los últimos 30 años, las ciudades en México crecen a un ritmo de 50 hectáreas diarias, un fenómeno sin precedentes. El aumento de la población urbana se encuentra fuertemente relacionado con los movimientos migratorios interurbanos e intermetropolitanos entre sus ciudades, donde la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) resulta el centro de atención económico, financiero, político y cultural de México, además de ser, desde hace años, el principal destino migratorio. El Valle de México produce cerca de un cuarto del Producto Interno Bruto (PIB) (OECD, 2015).

El término “Megalópolis” se refiere a un conjunto de zonas metropolitanas y aglomeraciones urbanas menores de la región, con fuertes vínculos de flujos sociales y económicos (Iracheta, 2017). La Megalópolis de la ZMVM se creó en 1996 y comprende el área de los municipios correspondientes a las zonas metropolitanas de las capitales de los estados limítrofes al Valle de México, además de la totalidad de los municipios que mantienen una relación funcional estrecha con la Ciudad de México. En total, se incluyeron 189 municipios: 91 del Estado de México, 8 de Morelos, 29 de Puebla, 37 de Tlaxcala y 16 de Hidalgo, además de las 16 delegaciones del Distrito Federal (DOF, 1996).

Este libro se centra en tres zonas metropolitanas de esta Megalópolis: la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la más grande del país; la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), que actualmente presenta las concentraciones más altas de partículas finas; y la Zona Metropolitana de Cuernavaca (ZMC), que es una ciudad media turística que en las últimas décadas ha crecido en servicios y zonas residenciales (figura 2.1).

En este capítulo se pretende abordar la descripción comparativa de los aspectos fisiográficos, demográficos y económicos, así como el monitoreo y la evaluación de la calidad del aire en las tres zonas metropolitanas, con el fin de proporcionar un contexto al lector, que le será de utilidad cuando revise la información de los capítulos posteriores.

Figura 2.1. *Ubicación espacial de las tres zonas metropolitanas*



Nota: Los puntos corresponden a las estaciones de monitoreo de la calidad del aire y sus respectivas claves de identificación para cada zona metropolitana.

Fuente: elaboración propia.

2.1 ASPECTOS FISIOGRÁFICOS

Localización y extensión

ZMVM. Localizada entre las latitudes norte 20°04'02" y 18°55'03", cuenta con una superficie de **7866 km²**, teniendo colindancia al norte con los estados de Hidalgo y México, al este con los estados de México, Tlaxcala y Puebla, al oeste con el Estado de México y al sur con el Estado de México y Morelos. La ZMVM comprende las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y un municipio del estado de Hidalgo (INEGI, 2000; INEGI, 2013).

ZMVT. Se localiza en la parte central del Estado de México, entre las latitudes norte, 18°59'07" y 19°34'47" y longitudes oeste 99°38'22" y 99°56'13" (SMAGEM, 2012). Está compuesta por 16 municipios, con una extensión total de **2412 km²** (SEDATU, 2018). Se localiza a 60 km al oeste de la Ciudad de México y sus vías de comunicación principales son las carreteras de cuota 15D México-Toluca, 57D Chamapa-Lechería y la carretera federal 15 México-Toluca. Asimismo, en 2024 entró en operación el tren rápido interurbano, "El Insurgente", que conecta estas dos ciudades.

ZMC. Se localiza al sur de la ZMVM, entre las coordenadas 18°34'41" a 19°07'54" de latitud norte, y 98°59'44" a 99°21'08" de longitud oeste. Está integrada por 8 municipios del centro y norte del estado de Morelos, asentados en una extensión territorial de **1189.9 km²**, que representa el 24.4% de la superficie del estado (INEGI, 2020). Limita al norte con la alcaldía Tlalpan de la Ciudad de México, al noreste con Tlalnepantla y Tlayacapan, al este con Yautepec, al suroeste con Ayala, al sur con Zacatepec y Puente de Ixtla y al oeste con Miacatlán y Ocuilán en el Estado de México. El municipio eje de la ZMC es Cuernavaca, el cual se conecta a la Ciudad de México a través de la autopista México-Cuernavaca, mediante la carretera federal del mismo nombre.

Orografía

ZMVM. La elevación media es de 2240 msnm, el territorio comprende valles, mesetas, cañadas y terrenos semiplanos; el valle se encuentra rodeado de cadenas montañosas, de las que destacan la Sierra de Guadalupe al norte, la Sierra de las Cruces al oeste y las montañas del Ajusco al sur. Los cuerpos topográficos de más de 3500 msnm son: el volcán Popocatepetl (5500 msnm), el volcán Iztaccíhuatl (5220 msnm), el cerro El Mirador (4120 msnm), el cerro Telapón (4030 msnm) y el volcán Ajusco (3930 msnm). Debido a estas condiciones, el clima y la circula-

ción del aire en el valle se ven modificados. La zona urbana comprende una cuenca semicerrada ubicada en la zona suroeste del Valle de México, lo que además influye en la ventilación de la atmósfera y representa un problema reflejado en la contaminación ambiental (Urias, 2010).

ZMVT. La altitud promedio de las cabeceras municipales es de 2660 metros sobre el nivel del mar con una altura mínima y máxima de 2560 y 2740 msnm, respectivamente, por lo que es una de las ciudades más altas de México. La ZMVT está parcialmente rodeada por elevaciones de terreno considerables, entre ellos se encuentran: al suroeste, la Sierra Nevado de Toluca; al este, la Sierra de las Cruces y Sierra de Ocoyotepec; al noreste, la Sierra de Monte Alto; y al sur, la Sierra Matlazinca. Particularmente, el volcán Nevado de Toluca, con una altitud de 4680 msnm, funciona de manera determinante en la dinámica del viento del valle, a partir de los sistemas de baja y alta presión que se generan sobre esta región a lo largo del año (SMAGEM, 2012).

ZMC. Se localiza sobre el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, por lo que presenta un alto grado de variaciones en su relieve, con altitudes que van de los 900 msnm en Xochitepec hasta los 3677 msnm en Huitzilac (INEGI, 2010). Su configuración fisiográfica es variada e incluye zonas de lomeríos con cañadas y sierra volcánica con estrato, además de llanura aluvial con lomerío y sierra de laderas escarpadas. La zona de lomeríos de Cuernavaca y Temixco está limitada por un sistema de más de 200 barrancas que convergen al pie de la sierra de Zempoala. Estas barrancas representan un medio de regulación del clima y han sido el hábitat de una gran diversidad de especies de flora y fauna (Alvarado y Di Castro, 2013).

Temporadas climáticas y meteorología

ZMVM. Se ve afectada por múltiples problemas ambientales. El cambio climático es responsable de efectos negativos, por ejemplo, se observa un incremento en las lluvias torrenciales e incendios forestales. La ZMVM está influenciada principalmente por un clima templado subhúmedo que presenta lluvias en verano. En el centro y sur, el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, mientras que en el noreste es semiárido templado con veranos cálidos. En el sur del valle, las temperaturas tienden a ser más frescas, mientras que en el centro de la ciudad se incrementan, especialmente durante ciertas horas del día cuando el aire se vuelve más seco. Las inversiones térmicas, que ocurren cuando la temperatura aumenta con la altitud, son comunes durante la época seca fría (noviembre a febrero) en la ZMVM, mientras que su presencia disminuye durante la época de lluvias (junio a octubre).

La mayor humedad relativa y la presencia de lluvias en la ZMVM están asociadas con la llegada de vientos alisios con alto contenido de humedad entre mayo y octubre. Estos vientos tienen una intensidad débil y una trayectoria predominante del norte-noreste durante la época de lluvias, y del norte al este, sur o noreste durante la época de sequía. La temporada de lluvias ayuda a mejorar la calidad del aire, ya que actúa como un mecanismo de limpieza atmosférica conocido como lavado atmosférico. La radiación solar acelera la formación fotoquímica de contaminantes atmosféricos como el O_3 en la ZMVM. La máxima exposición a la radiación solar se produce durante la primavera y el verano, especialmente entre las 13:00 y las 17:00 horas, mientras que es mínima durante el otoño y el invierno (INEGI, 2014; Zaragoza y Guzmán, 2023).

ZMVT. Conforme a la clasificación climática de Köppen, están presentes tres tipos de clima: templado subhúmedo en su mayoría, semifrío subhúmedo al poniente y frío en las elevaciones principales como el Nevado de Toluca. Asimismo, se presentan tres temporadas climáticas regulares: 1) temporada “seca fría” (noviembre a febrero); 2) temporada seca-caliente (marzo a mayo), y 3) temporada de Lluvia (junio a octubre) (SMAGEM, 2012).

