

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	15
<i>Karina Landeros Mugica</i>	
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	21
<i>Violeta Mugica Álvarez</i>	
2. Tres zonas metropolitanas de la Megalópolis: Valle de México, Valle de Toluca y Cuernavaca	57
<i>Alma Angélica Neria Hernández, Fernando Millán Vázquez y Alhelí Brito Hernández</i>	
3. Epidemiología. Padecimientos asociados a la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca	89
<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>	

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 Alatríste 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 1

Contaminantes atmosféricos y gestión de la calidad del aire en México

Violeta Mugica Álvarez

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es el principal problema de salud pública ambiental a nivel global, por lo que es importante que tanto los profesionales de distintas disciplinas como las autoridades ambientales, de salud y de educación tengan un conocimiento mínimo de los distintos contaminantes, de los responsables de emitirlos a la atmósfera, de sus implicaciones a la salud y al medio ambiente, además de estar al corriente de la normatividad y de los esfuerzos que se realizan para combatirla, de tal forma que puedan ser partícipes en esta lucha.

El objetivo de este capítulo es presentar los conceptos generales de la contaminación atmosférica, así como los elementos y las acciones que componen la gestión de la calidad del aire que han llevado a cabo las autoridades de los tres órdenes de gobierno en México para proteger la salud de la población.

En el capítulo, se relacionan los conceptos principales de la contaminación atmosférica con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) y se describe el origen

de los contaminantes criterio y climáticos, así como los efectos adversos de estos en los seres vivos y el medio ambiente. Posteriormente se explica la gestión de la calidad del aire en el país, a través de la publicación y el seguimiento de normas ambientales que se comparan con las de otros organismos internacionales, la creación de sistemas de monitoreo, el desarrollo de inventarios de emisión y la propuesta de planes y programas para mejorar la calidad del aire en las ciudades mexicanas. Finalmente, debido a que este libro presenta los resultados de un estudio integral relacionado con la calidad del aire de tres zonas metropolitanas de la Megalópolis: la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) y la Zona Metropolitana de Cuernavaca (ZMC), se ejemplifica la política de gestión de la calidad del aire en estas zonas.

1.1 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

La sobreexplotación de los recursos naturales y el desarrollo tecnológico acelerado han ocasionado un desequilibrio en la atmósfera del planeta por la emisión de una gran cantidad de especies contaminantes que se han dispersado por todo el mundo, y que han llegado a lugares antes prístinos, como las zonas ártica y antártica, provocando efectos dañinos en los seres vivos (Mugica y Figueroa, 1994). Asimismo, algunos de los contaminantes emitidos han acrecentado el efecto invernadero y ocasionado el calentamiento global, generando modificaciones importantes en el clima (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2018).

En 2019, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que 4.2 millones de muertes prematuras habían sido provocadas por la contaminación atmosférica en exteriores, principalmente por la exposición a partículas finas; asimismo, declaró que anualmente se asociaban 3.8 millones de fallecimientos con la mala calidad del aire en las viviendas y que casi el 90% de dichas muertes sucedieron en las naciones con bajo y mediano ingreso y con personas vulnerables, como mujeres, niños, adultos mayores y personas con enfermedades preexistentes (OMS, 2021). Por ello, la Organización Panamericana de la Salud (OPS) declaró que el principal riesgo ambiental para la salud pública en Latinoamérica es la contaminación atmosférica (OPS, 2019).

El estudio, atención y control de la contaminación atmosférica se incluye también en los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) que adoptaron los países afiliados a la Organización de las Naciones Unidas en 2015, en la llamada Agenda 2030, porque es el año considerado para su cumplimiento (Naciones Unidas [UN],

2018). Con el cumplimiento de los 17 ODS se pretende lograr equidad, erradicación de la pobreza y buena calidad de vida para toda la humanidad. En la figura 1.1 se muestran los ODS que se relacionan con la contaminación atmosférica:

Figura 1.1. *Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la contaminación atmosférica*



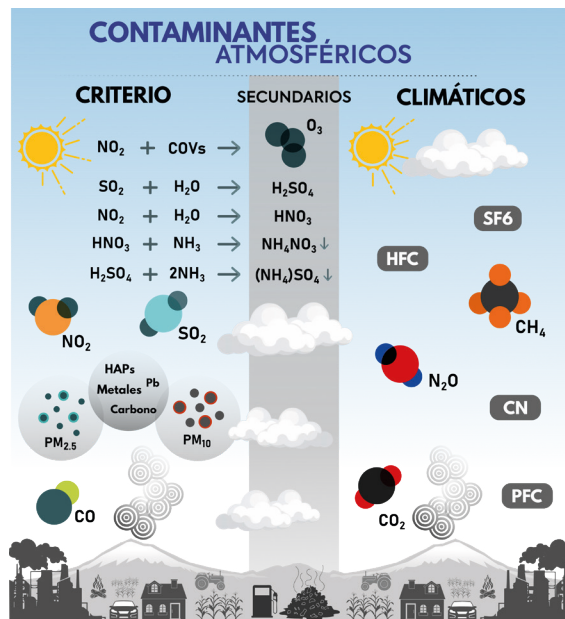
Fuente: elaboración propia con base en ONU (2018).

La contaminación atmosférica es la presencia de especies químicas, biológicas o de radiación en el aire, en concentraciones mayores a las naturales y que ocasionan efectos adversos en la salud y/o en el medio ambiente. Diariamente, se emiten a la atmósfera miles de especies químicas contaminantes (figura 1.2) que pueden clasificarse de diversas maneras:

- Por su composición química:
 - Orgánicos. Ejemplos: tolueno, metano, formaldehído.
 - Inorgánicos. Ejemplos: dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, plomo
- Por su origen:
 - Primarios, son los que emiten las fuentes de forma directa. Ejemplos: monóxido de carbono, dióxido de azufre.
 - Secundarios, cuando se forman en la atmósfera. Ejemplos: ozono, sulfato de amonio, nitrato de amonio, ácido nítrico.
- Por la toxicidad que causan en la salud de los seres vivos:
 - Neurotóxicos. Ejemplos: mercurio, plomo, tolueno.
 - Cancerígenos. Ejemplos: benceno, cadmio.

- Por contribuir al calentamiento global:
 - Contaminantes climáticos. Ejemplos: dióxido de carbono, óxido nitroso.
 - Contaminantes climáticos de vida corta. Ejemplos: carbono negro, metano.
- Por su selección como contaminantes criterio para determinar la calidad del aire Ejemplo: monóxido de carbono, partículas PM_{2.5}, dióxido de nitrógeno.

Figura 1.2. Clasificación de los contaminantes atmosféricos



Fuente: elaboración propia.

1.2 CONTAMINANTES CRITERIO

A fines del siglo xx, se seleccionaron los contaminantes atmosféricos más importantes y comunes, a los que se les denominó “contaminantes criterio” en el *Acta de Aire Limpio de 1970* aprobada por el Congreso de los Estados Unidos, que estableció una forma de comunicar y cuantificar la calidad del aire (Bachmann, 2007; Rogers, 1990). Estos contaminantes son los que se incluyeron en la primera edición de la *Guía de Calidad del Aire* publicada en 1987 por la Organización Mundial de la Salud y la Unión Europea (World Health Organization [WHO], 1987) y

que se adoptaron en la mayoría de los países, incluyendo a México. En la tabla 1.1 se muestran las características principales de cada uno.

Tabla 1.1. *Características de los contaminantes criterio*

Contaminante	Fórmula	Fase	Origen	Propiedades físicas
Monóxido de carbono	CO	Gas	Primario	Inoloro, incoloro, insípido.
Dióxido de azufre	SO ₂	Gas	Primario y secundario	Incoloro, de olor y sabor picante.
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	Gas	Primario y secundario	Color pardo, de olor y sabor picante.
Ozono	O ₃	Gas	Secundario	Insípido y de olor característico. Se genera por la radiación de luz solar en presencia de NO ₂ y COVs.
Partículas con diámetro aerodinámico < 10 µm	PM ₁₀	Sólida	Primario y secundario	Mezcla de especies líquidas y sólidas cuyas propiedades dependen de su composición química.
Partículas con diámetro aerodinámico < 2.5 µm	PM _{2.5}	Sólida	Primario y secundario	Mezcla de especies líquidas y sólidas cuyas propiedades dependen de su composición química.
Plomo en partículas	Pb	Sólida	Primario	Depende del compuesto en que se encuentra combinado o adsorbido.

Fuente: elaboración propia.

1.3 NORMATIVIDAD DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Debido a los impactos a la salud que producen los contaminantes atmosféricos, las instituciones y los organismos internacionales de salud promulgan normas y estándares con valores máximos permisibles de los contaminantes criterio para proteger la salud de las personas. Sin embargo, en 2019 se estimó que el 99% de los habitantes del planeta vive en sitios donde no se cumplen los valores de referencia de la *Guía de Calidad del Aire* de la OMS (OMS, 2021).

La tabla 1.2 muestra las normas de calidad del aire publicadas por las autoridades de salud en México, vigentes en 2024, comparadas con las de otros organismos.

