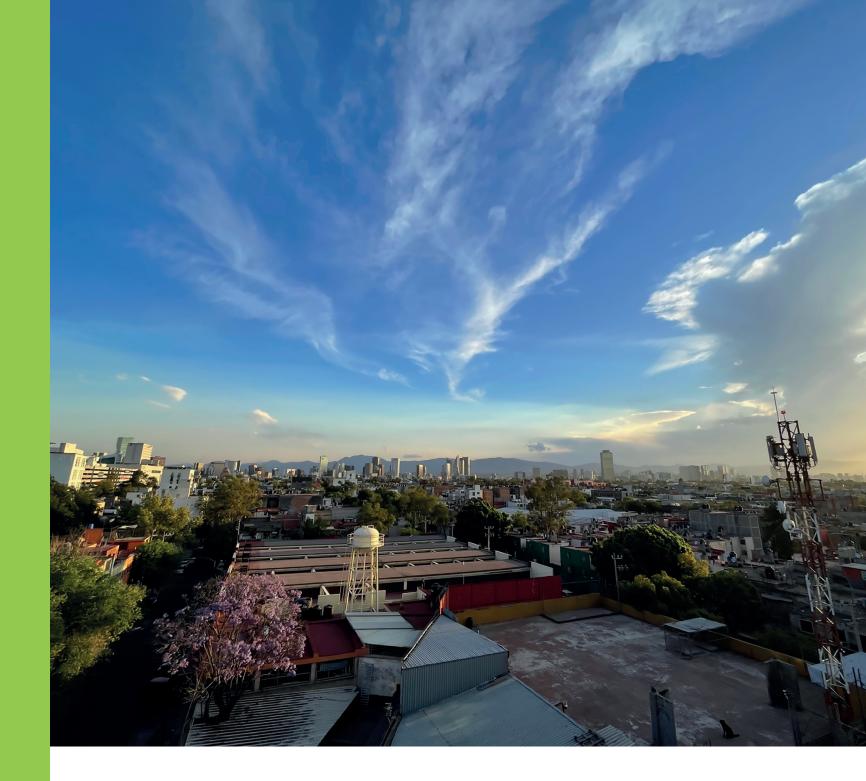


Diagnóstico de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México Cuando las concentraciones de ciertos compuestos o sustancias superan los niveles presentes de forma natural en el aire, estos pueden perjudicar la salud humana y producir efectos nocivos sobre el medio ambiente.





El presente capítulo se elaboró con las aportaciones y revisiones de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, en específico de la Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire, la cual validó los indicadores de calidad del aire que se presentan.

La calidad del aire define la condición del aire que se respira en un lugar y tiempo específico. Una buena calidad del aire corresponde a un estado del aire claro y libre de contaminantes. En cambio, una mala calidad del aire indica la presencia de com-

puestos o sustancias que, en función de su concentración y tiempo de permanencia en la atmósfera, superan la concentración de los compuestos presentes de forma natural y pueden perjudicar a la salud humana y/o producir efectos nocivos sobre el medio ambiente. La contaminación atmosférica incluye humo, polvo, el *smog fotoquímico*, entre otras impurezas gaseosas que se originan por varios procesos naturales como erupciones volcánicas, relámpagos, incendios forestales y procesos biológicos de la vegetación y los microorganismos en el suelo. A estas fuentes se suman procesos an-

tropogénicos relacionados con el uso y generación de energía, el transporte, actividades industriales, el uso de productos químicos, actividades agropecuarias y la disposición de residuos.