En la temporada seca-fría, el desplazamiento de frentes fríos y masas de aire polar son los sistemas meteorológicos predominantes; ocasionando inversiones térmicas y estabilidad atmosférica que ocasionan estancamiento de los contaminantes; aunado a esto, las bajas temperaturas de esta temporada son un factor que fomenta la quema de biomasa como fuente de calor en los hogares. La temporada “seca caliente” es la temporada de estiaje, en la cual es típica la ocurrencia de incendios forestales y quemas agrícolas. Asimismo, la ZMVT se ve afectada con sistemas anticiclónicos (tiempo atmosférico estable y seco) originando condiciones que favorecen la acumulación de contaminantes. En la temporada de lluvia, el paso constante de ondas y ciclones tropicales aportan la humedad más importante del año en forma de nubosidad y lluvias abundantes sobre la zona; lo cual contribuye a la remoción de los contaminantes presentes en la atmósfera, así como la mayor humedad del suelo disminuye la resuspensión del suelo. La mayor parte del año existe una marcada dominancia de los vientos del sur y sureste, lo cual ocasiona que los contaminantes migren hacia el norte de la ZMVT donde las concentraciones son mayores (SMAGEM, 2018).

ZMC. El clima cálido subhúmedo se presenta en casi la totalidad de Emiliano Zapata, Jiutepec, Xochitepec y Tlaltizapán de Zapata, y en el 53% del territorio de Temixco, donde predomina la selva baja caducifolia y planicies con pastizales. El clima semicálido subhúmedo se presenta en el 65% de Cuernavaca, el 55% de Tepoztlán y el 42% de Temixco, donde prolifera la selva baja caducifolia. El cli-

ma templado subhúmedo cubre el 42% de Cuernavaca y el 37% de Tepoztlán, y se caracteriza por bosques mixtos de pino y encino. Por otro lado, el municipio de Huitzilac presenta un clima frío con bosques de pino (52%) y templado subhúmedo (48%) (INEGI, 2010c). La temperatura media de la ZMC es de 21.5 °C, la mínima es de 8 °C y la máxima de 26 °C. En la ZMC las lluvias se presentan en los meses de junio a septiembre, con intervalos de precipitación anuales de 800 a 1600 mm de agua.

Respecto al comportamiento de los vientos dominantes, se sabe que provienen principalmente del suroeste hacia el sur, norte y oeste del estado, influenciados por la masa tropical marítima del océano Pacífico con origen en el estado de Guerrero, viajando a alturas promedio de 10 a 50 m por lo que se impactan con las barreras montañosas de la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico, así como con edificaciones, originando movimientos circulares dentro del territorio Morelense, con predominancia hacia sur del Estado (Luna Ceballos, 2015).

2.2 ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS

Demografía

ZMVM. Al 2020 contaba con una población de 21,804,515 habitantes (hab.), con un 51.7% de mujeres y un 48.3% de hombres. Desde los datos registrados en 2010, la población tuvo un aumento de 8.4%. Los rangos de edad de 25 a 29 años fueron los que registraron mayor población, seguida de los 20 a 24 años y de 15 a 19 años (INEGI, 2020).

ZMVT. Con base en el último Censo de Población para 2020, la población total de los 16 municipios que componen la ZMVT fue de 2,353,924 hab., la cual corresponde al 14% de la población del Estado de México. El intervalo etario de mayor porcentaje corresponde entre los 25 y 59 años. El municipio más poblado de la ZMVT es Toluca, el cual aporta el 40%. Con respecto al censo anterior de 2010, la población de la ZMVT creció un 17 por ciento.

ZMC. Su población al 2020 fue de 1,028,589 habitantes, lo que representa el 52.2% de la población total de Morelos. El 52% son mujeres y 48% son hombres. La mediana de edad fluctúa entre los 29 y 34 años. Su densidad poblacional promedio es de 864.4 hab./km². Los municipios más poblados de la ZMC son Cuernavaca y Jiutepec, con 378,476 y 215,357 habitantes, respectivamente. El municipio menos poblado es Huitzilac con 24,515 habitantes al 2020 (INEGI, 2020).

En la tabla 2.1 se condensan los datos de población total y porcentajes de población sensible para cada una de las zonas metropolitanas con base en el último Censo de Población y Vivienda del INEGI en 2020.

Tabla 2.1. *Población Total y porcentajes de población sensible de las tres zonas metropolitanas*

	ZMVM	ZMVT	ZMC
Población Total (hab.)	21,804,515	2,353,924	1,028,589
Densidad de población (hab./km ²)	2,772	976	864.4
Población sensible:	16.6%	32%	25%
Población < 15 años	10.6%	25%	15%
Población > 64 años	6%	7%	10%

Fuente: elaboración propia con información de INEGI (2014).

Las extensiones territoriales de la ZMVT y la ZMC equivalen al 31% y 15% de la ZMVM, respectivamente. La población de la ZMVT equivale al 11% de la cantidad de habitantes de la ZMVM, mientras que la población de la ZMC equivale a un 5%. La ZMVT presenta el mayor porcentaje de población sensible, lo cual es un dato relevante en términos del impacto de la mala calidad del aire en la salud pública, como se abordará en capítulos posteriores.

Actividades económicas

Las actividades económicas propias de cada zona metropolitana son importantes en términos de la calidad del aire, ya que se encuentran estrechamente relacionadas con la emisión de diversos contaminantes atmosféricos. El sector económico primario tiene mayor impacto, debido a las emisiones por quemas de los residuos agrícolas de la cosecha anterior, así como la resuspensión de partículas del suelo por la preparación del campo para la siembra. Las diversas industrias contenidas en el sector secundario emiten una gran variedad de contaminantes, según su proceso productivo. Algunas de las actividades terciarias forman parte de las fuentes de emisión área, como, por ejemplo, los diversos establecimientos de alimentos donde se cocina con carbón y leña, las tintorerías, talleres de pintura, entre otras,

las cuales pueden emitir en conjunto una gran cantidad de contaminantes a la atmósfera. La tabla 2.2 condensa las principales actividades económicas de cada zona metropolitana.

Tabla 2.2. *Principales aspectos de las actividades económicas de las tres zonas metropolitanas*

	ZMVM ¹	ZMVT ²	ZMC ³
Sector Primario	Actividad agrícola de riego y temporal Extensión agrícola: 437,000 ha	Actividad agrícola de temporal Extensión agrícola: 122,452 ha	Actividad agrícola de riego y temporal Extensión agrícola: 134,000 ha
Sector Secundario	Industrias manufactureras >2000 unidades económicas	Industrias manufactureras >1000 unidades económicas	Industrias manufactureras >400
Sector Terciario	Servicios privados no financieros, Comercio y Transporte	>44,000 unidades económicas dedicadas al comercio >2000 unidades del sector de servicios	>1000 unidades económicas dedicadas al comercio >1000 del sector servicios

Fuente: elaboración propia con información de Proaires de las Tres Zonas Metropolitanas.

¹ ProAire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021-2030; ² ProAire de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca 2012-2017; ³ ProAire de Morelos 2018-2027.

ZMVM. En la Ciudad de México, los principales sectores son los servicios privados no financieros (10.4%), el comercio (10.3%) y el transporte, correos y almacenamiento (10.2%), en comparación con el total nacional. En el Estado de México el comercio es la actividad predominante, representando el 14.2%, mientras que, en el estado de Hidalgo la minería es la principal actividad económica, contribuyendo con un 4.1% del total nacional (Zaragoza y Guzmán, 2023).

ZMVT. El sector primario está caracterizado por la actividad agrícola de temporal, es decir, la siembra ocurre justo antes de la temporada de lluvias. El sector secundario está compuesto por el 93.9% de microindustrias, 3.1% por pequeñas industrias, 2.5% por industrias medianas y el 0.5% por grandes industrias (SMAGEM, 2012). Las actividades terciarias están ampliamente diversificadas y se concentran mayoritariamente en Toluca, Metepec, Almoloya de Juárez y Zinacantepec.

ZMC. El sector primario es representado principalmente por la actividad agrícola de riego y de temporal, que aporta un 3% al PIB, la industria manufacturera contribuye con un 32% al PIB y el sector terciario, que incluye unidades dedicadas al comercio y servicios, aporta el 64.6% al PIB (INEGI, 2016).

Medios de transporte

ZMVM. En 2020, la ZMVM tenía un parque vehicular de 6.24 millones, de los cuales el 92% corresponde a vehículos de uso particular, el 5% a transporte público y el 3% a los vehículos de carga. De estos últimos, un 94% utiliza combustible gasolina; sin embargo, la contribución de partículas por vehículos de carga y autobuses es de gran importancia, los cuales pertenecen a una jurisdicción federal (<80%) y local (>20%), donde más del 95% utiliza combustible diésel. La vida media de los vehículos que utilizan gasolina es de 9 años y para vehículos que utilizan diésel es hasta 11 años (SEMARNAT, 2020).

ZMVT. Desde la década de los años 70, la ciudad de Toluca se ha expandido de manera desorganizada, provocando la aparición de varios sitios suburbanos dispersos, lo que compromete la viabilidad de proyectos de sistemas de transporte público masivo (CMM, 2014). El tren interurbano atraviesa la ZMVT de manera central, durante su etapa de operación acotada, es decir, solo en el Valle de Toluca presentó subutilización debido a que no representó una alternativa atractiva para los habitantes de las zonas más alejadas al centro. Los taxis colectivos son una alternativa que se adaptó mejor a las necesidades de la población, ya que su falta de regulación les permite la cobertura de rutas irregulares, pero con un impacto negativo en los índices de tráfico y además representan un riesgo para la población al exceder las capacidades de pasajeros de los autos particulares.