Tabla 1.2. *Normas de calidad del aire en México y de otros organismos vigentes en 2024*

Especie	NOM	OMS (2021)	EPA (2024)	UE (2021)
CO	NOM-021-SSA1-2021 26 ppm Promedio 1h 9 ppm Promedio móvil 8h	AQG-2021 4 mg/m ³ Promedio 24h 10 mg/m ³	35 ppm Promedio 1h 9 ppm Promedio móvil 8h	10 mg/m ³ Promedio 24h
SO ₂	NOM-022-SSA1-2019 0.075 ppm Promedio 3 años 0.040 ppm Promedio 24h	AQG-2021 40 µg/m ³ Promedio 24h	0.075 ppm Promedio 1h.	125 µg/m ³ Promedio 24h
NO ₂	NOM-023-SSA1-2021 0.106 ppm Promedio 1h 0.021 ppm Promedio anual	AQG-2021 25 µg/m ³ Promedio 24 h 10 µg/m ³ Promedio anual	0.1 ppm 0.2 Promedio 1h 0.053 ppm Promedio anual	40 µg/m ³ Promedio anual
O ₃	NOM-020-SSA1-2021 (2024-2025) 0.09 ppm Promedio 1h 0.06 ppm Promedio móvil 8h	AQG-2021 100 µg/m ³ Promedio móvil 8h	0.07 ppm Promedio móvil 8h	120 µg/m ³ Promedio móvil 8h
PM ₁₀	NOM-025-SSA1-2021 (2024-2025) 60 µg/m ³ Promedio 24h 28 µg/m ³ Promedio anual	AQG-2021 45 µg/m ³ Promedio 24 h 15 µg/m ³ Promedio anual	150 µg/m ³ Promedio 24h	50 µg/m ³ Promedio 24h 40 µg/m ³ Promedio anual
PM _{2.5}	NOM-025-SSA1-2021 33 µg/m ³ Promedio 24h 10 µg/m ³ Promedio anual	AQG-2021 5 µg/m ³ Promedio 24h 15 µg/m ³ Promedio anual	35 µg/m ³ Promedio 24h 9 µg/m ³ Promedio anual	25 µg/m ³ Promedio anual
Pb	NOM-026-SSA1-2021 0.5 µg/m ³ Promedio anual	AQG-2021 0.5 µg/m ³ Promedio anual	0.15 µg/m ³ Promedio 3 meses	

Fuente: elaboración propia.

La medición continua de los contaminantes criterio, aunada a otros instrumentos de gestión de la calidad del aire, ha permitido reducir las concentraciones atmosféricas, principalmente del CO, el SO₂ y el NO₂, cuyas excedencias a la norma son mínimas o inexistentes en muchas ciudades mexicanas; sin embargo, ha sido más difícil controlar las partículas y el ozono. En el caso del ozono, que se forma en la atmósfera, es necesario el control de sus precursores: los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles, lo que ha implicado un reto mayor (Mugica-Álvarez, 2019). Aunque el benceno no es un contaminante criterio, la OMS propuso en su *Guía de Calidad del Aire* un valor de referencia de 1.7 µg/m³ en promedio anual, y para otras especies tóxicas en partículas se propuso la inclusión de estándares para el cadmio (Cd) (5 ng/m³) y valores de referencia para el níquel (Ni) (25 ng/m³) y el arsénico (As) (6.6 ng/m³) en promedio anual (OMS, 2021).

1.4 FUENTES PRINCIPALES DE LOS CONTAMINANTES CRITERIO Y SUS PRECURSORES

Las actividades y procesos que emiten contaminantes a la atmósfera se clasifican en cuatro tipos o categorías de fuentes, cuyas características se presentan en la tabla 1.3. Estas fuentes son las que se consideran para construir los inventarios de emisiones de los contaminantes criterio.

Tabla 1.3. *Clasificación de las fuentes de emisión de los contaminantes criterio y sus precursores*

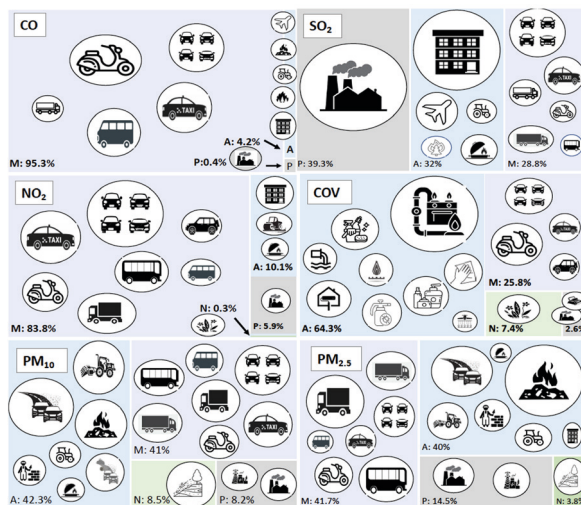
Categoría de fuente	Características
Fuentes fijas o puntuales	Instalaciones industriales, como plantas de generación, transmisión y distribución de energía, industrias de metales, químicas, papel, textiles, madera, productos no metálicos, alimentos y equipos de transporte.
Fuentes de área	Fuentes distribuidas en una zona, como viviendas, restaurantes, estaciones de servicio e incendios forestales. Incluye la combustión residencial y comercial, la construcción, actividades agrícolas, desechos urbanos, quemas a cielo abierto, fugas de gas, vialidades pavimentadas y no pavimentadas, emisiones de la aviación, plantas de luz, maquinaria, aguas residuales, ganadería, rellenos sanitarios, uso de disolventes, agricultura, etcétera.

Categoría de fuente	Características
Fuentes móviles	Vehículos registrados que circulan en la zona de estudio. Suelen dividirse en vehículos ligeros a gasolina, como camionetas o <i>van</i> a gasolina; transporte de carga a gasolina, como tractocamiones y transporte de pasajeros; y de carga a diésel, como motocicletas y embarcaciones.
Fuentes naturales	La vegetación que genera emisiones biogénicas de compuestos orgánicos volátiles (COV), emisiones volcánicas, resuspensión de polvos por erosión eólica, sal marina. Algunas de ellas no se estiman por la dificultad que representa hacerlo.

Fuente: elaboración propia.

La figura 1.3 presenta las principales fuentes que emiten a la atmósfera cada uno de los contaminantes criterio y los compuestos orgánicos volátiles (COV), porque al igual que el NO_2 son precursores del ozono. El tamaño de las fuentes proporciona una idea del volumen de las emisiones, las cuales se basaron en el Inventario de Emisiones de la ZMVM de 2020. Fuentes como las emisiones volcánicas no se incluyen porque a la fecha no se han contabilizado en dicho Inventario.

Figura 1.3. Fuentes de emisión de los contaminantes criterio y sus precursores

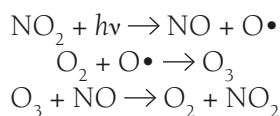


P: Fuentes puntuales, A: Fuentes de área, M: Fuentes móviles, N: Fuentes naturales

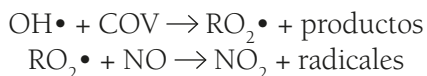
Fuente: elaboración propia.

Las cantidades emitidas y las proporciones de cada fuente de emisión varían por ciudad o región, porque dependen de las actividades que se realizan en cada estación climática; porque se integran nuevas fuentes; porque se incrementan o disminuyen algunas actividades; o por la introducción de medidas de control de emisiones. Ejemplos de lo anterior son: el incremento de las emisiones de partículas por erosión eólica en años con sequía, el incremento de emisiones vehiculares por la proliferación de motocicletas que no cuentan con equipos de control, o la disminución de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles por la implementación de recuperación de vapores de las estaciones de gasolina.

El ozono, por ser un contaminante secundario, no proviene de ninguna fuente, por lo que, para comprender su presencia en las atmósferas urbanas es necesario referirse a sus precursores: el dióxido de nitrógeno (que es un contaminante primario) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) que son hidrocarburos ligeros. El ozono se genera por un proceso fotoquímico, es decir, por la incidencia de la radiación solar (cuya energía se representa como $h\nu$) que rompe la molécula de dióxido de nitrógeno en una molécula de monóxido de nitrógeno (NO) y un radical oxígeno ($O\bullet$) que, al ser muy inestable, se une a una molécula de oxígeno para producir el ozono, el cual se destruye posteriormente con el NO formado de acuerdo con el siguiente ciclo:



En atmósferas poco contaminadas, el ozono se destruye relativamente rápido, sin embargo, cuando hay presencia de compuestos orgánicos volátiles, estos también se rompen por la acción de la luz solar y de los radicales $\text{OH}\bullet$ presentes en la atmósfera que, a su vez, generan radicales orgánicos que reaccionan con el NO atmosférico, limitando la destrucción del ozono y, en consecuencia, promoviendo su acumulación (Mugica-Álvarez, 2019). La cantidad de especies orgánicas y radicales libres de estos compuestos en períodos de alta radiación solar es del orden de miles que tienen varias rutas de reacción, una de ellas es la formación del radical peróxido ($\text{RO}_2\bullet$):



Cada compuesto orgánico reacciona con diferente velocidad con los radicales $\text{OH}\cdot$ y de ello depende su potencial para ocasionar la acumulación del ozono; durante la noche, en ausencia de luz solar, ya no hay rompimientos de compuestos volátiles y el ozono termina reaccionando con el NO remanente y se destruye. La presencia de COV se debe a las fugas de gas LP, al uso y almacenamiento de disolventes, al funcionamiento de estaciones de gasolina, al uso de aerosoles y al empleo de artículos de limpieza y de uso personal. En resumen, se presentan altas concentraciones de ozono en la atmósfera en días despejados y con alta radiación solar, en los que la reactividad atmosférica ocasiona el rompimiento del NO_2 y de moléculas orgánicas cuyos radicales reaccionan con el NO, impidiendo que el ozono se destruya y provocando su acumulación (Mugica-Álvarez *et al.*, 2019).