La industrialización, el crecimiento poblacional, los procesos de urbanización y la densificación de las ciudades son factores que reúnen a una gran cantidad de personas en áreas relativamente pequeñas; de esta forma, la contaminación de origen antropogénico es emitida con mayor frecuencia cerca de los lugares donde vive y trabaja una cantidad significativa de población. La contaminación atmosférica aumenta el riesgo de padecer enfermedades respiratorias y cardiovasculares (OMS, 2018), adenegativos asociados con la disminución en la proel incremento de los recursos económicos que necesitan destinarse para atender los problemas que la contaminación atmosférica genera (Harvard En este capítulo se analizan las herramientas dis-T.H. Chan School of Public Health & SEDEMA, 2018; Trejo-González et al., 2019).

minar el estado de la contaminación atmosférica

usando una serie de indicadores estadísticos que permiten evaluar las características del aire en un lugar y tiempo determinados. Estos indicadores se comparan con límites de concentración preestablecidos en la normatividad mexicana, por encima de los cuales existe un nivel de riesgo específico para la salud de la población. En el Valle de México, el comportamiento temporal y espacial de los contaminantes depende directamente de las fuentes de emisión, las características orográficas de la zona y los fenómenos meteorológicos a escala local, regional y sinóptica, por lo que para preservar la salud de la población y evitar el deterioro ambiental, también es necesario entender cómo estos fenómenos inciden en la formación y más de que puede generar impactos económicos los niveles de concentración de los contaminantes, a favor o en detrimento de la calidad del aire, y ductividad de personas con problemas de salud y así lograr controlar las emisiones de diversos compuestos hacia la atmósfera.

ponibles para la evaluación y seguimiento de los niveles de contaminación, así como la problemática de la calidad del aire en la ZMVM, a través de La gestión de la calidad del aire requiere deter- sus tendencias históricas y los niveles de contaminación presentes durante el 2018.

3.1 Características de los contaminantes atmosféricos

Los contaminantes y sustancias químicas en la dos directamente por alguna fuente de emisión se diente; existen interacciones entre las diferentes es- que a aquellos que se generan como resultado de formar nuevos contaminantes. El ciclo de vida y la se les denomina contaminantes secundarios. transformación de los contaminantes atmosféricos depende a su vez de las condiciones meteorológi- A los principales contaminantes que afectan a la y la humedad. Es así que una perturbación en los niveles de las emisiones o de una variable meteorológica puede derivar en cambios significativos y no-lineales en el comportamiento de los contaminantes en el aire ambiente, con mecanismos de retroalimentación y respuesta que amplifican o amortiguan las perturbaciones iniciales (Seinfeld & Pandis, 2006). A los contaminantes que son emiti-

atmósfera no se comportan de manera indepen- les denomina contaminantes primarios, en tanto pecies, las cuales pueden reaccionar entre sí para transformaciones físicas y químicas en la atmósfera

cas, tales como la radiación solar, la temperatura salud humana y a los ecosistemas, cuyos niveles de concentración en la atmósfera están regulados por la normatividad mexicana, se les denomina contaminantes criterio; estos son: dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), plomo (Pb), ozono (O₃) y partículas suspendidas de diámetro aerodinámico menor a 10 y 2.5 micrómetros (PM₁₀ y PM₂₅ respectivamente). La Tabla 3.1 resume las características físicas y

químicas de estos contaminantes en términos de su comportamiento, reactividad, formación y mecanismos de remoción en la atmósfera. Con el fin de complementar la descripción del NO₂ y las partículas suspendidas, se incluyen al óxido nítrico (NO) y las partículas ultrafinas (<0.1 µm) en el análisis. Se describen también otros tres tipos de contaminantes que si bien no se clasifican como criterio, inciden en la calidad del aire dentro de la ZMVM: los compuestos orgánicos volátiles (COV), los cuales participan en reacciones de formación de contaminantes secundarios, el carbono negro (CN), un tipo específico de partículas suspendidas que por sus características afecta a la visibilidad y el clima, además de poder ocasionar efectos adversos sobre la salud, y el amoniaco (NH₃), un importante precursor de partículas suspendidas.