ZMC. De acuerdo con el INEGI, para el año 2022, Morelos contaba con una flota vehicular total de 954,962 automóviles. De la cual el 74% eran automóviles particulares y el 1.62% autobuses para pasajeros. El 12.2% eran camiones y camionetas para carga y el 11.6% motocicletas. Los automóviles de uso oficial representan menos del 1%. En el 2014, el INEGI reportó la existencia de 476,396 vehículos de motor en Morelos, cantidad que ha aumentado 2.5 veces en 8 años.

La tabla 2.3 compara el parque vehicular, índices de tráfico, opciones de transporte público disponibles en cada una de las zonas metropolitanas.

Tabla 2.3. *Parque vehicular, índices de tráfico y opciones de transporte público de las tres zonas metropolitanas*

	ZMVM	ZMVT	ZMC
Parque vehicular total (unidades)	6.24 millones	1.13 millones	954,962
Autos particulares (%)	76	72.33	74.07
Transporte público (%)	4.51	2.48	1.62
Motos (%)	16.3	7.54	11.6
Vehículos de carga (%)	1.8	17.65	12.2
Indicador de tráfico vehicular (horas de retraso al año)	74 h	38 h	20 h
Opciones de transporte público	Autobuses Vagonetas Taxis colectivos Taxis de aplicación 12 líneas de Metro Metrobús Cablebús Tren Suburbano Tren ligero Trolebús	Autobuses Taxis colectivos Taxis de aplicación Tren Interurbano	Autobuses Taxis colectivos Taxis de aplicación

Fuente: elaboración propia con información de INEGI (2024), INRIX (2022). Global traffic scorecard. INRIX, Washington, USAM Scorecard.

2.3 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE

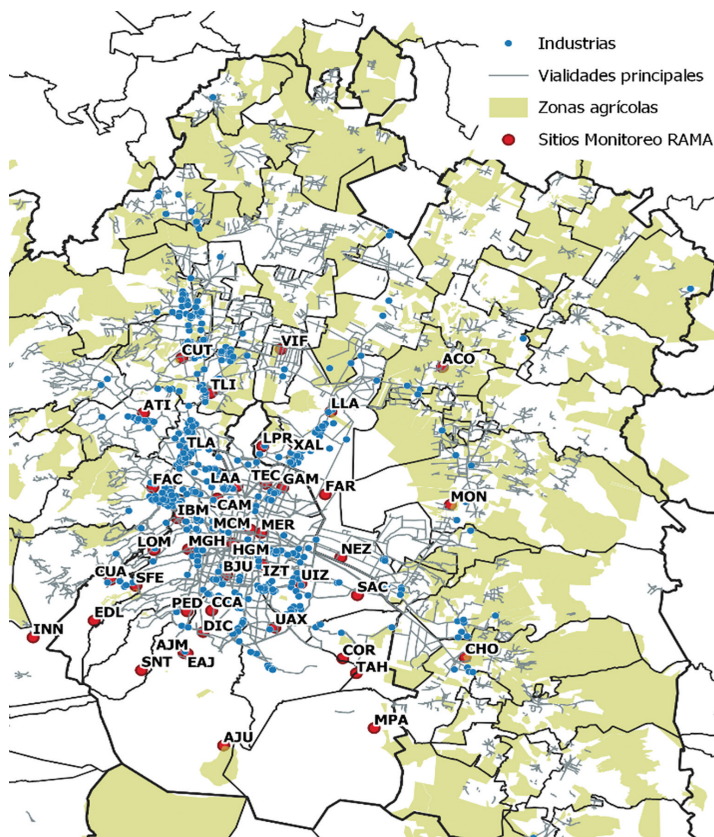
Redes de monitoreo

ZMVM. Debido a la emisión de contaminantes generados por las actividades de las distintas fuentes de emisión, surge la necesidad de desarrollar programas urbanos de gestión de calidad del aire, siendo la medida más importante, la red de monitoreo, ya que permite conocer el estado en tiempo real de la calidad del aire para verificar un cumplimiento efectivo de la normatividad. El Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) se asegura de la correcta medición de los contaminantes atmosféricos, con la finalidad de evaluar la calidad del aire, conocer los niveles de

exposición de la población, informar y prevenir de elevados valores a la población, generar distribuciones espaciales y transporte de contaminantes para conocer las tendencias históricas (SEDEMA, 2023a; Navarro, 2019).

En la ZMVM se cuenta con más de 40 estaciones de monitoreo, donde predomina la medición con equipos continuos para obtener la concentración de los contaminantes criterio (dióxido de azufre SO_2 , monóxido de carbono CO , dióxido de nitrógeno NO_2 , ozono O_3 y partículas $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10}) y las variables meteorológicas, incluyendo la radiación UV. La figura 2.2 muestra la distribución de las diferentes estaciones de monitoreo, distribuidas en la Ciudad de México y el Estado de México principalmente.

Figura 2.2. Ubicación espacial de estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVM y de las principales fuentes de emisión

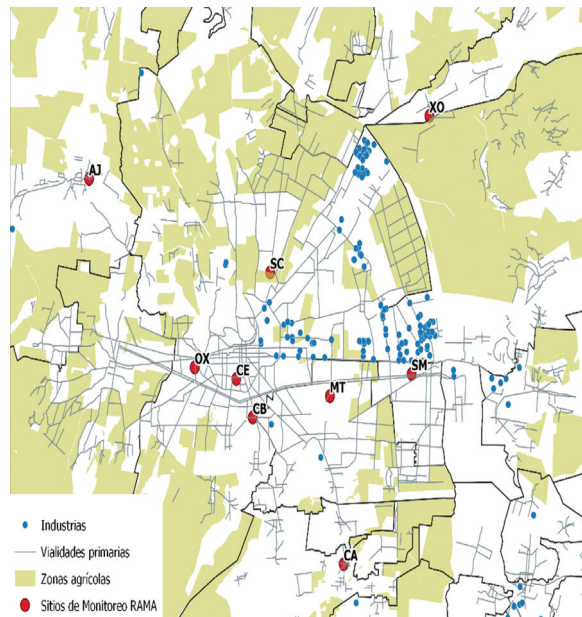


Fuente: elaboración propia.

La red de monitoreo cuenta con personal calificado, en general el Sistema de Monitoreo Atmosférico se compone de cuatro unidades: la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA), la Red Meteorológica y de radiación solar (REDMET) y la Red de Depósito Atmosférico (REDDA). Además, cuenta con un Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) y el Centro de Información de Calidad del Aire (CICA) que es responsable de la validación y difusión de datos (Ruiz-Villavicencio *et al.*, 2020; SEDEMA, 2023a).

ZMVT. La Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT inició sus operaciones en 1993. Actualmente, reporta oficialmente datos de ocho estaciones de monitoreo distribuidas en seis de los 16 municipios de la ZMVT: Oxtotitlán (OX), Toluca Centro (CE), Metepec (MT), Ceboruco (CB), San Mateo Atenco (SM), Almoloya de Juárez (AJ), Calimaya (CA) y Xonacatlán (XO). La RAMA proporciona datos horarios de los seis contaminantes criterio y parámetros meteorológicos que están disponibles para su descarga en el sitio web del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) después del periodo de validación. En la figura 2.3 se ilustra la ubicación espacial de los sitios de monitoreo.

Figura. 2.3. Ubicación espacial de estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT y de las principales fuentes de emisión



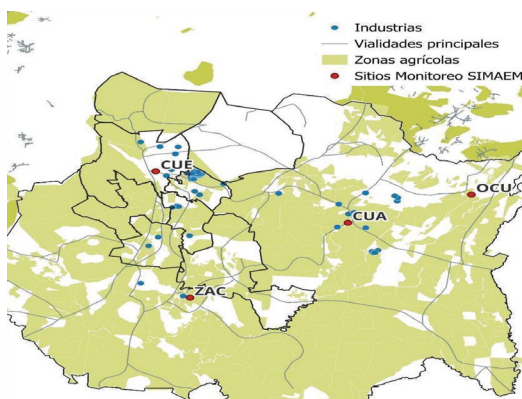
Fuente: elaboración propia.

ZMC. La red de monitoreo de la calidad del aire del estado de Morelos inició operaciones en el año 2000 con una estación atmosférica en el centro de Cuernavaca (CUE). Adicionalmente, en 2001 se instaló una red de monitoreo atmosférico en Ocuituco (OCU), con el objetivo de muestrear las emisiones del volcán Popocatepetl. Posteriormente, en 2006 y 2007 inició la operación de las redes de Zacatepec (ZAC) y Cuautla (CUA).

De acuerdo con el Sistema de Monitoreo Atmosférico del Estado de Morelos (SIMAEM), la información que genera la red de calidad del aire es confiable, sin embargo, no es suficiente ni representativa del entorno de cada sitio, por lo que se requieren esfuerzos técnicos y humanos para alcanzar la calidad de los datos conforme a la normatividad aplicable.