1.5 EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA SALUD

Los efectos adversos a la salud se tratarán con mayor detalle en los capítulos 3 y 4 de este libro, sin embargo, se mencionan brevemente en este capítulo, ya que la protección a la salud ha sido la principal fuerza motriz en el estudio de la contaminación atmosférica y la Gestión de la Calidad del Aire que se realiza en México y en el mundo.

De manera general, se ha encontrado que la mezcla de contaminantes atmosféricos provoca mortalidad prematura, agudiza cuadros de asma y de enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), disminuye la capacidad pulmonar, reduce la respuesta inmunológica y aumenta el riesgo de eventos cerebrovasculares y de enfermedades cardíacas, respiratorias y neurológicas. Las evidencias muestran que la exposición crónica a los contaminantes puede afectar cada órgano del cuerpo (Schraufnagel *et al.*, 2019).

Monóxido de carbono (CO). Los daños a la salud que ocasiona este contaminante se distinguen de los ocasionados por los demás contaminantes criterio, porque este compuesto es capaz de desplazar al oxígeno de la hemoglobina de la sangre que, al reaccionar con la glucosa, produce la energía necesaria para todas sus funciones (Oliu *et al.*, 2010); el CO también desplaza al O_2 de la mioglobina, lo que altera el funcionamiento del músculo esquelético y del músculo cardíaco (Piantadosi, 2002); la exposición al CO provoca desde cansancio, mareo, náuseas y dolor de cabeza, hasta sensación de asfixia e, incluso, la muerte (Bolaños y Chacón, 2017). En México cada año se reportan entre 220 y 350 accidentes por intoxicación de CO en interiores (SINAVE/DGE/SALUD, 2023).

Dióxido de azufre (SO₂). Este contaminante presenta una absorción eficiente en el organismo, ya que, al inhalarse, se disuelve en las mucosas del sistema respiratorio reduciendo el pH y provocando algunas alteraciones; el SO₂ provoca desde dificultad para respirar e inflamación de las vías respiratorias, hasta edema pulmonar, además de irritación ocular (Pan, 2019).

Dióxido de nitrógeno (NO₂). Como el NO₂ tiene una vida media de varias horas, la exposición puede ser prolongada y ocasionar irritación de las vías respiratorias, agravamiento del asma, disminución de la función pulmonar e, incluso, hospitalizaciones por infecciones respiratorias, principalmente en niños y ancianos (Mainka & Žak, 2022).

Ozono (O₃). Como se mencionó anteriormente, el O₃ es un contaminante secundario con propiedades oxidantes capaz de reaccionar con cualquier macromolécula biológica, incluyendo lípidos, proteínas, ácidos nucleicos y carbohidratos (Iritri & Faoro, 2009); la exposición al O₃ se relaciona con el aumento de casos de asma en niños y provoca el aumento de la mortalidad respiratoria y cardiovascular a nivel mundial (Gao *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2020).

Compuestos orgánicos volátiles (COVs). Estos contaminantes son precursores en la formación de ozono, por lo que se incluyen en la gestión de la calidad del aire. Las olefinas, los compuestos aromáticos y los aldehídos son los compuestos que generan más ozono (Carter, 2009). Además, varios COVs son dañinos a la salud, como el benceno y el formaldehído que son tóxicos importantes, ya que son cancerígenos (García *et al.*, 2022; IARC, 2012; Pyatt *et al.*, 2012).

Partículas atmosféricas (PM). El daño a la salud que producen las partículas depende de dos factores: su tamaño y su composición. Las PM₁₀ pueden alojarse en las vías aéreas superiores de los pulmones, mientras que las partículas finas (PM_{2.5}) pueden llegar a los alvéolos pulmonares, ingresar al torrente sanguíneo y alcanzar cualquier órgano. Por otro lado, cada partícula puede contener distintos compuestos de metales de transición, hidrocarburos policíclicos y/o quinonas que pueden inducir reacciones químicas en el organismo, producir estrés oxidativo y el debilitamiento del sistema inmunológico (Lakey *et al.*, 2016). La exposición a las partículas se ha asociado con enfermedades crónicas cardiovasculares y respiratorias, como EPOC, asma y cáncer (Viegi *et al.*, 2020); asimismo, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) clasificó a las partículas atmosféricas finas como cancerígenas (Loomis *et al.*, 2013).

Plomo (Pb). El plomo fue uno de los más importantes problemas de salud pública en los años 70 y 80, no solo en México, sino en el mundo, debido a su uso como antidetonante en la gasolina en forma de tetraetilo de plomo. Fue clasificado en los Estados Unidos como la sustancia más peligrosa en el Registro de Sustancias

Tóxicas y Registro de Enfermedades (US-ATSDR, por sus siglas en inglés), a la fecha ocupa la segunda posición ya que causa problemas neurológicos en niños y adultos y cada año se reportan más de 600,000 niños con discapacidad intelectual por exposición al Pb, principalmente en países en desarrollo (US-ATSDR, 2020). Como se dejó de utilizar la gasolina con plomo, las concentraciones atmosféricas de este elemento se redujeron considerablemente y hay excedencias muy esporádicas de las normas; actualmente se usa en pinturas, dispositivos electrónicos, baterías y en algunos casos como aditivo de combustibles (Lacerda *et al.*, 2023; WHO, 2020).

Otras especies tóxicas contenidas en PM_{10} y $PM_{2.5}$. Además del plomo, las partículas atmosféricas pueden contener otros metales tóxicos en atmósferas urbanas, como son: el mercurio (Hg), el cadmio (Cd), el cromo (Cr) y el níquel (Ni); y metaloides como el arsénico (As) y el selenio (Se), derivados principalmente de procesos industriales, minería, aplicación de pinturas y desgaste de frenos automotrices (Csavina *et al.*, 2012; Mugica-Álvarez *et al.*, 2009; Zhi *et al.*, 2021). En la última década, se ha estudiado el contenido de carbono en partículas de hollín, que se considera uno de los principales responsables de los fallecimientos prematuros por la contaminación atmosférica, ya que contiene hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) con propiedades cancerígenas, como el benzo[a]pireno. Además, el hollín contribuye al cambio climático porque contiene carbono negro (OMS, 2021).

1.6 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE

Un índice de calidad del aire es un valor numérico adimensional, que se relaciona con las concentraciones de un grupo de contaminantes para comunicar a la población los riesgos a la salud; es común que el índice se asocie a colores relacionados con distintos niveles de contaminación, lo cual facilita la difusión.

El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), publicado en noviembre de 1982, fue el primer índice publicado en México en el *Diario Oficial de la Federación*. El valor de 100 IMECA correspondía a la NOM de cada contaminante. Asimismo, el IMECA fue la herramienta utilizada para explicar y decretar las contingencias ambientales, que se abordarán en la siguiente sección.

Como resultado del análisis y discusión realizados en la última década, se concluyó que el IMECA, al ser un promedio de 24 h, no proporcionaba información oportuna para proteger a la población, por lo que se desarrolló el Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud, conocido como Índice AIRE Y SALUD, cuyos lineamientos se publicaron en la NOM-172-SEMARNAT-2019 en noviembre de 2019. Esta norma unifica el método de cálculo y vincula las concentraciones de los con-

taminantes criterio con la calidad del aire y los riesgos a la salud, además de que en ella se establece la forma de comunicación al público que deben aplicar las instituciones ambientales locales o estatales que realizan el monitoreo atmosférico. El contaminante que alcanza el mayor valor del Índice en alguna de las estaciones de monitoreo es el que se reporta. A diferencia del IMECA, que convertía las concentraciones a una escala adimensional, el Índice AIRE Y SALUD establece una franja o banda de calidad del aire y el riesgo a la salud para cada contaminante; la población puede disminuir la exposición si sigue las recomendaciones de la banda correspondiente (figura 1.4).

Figura 1.4. *Bandas de calidad del aire, riesgo asociado y recomendaciones para la población*

CALIDAD DEL AIRE	NIVEL DE RIESGO A LA SALUD ASOCIADO	COLOR	RECOMENDACIONES	
			PARA GRUPOS SENSIBLES	PARA TODA LA POBLACIÓN
Buena	Bajo	VERDE	Disfruta actividades al aire libre	
Aceptable	Moderado	AMARILLO	Considera reducir las actividades físicas vigorosas al aire libre	Disfruta actividades al aire libre
Mala	Alto	NARANJA	Evita las actividades físicas (tanto moderadas como vigorosas) al aire libre	Reduce las actividades físicas vigorosas al aire libre
Muy mala	Muy Alto	ROJO	No realices actividades al aire libre. Acude al médico si se presentan síntomas respiratorios o cardíacos	Evita las actividades físicas moderadas y vigorosas al aire libre
Extremadamente mal	Extremadamente alto	MORADO	Permanece en espacios interiores. Acude al médico si se presentan síntomas respiratorios o cardíacos	

Fuente: elaborado a partir de la NOM-172-SEMARNAT-2019.

1.7 PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS (PCAA)

Una contingencia ambiental es una situación temporal en que la concentración de uno o más contaminantes atmosféricos alcanza niveles que pueden ocasionar daño a la población en general, por lo que las autoridades ambientales y/o de salud, a través de una declaratoria, intervienen con el fin de establecer de forma inmediata

actividades restrictivas para los sectores que generan las emisiones contaminantes a la atmósfera y, de este modo, atender la emergencia. La declaración o suspensión de una contingencia se basa en el monitoreo atmosférico y el análisis del pronóstico meteorológico.