La transformación de los contaminantes atmosféricos depende de:









Humedad

Radiación

Temperatura

Tipos de contaminantes





Primarios

Generados por alguna fuente de emisión

Resultado de transforma-

ciones físicas y químicas en la atmósfera

Contaminantes criterio

Aquellos cuya concentración en el aire ambiente está normada





Tabla 3.1 Características principales de los contaminantes atmosféricos

Contaminante	Criterio	Fórmula química / abreviación	Características físicas y químicas	Reactividad atmosférica	Mecanismos de remoción	Fuente principal de emisión	Concentración de fondo
Dióxido de azufre	Sí	Origen Predominantemente primario	Gas incoloro e irritante, perceptible a partir de una concentración de 300 ppb y con un olor fuerte por encima de las 500 ppb. Es soluble en agua.	En presencia de humedad forma ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄), precur- sor de aerosoles secundarios ultrafinos (<0.1 μm). Se oxida para formar sulfatos (SO ₄ ²), componente mayoritario de las partículas suspendidas.	Oxidación química y deposición ácida húmeda y seca sobre el suelo, la vegetación, los cuerpos de agua o la infraestructura gris en la ciudad.	La refinería y termoeléctrica de Tula y el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, donde se quema combustóleo (Alcántar González & Cruz Gómez, 2011), las emisiones volcánicas, la combustión de combustibles fósiles con contenido de azufre (como la gasolina, el diésel y el carbón) y la manufactura química (SEDEMA, 2018e).	10 ppt a 1 ppb; en aire contaminado los niveles pueden superar las 30 ppb (Jacobson, 2012).
Óxido nítrico¹	No	Origen Predominantemente primario	Gas incoloro, poco soluble en agua y un radical libre.	En la atmósfera se oxida para formar NO ₂ . Es precursor del ácido nítrico (HNO ₃) ² y nitratos (NO ₃). Participa en reacciones de formación de O ₃ . Puede formarse por reacciones de fotólisis de otros óxidos de nitrógeno (NO _X).	Oxidación química, donde el producto principal es el NO2. También puede removerse por disolución en agua y deposición sobre superficies.	Producto principal de procesos de combustión a alta temperatura, por la oxidación del nitrógeno en los combustibles y la reacción entre el oxígeno y el nitrógeno atmosféricos. Principales fuentes: autos particulares, tractocamiones y autobuses (SEDEMA, 2018e) y fuentes naturales como la actividad volcánica, incendios forestales, descargas eléctricas atmosféricas y la actividad de plantas y microorganismos en el suelo.	5 ppt en aire limpio; en zonas urba- nas puede llegar a 100 ppb durante las primeras horas de la mañana (Jacobson, 2012).
Dióxido de nitrógeno¹	Sí	Origen Predominantemente secundario	Gas tóxico e irritante de color marrón-amarillento, soluble en agua.	Se oxida para formar ácido nítrico (HNO3) y nitratos (NO3), componentes y precursores de partículas suspendidas. Es in- termediario entre la formación de O3 a partir de NO.	Oxidación química, disolución en agua, reacciones atmosféricas, fo- tólisis, deposición ácida húmeda y seca sobre el suelo, la vegeta- ción, los cuerpos de agua o la infraestructura gris en la ciudad.	Oxidación atmosférica de NO. En menor magnitud el uso de combustibles fósiles y la quema de biomasa; solo entre el 5 y 15% de las emisiones totales directas de NOx corresponden a NO2, aunque el NO emitido se oxida rápidamente para formar NO2 (Jacobson, 2012).	10 a 50 ppt; en zonas contaminadas se registran niveles de 50 a más de 250 ppb (Jacobson, 2012).
Ozono	Sí	Origen Secundario	Gas oxidante e irritante que se caracteriza por un olor fuerte (metálico y picante) cuando excede 20 ppb. También es un contaminante climático de vida corta.	Se forma a partir de reacciones fotoquímicas entre los NO _x y compuestos orgánicos volátiles (COV), en presencia de radiación solar, que tienen como resultado la formación del <i>smog fotoquímico</i> ³ .	Fotólisis, reacciones atmosféricas en fase gaseosa y sobre superficies, disolución en agua, así como procesos de deposición en la vegetación, la cual puede absorber parte del O ₃ (Heald & Spracklen, 2015).	Oxidación de COV iniciada por radicales libres en presencia de NO _x y radiación solar (Jaimes, 2017). La formación depende no solamente de la concentración absoluta de COV y NO _x , sino también de su relación ⁴ . Para una descripción detallada de las reacciones de formación de O ₃ , consultar el Anexo 3.1.	En la tropósfera la concentración de O₃ incrementa con la altitud: entre 20 y 40 ppb a nivel del mar, y entre 30 y 70 ppb a altitudes mayores (Jacobson, 2012). Para el caso de la ZMVM, se estima que la concentración de fondo oscila entre las 10 y 45 ppb (SEDEMA, 2018a, 2020a).
Compuestos orgánicos volátiles	No	Origen Primario	Compuestos orgánicos con una alta volatilidad a tem- peratura y presión ambien- te. Se clasifican como COV a aquellos con un punto de ebullición menor a 250°C a una presión de 101.3 kPa (US EPA, 2017).	Participan en reacciones foto- químicas atmosféricas para for- mar contaminantes secundarios como O ₃ y aerosoles orgánicos. Los COV reaccionan a diferentes tasas y con mecanismos de reacción distintos, en función de su estructura química.	Oxidación por reacciones en la atmósfera y deposición sobre superficies y vegetación. Su compleja reactividad y la gran variedad de compuestos hace que el monitoreo y regulación sea más difícil.	Fuentes antropogénicas que incluyen una gran variedad de actividades de la población. Se destacan las fugas en instalaciones de gas L.P., uso y fabricación de solventes, artículos de limpieza, pinturas y barnices. La vegetación, la descomposición de residuos orgánicos y las aguas residuales son otras fuentes de COV. El metano (CH ₄) es el COV que más se emite; otros ejemplos son el propano, butano, etanol, tolueno, benceno, entre muchos otros.	Para metano (CH ₄), la concentración de fondo es de alrededor de 1.85 ppm. Otros COV están presentes de forma natural en concentraciones por debajo de decenas de ppb (Williams, 2004).
Monóxido de cárbono	Sí	Origen Predominantemente primario	Gas inodoro, incoloro e insípido, altamente tóxico, cuyo monitoreo es relevante por sus efectos a corto plazo sobre la salud de las personas.	No tiene una contribución significativa en la formación de contaminantes secundarios. En la atmósfera se oxida a dióxido de carbono (CO ₂).	Oxidación química. En menor magnitud por disolución en agua o deposición sobre superficies y vegetación.	Después del dióxido de carbono (CO ₂) y el agua, es el segundo gas que más se emite a la atmósfera, aunque con mayor variabilidad espacial y temporal. Su principal fuente son los procesos de combustión incompleta de combustibles fósiles, como gas natural, gas propano, gasolina, petróleo, queroseno, carbón y materia orgánica (madera, biomasa). La principal fuente es el transporte con vehículos motorizados que utilizan combustibles fósiles.	50 a 150 ppb; en aire contaminado, entre 2 y 10 ppm; >100 ppm en túneles y vialidades primarias con niveles significativos de tránsito vehicular (Jacobson, 2012).