La ZMC solo cuenta con la estación CUE, la cual se ubica en el techo del palacio de gobierno de Cuernavaca y mide de forma automática los seis contaminantes criterio y variables meteorológicas. Su representatividad o escala vecinal va de los 500 m a los 4 km, por lo que es insuficiente para cubrir los 1 189.9 km² de la superficie que ocupa la ZMC.

Figura 2.4. Ubicación espacial de las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMC y de las principales fuentes de emisión



Fuente: elaboración propia.

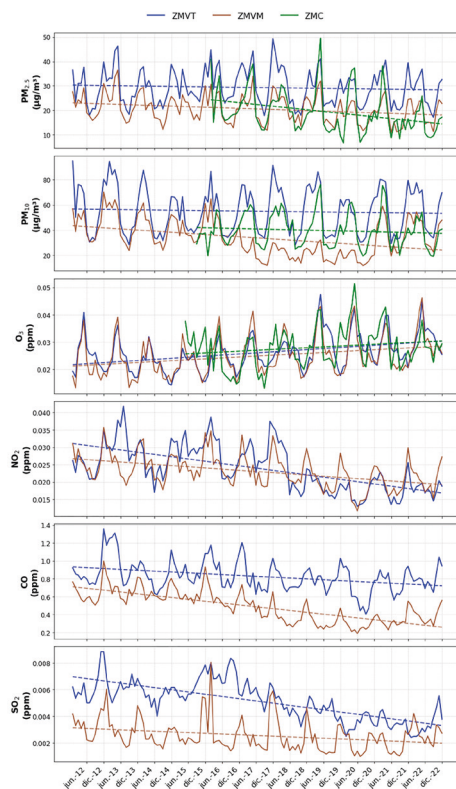
Evolución de los contaminantes criterio (2012-2022)

El ozono (O₃), las partículas PM_{2.5} y PM₁₀, el dióxido de nitrógeno (NO₂), el dióxido de azufre (SO₂) y el monóxido de carbono (CO) integran el conjunto de

contaminantes criterio, esta denominación es debida a que fueron objeto de diversos estudios cuyos resultados fueron publicados en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos (EE.UU.), con el objetivo de establecer niveles permisibles para proteger la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población (Zuk, 2007). El índice de calidad del aire está calculado con base en la concentración de estos contaminantes. Para una revisión más amplia al respecto, consultar el Capítulo 1.

En la figura 2.5 se presentan los promedios mensuales de los seis contaminantes criterio para la ZMVM y la ZMVT, con el propósito de analizar y comparar sus tendencias a lo largo de 10 años (2012-2022). En el caso de los contaminantes criterio de la ZMC solo se incluyen en el gráfico las partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} , y el ozono O_3 , el resto de los contaminantes no cumplieron con los criterios de suficiencia.

Figura 2.5. Promedios mensuales de los contaminantes criterio a lo largo de 10 años (2012-2022) en las tres zonas metropolitanas



Fuente: elaboración propia con base en los datos de las redes de monitoreo.

ZMVM. En general, los contaminantes criterio se mantienen con una tendencia de disminución, siendo el CO y NO₂ los que presentan la disminución más marcada, el contaminante que presenta mayor aumento en la línea de tiempo (2012-2022) fue el O₃. El 2020 –año del confinamiento debido a la presencia del SARS-COV-2– mostró ligeros decrementos de concentración, lo que puede estar relacionado al paro de actividades.

ZMVT. Las PM₁₀, NO₂, CO y SO₂ presentan una tendencia claramente decreciente a lo largo del análisis de 10 años, las PM_{2.5} se han mantenido prácticamente estables mientras que el O₃ ha mostrado un incremento sostenido durante el periodo analizado. Las tasas de reducción de las concentraciones de los contaminantes criterio de la ZMVT son menores con respecto a la reducción de contaminantes en la ZMVM debido a su mayor cantidad de políticas públicas implementadas.

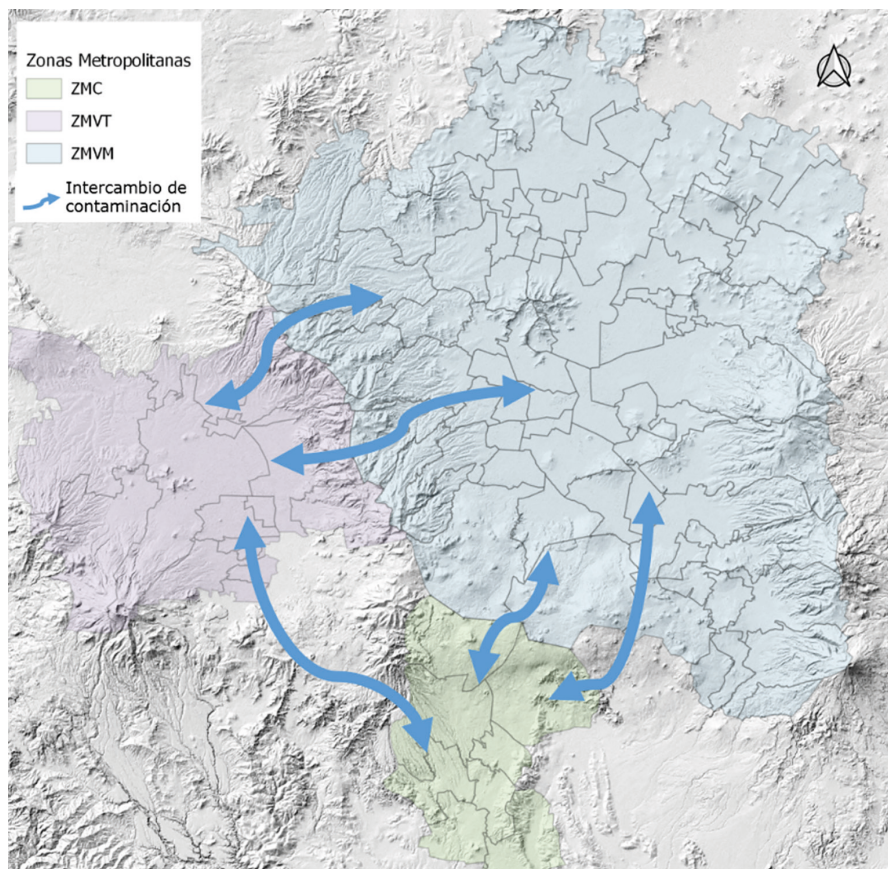
ZMVC. No se contó con suficiencia de datos para el periodo 2012-2015 en la estación CUE. Las concentraciones de las PM_{2.5} y PM₁₀ muestran una tendencia a la baja a lo largo del periodo 2015-2022. En contraste, los niveles de O₃ han aumentado. La insuficiencia de datos horarios de NO₂, CO y SO₂ no permite evaluar su serie de tiempo ni tendencia a lo largo del periodo de análisis.

Transferencia de contaminantes entre zonas metropolitanas

Es posible notar una similitud en los patrones de los contaminantes criterio de la ZMVM y ZMVT (figura 2.5). Estos comportamientos similares son evidencia del intercambio de contaminantes atmosféricos entre las ciudades de la cuenca atmosférica del Valle de México.

Hernández-Moreno *et al.* (2023) demostraron que la ZMVM exporta grandes cantidades de PM_{2.5} a las áreas metropolitanas del Valle de Toluca y Cuernavaca, estas cantidades equivalen casi al 100% de sus emisiones locales. En el balance de importaciones y exportaciones, las áreas metropolitanas de Toluca y Cuernavaca tuvieron una importante concentración de PM_{2.5} aumentando durante los meses con clima frío-seco debido principalmente al ingreso de partículas desde la ZMVM. Aunque el intercambio de contaminantes también realiza cierto grado de exportación hacia la ZMVM por parte de Toluca y Cuernavaca, como se muestra en la figura 2.6, la mayor exportación se da de la ZMVM hacia las otras dos zonas.

Figura 2.6. Intercambio de contaminación atmosférica entre las tres zonas metropolitanas



Fuente: elaboración propia adaptado de Hernández-Moreno *et al.* (2023).

Calidad del aire de las tres zonas con respecto a normatividad nacional e internacional

Los efectos en la salud por la exposición a la contaminación del aire incluyen desde síntomas agudos, como dolor de cabeza e irritación de los ojos, hasta enfermedades respiratorias y cardiovasculares, e incluso hasta la muerte prematura. La severidad del impacto depende de factores como la concentración y características del contaminante, así como la susceptibilidad del individuo y el tiempo de exposición (Zuk, 2007), lo cual se ampliará en capítulos posteriores.

Para proteger la salud humana, los gobiernos de muchos países intentan controlar los niveles de contaminación usando diversas herramientas normativas que establecen límites de concentración ambiental aceptables para la población en términos de la prevención de riesgos. En México, la Secretaría de Salud es el órgano responsable de evaluar la evidencia de los impactos de la contaminación atmosférica en la salud y establecer los límites permisibles de concentración ambiental. Algunos de estos límites son comparables con las normas de EUA y de la Organización Mundial de la Salud (OMS), sin embargo, para la mayoría de los contaminantes, las normas mexicanas tienen límites por arriba de los valores internacionales.