En las ciudades mexicanas, las contingencias ambientales se activan por altas concentraciones de ozono o de partículas PM_{10} y/o $PM_{2.5}$. En la época seca caliente, de marzo a mayo o junio, suelen elevarse los niveles de ozono debido a la baja nubosidad y humedad, a la elevada radiación solar y a las altas temperaturas combinadas con eventos de alta presión atmosférica que originan estabilidad atmosférica, es decir, una baja circulación de aire que impide la dispersión de los contaminantes; el aumento de partículas en esta época se incrementa por la erosión del suelo, las quemas agrícolas, la quema de residuos, la alta incidencia de incendios forestales y por diversas prácticas agrícolas. En la época invernal suelen presentarse contingencias ambientales por partículas PM_{10} y/o $PM_{2.5}$, debido a la presencia de frentes fríos e inversiones térmicas que favorecen la concentración de contaminantes, así como por la quema de leña, carbón y biomasa.

Las situaciones de contingencia han activado protocolos específicos con algunas diferencias en las últimas tres décadas para disminuir más rápidamente la contaminación, que incluyen:

- Disminuir la circulación de automóviles.
- Disminuir la actividad industrial de las empresas con mayores emisiones.
- Disminuir el transporte de gas LP.
- Evitar el uso de carbón y leña en interiores y exteriores.
- Evitar quemas agrícolas y de jardinería.
- Suspender actividades de mantenimiento y jardinería en la ciudad.
- Suspender actividades de construcción, incluyendo el traslado de material pétreo generador de partículas.

Para proteger la salud de la población se estableció:

- Comunicación oportuna de la calidad del aire y recomendaciones de protección.
- Reducción o suspensión de actividades al aire libre e, incluso, suspensión de actividades escolares.

Desde 1986, la ZMVM ha tenido un Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA), en el que se indican los valores de IMECA en los que se activan y

suspenden las contingencias ambientales. Este programa se ha modificado periódicamente y los valores en que se activa la contingencia actualmente se han reducido entre el 30 y 40% (en comparación con las pasadas décadas) para una mayor protección de la salud de los habitantes, al igual que sucedió con las normas de calidad del aire. A partir de mayo de 2019, se aplica el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México (PPRECAA) que sigue vigente en 2024 (Gaceta del Gobierno, 2019). La Tabla 1.4 muestra los valores de concentración por contaminante y el índice de calidad del aire en que se activa y suspende la contingencia.

Tabla 1.4. *Activación y suspensión de las fases de la contingencia ambiental para la ZMVM*

Contingencia	Activación			Suspensión		
	Índice (concentraciones)			Índice		
	Ozono ^a	PM ₁₀ ^b	PM _{2.5} ^b	Ozono	PM ₁₀	PM _{2.5}
Pre-contingencia	Pronóstico de O ₃ para el día siguiente a 140 puntos con probabilidad de 70% de ocurrir	> 135 puntos	> 135 puntos	Automático al siguiente día o por activación de Fase I	< 135 puntos y pronóstico meteorológico favorable para día siguiente	< 135 puntos y pronóstico meteorológico favorable para día siguiente
Fase I	> 150 puntos (>154 ppb)	> 150 puntos (> 214 µg/m ³)	> 150 puntos (> 97.4 µg/m ³)	< 150 puntos con pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente		
Fase II	> 200 puntos (> 204 ppb)	> 200 puntos (> 354 µg/m ³)	> 200 puntos (> 150.4 µg/m ³)			
Fase combinada	Ozono >150 puntos y PM ₁₀ o PM _{2.5} >140 puntos Ozono >140 puntos y PM ₁₀ o PM _{2.5} >150 puntos			< 150 puntos y < 140 puntos dependiendo del contaminante, con pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente		

Nota: *a)* Concentración promedio horario en partes por billón; *b)* Concentración promedio móvil 24 horas.
Fuente: elaboración propia.

En la ZMVT se aplica el Programa para la Atención de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PACAA), publicado el 18 de febrero de 2022 en la *Gaceta de Gobierno*, de acuerdo con las concentraciones mostradas en la tabla 1.5. Con este último PACAA se realizó una disminución de los valores umbrales para activar la contingencia y la declaración de la Fase I para PM_{10} y $PM_{2.5}$ que se aplicaba desde 2019.

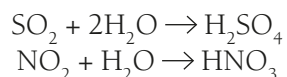
Tabla 1.5. Activación y suspensión de las fases de la contingencia ambiental para la ZMVT

	Activación			Suspensión		
	Concentraciones			Concentraciones		
	Ozono	PM_{10}	$PM_{2.5}$	Ozono	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Fase preventiva Cuando se rebasan las NOM	> 0.90 ppm	> 0.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	> 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Al alcanzar valores menores a la norma		
	Promedio 1h	Promedio móvil 24 h	Promedio móvil 24 h	Pronóstico meteorológico favorable para día siguiente y valores menores a:		
Fase I	> 0.154 ppm	> 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	> 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	< 0.154 ppm	< 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	< 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Fase II	> 0.204 ppm	> 354 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	> 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	< 0.204 ppm	< 354 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	< 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Fuente: elaborado a partir de SMAGEM (2022).

1.8 EFECTOS ADVERSOS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN EL MEDIO AMBIENTE

Además de los impactos a la salud, los contaminantes atmosféricos ocasionan efectos adversos en el medio ambiente. Uno de los más importantes se debe a las emisiones de SO_2 y NO_2 que, cuando reaccionan con el vapor de agua, forman la lluvia ácida que contiene ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), los cuales se precipitan con la lluvia y llegan a los cuerpos de agua y al suelo, acidificándolos (Abbasi *et al.*, 2013):

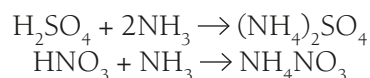


Algunas especies, tanto animales como vegetales, tienen dificultad para sobrevivir a las condiciones ácidas del agua o del suelo, además de que estas condiciones favorecen la disolución y movilidad de metales que se encuentran en forma de óxidos o compuestos insolubles y que se convierten en sales biodisponibles que pueden ser absorbidas por vegetales, causando deforestación, pérdidas en la agricultura y la biodiversidad, o pueden ser consumidas por especies animales e ingresar a la cadena trófica para el consumo humano (Liang, 2020). La lluvia ácida también genera corrosión en los materiales metálicos y el concreto, dañando el patrimonio cultural y la arquitectura.

Otro impacto de la contaminación atmosférica es el daño a la vegetación por el ozono, el cual es capaz de oxidar la superficie de las hojas, lo que ocasiona en estas la aparición de manchas amarillentas al degradarse la clorofila (clorosis) o manchas de color marrón rojizo al acumularse fenilpropanoides (Iritri y Faoro, 2009). Debido al impacto económico en la producción de granos, se han realizado varios estudios que reportan alteraciones ocasionadas por el ozono en especies agrícolas, desde lesiones visibles, como la reducción del contenido de clorofila y fotosíntesis, hasta la reducción de biomasa y la cantidad y la calidad de los cultivos; en el caso del trigo se han reportado pérdidas en el rendimiento de más del 8% por las concentraciones actuales de ozono atmosférico (Emberson, 2020).

La mayoría de los impactos a la salud que producen los contaminantes atmosféricos a las personas se extienden a la fauna, principalmente en enfermedades respiratorias, lo cual, aunado a la deforestación y al calentamiento global, es causa de la pérdida de biodiversidad (Kaiho, 2023).

Otro efecto en el medio ambiente es la disminución de la visibilidad producida por aerosoles secundarios orgánicos o inorgánicos, los cuales están constituidos por partículas ultrafinas que se forman en la atmósfera por efecto de la luz solar, la humedad y la presencia de especies químicas capaces de formar nuevos compuestos. Un ejemplo de ello es la formación de partículas ultrafinas de sulfato de amonio y de nitrato de amonio que se forman por la reacción de amoníaco emitido por material orgánico en descomposición en el suelo o el agua, con los ácidos sulfúrico y nítrico formados en la atmósfera:



1.9 CONTAMINANTES CLIMÁTICOS

Los contaminantes climáticos son aquellas especies emitidas a la atmósfera que acrecientan el efecto invernadero y provocan el calentamiento global, por lo que se conocen como compuestos de efecto invernadero, cuyas fórmulas y propiedades se muestran en la tabla 1.6.

Los gases de efecto invernadero (GEI) tienen la capacidad de absorber la radiación infrarroja que emite la tierra y regresarla a la atmósfera baja, provocando un calentamiento, por lo que también se les denomina forzadores climáticos. El carbono negro (CN) es el único compuesto invernadero que se encuentra en fase sólida; se comporta como un cuerpo negro que absorbe y emite todas las radiaciones, provocando también el calentamiento de la atmósfera. No todos los compuestos invernadero tienen el mismo efecto o potencial de calentamiento, a 1 kg de CO_2 se le asigna un potencial de calentamiento relativo de 1 y el potencial de los demás gases se refieren al de CO_2 , y pueden calcularse para diversos periodos de tiempo, aunque el más utilizado es el de 100 años.

Las emisiones de los GEI se reportan en conjunto como CO_2eq (dióxido de carbono equivalente); para ello, se multiplica la masa de las emisiones de cada gas por su valor de potencial de calentamiento global y se suman.

El CO_2 puede permanecer en la atmósfera por más de 200 años, sin embargo, otros contaminantes climáticos permanecen menor tiempo, entre algunos días y 15 años, por lo que se les conoce como contaminantes climáticos de vida corta (CCVC). Recientemente, el control de las emisiones de los contaminantes climáticos se ha enfocado en los CCVC, como el metano y el CN, ya que, debido a su corto periodo de residencia en la atmósfera, su control puede contribuir de manera más rápida a la mitigación del cambio climático. Por ello, entre los compromisos de reducción de compuestos invernadero de México ante el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático se encuentra la reducción del 51% de las emisiones de CN para el año 2030, tomando como año base el 2013, ya que es más sencillo controlar la emisión de las partículas de hollín que las emisiones de CO_2 .