¹ Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son un grupo de compuestos formados por oxígeno y nitrógeno. Por sus efectos a la salud y reactividad, el NO_y el NO_z son importantes en la evaluación de la calidad del aire, aunque al grupo pertenecen también otras especies como el óxido nitroso (N_2O_y) y el pentóxido de nitrógeno (NO_s). En temas de calidad del aire, el término NO_x hace referencia a la suma de las concentraciones de NO_y NO $_z$. Actualmente los niveles de NO_z 0 en la atmósfera no son regulados en el país, en tanto que las acciones de monitoreo y regulación se centran en el NO_z .

² El carácter ácido del H₂SO₄ y el HNO₃, así como de los aerosoles secundarios que se forman a partir de ellos, juega un papel importante en los procesos de deposición ácida húmeda y seca. La deposición ácida ocurre cuando sustancias ácidas en la atmósfera se depositan sobre el suelo, la vegetación, los cuerpos de agua o la infraestructura gris en la ciudad, lo que puede tener efectos negativos como la lixiviación de nutrientes en el suelo, afectaciones sobre el crecimiento vegetal, mala calidad del agua y costos asociados al mantenimiento de infraestructura. Cuando el proceso es directo, se le conoce como deposición ácida seca, mientras que la deposición ácida húmeda ocurre cuando las partículas y gases ácidos se disuelven en las gotas de agua que forman las nubes o que se encuentran suspendidas en la atmósfera (niebla, neblina), con su subsecuente remoción cuando llueve o cuando las gotas se depositan sobre una superficie (Jacobson, 2012).