La tabla 2.4 presenta los valores límite de la Normatividad Nacional y los límites de las Guías de Calidad del Aire de la OMS, así como también el grado de cumplimiento en la ZMVM y la ZMVT para cada contaminante, con base en los datos de monitoreo de 2022.

La ZMVT presentó mayores porcentajes de excedencia de los límites normados para $PM_{2.5}$, PM_{10} y NO_2 , así como promedios anuales más altos en comparación con la ZMVM. Ambas ciudades superaron el límite nacional anual para las partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} , mientras que los estándares de la OMS mostraron aún mayores frecuencias de incumplimiento. En la ZMVT, el límite de $PM_{2.5}$ de 24 horas de la OMS fue excedido casi todos los días del año 2022, y el límite anual se superó por más de cinco veces.

Para el caso del O_3 , la ZMVM presentó mayor porcentaje de incumplimiento, tanto para el límite de 1 hora como para el de 8 horas, esto es debido a que las condiciones fisiográficas y meteorológicas influyen en la dispersión de contaminantes. Asimismo, la altura de la ZMVT y la de la ZMVM están relacionadas con alta radiación en todo el año, lo cual promueve la formación de contaminantes secundarios como el O_3 , principalmente en días con poca nubosidad y vientos débiles, lo que genera mayor producción y poca dispersión (SEDEMA, 2023a).

La ZMC presentó los menores porcentajes de excedencia de los límites nacionales y de la OMS en comparación con la ZMVM y la ZMVT. Sin embargo, los niveles de $PM_{2.5}$, PM_{10} y O_3 superaron los valores de referencia. Las $PM_{2.5}$ excedieron el límite de 24 h de la OMS en el 41.92% de los días monitoreados y el límite anual en casi tres veces. Las PM_{10} excedieron el límite de 24 h en el 22.47% de los días y el promedio anual fue más del doble del límite de la OMS. Los niveles de O_3 mostraron que el límite de 8 h fue excedido en el 3.29% de los días. En resumen, las $PM_{2.5}$ y PM_{10} son los principales contaminantes en la ZMC, atribuibles a emisiones primarias de partículas y a la formación secundaria de aerosoles, favorecidas por factores climáticos estacionales, especialmente en épocas frías.

Tabla 2.4. Límites de exposición de la normatividad nacional y de la OMS para los seis contaminantes criterio y evaluación de su cumplimiento en la ZMVM y la ZMVT

Cont.	Límite Normado Nacional		ZMVM	ZMVT	ZMC	Límite OMS		ZMVM	ZMVT	ZMC	
PM _{2.5}	24 h	41 µg/m³	% días al año que se rebasa			24 h	15 µg/m³	% días al año que se rebasa			
			8.5	24	0.82				87.4	99	41.92
	Anual	10 µg/m³	Promedio Anual (µg/m³)			Anual	5 µg/m³	Promedio Anual			
			19.7	27.8	13.70				19.7	27.80	13.70
PM ₁₀	24 h	70 µg/m³	% días al año que se rebasa			24 h	45 µg/m³	% días al año que se rebasa			
			32.3	53	2.47				67.9	83	22.47
	Anual	36 µg/m³	Promedio Anual (µg/m³)			Anual	15 µg/m³	Promedio Anual			
			40.3	57.48	35.03				40.3	57.48	35.03
O ₃	1 h	0.09 ppm	% días al año que se rebasa			8 h	100 µg/m³	% días al año que se rebasa			
			64.3	19	0.55						
	8h	0.065 ppm	% días al año que se rebasa						70.4	46	3.29
			69.3	43	2.2						
NO ₂	1 h	0.106 ppm	% días al año que se rebasa			24 h	25 µg/m³	% días al año que se rebasa			
			4.9	0	0				99	97	74.81
	Anual	0.021	Promedio Anual			Anual	10 µg/m³	Promedio Anual (µg/m³)			
			0.01	0.018	0.007				0.01	27	10.36
SO ₂	1 h	0.075 ppm	% días al año que se rebasa			24 h	40 µg/m³	% días al año que se rebasa			
			0	0	0						
	24 h	0.04 ppm	% días al año que se rebasa						0	0	0
			0	0	0						
CO	1 h	26 ppm	% días al año que se rebasa			24 h	4 mg/m³	% días al año que se rebasa			
			0	0	0						
	8 h	9 ppm	% días al año que se rebasa						0	0	0
			0	0	0						

Fuente: elaboración propia. Los porcentajes de incumplimiento de límites, así como los promedios anuales, fueron calculados por los autores usando las bases de datos validadas, descargadas del sitio web de la RAMA de la ZMVM, mientras que para la ZMVT, los datos validados fueron proporcionados por el personal de la RAMA de la ZMVT.

2.4 PRINCIPALES FUENTES DE EMISIÓN

El inventario de emisiones indica la aportación de cada contaminante por tipo de fuente, las cuales se clasifican en cuatro categorías principales: las fuentes móviles que incluyen todo el parque vehicular, como transporte particular, de pesaje y carga; las fuentes puntuales que comprenden establecimientos industriales, comerciales y de servicio; las fuentes de área como emisiones domésticas y misceláneas; y, finalmente, las fuentes naturales donde se encuentran emisiones vegetales y suelos principalmente. La tabla 2.5 resume los resultados presentados en los últimos inventarios de emisiones para cada zona.

Tabla 2.5. *Distribución de las emisiones de los contaminantes criterio por categoría de fuente*

Fuente	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO ₂
ZMVM (Total) ¹	34,779	16,500	3,068	728,891	144,598
Área	44.2%	35.8%	32.3%	4.6%	7.4%
Puntuales	12%	19.2%	33.2%	0.8%	6.6%
Móviles	39.6%	43%	34.5	94.6%	85.8
Naturales	4.2%	2%	NA	NA	7.7
ZMVT (Total) ²	6,044	5,216	1,954	119,037	25,068
Área	82%	82%	13%	20%	12%
Puntuales	9%	8%	63%	0.4%	7%
Móviles	9%	10%	24%	79%	59%
Naturales	NA	NA	NA	NA	22%
ZMC (Total) ³	2,497	1,878	2,174	68,231	19,119
Área	51%	47%	2%	7%	4%
Puntuales	21%	19%	81%	3%	31%
Móviles	28%	35%	17%	91%	65%
Naturales	NA	NA	NA	NA	NA

Fuentes: ¹ Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2020. ² Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México. Inventario Estatal de Emisiones de Contaminantes 2016 en ProAire del Estado de México 2018-2030. ³ Inventario de Emisiones 2014. Inventario de Emisiones a la Atmósfera de Contaminantes en el Estado de Morelos. Secretaría de desarrollo sustentable, Morelos.

ZMVM. En 2020, se emitieron 30,135 toneladas (t) de PM_{10} , las fuentes de área fueron las que dominaron la emisión, particularmente la resuspensión de polvo en las calles pavimentadas con 15%, siendo las vialidades sin pavimentar las de menor emisión con 3.2%. En ese mismo año, se emitieron 14,939 t de $PM_{2.5}$, la mayor contribución se atribuye a las fuentes móviles (42%), donde de manera particular el transporte de carga pesada destaca en la emisión (17%) y la labranza y cosecha son las de menor contribución (3.5%). En la figura 2.2, se presentan las principales fuentes de emisión de la ZMVM.

Asimismo, se emitieron 434,752 t de compuestos orgánicos volátiles (COV), las fuentes de área contribuyeron con 64% en esa clasificación. El mayor emisor pertenece a las fugas de gas LP (19.3%) y las aguas residuales emiten la menor cantidad (3.1%). Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_2) se estimaron en 134.137 t. Las fuentes vehiculares son responsables del 84%, en donde el transporte particular fue el mayor emisor (34.7%), mientras que la maquinaria agrícola y de construcción fue la de menor emisión (3.2%). Las emisiones de tolueno, isómeros de xileno, 1,1,1-tricloroetano y alcoholes metílico e isopropílico son importantes por sus efectos a la salud y fueron equivalentes a 124,000 t. Las fuentes que lideraron esta emisión fueron de área, emitiendo un 70%, y las fuentes naturales tan solo emitieron 3 por ciento.

Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) son importantes para el ambiente, ya que son capaces de absorber la energía que proviene del Sol y la radiación infrarroja que emite la tierra, contribuyendo al calentamiento global. En el año 2020 se emitieron más de 67 millones de t de CO_2eq , el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y los hidrofluorocarbonos (HFC), también se conocen otros como el carbono negro (CN) y ozono (O_3), (en 2022 se emitieron 2596 t de CN) se clasifican por tener tiempos de vida corta. La emisión de los GEI destacó por las fuentes móviles con el 53%, de los cuales el transporte particular lideró con el 25.8% y el transporte de carga pesado fue el de menor emisión con el 4%. Las emisiones de CN en 2022 fueron en 50% por las fuentes móviles, el transporte público lidera con el 19.6% y las motocicletas fueron las de menor emisión con el 3.6% (SEDEMA, 2023b).

