

Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis

Resumen Ejecutivo



Molina Center for
Energy and the Environment

Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis

Resumen Ejecutivo

Luisa T. Molina, Armando Retama y Miguel Zavala

Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment (MCE2)

Preparado para la

Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME)

Boston, Massachusetts

Mayo de 2023

Fotografía de la portada: A. Retama.

Citar como:

Molina, L. T., Retama, A., Zavala, M. (2023). Diagnóstico sobre el Conocimiento Actual de las Bases Científicas para la Gestión de la Calidad del Aire en la Región de la Megalópolis. Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment. Boston, MA, mayo de 2023.

AGRADECIMIENTOS

El presente documento “Diagnóstico sobre el Conocimiento Actual de las Bases Científicas de la Gestión de la Calidad del Aire en la Región de la Megalópolis” fue elaborado por el Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment (MCE2). El equipo agradece a la Coordinación Ejecutiva de la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) por su apoyo y colaboración, al igual que a Erik Velasco, Álvaro Osornio y Benjamín de Foy por su revisión y discusión.

El documento se basa en la revisión de las presentaciones y discusiones del taller virtual "Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis" que se realizó los días 21 y 22 de abril de 2022, así como la revisión de artículos de literatura publicados e informes técnicos relevantes disponibles.

El taller virtual fue organizado conjuntamente por el MCE2 y la CAME, con la colaboración de la SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México), la SMAGEM (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México), la SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), el INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), el ICAYCC-UNAM (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México). A continuación se enumera una lista completa de las personas que participaron en el taller.

Comité Organizador: Alejandro Villegas López, Daniel López Vicuña, Hugo Landa Fonseca, Jorge Zavala Hidalgo, Gloria Julissa Calva Cruz, Luis Gerardo Ruiz, Luisa Tan Molina, Olivia Rivera Hernández, Ramiro Barrios Castrejón, Sergio Zirath Hernández, Víctor Hugo Páramo Figueroa.

Moderadores: Alejandro Villegas López, Armando Retama, Daniel López Vicuña, Erik Velasco, Gloria Julissa Calva Cruz, Horacio Riojas Rodríguez, Hugo Landa Fonseca, Jorge Zavala Hidalgo, José Agustín García Reynoso, Luisa Tan Molina, Michel Grutter de la Mora, Miguel Zavala, Omar Amador Muñoz, Ramiro Barrios Castrejón, Víctor Hugo Páramo Figueroa,

Panelistas: Adalberto Noyola Robles, Adriana Ipiña, Alberto Mendoza Domínguez, Alejandra Méndez Girón, Alejandro Déciga Alcaráz, Alvaro Lomelí Covarrubias, Andrea Burgos Cuevas, Andrea de Vizcaya Ruíz, Angélica Guadarrama Chávez, Armando Retama, Beatriz Herrera Gutierrez, Beatriz Manrique Guevara, Benjamin de Foy, Bernhard Rappenglück, Claudia Inés Rivera Cárdenas, Daniel López Vicuña, Dara Salcedo González, Dzoara Damaris Tejeda Honstein, Erik Velasco, Erika Danaé López Espinoza, Francisco Hernandez Ortega, Graciela Velasco Herrera, Gustavo Enrique Sosa Iglesias, Hugo Landa Fonseca, Iván Yasmani Hernández Paniagua,

Jorge Luis García Franco, Jorge Zavala Hidalgo, José Abraham Ortíz Álvarez, José Agustín García Reynoso, José Luis Galindo Cortéz, José Luis Guevara Muñoz, José Luis Texcalac Sangrador, Karen Elizabeth Nava Castro, Karla Cervantes Martínez, Kate Bloomberg, Laura Noemí Muñoz Benitez, Leonora Rojas Bracho, Leticia Hernandez Cadena, Luis Gerardo Ruiz Suárez, Magali Hurtado Díaz, Manuel Suárez Lastra, Marco Antonio del Prete Tercero, Marco Mora, María del Carmen Calderón Ezquerro, María Eugenia Ibararán Viniegra, Mauro Alvarado Castillo, Michel Grutter de la Mora, Miguel Zavala, Mónica del Carmen Jaimes Palomera, Octavio A. Castelán-Ortega, Olivia Rivera Hernández, Omar Amador Muñoz, Oscar Peralta Gutiérrez, Patricia Camacho Rodríguez, Ramiro Barrios Castrejón, Ricardo Torres Jardón, Rodolfo Iniestra Gómez, Rodolfo Sosa Echeverría, Salvador Blanco Jiménez, Salvador Medina Ramírez, Sergio Israel Mendoza, Sergio Zirath Hernández Villaseñor, Stephan Brodziak de los Reyes, Stephanie Montero Bending, Verónica Garibay, Víctor Almanza Veloz, Victor Torres Meza, Violeta Mugica Álvarez, Zuhelen Verónica Padilla Barrera.

Soporte logístico: Ana Lilia Ubaldo Moreno, Eduardo Alberto Durán Rodríguez, Elizabeth Méndez Márquez, Israel Hupio Montesinos, Jennifer Sandra García Escalante, Julia Jiménez Bejarano, Mónica Palomero Rivero, Ricardo Daniel Ramírez Pérez, Valeria Navarro Pérez de León, Yeni Solís Reyes.

RESUMEN EJECUTIVO

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Con más de veintiún millones de habitantes, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es una de las megaciudades más grandes del mundo y el área metropolitana más poblada de América del Norte. La Ciudad de México y su área metropolitana han experimentado una transformación masiva en la urbanización y la demografía a lo largo de su historia. La población pasó de menos de tres millones de habitantes en 1950 a más de dieciocho millones en el año 2000, lo que corresponde a un incremento aproximado de seis veces en cincuenta años. La extensión urbana continua pasó en el mismo periodo de 690 km² a ~1500 km², extendiendo la zona urbana más allá de los límites del Distrito Federal (ahora Ciudad de México) hacia el Estado de México, así como a algunas partes del Estado de Hidalgo, integrando lo que ahora se conoce como la ZMVM. La tasa de crecimiento de la población de la Ciudad de México se mantiene estable desde el año 2000, mientras que la población urbana del Estado de México continúa aumentando, debido a la agregación de más municipios del Estado de México a la ZMVM. Actualmente, la zona metropolitana cuenta con más de 21.7 millones de habitantes, de los cuales 9.0 millones viven en la Ciudad de México y 12.6 millones en 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo. Las áreas metropolitanas vecinas (Puebla, Tlaxcala, Cuernavaca, Pachuca y Toluca) también muestran un rápido crecimiento demográfico. Esta expansión múltiple ha integrado un complejo urbano contiguo conocido como la "Megalópolis" de México la cual incluye a la Ciudad de México y los municipios de cinco estados contiguos México, Puebla, Tlaxcala, Morelos e Hidalgo, con una población estimada de aproximadamente treinta y cinco millones en las áreas urbanizadas. Para propósitos de gestión ambiental el estado de Querétaro se considera también como parte de esta Megalópolis. La Figura 1 muestra un mapa de la Megalópolis.

La combinación del rápido crecimiento de la población, la expansión urbana descontrolada, el aumento del consumo de energía y la motorización, así como una cuenca a gran altitud rodeada de montañas y la intensa radiación solar, provocaron graves problemas de contaminación del aire en la zona metropolitana de la Ciudad de México en la década de 1980. En respuesta a la creciente preocupación pública sobre la mala calidad del aire, el gobierno mexicano anunció acciones de reducción de emisiones, fortaleció el marco legal que definía las responsabilidades a nivel federal, estatal y local, y estableció varias agencias administrativas para abordar los problemas ambientales, incluida la Comisión Ambiental Metropolitana (CAM) en 1996 para coordinar los diversos niveles de gobierno que se ocupaban de los problemas ambientales metropolitanos. Posteriormente, la CAM fue reemplazada en 2013 por la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) para atender los problemas ambientales en la Megalópolis.

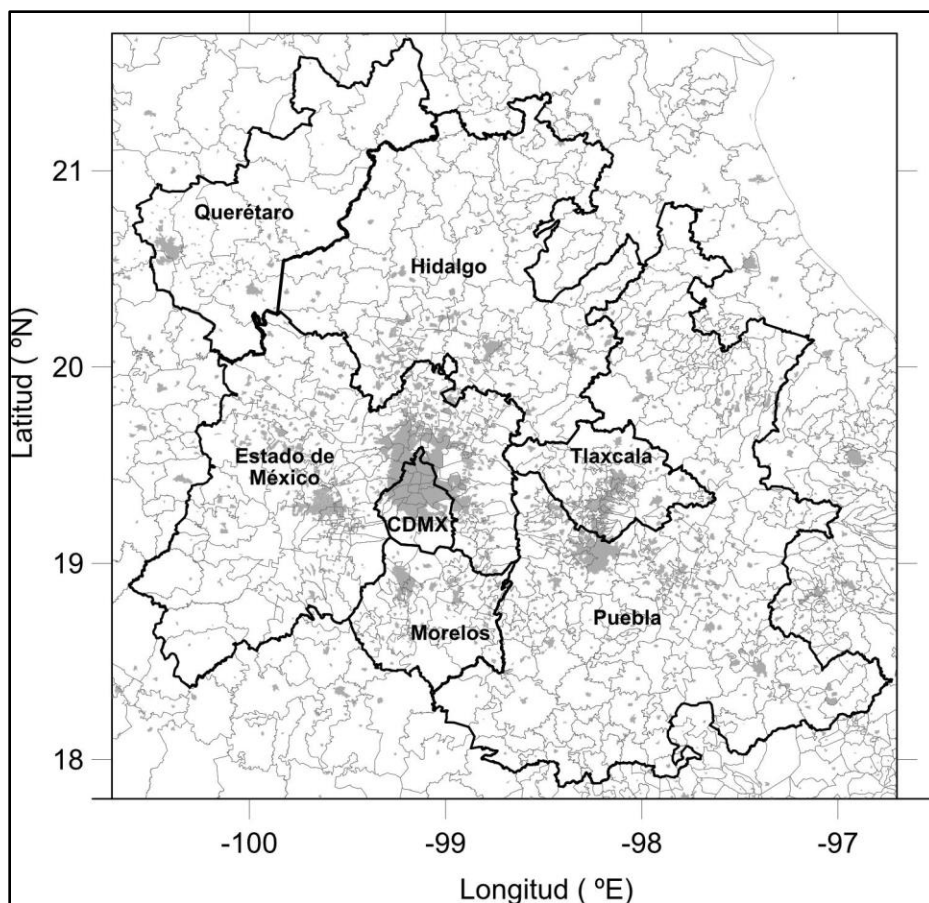


Figura 1. Mapa de la Megalópolis, los límites estatales se indican con una línea negra gruesa, mientras que los municipales con líneas más delgadas, las áreas urbanizadas se destacan con un sombreado gris.

A partir de la década de 1980 se buscó establecer programas integrales de gestión de la calidad del aire basados en consideraciones científicas, técnicas, sociales y políticas; la ZMVM logró reducir drásticamente los contaminantes del aire y mejorar la salud pública. A principios de este siglo, las concentraciones atmosféricas de plomo (Pb), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂) se redujeron drásticamente hasta alcanzar niveles por debajo de los valores límite establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de calidad del aire. Las concentraciones de ozono (O₃), PM₁₀ (partículas suspendidas con diámetros de 10 micrómetros y menores) y PM_{2.5} (partículas suspendidas con diámetros de 2.5 micrómetros y menores) también disminuyeron, pero aún se encuentran en niveles superiores a los de las respectivas NOM.

Los sistemas de vigilancia de la calidad del aire de las entidades que rodean a la Ciudad de México reportan concentraciones de O₃, PM₁₀ y PM_{2.5} que superan con frecuencia los valores límite de las NOM. Las concentraciones promedio de algunos centros urbanos igualan o superan las observadas en la Ciudad de México, exhibiendo la escala regional del deterioro de la calidad del aire. En los informes anuales de calidad del aire del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) se puede encontrar información detallada sobre la situación de la calidad del aire en las entidades de la Megalópolis. Las Figuras 2 a 4 muestran la comparación entre las concentraciones máximas reportadas por las diferentes redes de monitoreo de la región CAME en 2020 y los valores límite de las NOM para O₃, PM₁₀ y PM_{2.5}, respectivamente.

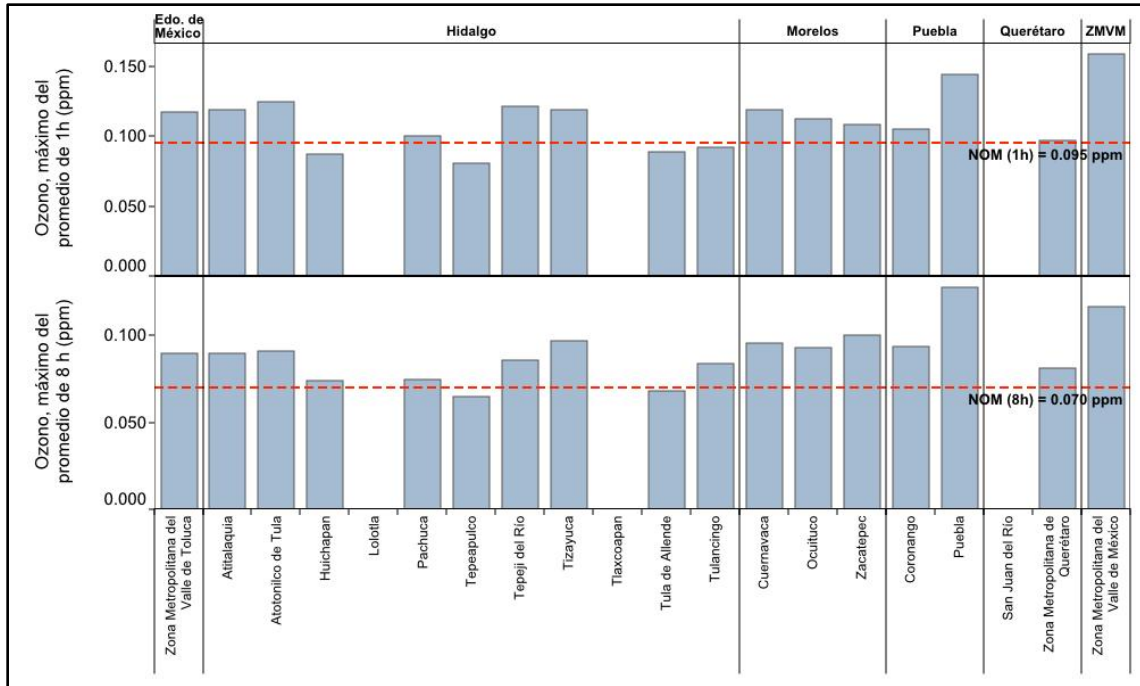


Figura 2. Comparación de las concentraciones máximas de O_3 para el promedio de 1 hora (superior) y de 8 horas (inferior) reportadas por las diferentes redes de monitoreo en la región de la Megalópolis durante 2020. Los valores límite de la NOM-020-SSA1-2021 se indican con la línea roja discontinua (Fuente: elaborada con los datos del INECC empleados en el Informe Nacional de Calidad del Aire 2020).

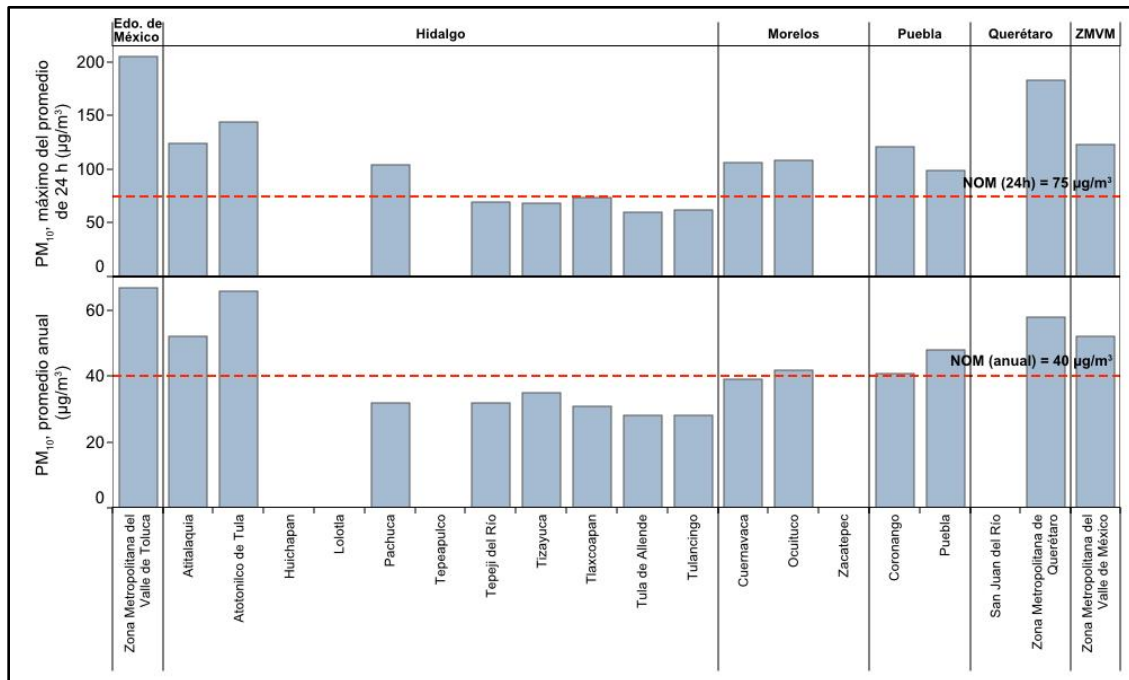


Figura 3. Comparación de las concentraciones máximas de PM_{10} para el promedio de 24 horas (superior) y anual (inferior) reportadas por las diferentes redes de monitoreo en la región de la Megalópolis durante 2020. Los valores límite de la NOM-025-SSA1-2021 se indican con la línea roja discontinua (Fuente: elaborada con los datos del INECC empleados en el Informe Nacional de Calidad del Aire 2020).