³ Una mezcla de ozono, aerosoles y otros oxidantes como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y el peroxiacetil nitrato (PAN) que, entre otras características, limitan la visibilidad y tienen efectos perjudiciales sobre la salud de la población (Wang, Pereira, & Hung, 2004). En el Anexo 3.1 se puede consultar una descripción más detallada de las reacciones de formación de ozono.

⁴ La formación de ozono puede estar limitada por COV o NOx. En una atmósfera limitada por NOx (COV/NOx>>10) la concentración de O3 se reduce de manera efectiva cuando se disminuye la concentración de NOx. Caso contrario, cuando los NOx son relativamente más abundantes (COV/NOx<10) la formación de O3 está limitada por la concentración de COV, por lo que es más efectivo reducir las emisiones de contaminantes orgánicos para disminuir la concentración de O3. Entre ambos extremos hay una región donde la producción de O3 es igualmente sensible a ambos precursores (US EPA, 2008). La formulación de políticas públicas medioambientales efectivas requiere entender la relación COV/NOx en el área de estudio específica (Garzón et al., 2015). Investigaciones recientes muestran que en el área urbana de la ZMVM la producción de O3 actualmente está limitada por COV (Lei, de Foy, Zavala, Volkamer, & Molina, 2007; Lei, Zavala, de Foy, Volkamer, & Molina, 2008; Song et al., 2010; Tie et al., 2007; Zhang & Dubey, 2009).

Tabla 3.1 Características principales de los contaminantes atmosféricos [continuación]