ZMVT. Con base en el último inventario estatal de emisiones de contaminantes criterio del año 2016 (SMAGEM, 2018), las PM son los contaminantes que más afectan la calidad del aire, las fuentes de área son las que contribuyen con el 82% de las $PM_{2.5}$ y PM_{10} , lo cual representa un reto en materia de mitigación, debido a la falta de regulación de este tipo de fuentes de emisión, en donde están contenidos los hogares, comercios, las actividades agrícolas y ganaderas, cuya extensión se ilustra en la figura 2.3.

A diferencia de la ZMVM, en el caso del CO y NO_2 , las fuentes de área contribuyen con el 20% de la emisión de CO debido a las quemas agrícolas y la quema

de biomasa, que son actividades típicas de las zonas rurales contenidas en la ZMVT (SMAGEM, 2018). Las fuentes naturales también están consideradas en la emisión de NO_2 debido a la descomposición de materia orgánica en el suelo, así como a la degradación de materia orgánica en las aguas residuales y rellenos sanitarios. En el caso de COV se emiten anualmente 68,070 t, de las cuales la mayor contribución es de las fuentes de área (54%), mientras que, anualmente se emiten 6567 t de NH_3 que casi en su totalidad provienen de las fuentes de área. Se estima que el municipio de Toluca emite 5,578,200 t de CO_2eq , de las cuales el 93% provienen de la categoría de energía, el 5.7% a residuos, el 0.64% a procesos industriales y el 0.3% a actividades agrícolas (H. Ayuntamiento de Toluca, 2022).

ZMC. El último inventario de emisiones del estado de Morelos corresponde al año 2014, con base en éste, el ProAire 2018-2027 estimó el volumen de emisiones para la región centro-poniente, que comprende los municipios de Cuernavaca, Emiliano Zapata, Tepoztlán, Huitzilac, Jiutepec, Temixco y Xochitepec. A continuación, se describen las fuentes de emisión en esta región.

Las fuentes de área representan el 51% de las emisiones de PM_{10} y el 47% de $\text{PM}_{2.5}$. Por su parte, las fuentes puntuales contribuyen con el 21% de PM_{10} y el 19% de $\text{PM}_{2.5}$. En cuanto a las fuentes móviles, aportan el 28% de las PM_{10} y el 35% de las $\text{PM}_{2.5}$. Dentro de las fuentes de área, una de las principales emisoras es la combustión doméstica de leña, que genera el 19% de las PM_{10} y el 25% de las $\text{PM}_{2.5}$.

El CO y los NO_2 son emitidos principalmente por fuentes móviles, que contribuyen con un 91% y un 65% respectivamente de su volumen total. En cuanto al SO_2 , el 81% es emitido por fuentes puntuales, entre las que destacan la industria de la celulosa y papel, y la automotriz, que contribuyen con un 38% y 23%, respectivamente, la ubicación de las principales industrias se presenta en la figura 2.4. Los COV y el NH_3 son emitidos en un 62% y 94% por fuentes de área, que provienen del uso doméstico de solventes y sustancias químicas, en un 15% y 59%, de forma respectiva.

2.5 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y COMUNICACIÓN DE RIESGOS

Programas públicos de control de la contaminación del aire

ZMVM. El “Hoy no circula” es un programa vigente desde 1989; se aplica en las 16 alcaldías de la Ciudad de México y los 18 municipios del Estado de México. La limitación a la circulación de 05:00 am a 22:00 pm, donde el único día exento

es el domingo. Asimismo, los vehículos se someten a una verificación obligatoria, como resultado, se les otorga un holograma que indica los días que se limitará la circulación (CAME, 2024).

Otra medida que busca disminuir los niveles de contaminación es la “Contingencia ambiental”, la cual se activa de manera eventual y transitoria cuando se presenta un incremento en las concentraciones ambientales de cualquiera de los contaminantes criterio, por encima de un nivel que comprometa la salud de los habitantes, así como riesgos ecológicos asociados. El SIMAT es el encargado de monitorear los niveles y notificar a las instancias responsables para que tomen medidas que disminuyan la contaminación. Como referencia, se utiliza el índice de calidad del aire establecido en la NADF-009-AIRE-2017, basado en los límites de las normas emitidas por la Secretaría de Salud, del contaminante de interés (O_3 , PM_{10} y $PM_{2.5}$) (SEDEMA, 2023a).

Los ProAire buscan la participación del gobierno federal, estatal y municipal, con el fin de disminuir la contaminación y su respectivo impacto en la población expuesta. En México se tienen 27 ProAires. En 2030, se busca que con los programas, la población beneficiada sea de más de 104 millones (SEMARNAT, 2024).

El programa propone la implementación de 19 acciones:

- Aumentar la utilización de tecnologías ecológicas y fortalecer las regulaciones para disminuir las emisiones en el ámbito del transporte.
- Gestionar la demanda de transporte individual con el fin de reducir la cantidad de viajes, las distancias recorridas y los tiempos de traslado.
- Promover la adopción de medios de transporte masivos y con bajas emisiones, así como fomentar un desarrollo urbano sustentable.
- Ampliar la utilización de combustibles fósiles más limpios tanto en el sector del transporte como en la industria.
- Actualizar el marco normativo para disminuir las emisiones industriales, e implementar esquemas de auditoría y vigilancia para supervisar las emisiones en sectores prioritarios.
- Reducir el empleo de gas licuado de petróleo y abordar las fugas presentes en las distintas etapas de la cadena de suministro y consumo.
- Establecer límites al contenido de compuestos orgánicos volátiles en productos cosméticos, domésticos, industriales, comerciales y de servicios.
- Abordar la emisión de partículas generadas por el tráfico en carreteras, actividades agrícolas, así como por la erosión del viento.
- Mejorar la gestión de los desechos sólidos urbanos y las aguas residuales.
- Mejorar la gestión de incendios forestales y la capacidad para combatirlos.

- Promover la salud pública y reducir la exposición de la población a contaminantes atmosféricos.
- Mejorar la supervisión de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México.
- Fomentar la investigación científica para respaldar la gestión de la calidad del aire.

En la ZMVM, el ProAire 2021-2030 es el programa vigente con el que se busca cumplir al menos con el 70% de las acciones y, con las medidas correspondientes, se proyecta una disminución de 25% de los contaminantes emitidos para el año 2030, mejorando así la calidad del aire, lo cual disminuiría alrededor de 6,000 muertes prematuras.

ZMVT. A diferencia de la ZMVM, en el Valle de Toluca el Programa “Hoy no circula” no se aplica, solo se difunde la información para aquellas personas que diariamente se desplazan a la ZMVM. La verificación vehicular de emisiones no es obligatoria en la ZMVT, aunque sí se cuenta con los establecimientos para medir la emisión de cada vehículo, conocidos como “verificentros”, para atender la demanda de las personas que viajan al Valle de México y necesitan obtener su holograma de circulación.

En cuanto a los programas de Contingencia Ambiental, fue hasta febrero de 2024 cuando entró en vigor este recurso para declarar un estado de Contingencia Ambiental con base en las emisiones registradas en la ZMVT y en la Zona Metropolitana de Santiago Tianguistenco (ZMST), ya que antes solo se transmitía oficialmente el comunicado de declaración de Contingencia por parte de la CAME y se emitían ciertas recomendaciones, como la reducción del uso del automóvil, pero sin carácter obligatorio. Las medidas aplicables en las distintas fases están enfocadas en acciones preventivas del impacto en la salud de la población. En el caso de las restricciones a la circulación vehicular, la disminución del uso del automóvil solo es en carácter de sugerencia; hay ciertas restricciones en algunas actividades industriales; y suspensión de servicios que generan emisiones de contaminantes.

En el caso de los informes del ProAire, la última edición para el Valle de Toluca fue la 2012-2017, posteriormente la información en materia de calidad del aire de la ZMVT se conjuntó en el ProAire del Estado de México edición 2018-2030.

Las estrategias del ProAire Estatal 2018-2030 se clasifican en 8 categorías:

- Reducción de emisiones en fuentes móviles.
- Reducción de emisiones en fuentes fijas.
- Reducción de emisiones en fuentes de área.

- Reducción de emisiones en el sector doméstico, comercial y de servicios.
- Desarrollo urbano.
- Protección a la salud.
- Fortalecimiento institucional y financiamiento.
- Comunicación y educación ambiental.

ZMC. No cuenta con programa “Hoy no circula”. En cuanto a la verificación vehicular, se estableció como obligatoria a partir de 1995, sin embargo, en el 2016 la entrada en vigor de la NOM-EM-167-SEMARNAT-2016 ocasionó la cancelación, actualización y reapertura de los verificentros. El Inventario de Emisiones (IE) de 2014 reporta que en ese año solo el 42% de los vehículos registrados en Morelos había sido verificado. Morelos no cuentan con ningún programa de contingencia ambiental. La ZMC cuenta con dos ProAire, el primero corresponde al periodo 2009-2012 y el más reciente del 2018 al 2027. Ambos programas reconocen que en la ZMC no se cuenta con una red de monitoreo atmosférico representativa del área de interés.