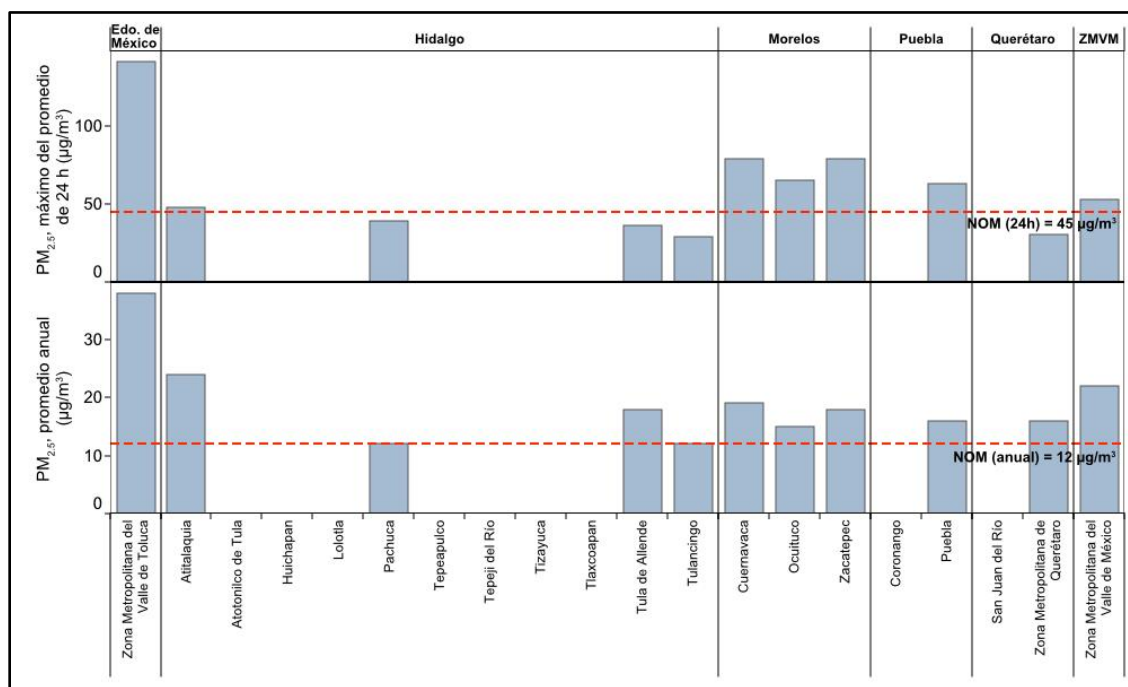


Figura 4. Comparación de las concentraciones máximas de PM_{2.5} para el promedio de 24 horas (superior) y anual (inferior) reportadas por las diferentes redes de monitoreo en la región de la Megalópolis durante 2020. Los valores límite de la NOM-025-SSA1-2021 se indican con la línea roja discontinua (Fuente: elaborada con los datos del INECC empleados en el Informe Nacional de Calidad del Aire 2020).

En los últimos años, se han registrado episodios con altas concentraciones de O₃ y PM_{2.5} en la ZMVM y en otras entidades de la Megalópolis, asociados a eventos meteorológicos desfavorables para la dispersión de la contaminación. Además, los incendios forestales regionales intensificados durante los períodos de sequías cada vez más frecuentes e intensas han inducido episodios severos de contaminación por partículas. Las medidas de confinamiento promulgadas en respuesta a la pandemia de COVID-19 demostraron que, incluso las reducciones drásticas en las actividades económicas y el tráfico vehicular tienen impactos relativamente menores en la disminución de los niveles de O₃ en la Megalópolis. Esta experiencia tiene profundas implicaciones para la gestión de la calidad del aire, ya que las políticas básicas de control tienen como objetivo reducir las emisiones del tráfico y la industria para proteger la salud pública y el medio ambiente.

A fin de guiar el diseño de nuevas políticas de mejora de la calidad del aire en la región de la Megalópolis, se requiere de información científica actualizada y generada localmente sobre los cambios en los perfiles de emisión resultantes de las nuevas medidas regulatorias y las mejoras tecnológicas, los cambios en la climatología urbana provocados por la creciente urbanización y las alteraciones en los procesos físicos y químicos atmosféricos bajo un clima cambiante.

Para lograr este objetivo, el Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment (MCE2) elaboró el presente documento. El texto incluye un diagnóstico del conocimiento técnico y científico actual sobre las fuentes emergentes de emisiones, el monitoreo y las mediciones de la calidad del aire en la Megalópolis, los cambios en la química atmosférica a lo largo de los años,

los impactos de los contaminantes en la salud pública y el cambio climático, y los impactos de la pandemia de COVID-19 en la calidad del aire.

El documento se basa en los resultados de la revisión y análisis de artículos científicos publicados recientemente y de informes técnicos relevantes, además integra los hallazgos clave del “Taller virtual: Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis” (en adelante, “el Taller virtual”), que se realizó los días 21 y 22 de abril de 2022.

El Taller virtual fue organizado conjuntamente por el MCE2 y la Coordinación Ejecutiva de la CAME, con la colaboración de la SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México), la SMAGEM (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México), la SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), el INECC, y el ICAYCC-UNAM (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México).

El objetivo del Taller virtual fue identificar los avances recientes y las brechas en el conocimiento científico y técnico sobre la calidad del aire, y los desafíos que enfrentan los tomadores de decisiones en la implementación de políticas en esta materia. Los participantes del Taller virtual fueron especialistas en temas de contaminación atmosférica que participan en instancias académicas, gubernamentales y organizaciones de la sociedad civil, que presentaron y debatieron los resultados de sus estudios científicos y técnicos, así como autoridades de los organismos federales y locales, que compartieron sus conocimientos y las barreras en la aplicación de las políticas de mejora de la calidad del aire. La agenda, la lista de panelistas y el resumen de las presentaciones y discusiones se incluyen como apéndice en este documento.

1.2. El papel de la ciencia en la gestión de la calidad del aire

La investigación científica ha desempeñado un papel importante para ayudar a las autoridades ambientales de la ZMVM a caracterizar las fuentes de emisión de especies contaminantes, su transporte y transformación en la atmósfera, sus efectos sobre la salud humana y en el medio ambiente, y la identificación de estrategias eficaces de reducción de emisiones.

Como se muestra en la Figura 5, la gestión de calidad del aire es un proceso iterativo y dinámico que se puede representar como un ciclo de elementos interrelacionados. Por lo general, el proceso inicia con una institución gubernamental que establece objetivos, metas y estándares de calidad del aire, y fija concentraciones umbral para contaminantes clave que protegerán la salud pública y el medio ambiente. Los administradores de la calidad del aire, mediante la aplicación de diversas herramientas de evaluación entre los que se incluyen los inventarios de emisiones, el monitoreo de la calidad del aire y la modelación, deberán estimar las reducciones de emisiones necesarias para cumplir con los estándares y objetivos. Durante el desarrollo de las estrategias de control, los administradores de la calidad del aire deben incluir el presupuesto requerido, los mecanismos de implementación, las agencias responsables de las acciones, y un cronograma con los planes de cumplimiento e implementación. Para alcanzar las metas de reducción requeridas, deben implementar los programas propuestos, hacer cumplir las reglas y regulaciones, mantener una

evaluación continua de la efectividad de las estrategias y medir el progreso hacia el cumplimiento de los objetivos de calidad del aire. Un elemento clave en este proceso es la contribución de la ciencia y la tecnología en todo el ciclo a través del monitoreo, análisis, investigación y desarrollo, para proporcionar a los administradores de calidad del aire los conocimientos fundamentales para tomar decisiones informadas.



Figura 5. El proceso de la gestión de la calidad del aire (Adaptado de NRC, 2004 y Bachman, 2007).

Estudios científicos como la evaluación integral de la calidad del aire en la Ciudad de México realizado en 2000 (Programa Estratégico de Gestión Integral de la Calidad del Aire en el Valle de México para el período 2001-2010), y las campañas intensivas de mediciones de campo, MARI (*Mexico City Air Quality Research Initiative*) en 1994, IMADA-AVER (Investigación sobre Materia Particulada y Deterioro Atmosférico-Aerosol and Visibility Research) en 1997, las campañas MCMA-2002 y MCMA-2003, y MILAGRO (*Megacity Initiative: Local and Global Research Observations*) en 2006, proporcionaron información exhaustiva sobre las emisiones, el

transporte y la transformación de contaminantes en la atmósfera suprayacente de la ZMVM, así como de sus impactos a escala regional. Sus resultados mejoraron significativamente la comprensión de los procesos meteorológicos y fotoquímicos que contribuyen a la formación de O₃, aerosoles secundarios y otros contaminantes. Los hallazgos científicos clave y las implicaciones políticas se incorporaron en el diseño de los programas integrales de mejora de la calidad del aire previos. Salvo algunos estudios especiales realizados por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), el INECC, el MCE2, universidades e investigadores independientes, desde la campaña MILAGRO se han realizado relativamente pocos estudios de campo en la ZMVM y en otras regiones de la Megalópolis.

Este documento describe la comprensión científica actual de la calidad del aire y de la gestión en la ZMVM y otras regiones de la Megalópolis. El Capítulo 2 proporciona una descripción detallada del estado actual del conocimiento sobre el monitoreo de la calidad del aire, mientras que la caracterización de las emisiones, la investigación científica atmosférica y los estudios de impacto en la salud se presentan en los Capítulos 3, 4 y 5, respectivamente. El Capítulo 6 describe algunos de los principales programas de gestión de la calidad implementados en la ZMVM y la región de Megalópolis. El documento concluye resumiendo los desafíos y lecciones aprendidas en la implementación de políticas de control de emisiones en la región de la Megalópolis (Capítulo 7), con base en la información más reciente disponible.

2. HALLAZGOS CLAVE

2.1. Monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis

Las entidades que integran la Megalópolis cuentan con sistemas de monitoreo de la calidad del aire equipados con instrumentos para la medición continua de los contaminantes criterio. Entre ellos se encuentra el SIMAT, que concentra la mayor infraestructura y capacidad técnica con una cobertura espacial adecuada para la Ciudad de México y parte del área conurbada, y está diseñado para servir a diversos objetivos de monitoreo. La calidad de los datos que genera cumple con estándares técnicos para atender las necesidades de gestión ambiental, así como para la investigación científica. El resto de las entidades de la Megalópolis cuenta con sistemas de monitoreo, la mayoría de sus estaciones de monitoreo están ubicadas en las ciudades capitales y algunos asentamientos urbanos principales. Gran parte del territorio de las entidades y las extensiones interurbanas no dispone de datos sobre la calidad del aire. En la mayoría de los casos, la operación está bajo la responsabilidad de las autoridades estatales y se cuenta con poca participación de las autoridades municipales.

La experiencia muestra que existe una correlación entre la edad y la complejidad de los sistemas de monitoreo, donde los sistemas más antiguos tienen un mayor número de estaciones, más y mejores equipos, y personal experimentado, como es el caso de los sistemas en las áreas metropolitanas de Toluca y Puebla. Los sistemas más recientes, como los existentes en Morelos y Tlaxcala, aún están en proceso de consolidación. También existe una relación entre la calidad de los datos, el nivel de madurez y las capacidades de la red. Desafortunadamente, a excepción de los datos generados por el SIMAT, existen dudas sobre la calidad de los datos que generan los otros sistemas, lo que pone en cuestionamiento su propósito. La falta de un presupuesto adecuado para

las actividades de operación y mantenimiento, las limitaciones en la renovación de equipos, la falta de personal capacitado, y la disparidad en la calidad de los datos son aspectos importantes que requieren atención inmediata. En los últimos años, la CAME promovió la adquisición de nueva instrumentación para el refuerzo de las redes locales. En materia de monitoreo de la calidad del aire, el INECC cuenta con la infraestructura y conocimiento para realizar capacitación, auditorías técnicas y la transferencia de estándares, además de realizar proyectos de investigación en varios tópicos ambientales. La experiencia y capacidad del INECC podría ser utilizada para subsanar las limitaciones identificadas.

La difusión de los datos sobre el estado de la calidad del aire se realiza a través de los medios de comunicación oficiales como los sitios web de las autoridades ambientales locales, el Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA), aplicaciones móviles y, en algunos casos, mediante las redes sociales. El uso del Índice Aire y Salud integra los reportes de las diferentes entidades, sin embargo, es imprescindible avanzar en la armonización de los criterios de revisión y validación de los datos, así como su publicación oportuna.

2.2. Inventario de emisiones

Desde principios de la década de 1990, la SEDEMA publica cada dos años el Inventario de Emisiones para la Zona Metropolitana del Valle de México (IE-ZMVM), el cual abarca cuatro categorías generales: fuentes puntuales (industria), fuentes de área (servicios y residenciales), fuentes móviles (transporte) y fuentes naturales (vegetación y suelo). La versión más reciente del IE-ZMVM está disponible para el año base 2018 (el inventario de emisiones 2020 se encuentra en elaboración y será publicado durante el segundo semestre de 2023), que también incluye emisiones de contaminantes tóxicos, carbono negro (CN), y los gases de efecto invernadero (GEI), así como la variabilidad diurna y espacial de las emisiones. Las estimaciones de este inventario se utilizaron para diseñar las estrategias de reducción de emisiones y la priorización de las medidas y acciones del ProAire 2021-2030.

A nivel federal, la Dirección General de Industria, Energías Limpias y Gestión de la Calidad del Aire (DGIELGCA) de la SEMARNAT es responsable de elaborar el Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM), cuya versión más reciente es del año 2016. En la elaboración del INEM, colabora con otras dependencias adscritas al Gobierno Federal y las autoridades ambientales de los estados y municipios, así como con organizaciones académicas y no gubernamentales. Actualmente, la DGIELGCA colabora con la CAME en la elaboración del inventario de fuentes móviles carreteras para la Megalópolis, año base 2018, que incluye la actualización del modelo MOVES-México y la incorporación de las motocicletas; también participan en el inventario de emisiones regional que armoniza los contaminantes criterio por tipo de fuente. Es importante que la experiencia adquirida en la elaboración del inventario de emisiones se transfiera al personal técnico de las entidades. A nivel de la Megalópolis, se identificó la necesidad de contar con factores de emisión actualizados para el parque vehicular que circula en la región, además de aumentar la resolución espacial del inventario de emisiones e incluir fuentes emergentes de contaminación. Actualmente, sólo la ZMVM cuenta con un inventario de emisiones con alta resolución y mantiene un esfuerzo continuo para identificar y cuantificar nuevas fuentes de emisión, considerando el uso de observaciones en la estimación de perfiles de emisión y su

variabilidad temporal. El INEM realiza esfuerzos para la construcción de un inventario actualizado con resoluciones espaciales y temporales en todas las fuentes y listo para modelación.