Contaminante	Criterio	Fórmula química / abreviación	Características físicas y químicas	Reactividad atmosférica	Mecanismos de remoción	Fuente principal de emisión	Concentración de fondo
Partículas ultrafinas (<0.1 μm)⁵	No. Sin embargo, forman parte de las PM _{2.5} .	Origen Primario y secundario	Diámetro aerodinámico menor a 0.1 μm. Se componen principalmente de sulfatos, carbono elemental, metales y compuestos orgánicos.	Formación por nucleación de gases atmosféricos (H ₂ SO ₄ , NH ₃ y algunos COV). Crecimiento por coagulación, por condensación de gases o por reacciones químicas.	Tiempo de residencia corto (mi- nutos u horas). Crecen en tamaño para pasar a formar parte de las partículas finas. Remoción por pro- cesos de difusión en gotas de lluvia o deposición sobre superficies.	Formación en la atmósfera a partir de precursores. Origen primario por quema de combustibles fósiles; los motores a diésel son una de las principales fuen- tes de partículas ultrafinas primarias (Health Effects Institute, 2013).	No aplica. La concentración de fondo de partículas PM _{2.5} contempla la contribución de las partículas ultrafinas.
Partículas finas (0.1-2.5 μm) ⁵	Sí. La suma de las partículas finas y ultrafinas se conoce como PM _{2.5} .	Ovience	Diámetro aerodinámico entre 0.1 y 2.5 μm. Solubles en agua. Se componen principalmente de iones inorgánicos como nitrato, sulfato y amonio; carbono elemental y compuestos orgánicos, metales pesados, agua y agentes patógenos como bacterias y virus.	Se forman por la oxidación atmosférica del SO ₂ , los NO _x y COV. Se originan por diversos procesos como la condensación de gases y coagulación de partículas ultrafinas, reacción de gases en fase líquida y por la disolución de gases en gotas de agua suspendidas en la atmósfera.	Tiempo de vida en la atmósfera de días a semanas; al ser muy solubles en agua, forman fácilmente gotas de lluvia en la atmósfera y son removidas principalmente por precipitación pluvial, aunque también participan en procesos de deposición seca. Pueden ser transportadas de cientos a miles de kilómetros antes de ser removidas.	El sector transporte es el principal emisor de este contaminante; destaca la contribución de tractocamiones y autobuses. Otras emisiones primarias provienen de fuentes industriales como la fabricación de productos a base de minerales no metálicos, la industria alimentaria y la fabricación de fibra de vidrio (SEDEMA, 2018e). También se forman en la atmósfera a partir de compuestos precursores.	Para PM _{2.5} la concentración de fondo se estima entre 3-5 μg/m³ en América del Norte y Europa Occidental (OMS, 2006).
Partículas gruesas (2.5-10 μm)⁵	Sí. La suma de las partículas gruesas, finas y ultrafinas se conoce como PM ₁₀ .	Origen Predominantemente primario	Diámetro aerodinámico entre 2.5 y 10 μm. Relativamente insolubles. Se componen principalmente de nitratos, cloruros y sulfatos, óxidos de la corteza terrestre (Si, Al, Fe), carbonatos, bacterias, polvo, polen, moho, esporas de hongos y detritos de animales y plantas.	Procesos mecánicos como la abrasión, el rompimiento de sólidos o gotas líquidas y la suspensión de polvos por acción del viento, aunque también pueden formarse por reacciones atmosféricas y el crecimiento de partículas de la fracción fina.	Tiempo de vida corto en la at- mósfera (minutos a horas). Por su tamaño presentan menores distan- cias de transporte en comparación con las partículas más finas. Remo- ción por procesos de precipitación seca o por gotas de lluvia.	Algunas fuentes primarias son el transporte de carga y los autobuses que utilizan diésel como combustible, la suspensión de partículas de suelo (por ejemplo, por erosión en campos agrícolas, calles no pavimentadas) y la suspensión de polvo en calles pavimentadas (SEDEMA, 2018e). Otras fuentes son las actividades de construcción y demolición, la fabricación y comercio de concreto y grava, y las cenizas que provienen de procesos de combustión.	Aproximadamente 10 μg/m³ (Ostro, Prüss-Üstün, Campbell-Lendrum, Corvalán, & Woodward, 2004).
Plomo	Sí	Pb Origen Primario	Metal pesado altamente tóxico. Al ser ingerido, puede llegar al torrente sanguíneo y causar efectos a la salud que incluyen daños al sistema nervioso central, al sistema cardiovascular y a las células de la sangre (SEDEMA, 2018a).	Forma parte de las partículas suspendidas en la atmósfera.	Deposición sobre superficies (suelo, agua, infraestructura gris) y vegetación. Inhalación e ingesta de seres vivos; se destaca que es bioacumulable, lo que implica que las concentraciones en seres vivos incrementan a medida que se avanza en el nivel trófico de la cadena alimenticia.	El Pb y sus compuestos se han utilizado en productos como pinturas, cerámica, tuberías y materiales de plomería, soldaduras, aditivos en gasolina, baterías, municiones y cosméticos (US EPA, 2018). Su principal fuente es la resuspensión de material remanente en el suelo, aunque la fabricación de acumuladores y baterías de plomo, las incineradoras de residuos, actividades mineras y el uso de algunas pinturas y pigmentos (Jacobson, 2012) también contribuyen.	No aplica. En México el Pb era emitido por la combustión de gasolinas con aditivos a base del metal. Sin embargo, desde la década de los noventa se retiró este aditivo de las gasolinas en el país, lo cual disminuyó considerablemente las emisiones por debajo de los límites normados.
Carbono negro	No	Origen Primario	Partículas de carbono elemental con propiedades ópticas específicas, como la absorción de luz solar, que después se transforma a calor. Se cataloga como un contaminante climático de vida corta.	Es un componente importante de las partículas finas (Janssen et al., 2012). Tiene impactos sobre la salud de la población, reduce la productividad agrícola y causa daños sobre la vegetación y los ecosistemas cuando se deposita sobre estos.	Deposición directa sobre super- ficies o lavado por acción de la lluvia.	Combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa. Se destaca la contribución de los motores a diésel y la quema de combustibles pesados y carbón como fuentes de carbono negro u hollín (Cruz Núñez, 2019; US EPA, 2012).	Estudios específicos en la ZMVM determinaron una concentración de fondo de 0.70 μg/m³ (Peralta et al., 2019).
Amoniaco	No	Origen Predominantemente primario	Gas incoloro con un caracte- rístico olor irritante. Es muy soluble y reactivo.	El NH₃ es el compuesto básico principal en la atmósfera; reac- ciona con compuestos ácidos para formar sales de amonio (NH₄¹) que son un constituyente mayoritario de las partículas suspendidas.	Reacciones químicas atmosféricas, disolución en agua y deposición sobre superficies y vegetación.	Fuentes agrícolas; incluye el manejo de estiércol y la aplicación de fertilizantes. Otras fuentes son los pro- cesos biogénicos por microorganismos en el suelo, la disposición de residuos, fuentes industriales y la quema de biomasa.	De 0.1 a 5 ppb en aire limpio; en zonas agrícolas puede alcanzar niveles de 100 ppb (Pogány <i>et al.</i> , 2015).