Entre las medidas recomendadas por ProAire 2018-2027 para mejorar la calidad del aire se incluyen:

- Fortalecer el Sistema de Monitoreo Atmosférico del Estado de Morelos.
- Reducir las emisiones industriales incluyendo las del sector cañero.
- Fortalecer el programa de verificación vehicular.
- Implementar un programa de reducción de emisiones del transporte de pasajeros y vehículos de carga, a través de mejora tecnológica o renovación de sus autobuses.
- Reducir el uso y fugas de gas LP en el sector doméstico, comercial y de servicios.
- Reducir las emisiones de COV generadas por actividades de limpieza en la industria.
- Reducir el uso de leña y carbón como combustible doméstico.
- Reducir las quemas agrícolas a través de la cosecha verde.
- Fortalecer la prevención y combate de los incendios forestales de origen humano.
- Regular actividades no registradas, como fuentes emisoras, como son la-drilleras y alfareras.
- Frenar el cambio de uso de suelo para reducir emisiones por erosión.
- Estimar la carga de mortalidad atribuible a las PM_{10} , $PM_{2.5}$ y O_3 .

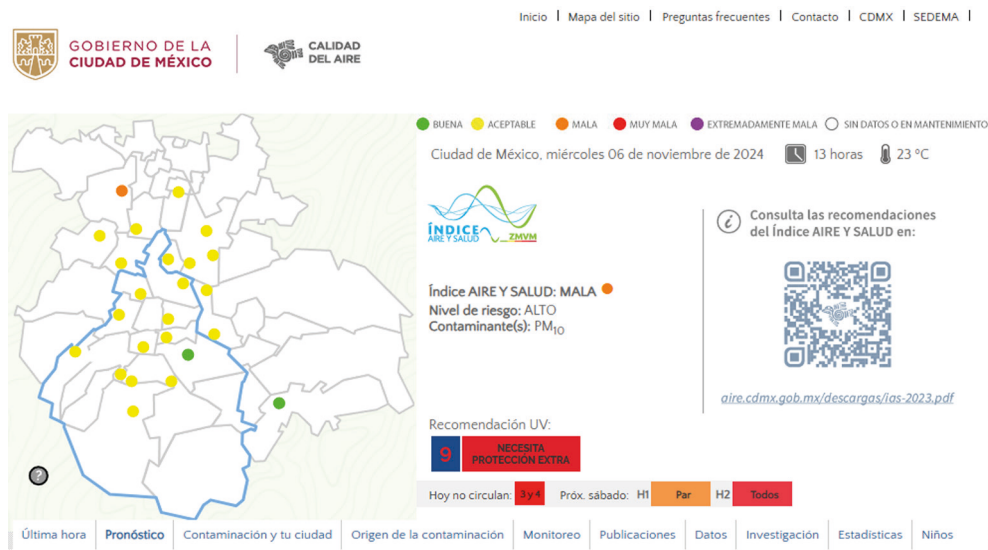
- Construir un Sistema de Vigilancia Epidemiológica para monitorear el impacto inmediato de los contaminantes atmosféricos en la salud humana.
- Desarrollar proyectos de investigación en materia de calidad del aire en el Estado.

Medios de comunicación de la calidad del aire

ZMVM. Para dar a conocer la calidad del aire en la ZMVM existen diversos medios de comunicación, a través de la página a cargo del gobierno de la Ciudad de México (figura 2.7):

- <http://www.aire.cdmx.gob.mx/>
- <https://sinaica.inecc.gob.mx/>

Figura 2.7. Sitio web del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México y App Aire

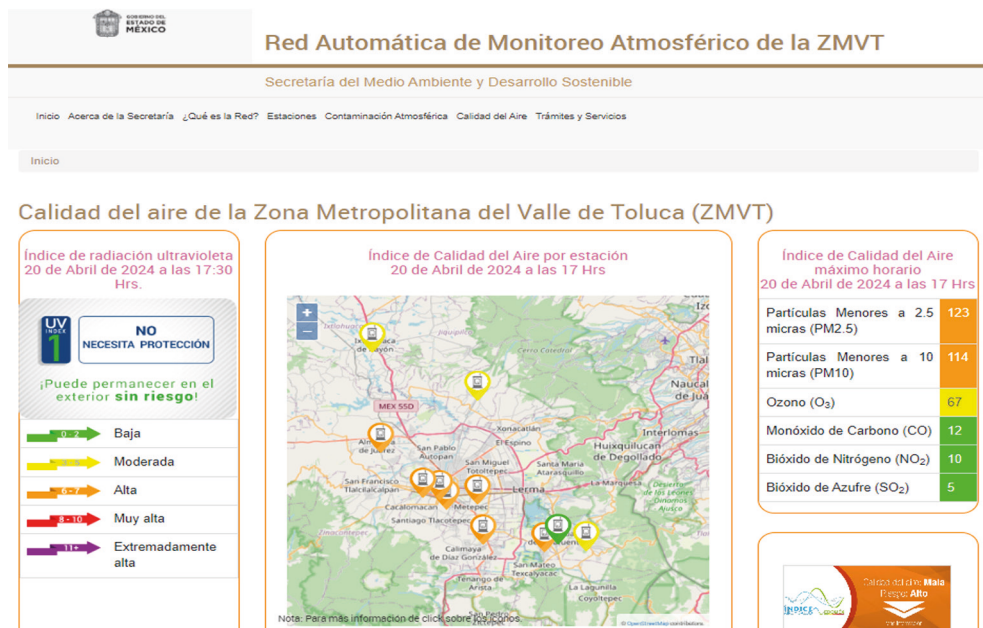


Fuente: Gobierno de la Ciudad de México, Calidad del aire a cargo de la Secretaría del Medio Ambiente. [<http://www.aire.cdmx.gob.mx/>].

ZMVT. La Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT cuenta con un sitio web donde se comunica el IMECA y el Índice de Aire y Salud (Fig. 2.8):

- <https://rama.edomex.gob.mx/calidaddelaire>

Figura 2.8. Sitio web de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT



Fuente: Calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. [<https://rama.edomex.gob.mx/calidaddelaire>].

La Secretaría del Medio Ambiente del Estado México, a través de su cuenta de Facebook, también difunde esta información cada hora: [https://www.facebook.com/AmbienteEdomex/?locale=es_LA]. Son todos los medios con los que se cuenta para la difusión del estado de la calidad del aire ya que no se cuenta con una aplicación específica para los habitantes de la ZMVT como es el caso de la ZMVM.

ZMC. El principal medio de comunicación de la calidad del aire en Morelos es el sitio web del SINAICA. La ZMC no cuenta con un sitio oficial que presente los niveles de los contaminantes ambientales en tiempo real. Sin embargo, existen distintos sitios web no oficiales que presentan índices de calidad del aire.

REFLEXIONES FINALES

La contaminación del aire en estas tres zonas de la Megalópolis es un tema de interés ambiental prioritario, ya que afecta a millones de personas que habitan y transitan entre las tres zonas diariamente, quienes se exponen a concentraciones ambientales de partículas atmosféricas y ozono que superan los límites de las normas nacionales e internacionales de manera frecuente.

Como pudo observarse, los factores fisiográficos, demográficos y económicos influyen de manera significativa en la calidad del aire. El fenómeno de inversión térmica, frecuente durante el invierno, así como la estabilidad atmosférica y alta radiación solar propias de la primavera, aunado al hecho de que las zonas metropolitanas están parcialmente cerradas con elevaciones topográficas, son condiciones que dificultan la dispersión de los contaminantes. Asimismo, las emisiones de las actividades primarias, como son la quema de residuos agrícolas y la erosión de los campos de cultivo impactan considerablemente la calidad del aire en la ZMVT y en la ZMC, mientras que en la ZMVM la gran cantidad de habitantes y su movilidad es la principal fuente de contaminación del aire.

El análisis longitudinal muestra, en su mayoría, una tendencia decreciente en las concentraciones ambientales a lo largo de 10 años (2012-2022) en la mayoría de los contaminantes criterio, a excepción del ozono y las $PM_{2.5}$. Esto es evidencia de los grandes esfuerzos en materia de políticas públicas ambientales por parte de los gobiernos de las metrópolis, pero aún están lejos de ser suficientes para que se respete el derecho de los habitantes a respirar aire seguro. El fenómeno de exportación-importación entre zonas metropolitanas convierte esta situación en un problema conjunto entre las ciudades de la Megalópolis, ya que la contaminación del aire trasciende los límites políticos y necesita de la atención y acción conjunta de los gobiernos involucrados, en especial para mitigar la emisión de partículas atmosféricas y ozono.

Al comparar las tres zonas metropolitanas pudo apreciarse que la ZMVT presenta los peores índices de calidad del aire y, a su vez, la mayor excedencia de los límites normados de exposición. Esta situación representa un riesgo considerable en materia de salud pública, ya que esta zona metropolitana es la que tiene el mayor porcentaje de población sensible (infantes y adultos mayores), el 32%, los cuales son más vulnerables a los efectos negativos ocasionados por respirar aire de mala calidad. Aunque las tres zonas son urbes en expansión desorganizada, la calidad del aire en la ZMVT y en la ZMC sufre de mayor impacto del entorno rural de las zonas periféricas. Además, hay menores alternativas de transporte masivo y se ha implementado una menor cantidad de políticas públicas ambientales con res-

pecto a la ZMVM, que, a pesar de tener mayor densidad poblacional, mayor parque vehicular y mayor cantidad de industrias, ha logrado mayores reducciones de la mayoría de los contaminantes criterio, a excepción del ozono.