Tabla 1.6. Características de los contaminantes climáticos

Contaminante	Fórmula	Fase	Tiempo residencia	Potencial de calentamiento Global a 100 años	Fuentes
Dióxido de carbono	CO ₂	Gas	>200 años	1	Quema de combustibles fósiles y biomasa
Metano	CH ₄	Gas	12 años	28	Aguas residuales, descomposición de residuos sólidos, uso y producción de gas natural, ganadería
Óxido nitroso	N ₂ O	Gas	121 años	265	Fertilizante de suelos
Hidrofluorocarbono	HFC-134a	Gas	13.4 años	1,300	Aire acondicionado
Hidrofluorocarbono	HCFC-22	Gas	11.9 años	1,760	Refrigerante
Clorofluorocarbonos	CFC-11	Gas	45 años	4,660	Refrigerante y propelente
Hexafluoruro de azufre	SF ₆	Gas	3,200 años	23,500	Aislamiento eléctrico de alta tensión
Carbono negro o Carbono elemental	CN CE	Sólida	Días	900	Quema de diésel, combustóleo y biomasa

Fuente: Gobierno de la República, *Intended Nationally Determined Contribution* (2015).

Los términos de carbono elemental (CE) y de carbono negro (CN) se utilizan de forma equivalente en distintos documentos que tratan sobre contaminación atmosférica, hollín y el calentamiento global, sin embargo, el carbono elemental y el carbono negro no son idénticos, puesto que se miden por métodos distintos: el CE se termina por un método químico termo-óptico y el CN por un método óptico.

Entre los efectos del calentamiento global y el cambio climático se tienen, por una parte, el aumento de temperatura, que ha registrado valores nunca observados en la mayor parte del planeta, el aumento de los eventos extremos como ciclones, inundaciones y sequías, el deshielo de los glaciares y la reducción del potencial productivo en varios cultivos agrícolas, entre otros; por otra parte, ha aumentado la tasa de muertes prematuras y enfermedades por las olas de calor, y por el incremento de la propagación de vectores como mosquitos, que transmiten enfermedades como la malaria, el dengue y el chikungunya, así como la de patógenos transmitidos por el aire, el agua y alimentos, especialmente en los países en desarrollo (Romanello *et al.*, 2022). El aumento de la temperatura también incide de forma importante en la generación de ozono troposférico, ya que se incrementa la

presencia de los COV, los cuales se evaporan en mayor cantidad, por lo que en varios sitios se han incrementado el número de contingencias debidas al ozono en la temporada seca caliente; asimismo, las partículas también pueden aumentar por la intensa sequía y por el incremento en los incendios forestales.

1.10 ZONAS METROPOLITANAS Y LA MEGALÓPOLIS

Desde los años 80, cuando se puso atención a la contaminación del aire, se utilizaba el término de “zona metropolitana”, ya que se reconocía que las ciudades capitales del país se habían convertido en urbes o metrópolis rodeadas de pequeñas ciudades que funcionaban como “dormitorios” o “áreas industriales”. La Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU), el Consejo Nacional de Población (CONAPO) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) son, desde el 2000, el grupo responsable de realizar la delimitación de las zonas metropolitanas en México, zonas que se definen como:

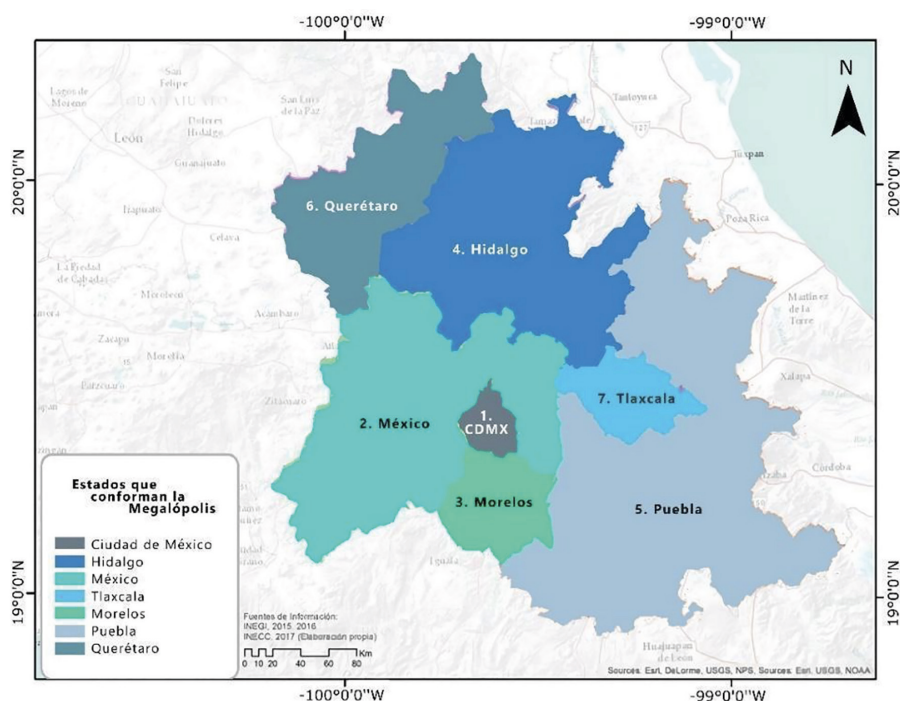
el conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 100 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan los límites del municipio, incorporando dentro de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica (SEDATU, CONAPO e INEGI, 2015, p. 35).

En 1992, la ZMVM, conformada por 16 delegaciones y 18 municipios conurbados del Estado de México, se clasificó como la segunda megaciudad más contaminada en el mundo, después de Tokio (World Health Organization *et al.*, 1992) y, para 1998, la ZMVM albergaba 18.1 millones de habitantes (Molina & Molina, 2002). Del 2014 al 2018, el número de zonas metropolitanas se incrementó de 59 a 74, siendo la más grande la ZMVM (Rosiles-Salas, 2019).

Para atender de manera integral los problemas ambientales de la región central del país, se creó la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) el 23 de agosto de 2013, para coordinar los problemas ambientales metropolitanos, planear, armonizar y reforzar las políticas y los programas ambientales en la región de la Megalópolis. Para fines de gestión ambiental, la Megalópolis quedó integrada por las delegaciones del Distrito Federal y los municipios de los estados de México, Hidalgo, Puebla, Morelos y Tlaxcala, y en 2017, se incorporó el estado de Querétaro (figura 1.5).

La Megalópolis integra 14 zonas metropolitanas con más de 35 millones de habitantes. La CAME toma decisiones ambientales y establece criterios para la integración y realización de programas, proyectos y acciones que contribuyan a controlar la contaminación ambiental, siendo imparcial y considerando siempre la evidencia científica.

Figura 1.5. *Mapa de la Megalópolis*



Fuente: SEMARNAT/INECC, *Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis 2017-2030*, (2017).

1.11 GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

La gestión de la calidad del aire en una localidad, ciudad, región o estado requiere, en primer lugar, contar con datos de monitoreo atmosférico de un largo período para conocer el estado de la contaminación en el sitio de estudio, su variación temporal y espacial en la zona, además de los patrones meteorológicos de velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad, ya que con ello es posible conocer

los patrones de transporte de los contaminantes. En segundo lugar, es necesario contar con un inventario de emisiones para determinar los emisores principales de los distintos contaminantes atmosféricos y sus volúmenes de descarga.

Monitoreo. Los sistemas de monitoreo de la calidad del aire en México han ido evolucionando con el paso del tiempo. En los años 80, inició el monitoreo en la Ciudad de México para comprender el fenómeno y comenzar a tomar acciones con la evaluación del cumplimiento de la normatividad, el monitoreo de la calidad del aire se convirtió en una acción fundamental en las ciudades con más de 500,000 habitantes y, desde el 2016, se cuenta con el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), que es un sistema informático que recaba y transmite los datos de las estaciones de monitoreo del país y proporciona de manera interactiva la información de la calidad del aire en tiempo real en los estados del país que cuentan con red de monitoreo atmosférico (figura 1.6).

Figura 1.6. Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA)



Fuente: imagen del 15 de mayo de 2024, a las 13:00 h. SINAICA 2024 [<https://sinaica.inecc.gob.mx/>].

Inventarios de emisión. Los inventarios de emisión son instrumentos fundamentales en la gestión de la calidad del aire. En ellos se compila la información sobre la cantidad de contaminantes, criterio que emite cada una de las fuentes presentes en la zona de estudio, que puede ser un país, una entidad, una región, una zona metropolitana o una ciudad. Sin ellos no es posible establecer un programa de gestión para mejorar la calidad del aire en un sitio.

En México, se actualizan periódicamente dos tipos de inventarios de emisión: el inventario de contaminantes criterio y el inventario de gases y compuestos de

efecto invernadero, aunque en algunos casos, como el de la ZMVM, se presentan de manera conjunta. Los inventarios de emisión de contaminantes criterio incluyen también las fuentes y volúmenes de emisión de los compuestos orgánicos volátiles, que son precursores de la formación de ozono en conjunto con el NO_2 .

Determinación de emisiones de fuentes fijas: las instalaciones industriales deben tener chimeneas con puertos de muestreo en las cuales se miden de forma directa las concentraciones de los contaminantes provenientes tanto de la quema de combustibles fósiles como de otros procesos industriales. Asimismo, para el cálculo de emisiones se utilizan factores de emisión de la base de datos del AP-42.