Además del INEM, el INECC es responsable del desarrollo del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI), el cual es una herramienta esencial de gestión ambiental para desarrollar políticas relacionadas con la mitigación del cambio climático y forma parte de los compromisos internacionales que México presentó a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). El INEGYCEI se desarrolla siguiendo los criterios establecidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) y se actualiza periódicamente para ser presentado en las Comunicaciones Nacionales de México ante la CMNUCC. El inventario contiene las estimaciones de las emisiones y absorciones de gases y compuestos de efecto invernadero derivados de la generación de energía, los procesos industriales, el uso de productos de consumo, la agricultura, la silvicultura y otros usos del suelo, y los residuos. La versión más reciente del INEGYCEI incluye estimaciones de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF₆) y CN para el período 1990 a 2019. México fue el primer país en comprometerse a reducir el CN como parte de su compromiso con la Conferencia de las Partes de la CMNUCC (COP21) celebrada en París en diciembre de 2015. Durante la COP 26 en Glasgow, Escocia, en noviembre de 2021, México se unió a más de 100 países para comprometerse a reducir las emisiones de CH₄ en un 30% para 2030. Los resultados de los estudios de campo realizados en México para caracterizar las emisiones de CH₄ provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales y la fermentación entérica del ganado, indicaron que las metodologías del IPCC representan una herramienta imprecisa para estimar los GEI locales; es importante determinar factores de emisión específicos y datos de actividad para estimar con mayor precisión los inventarios de emisiones de los GEI. De manera similar, los estudios de campo mostraron la importancia de obtener los factores de emisión de CN y los contaminantes asociados, en condiciones reales de operación de vehículos dentro y fuera de la carretera, así como de los hornos de ladrillos y estufas, para mejorar las estimaciones de emisiones (ver Capítulo 4, Sección 4.5).

2.3. La modelación y el pronóstico de la calidad del aire

La modelación numérica es una herramienta esencial para apoyar a los tomadores de decisiones en el diseño de políticas de calidad del aire y en la evaluación de medidas de control en escenarios climáticos y de emisiones presentes y futuros, así como en la previsión de la calidad del aire. El pronóstico de la calidad del aire en tiempo real juega un papel muy importante para informar a la población sobre concentraciones potencialmente dañinas de contaminantes como el O₃, PM₁₀, PM_{2.5} y NO₂. Esta información permite al gobierno y al público desarrollar medidas de prevención, como restringir la circulación de vehículos con el propósito de limitar las emisiones y minimizar las actividades al aire libre para limitar la exposición a niveles insalubres de contaminación del aire.

Actualmente, el gobierno de la Ciudad de México ha implementado un sistema de pronóstico de calidad del aire para alertar al público sobre la posible presencia de altos niveles de contaminación por O₃ y PM_{2.5} con 24 horas de anticipación, y para la evaluación de políticas de reducción de

emisiones para mejorar la calidad del aire y otros beneficios colaterales. El sistema tiene un buen desempeño en el pronóstico de las concentraciones máximas de O_3 , sin embargo, tiene dificultades para pronosticar los eventos de muy alta contaminación que suelen activar las contingencias ambientales atmosféricas en la ZMVM, y tiene un menor desempeño para el pronóstico de las $PM_{2.5}$. El ICAyCC-UNAM cuenta con un modelo de pronóstico de 72 horas para contaminantes criterio que cubre las ciudades de Toluca, Cuernavaca, Tlaxcala, Puebla y Ciudad de México. Similar al desempeño del sistema de pronóstico de la SEDEMA, el modelo del ICAyCC-UNAM subestima las concentraciones durante los eventos de alta contaminación por O_3 .

A nivel de la Megalópolis, aún existen desafíos sustanciales para la implementación de un sistema de pronóstico debido a la necesidad de mejores datos, tanto del monitoreo como del inventario de emisiones, e infraestructura y personal técnico calificado. Con la colaboración del ICAyCC-UNAM, la CAME pretende desarrollar e implementar un sistema de modelación y pronóstico, iniciando con un curso-taller de pronóstico de la calidad del aire dirigido a las entidades de la Megalópolis.

2.4. Investigación en ciencias de la atmósfera en la Megalópolis

El estudio de los procesos atmosféricos constituye una actividad fundamental para comprender las fuentes, las transformaciones e impactos de la contaminación y evaluar las mejores opciones de mitigación. En la ZMVM se estudiaron con gran detalle los procesos físicos y químicos que controlan la emisión, transformación y transporte de los contaminantes atmosféricos durante los estudios de campo intensivos colaborativos MCMA-2002/2003 y MILAGRO-2006. Desde entonces, se han efectuado relativamente pocos estudios de campo en la ZMVM, mientras que en otras regiones de la Megalópolis la investigación es casi nula. La mayoría de estos estudios han sido realizados por el SIMAT, universidades, el MCE2, el INECC e investigadores independientes, incluyendo la caracterización de los compuestos orgánicos volátiles (COV), la producción de O_3 , el SO_2 , los compuestos reactivos de nitrógeno atmosférico, la composición de los aerosoles y sus propiedades ópticas, los bioaerosoles, los metales tóxicos, los forzadores climáticos de vida corta (CN y CH_4), la exposición personal, la epidemiología ambiental y toxicología, así como la meteorología urbana.

Una revisión de la investigación científica atmosférica, que se describe con mayor detalle en los Capítulos 2 y 4, muestra que no se han logrado progresos sustanciales en el mejoramiento de la calidad del aire en la ZMVM en la última década. Las tendencias de la concentración de O_3 y $PM_{2.5}$ se han estancado, y la evidencia reciente sugiere que la producción de contaminantes secundarios ha aumentado junto con la expansión urbana, una creciente flota vehicular y la mayor relevancia de fuentes emergentes de COV. Ante la emisión continua de grandes cantidades de contaminantes, el clima cambiante puede desencadenar eventos graves de contaminación. Los serios episodios de contaminación del aire por O_3 ocurridos en 2016 se asociaron con eventos meteorológicos regionales, que suprimieron la ventilación de la cuenca de la ciudad y afectaron la evolución de la capa límite planetaria, la recirculación atmosférica y la acumulación de contaminantes emitidos y producidos localmente. Los episodios de partículas ocurridos en mayo de 2019 fueron causados por las emisiones provenientes de incendios forestales dentro y fuera de la Megalópolis, que podrían volverse más intensos y frecuentes debido al cambio climático.

La atmósfera de la ZMVM ha experimentado un calentamiento progresivo en las últimas décadas, posiblemente debido a la interacción sinérgica entre el aumento de la modificación de la cubierta terrestre, los nuevos materiales empleados en la construcción, el calor antropogénico y los cambios de temperatura asociados al cambio climático global. Se ha observado una tendencia creciente similar en la temperatura ambiente de otras entidades de la Megalópolis. También se ha identificado un incremento en la intensidad de la radiación solar ultravioleta (UV) en la ZMVM, lo que podría intensificar la producción de contaminantes secundarios, así como aumentar los riesgos para la salud humana, por ejemplo, cataratas, cáncer de piel. Estos aspectos se describen con mayor detalle en el Capítulo 4, Sección 4.4.

Una consecuencia no esperada relacionada con las restricciones por la pandemia de COVID-19 fue la reducción de las emisiones provenientes de los automóviles, algunos sectores industriales y actividades comerciales, en una escala sin precedentes en México, ofreciendo a los científicos atmosféricos y administradores de la calidad del aire una oportunidad única para estudiar los efectos de las reducciones extraordinarias en las actividades antropogénicas sobre la calidad del aire. La evaluación de los datos de calidad del aire en la ZMVM y de los estudios de modelación durante la pandemia, confirmaron que la aplicación de las restricciones condujo a reducciones en los niveles promedio de CO, SO₂, NO₂, PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente, mientras que para el O₃ aumentaron. La experiencia durante las restricciones confirmó el papel de las emisiones vehiculares, principalmente vehículos particulares y las emisiones industriales en el deterioro de la calidad del aire, pero también planteó interrogantes sobre la efectividad de las estrategias de mitigación y el esquema de gestión actual. No es suficiente con controlar las emisiones del tráfico vehicular y de las actividades manufactureras, se debe considerar una regulación integral de los gases precursores provenientes de todas las posibles fuentes de emisión. Urge un análisis más detallado de lo ocurrido durante la pandemia y extraer lecciones que contribuyan a la identificación de nuevas políticas que complementen la propuesta del ProAire 2021-2030 (ver Capítulo 4, Sección 4.7).

El conocimiento científico promueve la gestión efectiva de la calidad del aire a través de la identificación de fuentes prioritarias, la interpretación de los procesos de transporte y transformación de los contaminantes y la guía para el diseño de las acciones de control. Frente a los retos que tiene la Megalópolis para la gestión de la calidad del aire y el limitado avance de la investigación científica, es necesario orientar esfuerzos y destinar recursos para realizar estudios de campo de magnitud y objetivos similares a las grandes campañas de 2003 y 2006, para actualizar el conocimiento científico e impulsar una mejor gestión de la calidad del aire en la región.

2.5. Investigación sobre los impactos de la contaminación del aire en la Megalópolis

La contaminación del aire tiene una diversidad de impactos en la salud humana, que incluye entre otros, la reducción del crecimiento y la función pulmonar, las infecciones respiratorias y el asma agravado en los niños; mientras que la cardiopatía isquémica y el accidente cerebrovascular son las causas más comunes de muerte prematura en adultos. Hay evidencia reciente de otros efectos tales como la diabetes y las afecciones neurodegenerativas. La base de evidencia de los daños

causados por la contaminación del aire en la salud pública está creciendo rápidamente y apunta a daños significativos causados incluso por niveles bajos de muchos contaminantes del aire. Lo anterior ha conducido a estimaciones de riesgo cada vez más grandes asociadas con la contaminación del aire en la Carga Global de Enfermedades, a la publicación en 2021 por parte de la Organización Mundial de la Salud de pautas de calidad del aire más estrictas y a la actualización de las NOM de calidad del aire en México. Esto se vuelve aún más relevante en la región de la Megalópolis porque presenta problemas importantes de contaminación del aire, los cuales se reflejan en el incumplimiento frecuente de las normas, los impactos en la salud, los costos económicos directos e indirectos y el daño a los ecosistemas.

Desde la década de 1980 en México, se han realizado estudios epidemiológicos y toxicológicos especializados para mejorar el conocimiento sobre los impactos de los contaminantes del aire en la salud, y los resultados clave se han incorporado en políticas y programas para el control de la calidad del aire. Por ejemplo, los estudios sobre los efectos nocivos del plomo fueron importantes para cambiar las normas oficiales en las que se eliminaba el plomo de los combustibles. Otros estudios incluyen la relación entre los contaminantes del aire y el asma, las tasas de mortalidad, los efectos cardiovasculares, el desarrollo pulmonar en niños, enfermedades metabólicas, el cáncer y, más recientemente, la relación entre los niveles de contaminación y los impactos en la salud por COVID-19. Además de los impactos en la salud de los contaminantes criterio, en México se han realizado estudios de exposición a partículas ultrafinas y a contaminantes del aire no regulados, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Algunos de estos estudios se describen en los Capítulos 4 y 5.

Además de los impactos en la salud humana, los contaminantes atmosféricos tienen efectos en los cultivos reduciendo su rendimiento y aumentando el riesgo para la seguridad alimentaria. También pueden afectar a los bosques y los ecosistemas al disminuir la calidad y cantidad de los servicios ambientales que proporcionan a la sociedad. La mayoría de los estudios en México se han centrado en comprender los impactos de los contaminantes del aire en la salud pública, no obstante, todavía hay lagunas de información sobre los impactos en los cultivos, los bosques, los ecosistemas, el patrimonio cultural y la infraestructura pública y privada.

2.6. Programas de gestión de la calidad del aire en la Megalópolis

En México, el Gobierno Federal ha seguido un enfoque de gestión de la calidad del aire a través de los ProAire (Programa Para Mejorar la Calidad del Aire), que responde a la necesidad de cada uno de los 32 estados que conforman el país, de contar con un instrumento de carácter preventivo y/o correctivo en materia de calidad del aire y protección de la salud, así como para cumplir con el marco legal aplicable. A escala de la Megalópolis, en agosto de 2017 se publicó el Programa Federal de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis 2017-2030 (ProAire de la Megalópolis 2017-2030), con el objetivo principal de mejorar la calidad del aire en la región con un enfoque en las fuentes de jurisdicción federal.

En la década de 1990, debido al grave problema de la contaminación del aire en el Distrito Federal (hoy Ciudad de México) y a que su administración era parte del gobierno federal, las actividades iniciales de la gestión de la calidad del aire se centraron en ella y su zona metropolitana. El primer

programa de gestión de la calidad del aire en la ZMVM, PICCA (Programa Integral contra la Contaminación del Aire), fue desarrollado e implementado en 1990, seguido por los ProAire 1995-2000, ProAire 2002-2010, y ProAire 2011-2020. El más reciente ProAire 2021-2030 para la ZMVM se publicó en diciembre de 2021 e incluye medidas de política y acciones destinadas a prevenir, controlar y reducir las emisiones de fuentes prioritarias, al tiempo que aborda temas transversales para fortalecer la gestión de la calidad del aire, como los procesos de comunicación de riesgos, la participación ciudadana, los arreglos institucionales, el monitoreo, la coordinación metropolitana y la investigación científica.

Al igual que en muchos grandes centros urbanos de todo el mundo, el sector transporte continúa como una fuente importante de contaminación del aire en la ZMVM y la región de la Megalópolis. La mayoría de los programas de mejora de la calidad del aire tienen como objetivo reducir las emisiones relacionadas con el transporte a través de restricciones de circulación, cambios tecnológicos, planes de movilidad eléctrica (vehículos eléctricos como automóviles, furgonetas, camionetas de carga, autobuses y motocicletas), promoción de la movilidad sostenible (caminar, andar en bicicleta, usar el transporte público y de personal) y el teletrabajo.

Como las medidas específicas para reducir las emisiones de escape han sido exitosas, han cobrado mayor relevancia las relacionadas con el control de las emisiones de los sistemas que no son de escape (uso y desgaste de neumáticos, frenos, motores, evaporación de gasolinas y líquidos refrigerantes, etc.) y que también son fuentes importantes de contaminación. Los vehículos eléctricos son una alternativa para reducir drásticamente la contaminación en un corto plazo, no obstante, existe preocupación por la producción y disposición de las baterías. En la producción de energía eléctrica, será necesario explotar las fuentes renovables para reducir las emisiones a la atmósfera de las centrales eléctricas a base de combustibles fósiles. El uso y la disposición final de baterías de los vehículos eléctricos deberá regularse para evitar la contaminación que pudiera producir su manejo inadecuado.

Para fomentar el uso de vehículos de bajas emisiones, la CAME anunció en 2019 algunos cambios al programa "Hoy No Circula" (HNC) que se aplica en la ZMVM. Todos los vehículos eléctricos e híbridos están exentos de las restricciones de conducción. En la actualización del HNC se consideraron incentivos a los vehículos con menores emisiones de contaminantes criterio y de compuestos y gases de efecto invernadero.

Para proteger al público de la exposición a contaminantes nocivos, en la ZMVM, el PCAA (Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas), en funcionamiento desde 1986, fue reemplazado por el PPRECAA (Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas) en 2019, que actualiza los umbrales de activación para O₃ y PM₁₀, además de incorporar criterios para PM_{2.5} y contingencias combinadas por O₃ y PM₁₀ o PM_{2.5}. En el resto de las entidades existen también PCAAs, pero con algunas diferencias con respecto al PPRECAA. Actualmente la CAME realiza esfuerzos hacia la armonización de estos programas.

3. DESAFÍOS, LECCIONES APRENDIDAS Y RECOMENDACIONES

A continuación se resumen algunos de los principales desafíos, lecciones aprendidas, brechas de conocimiento y necesidades de investigación con respecto al estado actual del monitoreo, la construcción de inventarios de emisiones, el desarrollo de modelos de pronóstico, la investigación en ciencias atmosféricas y en salud pública en la ZMVM y el resto de la Megalópolis, así como algunas opciones de política pública para mejorar la calidad del aire y proteger a la población de los efectos de la contaminación.

3.1. Monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis

Retos del monitoreo de la calidad del aire

El SIMAT ha mantenido una calidad constante en su trabajo durante las últimas dos décadas, lo que permite contar con tendencias confiables sobre la contaminación del aire para evaluar objetivamente la evolución de los impactos del desarrollo urbano y los resultados de la gestión. A pesar de la creciente importancia del SIMAT para la gestión ambiental y la contribución a la protección y mejora de la salud de la gran población de la ZMVM, los recursos humanos y el presupuesto anual asignados para el monitoreo son limitados y podrían afectar el cumplimiento de las necesidades básicas de operación y mantenimiento. Por ello, es necesario explorar mecanismos de cooperación para incrementar la participación técnica y económica entre las entidades que conviven en la ZMVM.

El monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis se ha enfocado principalmente en los centros urbanos. Por lo tanto, hay poca información sobre la representatividad espacial de las redes/estaciones en función de los objetivos del monitoreo y de la situación de la calidad del aire en los asentamientos urbanos periféricos, zonas rurales y las áreas naturales. A pesar de que en la mayoría de las entidades que conforman la Megalópolis se realiza el monitoreo desde hace más de una década, los sistemas de monitoreo presentan diferentes niveles de madurez lo que se refleja directamente en su operación y desempeño, con una disparidad significativa en la calidad de los datos. La mayoría de las redes no cuenta con objetivos del monitoreo y de calidad de los datos, ni planes o protocolos adecuados para el control y aseguramiento de la calidad. Se desconoce la representatividad espacial de las redes/estaciones en función de los objetivos del monitoreo, así como las métricas para la evaluación de la calidad durante el monitoreo y la validación de los datos. Existe poca información sobre el nivel de certidumbre de los datos y el impacto de estas limitaciones en la toma de decisiones y en el cumplimiento de las metas de gestión.

Si bien, este documento no pretende realizar una evaluación del desempeño de las redes de monitoreo, de la revisión de los datos públicos surgieron algunos aspectos que requieren la atención de las autoridades ambientales los cuales se mencionan a continuación:

- La región de la Megalópolis está subrepresentada por el monitoreo atmosférico. Existen importantes brechas en el conocimiento sobre la distribución espacial de los contaminantes del aire, tanto a escala urbana como regional. Existe poca evidencia sobre la situación de la calidad del aire en zonas rurales, áreas de valor ecológico, extensiones agrícolas (importantes para la seguridad alimentaria) y poblaciones pequeñas.

- Existen desafíos para reducir la disparidad en la calidad de los datos entre los diferentes sistemas de monitoreo. En algunos casos los datos tienen incertidumbres difíciles de cuantificar, limitando severamente su uso para la gestión de la calidad del aire y la información pública.
- Algunos sistemas de monitoreo de calidad del aire no realizan una validación adecuada, antes de publicar sus datos en sus repositorios locales o en el SINAICA (Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire). Los datos con deficiencias deben identificarse e invalidarse durante el proceso del monitoreo, antes de su publicación. Por otro lado, la aprobación y publicación de estos datos en el repositorio del SINAICA da una falsa sensación de confianza para aquellas redes de monitoreo que están produciendo datos deficientes.
- La falta de recursos económicos, técnicos o humanos es una constante en todos los sistemas de monitoreo. Esta es una limitación muy importante que debe ser atendida, ya que la gestión de la calidad del aire depende de ellos y también son una herramienta para la protección de la salud pública.
- La mayoría de los sistemas de monitoreo no tienen un programa de gestión de la calidad de los datos adecuado.
- Todos los sistemas de monitoreo reportan concentraciones que exceden los valores límite de las Normas Oficiales Mexicanas, principalmente para ozono (O₃), partículas menores a 10 µm (PM₁₀) y partículas menores a 2.5 µm (PM_{2.5}). Las mayores concentraciones de O₃ se observan de marzo a mayo, mientras que las de partículas en suspensión entre noviembre y mayo, durante la estación seca. Entre junio a octubre, durante la temporada de lluvia, los niveles de contaminación disminuyen en toda la región. Es importante tener en cuenta que dos de los días más contaminados en todas las entidades suelen presentarse en Navidad y Año Nuevo debido a la quema de pirotecnia y fogatas.
- La lluvia ácida continua como un problema en el territorio de la Ciudad de México, no obstante, la gestión ambiental ha sido omisa y se desconoce cuál es la situación en las otras entidades de la Megalópolis.

Recomendaciones para mejorar el monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis

Las recomendaciones que se presentan a continuación tienen el propósito de invitar a las autoridades locales y federales a que realicen un diagnóstico sobre cómo están operando las redes de monitoreo y de la calidad de los datos que están colectando. Esto les permitirá tomar las acciones necesarias para mejorar el desempeño del monitoreo atmosférico en la región de la Megalópolis. La lista de recomendaciones expuestas aquí no es exhaustiva, pero sí cubre las mayores deficiencias encontradas en las redes de monitoreo de la calidad del aire durante la elaboración de este documento.

- **Implementar auditorías del sistema y evaluaciones técnicas.** Realizar auditorías del sistema y evaluaciones técnicas de las redes de monitoreo con el propósito de identificar sus capacidades y deficiencias en cada etapa del proceso. Estas evaluaciones deben realizarse con personal especializado, preferiblemente por terceros independientes ajenos a los programas de monitoreo. Con base en los resultados, establecer metas y planes de

trabajo realistas para garantizar la mejora continua y permanente de la operación adecuada en el corto plazo.

- **Implementar planes de control de calidad.** Diseñar y establecer planes estandarizados para el aseguramiento y control de la calidad en las diferentes etapas del monitoreo, con el propósito de avanzar hacia la armonización de la calidad de los datos generados en la región. Establecer métricas de calidad para evaluar la calidad del trabajo realizado por las redes de monitoreo.
- **Definir objetivos y métricas de validación.** Definir objetivos, criterios y métricas para la validación de datos; elaborar protocolos o procedimientos de validación de datos tanto del lado del productor de los datos, como del SINAICA. La validación debe ser trazable y auditable.
- **Evaluar la representatividad espacial.** Desarrollar protocolos para la evaluación de la representatividad espacial y a partir de ellos realizar una revisión de la ubicación y de los contaminantes medidos en todas las estaciones de monitoreo en la región. En aquellas donde su ubicación comprometa los objetivos del monitoreo, realizar las acciones necesarias para su reubicación, utilizando procedimientos armonizados basados en evidencia científica (por ejemplo, modelos regionales de calidad del aire).
- **Incorporar mecanismos de financiamiento a largo plazo.** Garantizar la sostenibilidad de las redes de monitoreo con presupuestos apropiados que incluyan participaciones estatales, municipales y federales. Explorar mecanismos de financiamiento, por ejemplo, fondos fiduciarios, así como la participación de recursos privados, como fundaciones, que permitan el funcionamiento de las redes de monitoreo a largo plazo.
- **Establecer el monitoreo en áreas no-urbanas.** Considerar el establecimiento de estaciones de monitoreo para cubrir las brechas espaciales, generar datos sobre niveles de contaminación en áreas rurales y en áreas de interés ecológico. Incorporar criterios de justicia ambiental en la selección de los sitios de monitoreo.
- **Validación retrospectiva de datos.** Con base en los objetivos del monitoreo, realizar un análisis retrospectivo de los datos generados por los diferentes sistemas de monitoreo e identificar con banderas apropiadas aquellos datos de calidad dudosa.
- **Fortalecer la infraestructura de monitoreo.** A través del Programa de Reforzamiento de las Capacidades de Monitoreo de la Calidad del Aire en la Megalópolis se destinaron 150 millones de pesos para fortalecer la infraestructura de monitoreo y apuntalar un Sistema Megalopolitano de Monitoreo de la Calidad del Aire. Hasta diciembre de 2022 el programa presentaba un avance físico y financiero del 94%. Si bien, existe la confirmación de la compra de los equipos e infraestructura, aún está pendiente la presentación de la evidencia clara y objetiva de los beneficios alcanzados en el monitoreo, la calidad de los datos, y la difusión de la información por parte de las entidades financiadas.
- **Ampliar las capacidades técnicas.** Desarrollar programas de capacitación continua para incrementar las capacidades técnicas del personal de las redes de monitoreo atmosférico.
- **Incorporar mediciones satelitales.** La creciente disponibilidad de datos satelitales y una nueva generación de monitoreo satelital de la calidad del aire puede proporcionar a los científicos y responsables del diseño de políticas información adicional sobre las

concentraciones de contaminantes criterio, que puede ser valiosa para regiones de la Megalópolis fuera de la cobertura espacial de las redes de monitoreo. Sin embargo, los datos satelitales no reemplazarán el monitoreo en la superficie, sino que son complementarios. Es necesario establecer nuevas estaciones y continuar el monitoreo de la calidad del aire ambiente de manera rutinaria con instrumentos de grado regulatorio en tales áreas.

- **Incorporar monitores de bajo costo calibrados y validados.** Los desarrollos recientes en la tecnología de sensores han mejorado el desempeño de los monitores de bajo costo y permiten que se utilicen en condiciones particulares para complementar los sistemas de monitoreo actuales y crear nuevas aplicaciones para informar mejor sobre el estado de la calidad del aire. Sin embargo, esto solo será posible si se implementa un esquema sólido de calibración de los dispositivos y de validación de datos para reducir las incertidumbres en sus mediciones.
- **Difusión pública de la información.** Es importante mantener la difusión permanente de los resultados del monitoreo a la población a través de medios de comunicación masiva, sitios web, aplicaciones y redes sociales.

3.2. Emisiones de contaminantes atmosféricos en la Megalópolis

Retos y recomendaciones para mejorar la estimación de las emisiones

- **Incorporación de métodos de control de calidad durante la construcción de inventarios de emisiones.** Es importante que los grupos de trabajo responsables del desarrollo de inventarios de emisiones relevantes para la Megalópolis, implementen las metodologías de control de calidad adecuadas durante la preparación de los inventarios de emisiones. La aplicación sistemática del control de calidad durante la elaboración de un inventario es crucial para obtener coherencia, integridad, comparabilidad, representatividad y transparencia de la información obtenida.

La aplicación de controles de calidad permitirá identificar las principales áreas con incertidumbre en el inventario, así como los retos existentes para mejorar las estimaciones en cada versión sucesiva. El control de calidad debe incorporarse con técnicas estadísticamente robustas paralelas a la preparación del inventario y no después. Uno de los principales desafíos para incorporar sistemáticamente los procesos de control de calidad es institucionalizar el apoyo a los grupos de trabajo en términos de asignación de los recursos financieros, de infraestructura y de capacitación necesarios.

- **Evaluación independiente de inventarios.** El INEM, el INEGYCEI y el IE-ZMVM generalmente utilizan una combinación de métodos para estimar las emisiones, que incluyen: (1) muestreo directo de fuentes (principalmente para fuentes industriales); (2) estimaciones indirectas utilizando una combinación de técnicas de balance de masa y modelos, por ejemplo, MOVES-México, el Modelo Mexicano de Biogás, el modelo *Non-Road* para fuentes fuera de carretera, y el Sistema de Modelación de Emisiones y Dispersión (EDMS), etc.; (3) técnicas de extrapolación para la combinación de factores de emisión con datos de actividad; y (4) las directrices del IPCC para estimar las emisiones de los GEI.

La aplicación conjunta de diversos métodos representa un esfuerzo significativo para obtener, procesar y analizar la información necesaria para elaborar los inventarios de emisiones. Sin embargo, es necesario incorporar técnicas para evaluar la incertidumbre y revisiones independientes. Las emisiones estimadas en los inventarios deben basarse en la verificación y análisis independientemente de la fuente de información utilizada. El primer desafío por resolver es la promoción sistemática del trabajo y la colaboración continua con instituciones y agencias federales, estatales y locales que generan y procesan la información de datos de actividad, para garantizar la coherencia entre los datos reportados, las aproximaciones utilizadas y los datos obtenidos en condiciones reales de operación.

La experiencia de las campañas de medición de campo en la ZMVM en 2002, 2003 y 2006 mostró que la información integral obtenida de estudios de campo, actividades de modelación, redes de monitoreo, consultas dirigidas y visitas guiadas, es una herramienta importante que puede utilizarse con éxito para la evaluación y el análisis de las emisiones estimadas en los inventarios locales. Algunas herramientas valiosas para la evaluación independiente de las emisiones utilizan métodos indirectos como la modelación independiente de emisiones en combinación con campañas de medición, así como estudios a largo plazo con la aplicación conjunta de diversas técnicas, incluidos sensores remotos para fuentes móviles e industriales, técnicas de modelación inversa, procesamiento de información satelital, torres de flujo de covarianza de vórtices turbulentos (*eddy covariance*) para fuentes de área, muestreo en túneles y con sistemas portátiles para emisiones vehiculares, etc.

- **Actualización de factores de emisión y datos de actividad.** Debido a los continuos cambios en la tecnología, los requisitos regulatorios de combustibles y los cambios en los procesos, es necesario realizar la actualización periódica de los factores de emisión y los datos de actividad. Es indispensable que los tomadores de decisiones y las autoridades ambientales de la Megalópolis promuevan estudios de campo y encuestas para actualizar la información utilizada en los inventarios.

Hay fuentes de emisión clave que deben priorizarse para la actualización periódica de los factores de emisión y los datos de actividad, ejemplos de estas fuentes incluyen: los vehículos de gasolina, los vehículos fuera de carretera, las motocicletas, los vehículos diésel pesados y los empleados en el transporte de pasajeros y carga. Algunas fuentes clave con una alta incertidumbre en sus estimaciones y que deben revisarse continuamente incluyen a las emisiones de resuspensión de polvo en las carreteras, las de los COV provenientes de las pinturas, el manejo de solventes, desinfectantes, limpiadores, impermeabilizantes y desechos infecciosos, así como las emisiones de la cocción en el sector informal y de los servicios.

- **Coordinación entre autoridades ambientales y grupos de trabajo que desarrollan inventarios de emisiones.** Se ha observado que cada entidad que conforma la Megalópolis es tanto emisora como receptora de contaminantes, por lo que es necesario fortalecer la coordinación entre las diferentes entidades para mejorar las estimaciones de emisiones a nivel regional. Además, es imprescindible mejorar la coordinación entre los grupos de trabajo que elaboran los inventarios de emisiones lo que permitirá que la generación, procesamiento y análisis de la información sea eficiente y transparente. Esto contribuirá a mejorar la gestión de la calidad del aire y reducir los niveles de contaminación en la Megalópolis. Es importante comprender la emisión y el transporte regional de

contaminantes para coordinar las medidas de control dentro de la Megalópolis. Muchas de las políticas públicas sólo podrán maximizar su beneficio si existe coordinación entre las dependencias gubernamentales de las diferentes entidades.

- **Aumentar y ampliar las capacidades técnicas.** Como parte de la implementación de un proceso para mejorar la coordinación entre las autoridades ambientales, también es importante aumentar y ampliar las capacidades técnicas para la elaboración de inventarios por parte de los grupos de trabajo de las diferentes entidades de la Megalópolis a nivel federal, estatal y municipal. Se requiere de una mejor coordinación y capacidad técnica para generar (en versiones sucesivas) un inventario regional de emisiones para la Megalópolis que sea integral, robusto, preciso, confiable y que sirva de apoyo en la modelación, el pronóstico y el diseño de programas que permitan mejorar la calidad del aire. Es necesario que sean de acceso público los informes de los inventarios de emisiones, la metodología de cálculo y el manejo de las incertidumbres.
- **Mejorar la estimación de fuentes móviles.** En el caso de las emisiones de vehículos, la mayoría de los inventarios desarrollados actualmente en México, utilizan el modelo MOVES-México, el cual es una adaptación del modelo MOVES (*Motor Vehicle Emissions Simulator*) de la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés). El modelo MOVES-México permite estimar las emisiones ajustando los cálculos con bases de datos locales como datos de campañas de monitoreo con sensores remotos, datos de programas de verificación vehicular, pruebas de emisiones en vehículos nuevos y formulación de combustible, además de las condiciones climáticas y características locales y regionales. Sin embargo, un desafío importante en la adaptación es la representación adecuada de las condiciones reales de manejo. Por lo tanto, debido a las particularidades del tránsito que tienen las distintas ciudades deben mejorarse las estimaciones de los factores de emisión y datos de actividad.

La primera versión del MOVES-México fue usada en el país en el año 2016, realizando ajustes al modelo MOVES de Estados Unidos versión 2014a, para la estimación de emisiones de vehículos en carretera. En el año 2022, se actualizó el modelo para México llamándolo MOVES-México 2022, ajustando las bases de datos con información reciente de sensores remotos, programas de verificación vehicular, flota y actividad vehicular. El modelo estará disponible públicamente durante el segundo semestre de 2023.

MOVES-México 2022 se basó en el modelo MOVES de Estados Unidos 2014b, en lugar del MOVES3, que fue publicado por la EPA en 2022 e incluyó el estado de la ciencia sobre las emisiones de fuentes móviles. Sin embargo, las modificaciones de MOVES3 no aplicarían en México, ya que presentan nuevas mediciones de emisiones en Estados Unidos y también ajustes a las emisiones de vehículos fuera de carretera cuyos factores de emisión no han sido evaluados para México.

Como parte de la campaña de forzadores climáticos de vida corta (FCVC o SLCF, por sus siglas en inglés), coordinada por el MCE2 en la Ciudad de México en 2013, se determinaron los componentes de las partículas suspendidas (CN, carbono orgánico y otros componentes inorgánicos de PM_{2.5}) y los gases (CO, NO_x, SO₂ y COV) presentes en las emisiones de varios vehículos diésel (autobuses, camiones de carga) con diferentes años modelo y tecnologías de control de emisiones, en condiciones reales de conducción utilizando la técnica de persecución con el Laboratorio Móvil Aerodyne (ver Capítulo 4,

Sección 4.5). La comparación de los resultados con el modelo US-EPA MOVES 2014b mostró desacuerdos para varias especies, demostrando la necesidad de utilizar una base de datos con factores de emisión obtenidos localmente para reducir la incertidumbre en las estimaciones de emisiones. Es necesario considerar no solo el ajuste del modelo MOVES-México a las condiciones locales, también la actualización de su versión base para mejorar las estimaciones.