Los Inventarios de Emisiones (IE) de cada zona metropolitana permiten identificar las fuentes de emisión y cuantificar sus emisiones. Estos inventarios han ido evolucionando y afinando la información en materia de datos de actividades y fuentes de emisión principales por contaminante, con lo cual se busca la reducción en la incertidumbre. Los estudios de muestreo y especiación química proveen evidencia factual que contribuye a una identificación más precisa de las fuentes de emisión.

Las redes de monitoreo actuales están limitadas si se considera la extensión territorial de cada zona. Es necesario ampliar la cobertura para conocer de manera más representativa la distribución de los contaminantes con mayor precisión, principalmente para contaminantes como las $PM_{2.5}$ y el O_3 , así como sus precursores. Cabe mencionar que es importante mejorar el acceso público a los datos de monitoreo validados, así como también ampliar los canales de comunicación para informar a la población sobre la calidad del aire y las acciones para minimizar el impacto en su salud cuando la calidad del aire es mala.

Los programas ProAire son una gran alternativa para compilar la información que permita contextualizar las causas de la contaminación del aire, así como para desarrollar estrategias de mitigación de los contaminantes que ocasionan problemas en la salud y el ambiente. Con base en lo observado en las tres metrópolis es importante brindar apoyo al campo para disminuir las quemas agrícolas, la trituration de residuos agrícolas y su reincorporación al suelo es una alternativa que también contribuye a disminuir la resuspensión de partículas del suelo. Asimismo, es importante incrementar las opciones de transporte masivo para disminuir la cantidad de vehículos en circulación, no solo de manera interna en cada ciudad, sino también para las personas que tienen que desplazarse de una ciudad a otra. Es importante incrementar la implementación y evaluación de dichas estrategias para poder generar un verdadero cambio positivo.

En este capítulo, el lector pudo conocer el contexto fisiográfico, demográfico y económico de cada zona metropolitana para comprender las causas de la contaminación del aire y su dispersión. También informa al lector sobre la situación actual en cada metrópoli en términos de contaminación atmosférica y cumplimiento de límites de exposición y cuáles son los recursos con los que cuenta cada ciudad para monitorear la calidad del aire y comunicarla, así como las políticas públicas ambientales implementadas. En definitiva, este contexto le permite al lector hacer un análisis comparativo que lo llevará a comprender los resultados presentados en los capítulos siguientes.

REFERENCIAS

- Alvarado Rosas, C. y Di Castro Stringher M.R. (2013). *Cuernavaca, ciudad fragmentada: sus barrancas y urbanizaciones cerradas*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos: Juan Pablos Editor.
- Centro Mario Molina (CCM) (2014). Estudio del sistema integral de movilidad sustentable para el valle de Toluca. Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos Sobre Energía y Medio Ambiente S.A. México. Comisión Ambiental de la Megalópolis. (2018). *Programa de gestión para mejorar la calidad del aire en Morelos 2018-2027*. México, Morelos. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/756647/8._ProAire_Morelos_2018-2027.pdf
- Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME). (2024). *Programa hoy no circula que aplica en la Zona Metropolitana del Valle de México*. México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/878737/Guia_del_Programa_HNC_02_enero_2024.pdf.
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2012). Informe de validación en campo. Cuenca del Río Amacuzc, Morelos.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). (2018). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015, México. <https://www.gob.mx/conapo/documentos/delimitacion-de-las-zonas-metropolitanas-de-mexico-2015>
- Diario Oficial de la Federación. (1996, 15 de julio). *Programa General de Desarrollo Urbano del Distrito Federal*. DOF. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4892371&fecha=15/07/1996
- Espejel Mena, J. (2019). La Zona Metropolitana del Valle de México: arreglos formales y fragmentación. *Economía, sociedad y territorio*, 19(60), 241-271. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101608>
- Gobierno del estado de Morelos. (2009). *Programa de Ordenación de la Zona Conurbada Intermunicipal en su Modalidad de Centro de Población de Cuernavaca, Emiliano Zapata, Jiutepec, Temixco y Xochitepec*. México, Morelos.
- H. Ayuntamiento de Toluca. (2022). *Programa Municipal de Cambio Climático 2030*, Toluca, México
- Hernández-Moreno, A., Trujillo-Páez, F. I., y Mugica-Álvarez, V. (2023). Quantification of primary PM2.5 Mass Exchange in three Mexican Megalopolis Metropolitan Areas. *Urban Climate*, 51, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101608>
- INRIX (2022). Global traffic scorecard. INRIX, Washington, USAM Scorecard. Consultado el 18 de octubre de 2024. <https://inrix.com/scorecard-2022/>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2015). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2014. INECC. México

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2016). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2015. INECC. México
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2017). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2016. INECC. México
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2018). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2017. INECC. México
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2019). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2018. INECC. México
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2020). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019. INECC. México
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2000). *Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. Superficie del País por Entidad y Municipio*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010*. Cuernavaca, Morelos.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010*. Emiliano Zapata, Morelos.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010*. Huitzilac, Morelos.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010*. Jiutepec, Morelos.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010*. Temixco, Morelos.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010*. Tepoztlán, Morelos.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010*. Tlaltizapán de Zapata, Morelos.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). *Marco Geoestadístico Nacional 2013, versión 6.0*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). Cuaderno estadístico y geográfico de la zona metropolitana del Valle de México 2014/ Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Participación por actividad económica 2016*. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mor/economia/default.aspx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de población y vivienda 2020*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Panorama sociodemográfico de México 2020*. Morelos. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/>

- prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197896.pdf
- Iracheta, A. (2017). Metropolitan Reform in Mexico City: Some Key Ideas. En Gómez-Álvarez, D., Rajack, R., López-Moreno, E. & Lanfranchi, G. (Eds.), *Steering the metropolis: metropolitan governance for sustainable urban development*. (pp 299-307). United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat).
- Luna Ceballos, E. I. (2015). *Estudio de calidad del aire de la Zona Metropolitana de Cuernavaca y la posible aportación de contaminación proveniente de la Zona Metropolitana del Valle de México*. [Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México]. TESIUNAM. https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?current_base=TES01&func=direct&doc_number=000734414.
- Navarro Arredondo, A. (2019). Control de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Estudios demográficos y urbanos*, 34(3), 631-663. <https://doi.org/10.24201/edu.v34i3.1806>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD). (2015), *OECD Territorial Reviews: Valle de México, México*, OECD Territorial Reviews, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264245174-en>.
- Ruiz-Villavicencio, E., López-López, M. Á., Cetina-Alcalá, V. M., y Ramírez-Guzmán, M. E. (2020). Modelación y estimación de NO₂ y O₃ en zonas rurales y suburbanas del Valle de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(3), 747-754. <https://doi.org/10.20937/rica.53548>
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). (2018). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*. México. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825006792.pdf
- Secretaría de Desarrollo Agropecuario. (2018). *Programa sectorial agropecuario 2013-2018*. México, Morelos.
- Secretaría de Desarrollo Sustentable de Morelos. (2009). *Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Municipio de Cuernavaca 2009*. Secretaria de desarrollo sustentable. <https://sustentable.morelos.gob.mx/p-territorial/oe-m>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2024). Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire. 24 de septiembre de 2024. Consultado el 28 de noviembre de 2024. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire>
- Secretaría de Desarrollo Sustentable de Morelos. (2014). *Inventario de Emisiones a la Atmósfera de Contaminantes en el Estado de Morelos 2014*. Secretaria de Desarrollo Sustentable del estado de Morelos, <https://sustentable.morelos.gob.mx/ca/pro-aire/morelos-inventario-emisiones>

- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2023a). *El monitoreo de la calidad del aire 2023*. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=%27>.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2023b). *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2020*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire. Ciudad de México. 2023. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2020/inventario-emisiones-cdmx-2020.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *Calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT)*. Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT. <https://rama.edomex.gob.mx/calidaddelaire>
- Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México (SMAGEM). (2012). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire del Valle de Toluca (2012-2017)*. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/69287/8_ProAire_ZMVT.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México (SMAGEM). (2018). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el estado de México 2018-2030*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://proaire.edomex.gob.mx/sites/proaire.edomex.gob.mx/files/files/mis%20pdf/ProAire%202018-2030.pdf>
- Urias, E. (2010). *Energías alternativas y desarrollo: El sector transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México (1990-2006)*. [Tesis de doctorado en Economía, FES Aragón, UNAM]. TESIUNAM. https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptb2010/junio/0659012/0659012_A1.pdf
- Zaragoza Badillo, J. y Guzmán, J. R. (2023). Economía, crecimiento urbano y el cambio climático local en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Inter disciplina*, 11(29), 311-332. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2023.29.84493>
- Zuk, M. (2007). *Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas*. Instituto Nacional de Ecología.