Determinación de las emisiones de fuentes de área: estas emisiones incluyen las emisiones domésticas, las de fuentes dispersas en la zona de estudio, los incendios forestales y la quema a cielo abierto, entre otras; suelen utilizarse factores de emisión específicos publicados en documentos como el AP-42 para su estimación. En el caso de los contaminantes climáticos, se utilizan las guías del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC).

Determinación de emisiones de las fuentes móviles: se utilizan los registros de automóviles y otros transportes que circulan en la zona y los factores de emisión, por marca y modelo, de bases de datos específicas de emisiones de vehículos a gasolina y a diésel que se actualizan cada año; como dato de actividad, se utilizan generalmente los kilómetros recorridos. En el caso de vehículos que usen gas natural o gas LP, se realizan los cálculos con los factores de emisión y datos de actividad. Debido al volumen de datos que se manejan para la estimación del inventario, se utilizan *softwares* especializados como el MOVES-México (*Motor Vehicle Emission Simulator*) a condiciones locales del sitio de estudio. MOVES-México es una versión del modelo MOVES2014a de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés).

Determinación de emisiones de fuentes naturales: se consideran emisiones de fuentes naturales las emisiones que provienen de la erosión eólica del suelo y rocas y las emisiones biogénicas de la vegetación y los procesos de desnitrificación del suelo (SEDEMA, 2023).

Para la utilización de factores de emisión en los distintos inventarios se han realizado adaptaciones teóricas y experimentales para su uso en distintas ciudades y regiones del país, en las que se toman en cuenta características específicas orográficas, como la altitud, y condiciones de temperatura, humedad y presión que influyen en los niveles de emisión. La altitud tiene una gran influencia en la eficiencia de combustión de los procesos industriales, residenciales y domésticos, así como de los motores de combustión de las máquinas y vehículos, porque a mayor altitud disminuyen la presión, la temperatura atmosférica y la densidad y, asimis-

mo, se altera la composición del aire y de las emisiones; a mayor altitud hay menor cantidad de oxígeno y se modifica la relación estequiométrica aire/combustible en los procesos de combustión, aumentando las emisiones de monóxido de carbono y de hidrocarburos o COV; por el contrario, las emisiones de NO₂ disminuyen al disminuir la temperatura y el oxígeno (Lapuerta *et al.*, 2006).

En las zonas de estudio que contempla este libro, las altitudes de la Zona Metropolitana del Valle de México y de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca son en promedio de 2240 msnm (metros sobre el nivel del mar) y de 2660 msnm, respectivamente; la ciudad de Toluca es la capital que se encuentra a mayor altitud del país. En cuanto a la Zona Metropolitana de Cuernavaca, esta se encuentra ubicada a una altitud promedio de 1510 metros sobre el nivel del mar.

1.12 PROGRAMAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE (PROAIRE)

ProAires para la ZMVM. Los esfuerzos en los años 90 para abatir la contaminación atmosférica en la ZMVM habían sido relativamente exitosos en la reducción del CO, el SO₂ y los NO₂; sin embargo, la norma de ozono de 0.11 ppm, en promedio horario y una exposición cada tres años, se excedió en 1991 en 353 días del año, y aunque en 1992 se redujo a 333 días, en ese año se alcanzaron las concentraciones más altas registradas hasta la fecha, con excedencias del triple de la norma (más de 300 puntos IMECA) en 11 días, y la norma de PST en esos mismos años se excedió en 61.5 y 46.9% de los días del año, respectivamente.

En el caso del CO, el SO₂ y el NO₂ las excedencias fueron esporádicas. Por ello, y con la finalidad de proteger la salud de la población que habitaba la zona metropolitana de la capital del país, se diseñó el primer Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la ZMVM 1995-2000 (SEMARNAT, 2003), para reducir de forma gradual las concentraciones de los contaminantes criterio y de los hidrocarburos, por ser estos últimos precursores de la formación de ozono.

El ProAire introdujo un nuevo marco de política pública, en el que el abatimiento de la contaminación fuera parte del proyecto de ciudad y su desarrollo metropolitano, con el compromiso compartido de los tres niveles de gobierno y de los distintos actores de la sociedad (Molina, 2000). En este programa se incluyó a todos los sectores de la sociedad para generar un conjunto de acciones e instrumentos integrados para alcanzar metas específicas, que fueron: industria limpia, vehículos limpios, nuevo orden urbano con transporte limpio y recuperación ecológica. A la fecha se han publicado tres ProAires más para la ZMVM.

ProAires en el país. Dos años después de la publicación del ProAire de la ZMVM 1995-2000, se publicaron los programas correspondientes a las ciudades de Monterrey, Guadalajara y el Valle de Toluca, posteriormente se formularon los ProAires de otras ciudades del país.

Para formular el ProAire de una ciudad, zona metropolitana, estado o país, se requiere:

- a) Análisis de la calidad del aire de la zona basados en los datos del monitoreo atmosférico, con el que se pueda formular un diagnóstico de la problemática de la contaminación.
- b) Inventario de emisiones.
- c) Análisis de la zona de estudio: condiciones geográficas y meteorológicas que influyen en la calidad del aire, así como una visión territorial e integral sobre la localización de fuentes, zonas residenciales, industriales, áreas protegidas, etcétera, que serán necesarias para implementar las acciones estratégicas.
- d) Estudio de salud en la zona: es la base para justificar muchas de las acciones propuestas, así como sus costos asociados en aras de disminuir los riesgos a la salud de la población.

Los ProAires desarrollados en las ciudades y entidades incluyen costos y plazos de cumplimiento de metas, acciones y actividades; los ejes o líneas estratégicas que los componen pueden diferir, pero se asientan los compromisos y las acciones de los distintos participantes. En los ProAires de zonas fronterizas han participado autoridades federales de la EPA y autoridades estatales y locales de los estados y condados fronterizos.

En varios de los ProAires recientes se incluyen acciones y medidas en las que existe el co-beneficio para mitigar el cambio climático y mejorar simultáneamente la calidad del aire, ejemplos de ello son la reducción de la quema de combustibles fósiles (que disminuye la emisión de contaminantes criterio y de CO₂) y el control de partículas con carbono negro (para reducir los niveles de partículas atmosféricas y el potencial de calentamiento por este CCVC).

A casi 30 años, desde que se publicó el primer ProAire, las autoridades ambientales federales, en conjunto con las correspondientes autoridades estatales y municipales, han formulado alrededor de 60 programas para mejorar la calidad del aire en las ciudades mexicanas. A inicios del 2024, hay 28 ProAires vigentes que benefician a una población de más de 104 millones (SEMARNAT, 2003). En 2017, la CAME presentó el primer Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire

en la Megalópolis 2017-2030, con una visión regional de la calidad del aire de las zonas metropolitanas que la integran y que puede analizar, en conjunto, todas las zonas naturales protegidas de la región para consolidar los corredores biológicos, además de desarrollar el Inventario de Emisiones de la Megalópolis.

La mayoría de las medidas y estrategias son comunes entre los distintos ProAires, porque las causas y fuentes son similares en las ciudades y porque se consideran las acciones exitosas realizadas en programas previos; sin embargo, cada ProAire tiene un sello particular por las condiciones geográficas de la zona de estudio, por las actividades productivas y, en general, por la dinámica particular de cada zona metropolitana o cada ciudad.

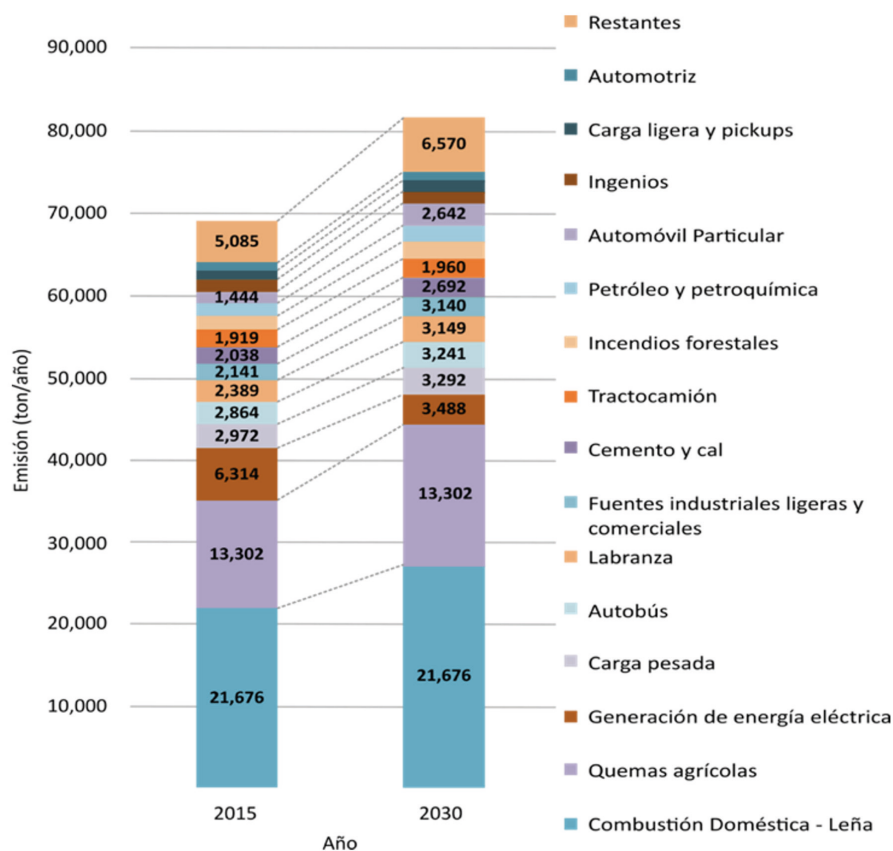
En el caso de las zonas metropolitanas de la Megalópolis, se ha identificado que, en general, se cumple la normatividad para el SO_2 , NO_2 y CO y que los problemas de contaminación son severos en cuanto a PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ en la ZMVM y ZMVT y, en menor grado, en la Zona Metropolitana de Puebla; mientras que el ozono presenta altas concentraciones en la ZMVM, ZMVT y comienza a ser frecuente en la Zona Metropolitana de Hidalgo y en la de Morelos. La figura 1.7 presenta una proyección de las emisiones de $\text{PM}_{2.5}$ al 2030 en la Megalópolis, donde se observa que las mayores emisiones de partículas finas se deben a la combustión doméstica y al uso de leña, así como a las quemas agrícolas que se incrementarán para el 2030 en toda la Megalópolis (SEMARNAT/INECC, 2017).