También en 2014, se obtuvieron factores de emisión para gases (CO, CO₂, NO_x) y partículas suspendidas (el componente CN y la concentración total) para una variedad de vehículos diésel fuera de carretera (equipos de construcción y agrícolas) con y sin filtro de partículas diésel (DPF, por sus siglas en inglés) utilizando la técnica de Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones (PEMS, por sus siglas en inglés) en alta resolución temporal. Los resultados mostraron que las reducciones de los factores de emisión de CN fueron significativamente mayores (>99%) con filtros instalados. A diferencia de los vehículos en carretera, aún no existe una regulación para los niveles de emisiones de los vehículos fuera de carretera, pero se encuentra en proceso la elaboración de una NOM. Sus contribuciones relativas aumentan con el tiempo a medida que las emisiones de los vehículos de carretera continúan reduciéndose gracias al uso de mejores tecnologías. Existe una gran necesidad de aumentar la base de datos de factores de emisión para los vehículos fuera de carretera a través de estudios de campo y de continuar estudiando los beneficios de las tecnologías de control de emisiones de estos vehículos en la Megalópolis.

Además de las emisiones de los sistemas de escape de automóviles, es importante caracterizar las emisiones evaporativas del sistema de combustible y aquellas provenientes del uso y desgaste de neumáticos, frenos y otros sistemas que no son de escape, los cuales incluyen a los metales tóxicos.

Actualmente se encuentra en ejecución el proyecto *Inventario de emisiones contaminantes de fuentes móviles carreteras para la Megalópolis con año base 2018 y la actualización del modelo MOVES México*, por parte de la CAME y SEMARNAT financiado con recursos del Fideicomiso Ambiental (FIDAM-1490). Este proyecto apoyará y brindará capacitación a las siete entidades que conforman la CAME para el desarrollo y actualización de su inventario de emisiones.

- **Mejorar la estimación de las emisiones evaporativas de los combustibles fósiles.** El control de las pérdidas de combustible por evaporación durante los procesos de trasiego y suministro debe basarse en una estrategia integral de regulación, optimización, actualización y mejora en las diferentes fases de la distribución, desde las refinerías, las terminales de almacenamiento y las estaciones de servicio, así como en la aplicación de métodos técnicos para medir las emisiones y evaluar su eficiencia. Es necesario garantizar la reducción de las emisiones durante el almacenamiento, trasiego y expendio mediante el uso de Sistemas de Recuperación de Vapores (SRV), cuyo funcionamiento debe ser continuo y eficiente de acuerdo con la NOM-004-ASEA-2017. La NOM-006-ASEA-2017 establece las especificaciones, criterios técnicos y requisitos para la seguridad industrial, la seguridad operacional y la protección del medio ambiente que deben realizarse en las instalaciones terrestres de almacenamiento de petróleo y productos petrolíferos. La norma indica que las instalaciones deben controlar los vapores de gasolina durante la carga de camiones cisterna con una eficiencia igual o superior al 95%, pero no establece los métodos de prueba, por lo que no hay evidencia de su funcionamiento ni cuantificación del control

de emisiones. De igual forma, la NOM-005-ASEA-2016 indica que las estaciones de servicio deben contar con dispositivos herméticos para controlar los vapores de gasolina durante la descarga de camiones cisterna. Sin embargo, la norma no establece los parámetros ni métodos de prueba. Actualmente, mediante un proyecto de la CAME se evalúa la cobertura y desempeño de los SRV en gasolineras y propondrá modificaciones a las NOM-005-ASEA-2016 y NOM-006-ASEA-2017.

- **Mejorar las estimaciones de las fuentes industriales.** En las estimaciones se aplican principalmente los factores de emisión de la US EPA, los cuales no necesariamente son aplicables a las condiciones de operación y tecnológicas de los procesos industriales en México. Más aún, cuando no se sigue un control de calidad riguroso los cálculos suelen tener errores, y la gran mayoría de los datos registrados en las Cédulas de Operación Anual (COA) no tienen la representatividad de operación necesaria para los inventarios de emisiones. Los datos son recalculados tomando en cuenta los datos de actividad, información histórica y otras fuentes de información, debido a que los reportes de la industria tienen múltiples errores. Varias entidades no cuentan con los reportes anuales de la industria de jurisdicción estatal o éstas no reportan anualmente o de manera confiable. También hay una gran incertidumbre respecto de las emisiones fugitivas y la eficiencia de operación de los sistemas de control que reporta la industria. Estas limitaciones subrayan la necesidad de reducir la incertidumbre en las estimaciones de fuentes industriales.
- **Mejorar las estimaciones de las fuentes área.** Las fuentes del área son pequeñas pero numerosas y contribuyen significativamente a PM, CO₂, COV, amoníaco (NH₃), SO₂ y compuestos tóxicos emitidos por diversas fuentes, incluyendo: almacenamiento, distribución y trasiego de gasolina y gas licuado de petróleo (GLP), uso comercial y doméstico de solventes, productos de consumo, gestión de residuos (rellenos sanitarios, quema de basura a cielo abierto, tratamiento de aguas residuales, aguas residuales no tratadas), actividades agrícolas (quema de cultivos, labranza, aplicación de fertilizantes y plaguicidas, corrales de engorda de ganado, fermentación entérica, manejo del estiércol), resuspensión de polvo, entre otros. A diferencia de las grandes fuentes estacionarias, las fuentes de área generalmente deben cumplir con límites de emisiones menos estrictos. Muchas de las microindustrias pertenecen al sector de la industria informal que no está regulado eficazmente; son pequeñas y numerosas para ser inventariadas, lo que contribuye a una de las mayores incertidumbres en las estimaciones de emisiones. Por ejemplo, las fuentes de área contribuyeron al 66% de los COV en la ZMVM en 2018. Existen numerosos talleres pequeños de manufactura, pintura, servicios mecánicos, entre otros, que forman parte del sector informal que en conjunto pueden tener aportes significativos de algunos contaminantes como los COV. A medida que las emisiones de COV urbanos procedentes de fuentes relacionadas con el transporte han disminuido debido a los avances tecnológicos y las medidas reglamentarias, los productos químicos volátiles procedentes de fuentes como el cuidado personal y los productos para el hogar, el recubrimiento de aerosoles, la pintura, el uso de disolventes y los plaguicidas, han ganado importancia, lo que pone de relieve la necesidad de adoptar medidas regulatorias para controlar las fuentes. Como se describe a continuación en categorías específicas (COV, quema de biomasa, gases de efecto invernadero), es importante apoyar las mediciones de campo para estimar los factores de emisión para las fuentes de área, así como los estudios para mejorar la estimación de los datos de actividad.

- **Caracterización de emisiones de COV y compuestos orgánicos tóxicos.** Los COV son de interés en parte porque participan en reacciones fotoquímicas atmosféricas que contribuyen a la formación de O₃ y tienen un rol en la formación de aerosoles orgánicos secundarios. Además, se sabe que muchos COV individuales son perjudiciales para la salud humana (tóxicos del aire).

El inventario de emisiones de COV tiene una de las mayores incertidumbres en las estimaciones de las emisiones. Durante 2018, los COV en la ZMVM se emitieron desde una variedad de fuentes, incluidos vehículos motorizados, instalaciones de fabricación de productos químicos, refinerías, fábricas, productos comerciales y de consumo, y fuentes naturales (biogénicas) (principalmente isopreno y monoterpenos de árboles). Alrededor de dos tercios de las emisiones totales (66%) son generadas por fuentes de área, incluido el uso comercial y doméstico de solventes, junto con fugas de GLP (principalmente propano y butano).

El uso comercial y doméstico de disolventes contribuye con aproximadamente el 32% de las emisiones totales de COV. Dentro de esta actividad, ciertos productos tienen un mayor aporte, como productos de cuidado personal, pesticidas y otros productos para consumo doméstico, limpiadores industriales, recubrimientos arquitectónicos y productos para el cuidado automotriz. Con esto en mente, se debe alentar la creación de estándares que limiten el contenido de COV en productos prioritarios, al tiempo que se promueve la adquisición de mercancías con menor contenido de estas sustancias. Los esfuerzos para controlar las emisiones de COV también deben centrarse en abordar las fugas de GLP en hogares, empresas, servicios e industrias, que en conjunto generan el 20% de las emisiones. Se requieren medidas para reducir las fugas, promover el consumo responsable de esta energía y avanzar hacia combustibles más respetuosos con el medio ambiente y tecnologías de energía renovable, como el sistema de calefacción y calentadores solares de agua.

Los contaminantes tóxicos son compuestos que tienen la capacidad de producir directamente efectos adversos sobre la salud de la población o el medio ambiente. La mayoría de estos contaminantes son COV como el tolueno y los xilenos, aunque la clasificación también incluye elementos como el plomo, otros metales pesados, fósforo y sus compuestos.

En la ZMVM, los compuestos orgánicos tóxicos representan el 29% de las emisiones totales de COV y las fuentes de área son la principal fuente de emisión, con una contribución del 69% del total de tóxicos. Las principales actividades emisoras están relacionadas con el uso doméstico y comercial de disolventes, la gestión de residuos urbanos y la distribución de gasolina.

En la actualidad se realizan esfuerzos por mejorar la caracterización de los compuestos orgánicos tóxicos no regulados en la Megalópolis. Un ejemplo de ello es el empleo de técnicas como el termodesorbido de aerosoles – cromatógrafo de gases – espectrómetro de masas (TAG-GC-MS, por sus siglas en inglés) por el Laboratorio de Especiación Química de Aerosoles Orgánicos Atmosféricos del ICAYCC-UNAM. El objetivo es mejorar el entendimiento del origen de los compuestos tales como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y su relación con fuentes móviles, industriales, solventes, productos del hogar, pinturas, impermeabilizantes, basura y de productos de uso personal, entre otros.

Debido a su relevancia en la química atmosférica y sus efectos tóxicos, es importante mantener y aumentar el apoyo para los estudios dirigidos a la caracterización de las emisiones de COV y de los compuestos orgánicos tóxicos. Además de caracterizar la especiación química de los COV, los estudios deben priorizar un mejor entendimiento de las distribuciones espaciales y temporales de los compuestos orgánicos en la Megalópolis.

- **Emisiones de motocicletas.** Un desafío importante es la regulación del uso y mejoramiento de la estimación de las emisiones provenientes de las motocicletas en la Megalópolis. En los últimos años el crecimiento en el uso de motocicletas en la región ha sido explosivo. Entre otros factores, se debe a la versatilidad de este tipo de unidades para circular en condiciones de alta congestión vehicular (generalmente haciendo caso omiso al reglamento de tránsito), el menor precio de adquisición y la falta de regulación adecuada. La importancia de reglamentar el uso y mantenimiento de las motocicletas, así como mejorar las estimaciones de sus emisiones, radica en el hecho de que en su mayoría circulan con tecnologías emisoras altamente contaminantes y potencialmente pueden impactar negativamente en la calidad del aire. Actualmente no hay regulaciones para las emisiones de motocicletas, pero la SEMARNAT coordina un grupo de trabajo para la preparación de un proyecto de NOM para limitar sus emisiones.
- **Mejorar las estimaciones de los incendios, la quema de biomasa y las tolveneras.** La quema de biomasa es una de las mayores fuentes de gases traza y aerosoles emitidos a la atmósfera global y es la fuente dominante de CN y aerosoles orgánicos primarios. El humo del fuego también es una fuente importante de gases de efecto invernadero, incluidos el CO₂, CH₄ y N₂O. Otros contaminantes emitidos incluyen CO, compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles y no volátiles, NO_x, NH₃, cianuro de hidrógeno (HCN) y ácido nitroso (HONO). Hay muchas fuentes y tipos de incendios relacionados con las emisiones de quema de biomasa; algunas son fuentes naturales como los incendios forestales no controlados y no planificados, mientras que otras, como las emisiones de la quema de residuos de cultivos, los desechos sólidos municipales, la quema de madera residencial para cocinar y calentar, y el biocombustible para la producción de ladrillos, son el resultado de actividades humanas. Se han utilizado diferentes enfoques para estimar los factores de emisión para la quema de biomasa en la Ciudad de México y la región circundante, incluidas las mediciones directas sobre incendios en experimentos de campo, mediciones de aeronaves y mediciones de laboratorio como parte de las campañas MILAGRO y FCVC. A pesar de los importantes avances en las mediciones de los factores de emisión, la detección y la cuantificación de la quema de biomasa, es necesario mejorar la precisión de las estimaciones de actividad, tanto para la quema a cielo abierto como para el uso de biocombustibles.

La evidencia sugiere que los episodios excepcionales con concentraciones elevadas de contaminación en la región están vinculados a condiciones meteorológicas particulares, junto con la contribución de grandes fuentes de emisión regionales, como la quema de biomasa (agrícola y forestal) y las emisiones de partículas provenientes del suelo descubierto y erosionado. Es importante promover y apoyar estudios de campo, monitoreo, satelitales y modelación para caracterizar mejor las emisiones de estas fuentes y así gestionar los procedimientos a seguir por la población y las autoridades ambientales durante las contingencias ambientales.

- **Mejorar las estimaciones de gases de efecto invernadero.** Las directrices del IPCC se utilizan generalmente para estimar las emisiones de los GEI con técnicas comparables en todos los países, incluido México. Como parte de la campaña FCVC, coordinada por el MCE2, para caracterizar las principales fuentes de CN, CH₄ y contaminantes asociados, los estudios de campo realizados en México para estudiar las emisiones de CH₄ de las plantas de tratamiento de aguas residuales y la fermentación entérica del ganado, indicaron que las metodologías del IPCC son una herramienta inexacta para estimar los gases de efecto invernadero locales (ver Capítulo 4, Sección 4.5). Es importante determinar factores de emisión específicos a cada fuente emisora localmente para estimar con mayor precisión los inventarios de emisiones de los GEI. Con base en estas mejores estimaciones, se pueden identificar y aplicar políticas de mitigación más efectivas.

Además, los estudios de campo demostraron la importancia de obtener factores de emisión de CN y contaminantes asociados en condiciones reales de operación provenientes de vehículos en y fuera de carretera, hornos de ladrillos, estufas, para mejorar las estimaciones de emisiones, ya que México fue el primer país comprometido a reducir el CN como parte de su NDC (siglas en inglés para Contribución Nacional Determinada) presentada a la CMNUCC.

- **Incorporación de datos satelitales y de percepción remota para la evaluación de emisiones.** Existen esfuerzos por parte del sector académico en conjunto con autoridades ambientales por incorporar el uso de información satelital como una herramienta de evaluación de los inventarios de emisiones. Un ejemplo de ello es el uso de columnas de NO₂ y formaldehído (HCHO) del instrumento TROPOMI de Sentinel-5P para evaluar cambios en las emisiones en regiones de la Megalópolis. Debido a su gran potencial para evaluar las estimaciones de las emisiones en los inventarios, es importante que se expanda el uso de estas técnicas en México. La incorporación de datos satelitales para la evaluación de emisiones debe también incluir la aplicación de técnicas que caracterizan la estructura vertical, los procesos de mezcla, ventilación y dispersión de la atmósfera tales como mediciones con ceilómetro, radiosondeos, lidars Doppler y ejercicios de modelación. La integración de estas técnicas es necesaria para comprender y predecir la interacción entre las emisiones, la meteorología y los niveles de contaminación de la Megalópolis.

3.3. Investigación en ciencias de la atmósfera en la Megalópolis

Fuentes y procesamiento de contaminantes atmosféricos

Lecciones aprendidas

- Los estudios MCMA-2003 y MILAGRO sugerían que, durante la primera década de este siglo, en el núcleo urbano de la ZMVM la atmósfera era altamente sensible a los COV, pero en la región periférica podría ser sensible a los COV o NO_x, dependiendo de las condiciones meteorológicas. Estudios recientes indican que es probable que exista una variación espacial sustancial en la sensibilidad del O₃ a los COV, incluyendo diferencias importantes en diversas áreas de la Ciudad de México y su periferia.
- Los niveles de contaminantes primarios (CO, NO₂, SO₂) en la ZMVM son altamente sensibles a los cambios en las emisiones antropogénicas. Esto se demostró durante los

problemas de suministro de combustible en enero de 2019 y en los efectos de la suspensión de actividades y restricciones de movilidad durante la pandemia de COVID-19 después de marzo de 2020.