Todos los ProAires tienen líneas o ejes estratégicos para fuentes móviles, fuentes fijas, fuentes de área, energía y áreas naturales, además se incluyen actividades de gestión. Entre las medidas más comunes para las distintas zonas metropolitanas se tienen:

- Medidas para el transporte (particular, público y de carga) y la movilidad, como el fortalecimiento de programas de verificación vehicular, ampliación de ciclovías para movilidad sustentable, ampliación de sistemas de transporte masivos con mayor capacidad. Sin embargo, en su aplicación existen diferencias. Un ejemplo es el programa “Hoy No Circula” puesto en marcha por primera vez en 1989, que restringe la circulación de los autos particulares una vez a la semana de acuerdo con la terminación del número de placa vehicular. Este programa ha evolucionado relacionándose con la verificación vehicular y ha llegado a establecer planes extremos como el “No Circula de Fin de Semana” y el “Doble Hoy No Circula”, vigentes en la actualidad y en los que aun los vehículos que cuentan con los hologramas 0 y 00, relacionados con su baja emisión de contaminantes, también deben suspender su circulación según su matrícula. Este programa solamente se aplica en la ZMVM.

- Medidas de desarrollo para implementar planes de reducción de emisiones industriales.
- Medidas para reducir los COV, como fortalecer programas de control de vapores en estaciones de servicio, terminales de almacenamiento y el transporte de combustibles.
- Actualización de normas oficiales mexicanas para fuentes fijas y transportes: 085, 041, 045, y 047.
- Medidas de recuperación de suelos erosionados y ampliación de áreas verdes boscosas y urbanas, reforestación y protección de la biodiversidad.

Figura 1.7. Emisiones de $PM_{2.5}$ en las entidades de la Megalópolis proyectadas del 2015 al 2030



Fuente: SEMARNAT/INECC (2017).

La tabla 1.7 presenta el resumen del ProAire de la Megalópolis sobre las líneas estratégicas y medidas de los ProAires de las zonas metropolitanas que la conforman, donde se visualizan sus medidas más importantes.

Tabla 1.7. *Resumen de las líneas estratégicas y medidas de los ProAires de la Megalópolis*

Línea estratégica	Acciones	Temas comunes relevantes
Fuentes móviles: movilidad	100	• Fortalecimiento del transporte público • Expansión de la movilidad no motorizada • Gestión de la demanda de transporte • Mejoramiento de la logística de carga • Implementación de planes de movilidad integral • Mejoramiento de la red urbana • Semaforización inteligente • Reducción de la circulación de taxis vacíos
Fuentes móviles: verificación	35	• Modernización integral de la verificación vehicular • Fortalecimiento de la vigilancia a centros de verificación • Mejora de comunicación de resultados de verificación • Incorporación de motocicletas al programa de verificación • Armonización del programa de toda la Megalópolis
Fuentes fijas: autorregulación	30	• Implementación de un programa de certificación y auditoría estatal • Establecimiento de convenios de colaboración • Capacitación en prevención y control de la contaminación • Identificación y promoción de esquemas de financiamiento
*Fuentes fijas: General	29	• Conversión/retiro de la termoeléctrica convencional • Cambio a combustibles más limpios • Establecimiento de un plan de reducción de emisiones de la industria cementera y calera • Establecimiento de convenios de colaboración y coordinación con ingenios azucareros • Reconfiguración de la Refinería Miguel Hidalgo de Tula

Línea estratégica	Acciones	Temas comunes relevantes
Fuentes de área: cov	52	- Fortalecimiento del control de vapores en terminales de reparto y almacenamiento, autotankers y estaciones de gasolina y gas LP - Requerimiento de tecnologías de control de emisiones de cov - Fomento de mejores prácticas en el uso de disolventes orgánicos - Fomento del uso de productos de consumo doméstico base agua e incentivos a la disminución de contenido de disolventes orgánicos
Energético	50	- Promoción e incentivo del uso de energías y combustibles alternos - Mejoramiento de la calidad de los combustibles usados por vehículos automotores - Promoción del uso de estufas y calentadores de agua en hogares y establecimientos comerciales y de servicios
Áreas verdes y boscosas	51	- Fortalecimiento del programa de combate a incendios forestales - Implementación de programas de recuperación de suelos erosionados

Nota: *Las acciones son específicas para las industrias presentes en cada estado.

Fuente: elaboración propia con base en SEMARNAT/INECC (2017).

Se ha identificado que el tema más relevante en los ProAires de la Megalópolis es la reducción de emisiones vehiculares con la mejora del transporte público y la verificación vehicular. Para apreciar algunas diferencias y contrastes entre los programas, que dependen de las empresas establecidas en cada zona, así como en las distintas actividades y estrategias de gestión, se presentan de forma comparativa algunos ejemplos de medidas propuestas en los últimos ProAires de las tres zonas metropolitanas de la Megalópolis del proyecto PRONACES-CONAHCYT: las zonas metropolitanas del Valle de México, del Valle de Toluca y de Cuernavaca (ZMVM, ZMVT y ZMC). En la tabla 1.8 se pueden visualizar algunas de las diferencias entre las tres zonas en número de medidas (que se incluyeron en el ProAire de la Megalópolis), de acuerdo con la complejidad, las actividades y las prioridades de cada zona y que pueden realizarse a través de instrumentos normativos, económicos o a través de la comunicación de información.

Tabla 1.8. Número de medidas por ProAire y línea estratégica de las tres zonas metropolitanas

Fuentes	Estrategias y medidas propuestas/ProAires	ProAire ZMVM	ProAire ZMVT	ProAire ZMC
Móviles	Detección de vehículos	1	1	1
	Movilidad	14	3	1
	Renovación vehicular	3	1	
	Verificación vehicular	1	1	
	Cambio tecnológico del control de emisiones	3		
Fijas	Autorregulación	1		1
	Inspección y vigilancia		1	
	Fuentes fijas en general	4		1
Área	Bancos de materiales		1	
	Control de emisiones/cambios tecnológicos		1	
	Control de COV	3	1	
	Residuos	1	2	1
	Ladrilleras		1	
	Quemas/incendios		1	
	Fuentes de área en general	1		1
Gestión	Comunicación de indicadores de calidad del aire	1	1	1
	Normatividad	13		1
	Gestión territorial de cuencas atmosféricas	1	1	1
	Inspección y vigilancia	1		
Otros	Energéticos	8	2	
	Áreas verdes	6	3	
	Salud	5	2	1
	Educación ambiental	2	1	1
	Monitoreo e investigación	5	2	2

Fuente: SEMARNAT/INECC (2017).

REFLEXIONES FINALES

La contaminación atmosférica, además de ser el mayor problema de salud pública ambiental en el mundo, es responsable del incremento del efecto invernadero y del calentamiento global que ha ocasionado el cambio climático en el planeta, por lo que es necesaria la acción combinada de todos los sectores de la sociedad para enfrentarla; para ello se requiere que los participantes tengan al menos algunos conocimientos generales que les permitan una participación más activa.

Aunque para conocer el estado de la calidad del aire se eligieron seis contaminantes conocidos como “criterio”, los cuales están normados y se miden diariamente, es necesario, por una parte, considerar la medición frecuente y/o continua de otros contaminantes que ocasionan daños a la salud, como el benceno, y la de los contaminantes climáticos que contribuyen al calentamiento global, como el CO₂, el metano y el carbono negro. Estas mediciones permiten tener diagnósticos actualizados para diseñar y poner en práctica estrategias de control.

La urbanización se ha incrementado de tal manera que las emisiones de las ciudades establecidas en las distintas cuencas atmosféricas pueden exportarse a poblaciones relativamente cercanas, complicando cada vez más la gestión ambiental de la calidad del aire que requiere un estudio y una visión regional. Por ello, en el centro del país se creó la Megalópolis, en la que convergen 11 cuencas atmosféricas que incluyen varias zonas metropolitanas de 7 estados que, de acuerdo a las condiciones meteorológicas, influyen en el transporte de los contaminantes atmosféricos. Esto debe ser tomado en cuenta para determinar los impactos en la salud de la población.

El monitoreo continuo en ciudades con más de 500,000 habitantes y la generación de inventarios de emisiones han permitido que se formulen Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAires), considerando las condiciones climatológicas y las actividades que se desarrollan en cada ciudad, en los que se proponen estrategias y acciones para disminuir y/o controlar los niveles de emisión de los contaminantes criterio.