- La experiencia obtenida de los cambios en las emisiones resultantes de las medidas drásticas emprendidas por los gobiernos durante la pandemia de COVID-19, muestra que la formación de contaminantes secundarios como el O_3 no fue controlada por las reducciones en los contaminantes primarios. Además, eso resalta la importancia de comprender los efectos de la meteorología y las contribuciones episódicas al evaluar la calidad del aire cuando ocurren grandes reducciones de emisiones. Durante la pandemia se modificaron los patrones de actividad y distribución de la flota vehicular, así como la actividad doméstica y de servicios, esto pudo tener impactos en la concentración y variedad de los precursores y, en consecuencia, en la reactividad química de la atmósfera.
- Deben investigarse las relaciones no lineales entre los contaminantes precursores y la formación de compuestos secundarios (incluidos sus efectos sobre las concentraciones máximas) en diversas condiciones meteorológicas, junto con el cambio climático y los factores socioeconómicos que podrían afectar a la calidad del aire en la Megalópolis en el futuro.
- Deben investigarse los efectos en las relaciones de los precursores y las variaciones en la composición química de los perfiles de emisión de COV (tanto los de la combustión de combustibles fósiles, como de los procesos de evaporación) en la formación de contaminantes secundarios, en diversas condiciones meteorológicas en la Megalópolis.
- La producción de aerosoles secundarios responde a cambios en la composición de sus precursores y las condiciones meteorológicas, por lo que se debe investigar su sensibilidad a diferentes compuestos gaseosos en distintos contextos meteorológicos.

Brechas de conocimiento

- ¿Qué procesos meteorológicos controlan la distribución temporal y espacial de los contaminantes gaseosos y particulados en la atmósfera?
- ¿Cuáles son los factores emergentes (por ejemplo, regulaciones para nuevas emisiones, cambios tecnológicos, comportamiento social) que intervienen en la formación de contaminantes en la Megalópolis y cómo se pueden controlar?
- ¿Ha cambiado la producción de O_3 en la ZMVM? ¿En qué sectores de la ciudad la producción de O_3 es sensible a COV o NO_x ? ¿Hay transiciones estacionales, semanales y diurnas entre los regímenes químicos?
- ¿Cuáles son los perfiles actuales y la distribución espacial de mezclas de COV, de los compuestos orgánicos semivolátiles, y los compuestos orgánicos persistentes en la Megalópolis? ¿Cuáles son las contribuciones de estos compuestos a la formación de O_3 y aerosoles orgánicos secundarios (SOA, por sus siglas en inglés)?
- ¿Cuáles son los impactos de la contaminación del aire en los ecosistemas naturales de la Megalópolis?

- A partir de la experiencia durante la pandemia ¿cómo modifican la reactividad química de la atmósfera los cambios en la flota vehicular y de la actividad doméstica?

Impactos del corredor industrial de Tula-Tepeji en la calidad del aire en la ZMVM y la región de la Megalópolis

- ¿Por qué no ha mejorado la calidad del combustible en el corredor Tula-Tepeji?
- ¿Es posible establecer un sistema de vigilancia para las emisiones provenientes del complejo industrial? ¿Cuáles son las alternativas viables para reducir emisiones de las fuentes prioritarias?
- ¿Cuál es el contenido de compuestos tóxicos presentes en las plumas que transportan contaminantes del aire desde Tula?
- ¿Cómo contribuyen las emisiones a la carga de enfermedad asociada con la contaminación del aire en Tula y sus alrededores, así como en las trayectorias de las plumas?
- ¿Cómo afectan las emisiones del corredor industrial a otras ciudades de la región, por ejemplo, Toluca, Pachuca, Tulancingo, San Juan del Río?
- ¿Hay algún impacto de la deposición ácida atmosférica en áreas agrícolas y suelo de conservación en las entidades de la Megalópolis?
- Además del corredor industrial Tula-Tepeji, ¿existen otras fuentes de contaminación antropogénica con impactos regionales?
- ¿Cómo afectan a los objetivos de gestión las contribuciones regionales de contaminantes antropogénicos en las entidades de la Megalópolis?

Investigación científica regional

- La información disponible del monitoreo indica que algunas ciudades dentro de la Megalópolis tienen niveles de contaminación similares e incluso mayores que los observados en la ZMVM.
- Los programas de gestión de la calidad del aire requieren de un sólido respaldo científico actualizado para el desarrollo y la evaluación de estrategias de control para mejorar la calidad del aire regional.
- Los estudios científicos que permiten entender los procesos de transporte y transformación de los contaminantes son escasos fuera de la ZMVM. Es necesario avanzar en el estudio de los fenómenos meteorológicos asociados al transporte regional de contaminantes, la identificación de fuentes naturales y antropogénicas con impacto regional, los efectos sobre la salud y los ecosistemas, los impactos en las metas locales de gestión y el diseño de estrategias para mitigar las emisiones regionales.
- La información sobre los efectos de la contaminación en la salud humana fuera de la ZMVM es escasa. Es prioritario conocer la situación en las demás entidades de la Megalópolis.
- El monitoreo de la calidad del aire en la región es limitado, es necesario incrementar la cobertura espacial con un enfoque en los contaminantes prioritarios en las diferentes

regiones y mejorar la difusión de la información, con fines de protección de la salud, incluidas las zonas no urbanas y de interés para la protección de cultivos y recursos forestales, modelación o validación de datos satelitales.

- Es necesario promover esfuerzos institucionales, financieros y técnicos para reducir la disparidad en las actividades de monitoreo, inventario de emisiones, modelación, investigación científica y gestión en la región, bajo la coordinación de la CAME.

Meteorología local y calidad del aire

Lecciones aprendidas

- Es necesario estudiar las características de la capa límite planetaria (o atmosférica) y sus efectos en la contaminación del aire. Los perfiladores meteorológicos (por ejemplo, viento, temperatura, humedad) y de aerosoles han demostrado ser una herramienta robusta para medir e investigar con una resolución temporal alta el comportamiento de diversas variables en la capa límite planetaria. El estudio de las propiedades de la capa límite requiere de múltiples técnicas, combinando la teledetección con observaciones de radiosondeos, donde cada una de ellas proporcionará información diferente sobre los procesos de mezcla, ventilación y dispersión.
- Quedan preguntas abiertas sobre los diferentes procesos en la capa límite que controlan la mezcla y las concentraciones superficiales de contaminantes, así como la interacción de las capas límite entre cuencas vecinas, por lo que se necesitan diferentes instrumentos síncronos en múltiples localidades para comprender mejor su variabilidad temporal y espacial.
- Los estudios presentados en la Sección 4.4.2 del Capítulo 4 describen el conocimiento reciente sobre la capa de mezclado, su variabilidad diaria y estacional, y los usos potenciales del ceilómetro para comprender mejor la relación entre la capa de mezcla y la calidad del aire. Sin embargo, aún quedan por investigar preguntas sobre cómo esta interacción influye en los eventos de contaminación extrema en el contexto de un clima cambiante.
- El posible efecto de la radiación sobre la formación de O₃ es un aspecto relevante para la gestión, se ha observado que con el incremento de la radiación solar aumenta también la producción de O₃.
- El ProAire 2021-2030 considera una reducción de aerosoles, sin embargo, esto podría inducir un aumento de las concentraciones de O₃ por el incremento en la radiación solar que alcanza la superficie. Por otra parte, el clima cambiante podría impactar en los procesos de formación de los contaminantes secundarios.

Brechas de conocimiento y necesidades de investigación

- ¿Cuál es la intensidad del calentamiento urbano en los diferentes conglomerados urbanos de la Megalópolis?
- ¿Cómo afecta el calentamiento urbano a la micrometeorología de las ciudades de la Megalópolis?
- ¿Qué impactos tiene el calentamiento urbano en el clima regional y la química atmosférica?

- ¿Deberían los planes de gestión considerar los efectos del calentamiento urbano en los objetivos de reducción de contaminantes? ¿Deberían incluir acciones para su mitigación?
- ¿Cuáles son los efectos esperados del cambio climático sobre la meteorología y la calidad del aire en regiones urbanas y no urbanas en las entidades que conforman la Megalópolis?
- La evidencia disponible indica con cierto grado de certeza que el incremento de la temperatura traerá cambios en la química de la atmósfera y en la producción de O₃, sin embargo, existe una gran incertidumbre en la magnitud. El concepto de penalización climática se refiere al posible incremento en la concentración de O₃ en ambientes con altos niveles de sus precursores. En este sentido ¿cómo afectará la penalización climática a los objetivos de reducción de los diferentes planes de gestión? ¿Deberían los planes de gestión incluir la penalización climática?

Forzadores climáticos de vida corta

Emisiones de carbono negro del sector vehículos diésel en carretera y fuera de carretera

- Los resultados de los estudios de campo en la ZMVM resaltan la necesidad de utilizar bases de datos de factores de emisión obtenidos localmente para los países en desarrollo, con el propósito de reducir la incertidumbre en las estimaciones de emisiones y mejorar la evaluación de la eficacia de las medidas de reducción.
- La estimación de las emisiones de los vehículos fuera de carretera que se usan para la construcción y la agricultura es un desafío, ya que el conjunto de datos de factores de emisión disponibles es considerablemente menor en comparación con los disponibles para vehículos en carretera.
- Debido a su durabilidad, los vehículos fuera de carretera a menudo se mantienen en servicio durante varias décadas y sus contribuciones relativas a las emisiones aumentan con el tiempo, mientras que las emisiones de los vehículos en carretera se reducen por la mayor frecuencia de renovación y las mejoras tecnológicas. Por lo tanto, los vehículos fuera de carretera son potencialmente grandes contribuyentes a las emisiones de CN en muchos centros urbanos, destacando la importancia de diseñar estrategias de control de emisiones y la gran necesidad de incrementar las bases de datos de factores de emisión para vehículos fuera de carretera a través de estudios de campo.

Emisiones de metano de las plantas de tratamiento de aguas residuales

- El drenaje y las plantas de tratamiento son fuentes importantes de CH₄ y N₂O.
- Adoptar sistemas de tratamiento con bajo consumo de energía, ya que esto representa más del 60% de las emisiones totales de CH₄.
- Mejorar el funcionamiento de la sedimentación primaria (purgas frecuentes).
- Se debe dar un tratamiento adecuado de los lodos, preferiblemente uno que considere la producción y el uso de biogás.
- Las metodologías de Tier 1 del IPCC (2006 y 2019) son una herramienta inexacta, ya que subestiman las emisiones.

- Es importante determinar factores de emisión específicos para estimar con mayor precisión los inventarios de emisiones de los GEI. En base a esto, se podrán identificar y aplicar políticas de mitigación más efectivas.

Emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica del ganado

- Es necesario continuar con los estudios sobre las emisiones de CH₄ por fermentación entérica del ganado bovino bajo diferentes sistemas de producción y de alimentación de México, incluyendo otras especies de rumiantes como ovinos y caprinos.
- Fortalecer los estudios para la determinación de factores de emisión específicos de CH₄ para el manejo de estiércol para México.
- Es necesario diseñar estrategias de mitigación de emisiones de CH₄ por fermentación entérica del ganado bovino aplicables a escala comercial.
- Fortalecer los estudios para la determinación de factores de emisión específicos de N₂O para México. En este aspecto, el progreso ha sido mínimo.
- Realizar análisis del ciclo de vida de los GEI originarios del sector agrícola.

Modelación de la calidad del aire y pronóstico

Mejorar el desarrollo y la aplicación de modelos

- Emplear modelación inversa para complementar la evaluación de los inventarios *bottom-up*, teniendo en cuenta su potencial para mejorar la resolución espacial y temporal del inventario, y para estimar la ubicación e intensidad de las fuentes de emisión conocidas y emergentes.
- Asignar recursos para reducir las incertidumbres en los inventarios, mejorar los perfiles y estimaciones basados en mediciones, y avanzar en el conocimiento sobre la participación de los COV en la producción de aerosoles y contaminantes gaseosos de origen fotoquímico.
- Obtener datos sobre las características de los aerosoles primarios para diferentes ambientes representativos de la Megalópolis. Obtener datos meteorológicos y de calidad del aire fuera de las zonas urbanas.
- Explorar las mejores parametrizaciones del modelo para las diferentes regiones de interés en la Megalópolis, producir u obtener los datos con las resoluciones adecuadas para la entrada y evaluación del modelo.
- Considerar las necesidades de modelación dentro de los proyectos de investigación y las políticas de gestión, aumentar la resolución espacial y temporal de las mediciones de calidad del aire y meteorológicas. Incluir las necesidades de modelación en el diseño de sistemas de monitoreo.
- Fortalecer las capacidades de modelación de la región a través de la construcción de un ensamble de modelos que incluya los modelos actualmente disponibles (SEDEMA, ICAyCC, Querétaro, etc.), así como posibles desarrollos futuros.
- Apoyar los esfuerzos de la Ciudad de México para asegurar la mejora continua de su sistema de pronóstico y garantizar su sostenibilidad.

- Avanzar hacia la asimilación de datos de productos satelitales y de otras redes de observación y perfiladores, que pueden utilizarse tanto para estudios de casos como de pronóstico. Con una capacidad informática adecuada, es posible pasar de modelos de área limitada a modelos globales multiescala y así estudiar la contaminación atmosférica en el contexto del cambio climático.
- Coordinar esfuerzos interinstitucionales en la producción, gestión y tratamiento de datos para generar productos útiles para la gestión de la calidad del aire.
- Aplicar algoritmos de aprendizaje automático para mejorar las parametrizaciones físicas de los modelos, en la estimación de emisiones, en el análisis de imágenes satelitales y salidas de modelos para ajustar los resultados, y con ello obtener mejores predicciones.

Fortalecer los recursos humanos

- Formar investigadores en el área de asimilación de datos, uso de información satelital, evaluación de modelos, evaluación del uso y aplicación del aprendizaje automático en los procesos realizados por los modelos, así como en la evaluación y post-procesamiento de los productos obtenidos en la modelación.
- Es necesario incrementar el número de personal técnico para el mantenimiento de la infraestructura de supercómputo y uso del software.

Desarrollar infraestructura

- Centralización de la infraestructura informática y virtualización de la prestación de servicios para dotar a entidades o instituciones de capacidades informáticas, o en su defecto asignar recursos a las entidades de la Megalópolis para la adquisición de la infraestructura.

Impacto de COVID-19 en la calidad del aire

Brechas de conocimiento y necesidades de investigación

- Se necesitan estimaciones precisas de las emisiones de NO_x y COV en la ZMVM y las regiones circundantes, para comprender los cambios en la formación de O₃, PM_{2.5} y otros contaminantes secundarios durante el período de confinamiento por el COVID-19.
- La experiencia durante la pandemia mostró un nuevo escenario que confirmó la compleja interacción entre las emisiones, la meteorología y la química atmosférica en la atmósfera urbana de la ZMVM.
- Comprender cómo cambió la composición química de los COV durante la pandemia.
- Existe evidencia suficiente de que, durante el confinamiento por COVID, el sector del transporte se vio fuertemente afectado, reduciendo sustancialmente la congestión vehicular, pero al mismo tiempo, incrementando el tránsito de vehículos de reparto de mercancías a domicilio. En términos generales el sector industrial también disminuyó sus actividades, algunas industrias más que otras. Se modificaron las actividades de preparación de alimento en el hogar, en la venta informal y el sector restaurantero. Sin embargo, aumentaron las emisiones de productos para uso personal, productos para el hogar, pinturas, agentes impermeabilizantes, basura doméstica, desechos, desinfectantes,

limpiadores, etc. Es necesario evaluar cómo modificaron sus operaciones los sectores de servicios y comercios.