En el caso de los contaminantes climáticos, con la generación del Inventario Nacional de Compuestos de Efecto Invernadero (en el 2004) y la de los Inventarios locales se han cuantificado las emisiones e identificado las fuentes responsables para proponer distintos escenarios de reducción a futuro y, con ello, cumplir con los compromisos internacionales pactados por México en sus Comunicaciones Nacionales y en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas, presentadas por primera vez en el Acuerdo de París.

Muchas de las medidas para controlar y mejorar la calidad del aire son comunes en las zonas metropolitanas de la Megalópolis, sin embargo, tal y como se observa en el caso de las tres zonas metropolitanas de estudio, cada zona metropolitana o ciudad requiere la formulación de medidas específicas dependiendo de sus actividades y características geográficas y de desarrollo.

REFERENCIAS

- Abbasi, T., Poornima, P., Kannadasan, T., y Abbasi, S. A. (2013). Acid rain: past, present, and future. *International Journal of Environmental Engineering*, 5(3), 229-272.
- Bachmann, J. (2007). Will the circle be unbroken: a history of the US National Ambient Air Quality Standards. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57(6), 652-697.
- Bolaños Morera, P., y Chacón Araya, C. (2017). Intoxicación por monóxido de carbono. *Medicina Legal de Costa Rica*, 34(1), 137-146.
- Carter, W. P. (2009). Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications. *California Air Resources Board Contract*, 339.
- Csavina, J., Field, J., Taylor, M. P., Gao, S., Landázuri, A., Betterton, E. A., y Sáez, A. E. (2012). A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of the Total Environment*, 433, 58-73.
- Emberson, L. (2020). Effects of ozone on agriculture, forests and grasslands. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 378(2183), 20190327.
- Gao, H., Wang, K., Au, W. W., Zhao, W., y Xia, Z. L. (2020). A systematic review and meta-analysis of short-term ambient ozone exposure and COPD hospitalizations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(6), 2130.
- García, R.; Silva Gómez S.; Andraca, G.; Torres Jardón, R.; García Reynoso, A.; Cerón, J.G.; Cerón, R.M. y Mugica Alvarez, V. (2022). Measurement of Indoor-Outdoor Carbonyls in Three Different Universities Located in the Metropolitan Zone of Mexico Valley during the First Period of Confinements Due to COVID-19. *Atmosphere*, 13(10), 1560.
- Gobierno de la República. (2015). *Intended Nationally Determined Contribution*. México
- Gobierno del Estado de México (2019, 28 de mayo). *Acuerdo por el que se establece el programa para prevenir y responder a contingencias ambientales atmosféricas en los 59 municipios del Estado de México que se localizan dentro la Zona Metropolitana del Valle de México*.

- IARC. (2012). A review of human carcinogens. WHO Press. Lyon, France.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2018). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- Iritri, M., y Faoro, F. (2009). Chitosan as a MAMP, searching for a PRR. *Plant, Signal. Behav.* 4, 66-68.
- Kaiho, K. (2023). An animal crisis caused by pollution, deforestation, and warming in the late 21st century and exacerbation by nuclear war. *Heliyon*, 9(4).
- Kim, S. Y., Kim, E., y Kim, W. J. (2020). Health effects of ozone on respiratory diseases. *Tuberculosis and Respiratory Diseases*, 83, S6-S11.
- Lacerda, D., Pestana, I. A., dos Santos Vergilio, C., y de Rezende, C. E. (2023). Global decrease in blood lead concentrations due to the removal of leaded gasoline. *Chemosphere*, 324, 138207.
- Lahey, P. S. J., Berkemeier, T., Tong, H., Arangio, A. M., Lucas, K., Pöschl, U., y Shiraiwa, M. (2016). Chemical exposure-response relationship between air pollutants and reactive oxygen species in the human respiratory tract. *Scientific Reports*, 6.
- Lapuerta, M., Armas, O., Agudelo, J. R., y Sánchez, C. A. (2006). Estudio del efecto de la altitud sobre el comportamiento de motores de combustión interna. Parte 1: Funcionamiento. *Información tecnológica*, 17(5), 21-30.
- Liang, C. (2020). Plant response to acid rain stress. *A handbook of environmental toxicology-Human disorders and ecotoxicology*. CAB International.
- Loomis, D., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., ... y Straif, K. (2013). The carcinogenicity of outdoor air pollution. *The lancet oncology*, 14(13), 1262-1263.
- Mainka, A., y Žak, M. (2022). Synergistic or antagonistic health effects of long-and short-term exposure to ambient NO₂ and PM_{2.5}: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21).
- Molina, M., (2000). Proyecto para el diseño de una estrategia integral de gestión de la calidad del aire en el Valle de México 2001-2010. *Gaceta Ecológica*, (57), 28-37.
- Molina, L.T. y Molina, M.J. (2002). *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*. Kluwer Academic Publishers.
- Mugica-Álvarez, V. y Figueroa Lara, J. (1994). *Contaminación Atmosférica*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Mugica-Álvarez, V. (2019) Ozono atmosférico: Héroe y villano ambiental. *Boletín de la Sociedad Química de México*, 19-21.

- Mugica-Álvarez, V., Ortiz, E., Molina, L., De Vizcaya-Ruiz, A., Nebot, A., Quintana, R., Aguilar, J. y Alcántara, E. (2009). PM composition and source reconciliation in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 43(32), 5068-5074. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.051>
- Naciones Unidas. (2018). *Informe sobre los Objetivos del Desarrollo Sostenible 2018*. UN Nueva York, 2018. https://agenda2030.mx/docs/doctos/SDG_Report2018_es.pdf
- Oliu, G., Nogué, S., y Miró, Ò. (2010). Intoxicación por monóxido de carbono: claves fisiopatológicas para un buen tratamiento. *Emergencias*, 22(6), 451-59.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire. OMS. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf>
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2019). *Calidad del Aire en Las Américas*. OPS. <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>.
- Pan, X. (2019). Sulfur oxides: Sources, exposures and health effects. En J. Nriagu (Ed.), *Encyclopedia of Environmental Health* (2.^a ed., pp. 290-296). Elsevier.
- Piantadosi, C. A. (2002). Carbon monoxide poisoning. *New England Journal of Medicine*, 347(14), 1054-1055.
- Pyatt, D. W., Hays, S. M., English, C., & Cushing, C. A. (2012). United States Voluntary Children's Chemical Evaluation Program (VCCEP) risk assessment for children exposed to benzene. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 22(2), 81-104.
- Rogers, P. G. (1990). The clean air act of 1970. *EPA J.*, 16, 21.
- Romanello, M., Di Napoli, C., Drummond, P., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., ... & Costello, A. (2022). The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: health at the mercy of fossil fuels. *The Lancet*, 400(10363), 1619-1654.
- Rosiles-Salas, J. (2019). Las 74 zonas metropolitanas de México: hacia una clasificación político-electoral. *Espacios Públicos*, 22(55), 103-123.
- Schraufnagel, D.E., Balmes, J.R., Cowl, C.T., De Matteis, S., Jung, S., Mortimer, K., Perez-Padilla, R., Rice, M.B., Riojas-Rodríguez, H., Sood, A., Thurston, G.D., To, T., Vanker, A., y Wuebbles, D.J. (2019). Air Pollution and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 1: The Damaging Effects of Air Pollution. *Chest*, 155 2, 409-416.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), Consejo Nacional de Población (CONAPO), & Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*. Secretaría de Gobernación (SEGOB). <http://www.gob.mx/conapo/documentos/delimitacion-de-las-zonas-metropolitanas-de-mexico-2015>

- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2023). 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.
- Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México (SMAGEM) (2022, 18 de febrero). *Acuerdo por el que se establece el programa para la atención de contingencias ambientales atmosféricas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y en la Zona Metropolitana de Santiago Tlanguistengo*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2003). ProAire 2002-2010. Programa para mejorar la calidad del aire en la ZMVM.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2017). Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis 2017-2030. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa_de_Gesti%C3%B3n_Federal_2017-2030_final.pdf
- SINAVE/DGE/SALUD. (2023). *Panorama epidemiológico y estadístico de la mortalidad por causas sujetas a vigilancia epidemiológica en México 2021*. Dirección General de Epidemiología. <https://www.gob.mx/salud/documentos/panorama-epidemiologico-y-estadistico-de-la-mortalidad-por-causas-sujetas-a-vigilancia-epidemiologica-en-mexico-2021>
- US-ASTDR. (2020). *Toxicological profile for lead*. U.S. Department of Health and Human Services. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp13.pdf>.
- Viegi, G., Maio, S., Fasola, S., & Baldacci, S. (2020). Global burden of chronic respiratory diseases. *Journal of aerosol medicine and pulmonary drug delivery*, 33(4), 171-177. <https://doi.org/10.1089/jamp.2019.1576>
- World Health Organization (WHO). (1987). *Air quality guidelines for Europe*. WHO. Regional Office for Europe.
- World Health Organization (WHO). (2020). *Action is needed on chemicals of major public health concern*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- World Health Organization, Prevention of Environmental Pollution Unit, United Nations Environment Programme, & Global Environment Monitoring System. (1992). *Urban air pollution monitoring: Report of a meeting of UNEP/WHO Government-Designated Experts, Geneva, 5–8 November 1991*. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/58952>

Zhi, M., Zhang, X., Zhang, K., Ussher, S. J., Lv, W., Li, J., ... y Meng, F. (2021). The characteristics of atmospheric particles and metal elements during winter in Beijing: Size distribution, source analysis, and environmental risk assessment. *Ecotoxicology and environmental safety*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111937>