- Es necesario comprender cómo la contribución de las emisiones domésticas (por ejemplo, productos de limpieza, preparación de alimentos, quema y fugas de GLP y gas natural, etc.) y de fuentes distintas a los automóviles y la industria (por ejemplo, incendios agrícolas y forestales, emisiones biogénicas, emisiones evaporativas de otras fuentes, etc.) contribuyen a la contaminación del aire e influyen en la producción de O₃ y aerosoles secundarios.
- Con base en lo que se observó durante las restricciones de COVID-19 en la ZMVM, los resultados indicaron que las reducciones en las emisiones de los vehículos e industrias provocaron la disminución de las concentraciones de los contaminantes primarios en el aire ambiente, sin embargo, para el O₃ no se observó una reducción en las concentraciones ¿por qué? ¿Cómo podría esto afectar las metas de gestión de la calidad del aire y las acciones que se aplican durante las contingencias ambientales?
- Dadas las reducciones observadas en PM_{2.5}, es necesario comprender cómo las disminuciones en las emisiones de precursores modificaron la química de la formación secundaria de aerosoles.
- Transporte regional de contaminantes atmosféricos durante el período de confinamiento:
 - ¿Cómo contribuyeron las fuentes de emisión de los estados cercanos a los niveles de contaminación del aire en la ZMVM?
 - ¿Cómo contribuyeron las emisiones de la ZMVM a los niveles de contaminación en los estados cercanos?
- Se necesita una caracterización exhaustiva de la reactividad atmosférica, la disponibilidad de los radicales y la formación de contaminantes secundarios, durante el período de confinamiento a través de estudios de modelación para comprender la calidad del aire durante el confinamiento.
- La disponibilidad de la especiación integral de los COV durante el confinamiento por COVID-19 permitirá evaluar los cambios en la reactividad de OH-COV.
- Se necesita una caracterización exhaustiva de la meteorología local y regional, y los diferentes escenarios durante el confinamiento para identificar cualquier mejora potencial en la ventilación (es decir, condiciones de viento) o condición favorable para la fotoquímica (es decir, radiación solar más intensa).
 - ¿Cuáles fueron las condiciones meteorológicas que contribuyeron a la alta producción/acumulación de O₃ y PM_{2.5} durante los días de alta contaminación?
 - ¿Qué patrones de viento regionales y locales ayudaron a dispersar los contaminantes durante el confinamiento?

3.4. Estudios de salud pública y contaminación atmosférica en la Megalópolis

Lecciones aprendidas

- ***Incorporación de resultados de estudios en salud en programas del control de la contaminación del aire.*** Los resultados de estudios recientes muestran evidencia de las correlaciones entre diversos tipos de morbilidad y las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, principalmente para PM_{2.5}. La investigación de los impactos en la salud incluye: efectos a nivel celular y ácido desoxirribonucleico (ADN), enfermedades pulmonares crónicas, diferentes tipos de cáncer, enfermedades metabólicas, efectos neurológicos, funciones de concentración-respuesta, y el valor estadístico de la vida. Existe un rango amplio de estudios que proveen evidencia de los impactos en salud por contaminantes atmosféricos. Sin embargo, es importante que estos resultados puedan incorporarse como soporte del diseño de normatividad y programas para reducir la contaminación atmosférica. Para ello, la comunidad científica en México debe abordar el tema de la representatividad y robustez de los resultados, para que puedan aportar al establecimiento de una base científica para el diseño de estrategias de control de la contaminación. Más aun, se deben crear mecanismos para reducir las brechas para una integración eficiente de los resultados de los estudios en salud en el diseño de políticas públicas, incluyendo las actividades para la prevención, y la disminución de la exposición a contaminantes dañinos a la salud.
- ***Divulgación de información para disminuir la exposición.*** Otro avance substancial ha sido la divulgación en tiempo real sobre las condiciones de la calidad del aire y sus posibles impactos en la salud en la población de la Megalópolis, con base en la información proveniente de las redes de monitoreo atmosférico disponibles. La divulgación continua de la información a través de aplicaciones, reportes públicos, medios informativos y de las redes sociales ayuda a la población a tomar decisiones informadas para la realización de sus actividades en espacios interiores y exteriores que permitan disminuir la exposición a contaminantes del aire, mejorando con ello la salud y la calidad de vida de las personas. Estas acciones han sido claves antes, durante y después de la declaración de las contingencias ambientales de O₃ y de partículas suspendidas en los programas de contingencias ambientales para alertar e informar a la población. Las actividades de divulgación de la información forman parte de las acciones listadas en los ProAire para la Megalópolis.
- ***La evidencia epidemiológica señala que no existe un umbral de exposición segura a material particulado y contaminantes gaseosos.*** De acuerdo con los resultados presentados, existe evidencia que sugiere que los efectos en la salud por la contaminación atmosférica no están relacionados a límites específicos. La mezcla de contaminantes atmosféricos en las diferentes zonas urbanas de la Megalópolis puede ser compleja, su caracterización química y los posibles efectos en la salud son retos importantes. Esto sugiere que la exposición a concentraciones de material particulado, incluso por debajo de las guías de calidad del aire de la OMS puede ser peligrosa para la salud de la población.

Preguntas científicas clave

- ***Representatividad de los estudios de morbilidad.*** Una pregunta clave tiene que ver con la necesidad de entender mejor la representatividad de los resultados obtenidos en los estudios

de morbilidad, tales como enfermedades metabólicas, diabetes, y efectos en el desarrollo neurológico, entre otras. Es importante saber si los resultados obtenidos en los estudios de morbilidad son lo suficientemente robustos para sustentar el desarrollo de nuevas iniciativas para políticas públicas y nuevas regulaciones.

- ***La integración de los resultados de estudios de salud en el diseño de políticas públicas.*** Un tema que debe abordarse entre la comunidad científica y los tomadores de decisiones es el establecimiento de los mecanismos para integrar los resultados de los estudios de salud en la agenda pública. Más allá del establecimiento científico de las relaciones entre efectos en la morbilidad y la exposición a contaminantes atmosféricos, es vital que la información generada asista en el desarrollo de estrategias de mejoramiento de la calidad del aire.
- ***Estudios de salud por exposición a otros contaminantes.*** Tradicionalmente los estudios en salud se han enfocado en contaminantes criterio como el O₃ y el material particulado. Sin embargo, la población en zonas urbanas típicamente se encuentra expuesta a complejas mezclas de gases y partículas. Así, existe la necesidad de expandir los estudios de los efectos en la salud por exposición a las mezclas químicas de COV, HAPs, contaminantes tóxicos, metales, nanopartículas y las complejas combinaciones de compuestos en el material particulado. Estas investigaciones son necesarias no solo para estudios de mortalidad sino también de morbilidad.
- ***Estudios de exposición.*** Es necesario aumentar y mejorar nuestro entendimiento de las características de la exposición a los contaminantes atmosféricos. Esto incluye también mejorar los mecanismos para generar la información necesaria para los estudios de exposición a nivel local y regional. Es importante determinar si los resultados de esos estudios pueden utilizarse para mejorar nuestro entendimiento de la exposición a los contaminantes del aire.
- ***Integración de otras metodologías.*** La mejora de las evaluaciones de exposición implica también reforzar la colaboración entre las agencias que generan la información, así como la integración de otras metodologías de generación de datos tales como información satelital, monitoreo personal, inventarios de emisiones, y de modelación de la calidad del aire. La integración de estas metodologías permitiría mejorar substancialmente la disponibilidad de las bases de datos necesarias para entender la exposición a contaminantes atmosféricos.

Retos científicos y necesidades de investigación

- ***Perfiles toxicológicos.*** Los resultados de los estudios toxicológicos muestran evidencia de causas biológicas y mecanismos que pueden explicar impactos en salud agudos, crónicos, y transgeneracionales. Existe sin embargo el reto de determinar los perfiles toxicológicos del contenido orgánico del material particulado en diferentes partes de la Megalópolis. Es importante conocer las diferencias regionales de los perfiles toxicológicos para correlacionarlos con impactos en salud específicos para grupos poblacionales en la Megalópolis.
- ***Impactos por mezclas de contaminantes atmosféricos y patógenos.*** El estudio de los impactos en salud por mezclas o combinación de contaminantes del aire con patógenos

(p.ej., virus) es todavía un reto importante que debe ser abordado por la comunidad científica. Esto incluye también la necesidad de desarrollar los métodos toxicológicos necesarios a utilizar para abordar el problema. La complejidad de este reto aumenta en la medida que la variabilidad de las distribuciones espaciales de los microorganismos patógenos y las concentraciones de los contaminantes atmosféricos sea grande dentro de la Megalópolis.

- ***Interacción entre el cambio climático, la calidad del aire y salud.*** Existe una compleja interacción en múltiples escalas entre el cambio climático y la calidad del aire. Sin embargo, es muy clara la conexión entre las fuentes de contaminación del aire local y las emisiones que impulsan el cambio climático. Además de los efectos adversos de los contaminantes antropogénicos en la salud humana, los contaminantes atmosféricos naturales como el polen, los compuestos orgánicos volátiles biogénicos, el humo de los incendios forestales y el polvo arrastrado por el viento pueden verse afectados por el cambio climático y convertirse en un riesgo cada vez mayor para la salud. La modificación del clima también inducirá cambios en los hábitos de la población, por ejemplo, el tiempo que los individuos permanecen en el interior, así como también modificará la disponibilidad y distribución de alérgenos derivados de plantas y hongos, esto tendrá efectos sobre el asma y la rinitis alérgica en niños y adultos, en consecuencia, será necesario abordar los ajustes de políticas y los cambios de estilo de vida necesarios para mitigar estos efectos nocivos.

Al estimar el impacto futuro en la salud, además de la incertidumbre en las concentraciones de O₃ y partículas suspendidas, existen incertidumbres en las estimaciones de riesgo, como la modificación del efecto por la temperatura en las relaciones entre contaminantes y en la respuesta humana, alterando la posible adaptación futura resultante de estos cambios y un potencial nuevo riesgo asociado a la exposición. Es necesario comenzar a evaluar las implicaciones del cambio climático en la salud humana y orientar las políticas hacia la mitigación del cambio climático y la contaminación del aire, potenciando así los beneficios para la salud y optimizando recursos y costos.

- ***Sistema de monitoreo de la salud.*** Una propuesta interesante es la de diseñar e implementar un sistema de monitoreo de la salud en conjunto con las redes de monitoreo ambiental existentes en la Megalópolis. La integración de los sistemas podría ayudar sustancialmente a la identificación temprana de acciones para mitigar la exposición a contaminantes del aire, incluyendo eventos extraordinarios como los presentados durante la pandemia de COVID-19. Más aun, la integración propuesta puede ayudar a mejorar la evaluación de la efectividad de los programas de control de la calidad del aire.
- ***Composición química del material particulado y tóxicos emergentes.*** Las asociaciones entre los impactos en salud y la toxicidad de las diferentes especiaciones químicas en el material particulado deben continuar y aumentarse, sobre todo para los componentes de HAPs, metales, CN y componentes orgánicos. Esto permitirá entender cómo la agregación química y la formación de aerosoles determinan la activación molecular de procesos fisiopatológicos de enfermedades agudas y crónicas. Se requiere también llevar a cabo estudios de partículas tóxicas emergentes como son las partículas ultrafinas, partículas de microplásticos y aquellas que no derivan de combustión como el desgaste de frenos y llantas, identificando sus fuentes de emisión y potencial tóxico.

- ***Métodos de estudios en salud.*** Para ayudar en el desarrollo de políticas para mejorar la calidad del aire, es necesario integrar los resultados de diferentes métodos de estudios epidemiológicos tales como ecológicos, series de casos, estudios cross-seccionales, controles de caso, estudios de cohorte, e intervenciones. Para los estudios en salud se deben integrar también modelos in vitro e in vivo de exposición a tóxicos, técnicas moleculares de alto rendimiento y parámetros de función fisiológica de enfermedades crónicas. Es necesario avanzar en el estudio de los efectos sinérgicos de la mezcla urbana, así como de los efectos de los contaminantes emergentes. Los modelos de exposición empleados en los estudios epidemiológicos se pueden beneficiar del uso de datos obtenidos de plataformas satelitales y de las tecnologías de bajo costo, así como de las salidas de ensambles de modelos numéricos.
- ***Datos sobre contaminantes criterio y de otras especies de interés.*** Se requieren datos de los contaminantes criterio con coberturas y resoluciones espaciales y temporales adecuadas, para los estudios epidemiológicos y de exposición. Es necesario mejorar la calidad de los datos para reducir la incertidumbre en las evaluaciones de los impactos. La evaluación de los efectos de los contaminantes emergentes requerirá de la aplicación de nuevas tecnologías en las redes de monitoreo y de la realización de campañas de campo.

Brechas de conocimiento:

- En el contexto mexicano, ¿existe nueva información científica sobre los efectos en la salud relacionados con la contaminación del aire? ¿Cuál ha sido la información reciente sobre contaminación del aire y salud?
- ¿Existe evidencia de efectos crónicos y agudos agravados por la exposición a la mala calidad del aire?
- ¿Existe evidencia de efectos sinérgicos relacionados con la exposición a las diversas mezclas de contaminantes encontradas en los distintos ambientes urbanos? ¿Existen datos suficientes para su evaluación?
- ¿Es necesario desarrollar factores de concentración respuesta adecuados para la población mexicana?
- ¿Cuáles son los costos sociales y económicos asociados con la contaminación del aire? ¿Es necesario desarrollar metodologías para apoyar las evaluaciones del costo beneficio en las entidades de la Megalópolis?
- ¿Cuáles han sido los avances para estimar mejor cuantitativamente los efectos de la calidad del aire en la salud?
- ¿Cuál es la contribución de la contaminación del ambiente exterior a la exposición en interiores?
- ¿Cuáles son los umbrales para la exposición a partículas y contaminantes gaseosos? ¿cuáles serían los retos para alcanzarlos?
- ¿Es necesario incluir algún otro contaminante o contaminantes, por ejemplo, partículas ultrafinas, HAPs, dentro de las regulaciones de calidad del aire ambiente?
- ¿Cómo modificará el cambio climático los impactos en la salud?

3.5. Gestión de la calidad del aire en la Megalópolis

Brechas de conocimiento

- ¿Cómo promover el desarrollo del conocimiento científico y promover la creación de centros de investigación fuera de la Ciudad de México?
- ¿Cómo promueve el gobierno federal el trabajo científico y el desarrollo de capacidades en las entidades de la Megalópolis?
- ¿Qué datos adicionales se necesitan para diseñar y evaluar las medidas de los ProAires de las entidades de la Megalópolis?
- ¿Cuáles son las principales necesidades de investigación en cada uno de los centros urbanos de la Megalópolis?
- La evidencia disponible sugiere que la química y la física de la atmósfera de la ZMVM están cambiando ¿cómo puede el gobierno liderar una nueva campaña integral de monitoreo para la Megalópolis?
- ¿Cuáles son las lecciones científicas aprendidas para la gestión ambiental de las restricciones durante la pandemia de COVID-19?

Papel de la CAME en la coordinación de la gestión regional de la calidad del aire

La Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) fue creada en 2013 como un órgano de coordinación para la planeación y ejecución de políticas, programas, proyectos y acciones en materia de protección al ambiente, preservación y restauración del equilibrio ecológico, en la región que conforma la Megalópolis del centro de México.

La CAME está integrada por siete entidades federativas: la Ciudad de México y los estados de Hidalgo, México, Morelos, Querétaro, Puebla y Tlaxcala y también por cuatro Secretarías del gobierno federal: La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), la de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) y la de SALUD. Cuenta con un Órgano de Gobierno, que está integrado por los Titulares de las Secretarías federales, los Gobernadores de los estados y el Jefe de Gobierno. Cuenta también con un Comité Científico Asesor, constituido por 15 científicos, académicos y expertos en materia ambiental, quienes tienen la facultad de asesorar y brindar sus opiniones y recomendaciones sobre las acciones prioritarias de la Comisión.

Para su operación y funcionamiento, la CAME cuenta con una Coordinación Ejecutiva, que convoca a las sesiones del Órgano de Gobierno, propone acciones y da seguimiento a los acuerdos. El Coordinador Ejecutivo articula la actuación de ocho Grupos de Trabajo, integrados por el personal técnico de las Entidades e Instituciones participantes en la CAME.

La CAME cuenta con el Fideicomiso 1490 Para apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis (FIDAM 1490). Éste recibe aportaciones anuales de \$5.00 pesos por cada verificación vehicular realizada en los centros de verificación de las entidades de la

CAMe. El FIDAM 1490 también puede recibir aportaciones de otras fuentes como donaciones, remanentes de economías presupuestarias de sus integrantes, entre otras.

La CAMe podría fortalecerse con acciones como las siguientes:

- Incluir como integrante de la Comisión a la Secretaría de Energía (SENER) y a la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (HACIENDA) del gobierno federal, para reforzar la implementación de políticas, programas y acciones ambientales regionales de alto impacto.
- Crear un Consejo Consultivo integrado por representantes de organizaciones ambientales de la sociedad civil, y cámaras y asociaciones empresariales y de servicios del sector ambiental, donde puedan opinar y dar seguimiento a temas de interés común, así como promover el diálogo constructivo entre las autoridades ambientales y la sociedad civil en general.
- Fomentar aportaciones y donaciones al FIDAM 1490 provenientes de otras fuentes, como la verificación vehicular obligatoria de emisiones de vehículos de placa federal que realiza la SICT, aportaciones por las industrias con mayores emisiones de contaminantes, y fortalecer el compromiso de las aportaciones derivadas de la verificación vehicular estatal.
- Avanzar en otros temas ambientales prioritarios en los que la CAMe puede contribuir a armonizar programas y acciones, por ejemplo, en la atención simultánea y armonizada de la calidad del aire y el cambio climático, economía circular, temas de calidad del agua, residuos y movilidad y transporte, así como de conservación de Áreas Naturales Protegidas, entre otros.
- De inicio, tomar como una prioridad apoyar el impulso de las medidas establecidas en los ProAires de las entidades para reducir las emisiones de los contaminantes en las cuencas atmosféricas de la región.
- Impulsar la evaluación basada en evidencia de la efectividad de los programas y proyectos en las decisiones presupuestarias y las políticas públicas, incluyendo la creación de requisitos de desempeño en subvenciones y contratos para garantizar que los programas se ejecutan y cumplen con sus objetivos de manera efectiva.

Monitoreo de la calidad del aire

Si bien la ZMVM tiene una red de monitoreo de la calidad del aire bien desarrollada que comprende gran parte del área urbana, la cobertura espacial del monitoreo de calidad del aire en la creciente zona conurbada de la Ciudad de México y el resto de la Megalópolis es limitada. A nivel de la Megalópolis el monitoreo está restringido a los centros urbanos. Además, existe una disparidad importante en la calidad de los datos.

La CAMe tiene la oportunidad de contribuir con su liderazgo en la gestión para mejorar las condiciones del monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis. En la Sección 3.1 anterior se listan una serie de valiosas recomendaciones que deben ser gestionadas por la CAMe y las autoridades ambientales para mejorar la cantidad, cobertura, y calidad de los datos de las redes monitoreo, destacando:

- Desarrollar capacidades estratégicas de la Red Regional de Monitoreo, incluyendo diferentes tipos de sitios (urbanos, periurbanos, rurales).

- Proporcionar apoyo financiero para mejorar la infraestructura y las capacidades técnicas de la red de monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis, incluida la capacitación en el análisis y validación de datos satelitales.

Inventarios de emisiones

Los inventarios de emisiones son una herramienta esencial de gestión de la calidad del aire para evaluar el progreso de las estrategias de control de emisiones y planificar acciones futuras. En el Capítulo 3 se presenta una descripción detallada de los retos y recomendaciones para mejorar los inventarios de emisiones.

El inventario de emisiones de la ZMVM está bien desarrollado y se utiliza para informar las estrategias de reducción de emisiones. En la Sección 3.2 anterior se describieron los retos y las oportunidades que existen para mejorar los inventarios de emisiones en la Megalópolis y que puedan ser verdaderamente útiles en la gestión de la calidad del aire. La CAME puede contribuir decisivamente en la implementación de las recomendaciones listadas en la Sección 3.2 al fungir como líder el proceso de gestión de la calidad del aire en la Megalópolis. Dentro de las áreas de oportunidad que se pueden destacar se incluyen:

- Verificar los objetivos del inventario y su alineación con las necesidades de la gestión.
- Mejorar la cobertura y resolución espaciales.
- Revisar los perfiles de emisiones y la especiación química.
- Incrementar la resolución temporal.
- Publicar la información de los cálculos e incertidumbres.

En todos los casos es necesario incluir o mejorar la información sobre las fuentes de área relacionadas con el uso de solventes en los sectores residencial, comercial y de servicios. Se requieren estudios específicos para obtener o mejorar los factores de emisión y datos de actividad, así como para las distribuciones temporales y la especiación química.

Modelación y pronóstico de la calidad del aire

El gobierno de la Ciudad de México ha implementado un sistema de pronóstico de calidad del aire para alertar al público sobre la alta contaminación por O₃ y partículas suspendidas con 24 horas de anticipación, y en la evaluación de las políticas de reducción de emisiones para mejorar la calidad del aire y otros beneficios colaterales. Aún persisten desafíos sustanciales en la implementación del sistema de pronóstico de la calidad del aire en el resto de las Megalópolis debido a la falta de datos e investigación para respaldar los esfuerzos de modelación y pronóstico, así como al limitado personal técnico calificado.

Hay esfuerzos de parte de las instituciones académicas para pronosticar la calidad del aire. El ICAyCC-UNAM cuenta con un modelo de pronóstico a 72 horas basado en WRF-CHEM para CO, NO_x, O₃, PM₁₀ y SO₂ con una cobertura espacial que comprende a la Ciudad de México y las entidades aledañas, las salidas gráficas se encuentran disponibles para consulta en línea. Existen otros esfuerzos de modelación y pronóstico en el sector académico y otras entidades, pero la información no es pública.

La CAME podría proporcionar los recursos financieros y ser un catalizador para desarrollar un sistema para el modelo y pronóstico de la calidad del aire en las entidades de la Megalópolis, incluyendo la colaboración con expertos nacionales e internacionales para brindar capacitación en modelación y pronóstico de la calidad del aire.

Transporte y movilidad: integración transporte-uso del suelo-gestión de la calidad del aire

La expansión urbana descontrolada y el aumento de la motorización en la Megalópolis son los principales orígenes de la contaminación del aire y de la congestión vial. La creación de un sistema de transporte equilibrado con el medio ambiente requiere de una estrategia transversal que integre al sector transporte, cambios en el uso del suelo, la gestión de la calidad del aire, y que involucre a los diferentes organismos responsables (medio ambiente, transporte, desarrollo urbano, energía y obras públicas) y con participación pública. El objetivo sería una menor dependencia de los vehículos individuales a través de la provisión de un mejor transporte público y de medidas que permitan realizar más desplazamientos a pie o en bicicleta. Algunas de las acciones en que la CAME debe tomar un liderazgo para su implementación incluyen:

- Impulsar la infraestructura para la movilidad activa o no motorizada.
- Desarrollar políticas públicas para la ubicación óptima de infraestructura y equipamiento (ciudades compactas con usos mixtos del suelo).
- Desarrollo de sistemas de transporte masivo inter e intraurbano (carga y pasajeros).
- Orientar el desarrollo urbano de la Megalópolis hacia la contención de su expansión (densificación del territorio).
- Estudios de origen-destino más frecuentes para la planificación de infraestructuras y para mejorar las operaciones.
- Promover la movilidad sostenible (teletrabajo, transporte público de alta capacidad, caminar y andar en bicicleta).
- Establecer incentivos para la introducción de vehículos de baja emisión, como automóviles eléctricos e híbridos, así como motocicletas eléctricas.
- Considerar la limitación del uso de vehículos privados en áreas muy transitadas.

Ciencia de la atmósfera

Las observaciones actuales en la ZMVM y otras entidades de la Megalópolis indican que las concentraciones atmosféricas de contaminantes como el O₃ y las partículas suspendidas no han disminuido a límites aceptables y muestran incrementos en los últimos años, lo que plantea la necesidad de actualizar el estado del conocimiento científico de los procesos que controlan la formación, el transporte y el destino de estos contaminantes. La comprensión sólida de los cambios en la meteorología, en las emisiones y los procesos que controlan la formación de O₃ y otros contaminantes secundarios en la ZMVM y sobre todo en la región de la Megalópolis, es fundamental para el diseño de nuevas acciones políticas. En la Sección 3.3 anterior se describieron los retos y las oportunidades que existen para mejorar nuestro conocimiento de los procesos atmosféricos en la Megalópolis. A continuación, se describen algunas de las necesidades de

investigación que la CAME debe promover para el desarrollo de estrategias de gestión de la calidad del aire.

- ***Se necesitan mediciones atmosféricas extensivas y estudios de modelación*** para definir estrategias óptimas de control de emisiones para cada entidad particular en la Megalópolis, considerando las circunstancias institucionales, técnicas, económicas, sociales y políticas locales.
 - La aplicación y validación de modelos de calidad del aire requiere de datos de emisiones con alta resolución espacial y temporal, así como del conocimiento de la meteorología y la radiación solar. Además de la medición de los contaminantes medidos comúnmente como el O₃, óxido nítrico (NO), NO₂, CO y la masa de las partículas suspendidas, se necesitan mediciones de COV individuales y de la composición química de las partículas. Esta información detallada requerirá estudios especiales para comprender mejor las causas de tales emisiones y evaluar el progreso en su reducción.
 - Los responsables de la formulación de políticas deben utilizar esta información para equilibrar los beneficios económicos y sociales de las mejoras sanitarias con los costos del control de emisiones.
- ***Impactos del cambio climático en la calidad del aire y la salud.*** El cambio climático puede afectar la calidad del aire y, a la inversa, la calidad del aire puede afectar el cambio climático. Las emisiones de gases de efecto invernadero (por ejemplo, CO₂, N₂O) y forzadores climáticos de vida corta (CH₄, CN, O₃) en el aire, pueden provocar cambios en el clima.
 - Perfeccionar el conocimiento de los impactos del cambio climático en la salud humana y el medio ambiente en la región de la Megalópolis, mejorando la capacidad de los administradores estatales y locales de calidad del aire para considerar el cambio climático en sus decisiones para proteger la calidad del aire y reducir los impactos de un clima cambiante, así como las comunidades para abordar el cambio climático de manera efectiva y sostenible.
 - Integrar la mitigación del cambio climático y los inventarios de emisiones con la gestión de la calidad del aire, como se ha hecho en la Ciudad de México.
 - Cuantificar los beneficios sanitarios y económicos de reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos y de gases de efecto invernadero.
 - Proporcionar herramientas y recursos para desarrollar un sistema energético más sostenible.
 - Evaluar cómo las diferentes estrategias de control multi-contaminante/multi-sectorial pueden afectar los gases de efecto invernadero y otras emisiones de contaminantes atmosféricos.
 - Desarrollar información y recursos basados en evidencia para informar al público y a las comunidades para prepararse mejor sobre las posibles amenazas climáticas creadas por incendios forestales, inundaciones, sequías y otros eventos extremos, particularmente en las poblaciones más vulnerables.

Impactos de la contaminación del aire

La contaminación del aire afecta negativamente a la salud humana, causa el deterioro de la visibilidad a escala regional y deposición ácida, daña los cultivos y los ecosistemas. La mayoría de los estudios en México se han centrado en comprender los impactos de los contaminantes del aire en la salud humana. Existen lagunas de información sobre los impactos en los cultivos, los bosques, los ecosistemas, el patrimonio cultural y la infraestructura pública y privada. Las políticas y programas para el control de la calidad del aire en la Megalópolis han incorporado algunos de los resultados de los estudios de salud sobre partículas y O₃. Sin embargo, persisten preguntas y cuestiones clave sobre la relación entre los efectos crónicos y agudos para la salud, que se ven agravados por la exposición a la mala calidad del aire, y la cuantificación de los costos y beneficios para la salud del control de las principales fuentes de emisión. En la Sección 3.4 anterior se describieron con detalle los retos y las oportunidades que existen para mejorar nuestro conocimiento de los impactos en salud y ecosistemas en la Megalópolis por la contaminación atmosférica. A continuación, se describen algunas de las necesidades de investigación que la CAME debe promover para el desarrollo de programas que mejoren la estimación de estos impactos.

- Proporcionar recursos suficientes para la investigación sobre la contaminación del aire y la salud.
- Generar estándares y regulaciones para otros tóxicos ambientales de interés para la región, por ejemplo, benceno, hidrocarburos poliaromáticos, entre otros.
- Realizar más estudios sobre la composición de partículas para estimar sus riesgos en la salud.
- Fortalecer y mejorar los sistemas de vigilancia de la contaminación del aire y de salud.
- Fortalecer los estudios sobre los impactos y beneficios de los programas de gestión de la calidad del aire en la salud.
- Generar conocimiento científico sobre los impactos de la contaminación del aire en los ecosistemas, los bosques, la vegetación, los cultivos.
- Generar evidencia sobre los efectos de la lluvia ácida en los cultivos, cuerpos de agua, el patrimonio cultural, en la infraestructura pública y privada.

Comunicación, desarrollo de capacidades y participación de las partes interesadas

El éxito y la sostenibilidad de las políticas ambientales dependen de altos niveles de conciencia ciudadana y de la participación informada de las partes interesadas. Los cambios permanentes en las actitudes y el comportamiento de la población requieren del desarrollo de una cultura ambiental y mejoras en la educación. Muchas políticas no funcionarán a menos que las partes interesadas se apropien de ellas y compartan la responsabilidad de su implementación. Su participación puede proporcionar apoyo a medidas impopulares pero rentables adoptadas en aras del interés público, especialmente si estas medidas son transparentes para la población. Es esencial, mejorar la capacidad de los recursos humanos necesarios para diagnosticar problemas ambientales, así como para formular, ejecutar y evaluar las políticas y programas destinados a mejorar la calidad del aire.

Personal más capacitado mejorará el desempeño del gobierno, los sectores privado y académico, y las organizaciones no gubernamentales. La CAME debe ser líder en la gestión de la calidad del aire fomentando la implementación de las siguientes recomendaciones:

- Apoyar las actividades educativas en curso de las entidades de la Megalópolis destinadas a la sensibilización ambiental del público en general.
- Asignar recursos financieros para programas de educación ambiental.
- Apoyar la investigación sobre la contaminación del aire en universidades e instituciones gubernamentales para fortalecer la capacidad de gestión ambiental en las agencias gubernamentales federales, estatales y locales, así como en los sectores industrial y académico.
- Desarrollar información y recursos basados en evidencia para mejorar la comunicación con el público y a las comunidades de tal manera que puedan estar mejor preparados para las posibles amenazas climáticas creadas por incendios forestales, inundaciones, sequías y otros eventos extremos, particularmente entre las poblaciones más vulnerables.
- Involucrar a las partes interesadas y al público en general en el diseño e implementación de estrategias de reducción de emisiones, incluido el desarrollo de campañas de información sobre los beneficios de reducir las emisiones para la población.
- Involucrar a las comunidades y grupos no gubernamentales en estudios de monitoreo y detección de áreas de alta contaminación mediante el uso de sensores de bajo costo.

4. CONCLUSIONES

A partir de la década de 1980 se implementaron programas de mejoramiento de la calidad del aire basados en consideraciones científicas, técnicas, sociales, políticas y económicas, que lograron un progreso significativo en la mejora de la calidad del aire en la ZMVM, como lo demuestra la reducción sustancial en las concentraciones de contaminantes criterio. Sin embargo, las tendencias de la concentración de O₃ y PM_{2.5} se han estancado, y la evidencia reciente sugiere que la producción de contaminantes secundarios ha aumentado, lo cual indica que aún hay trabajo por hacer antes de que cumpla con los límites legales actuales para la protección de la salud de la población.

La Megalópolis incluye a los centros de población más importantes en las siete entidades del centro del país, donde el fenómeno del crecimiento de población y del espacio urbano no ha sido homogéneo y ha resultado con frecuencia en zonas de menor densidad de población y en la necesidad de trasladarse grandes distancias. Aunque la CAME se estableció para coordinar las políticas y programas regionales, las diferentes jurisdicciones administrativas y legislativas, así como la disparidad en los recursos disponibles mantiene un desafío constante para la gestión. Hay limitaciones severas en el monitoreo de la calidad del aire, desarrollo de inventarios de emisiones, y de estudios de contaminación del aire en los estados, lo que dificulta la evaluación de la calidad del aire y sus impactos en la región. La ZMVM y las otras entidades de la Megalópolis enfrentan desafíos adicionales por el calentamiento urbano y los cambios de temperatura asociados con el cambio climático global, así como el impacto de la pandemia de COVID-19.

Para abordar los múltiples desafíos de la contaminación del aire, el cambio climático y la protección de la salud que enfrenta la Megalópolis, es esencial colaborar con expertos nacionales e internacionales en ciencias atmosféricas, salud pública, ciencias sociales y políticas, y en economía para participar en investigaciones interdisciplinarias que conduzcan, tanto a evaluaciones holísticas de los complejos problemas ambientales como al desarrollo de estrategias prácticas y soluciones rentables para proteger la salud pública y el ecosistema. Además, será necesario desarrollar estrategias para superar las barreras sociales, económicas y políticas características de los problemas megalopolitanos, incluido el compromiso político y el seguimiento, marcos institucionales, políticas e instrumentos con objetivos y prioridades claros, un mayor conocimiento sobre los impactos y las soluciones, acceso a recursos financieros adecuados, monitoreo y evaluación, procesos de gobernanza inclusivos, consulta con las partes interesadas pertinentes y divulgación pública.

Si bien la ciencia adecuada y las tecnologías bien elegidas pueden dirigir el camino hacia medidas regulatorias correctivas, ningún desarrollo científico y tecnológico puede ayudar sin un fuerte compromiso del gobierno. Se necesita liderazgo político para implementar efectivamente acciones megalopolitanas integrales pasando a través de jurisdicciones superpuestas y conflictivas en la Megalópolis en horizontes de corto plazo. Un resultado exitoso sería llegar a estrategias de control armonizadas que sean efectivamente implementadas y adoptadas por la sociedad.