⁵ En el Anexo 3.1 se puede consultar una descripción más detallada de las distintas clases de partículas suspendidas de acuerdo con diferentes criterios como su origen, tamaño, composición y efectos a la salud humana.

3.2 Sistema de monitoreo atmosférico de la **Ciudad de México (SIMAT)**

Un sistema de monitoreo atmosférico es una herramienta que se utiliza para evaluar el estado de la calidad del aire y asociar los datos recabados con impactos que la contaminación atmosférica tiene sobre la salud pública y los ecosistemas. La información generada por estos sistemas es indispensable para proteger a la población, ya que los datos pueden ser utilizados para el diseño, evaluación e implementación de políticas públicas para mejorar la calidad del aire; también pueden usarse para emitir alertas sobre niveles de contaminación peligrosos a la salud y así tomar medidas inmediatas para reducir las fuentes de emisión en episodios de emergencia. En México, los sistemas de monitoreo atmosférico están regidos por la NOM-156-SEMAR-NAT-2012, donde se establecen los lineamientos monitoreo de la calidad del aire.

Atmosférico (SIMAT) desde hace 35 años, el cual es operado y administrado por el gobierno de la Ciudad de México para recopilar información sobre el estado de la calidad del aire en la ZMVM en diferentes escalas de tiempo. El SIMAT trabaja de forma ininterrumpida para evaluar la calidad del aire a través de la medición de la concentración de la mayoría de los contaminantes criterio: SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀ y PM_{2.5}, así como parámetros meteorológicos (SEDEMA, 2018b). Los equipos automáticos del SIMAT registran los valores de concentración horaria de manera continua, los 365 días del año, lo que permite detectar cuáles son los contaminantes que predominan en la ZMVM, la ubicación de las zonas que presentan las máximas concentraciones, así como identificar los patrones de comportamiento de cada contaminante a través del tiempo, de forma horaria, semanal y anual, y así alertar a la población sobre los riesgos asociados. Los patrones en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos permiten establecer relaciones con los nores o igual a 10 µm, también conocidas como

parámetros meteorológicos y las fuentes de emisión en la región, evaluar tendencias históricas y analizar el impacto que ha tenido la implementación de diferentes programas para el control de la contaminación atmosférica.

El SIMAT cuenta con un total de 44 sitios de monitoreo en operación, distribuidos en cuatro subsistemas, y su cobertura comprende la mancha urbana de la ZMVM (SEDEMA, 2018b); 15 de los sitios del sistema se ubican en el Estado de México, 14 de ellos en municipios conurbados que forman parte de la ZMVM y uno adicional en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), mientras que el resto de las estaciones se ubica dentro de la Ciudad de México. El SIMAT para el establecimiento y operación de sistemas de tiene la capacidad técnica e infraestructura para realizar la reparación, mantenimiento, operación y verificación de toda la instrumentación La ZMVM cuenta con el Sistema de Monitoreo con la que cuenta, así como un área especializada para difundir oportunamente los niveles de contaminación horaria a la población a través de diferentes medios electrónicos y redes sociales.

> En términos operativos, el SIMAT mide continuamente las concentraciones atmosféricas de los contaminantes criterio a través de 34 estaciones automáticas de monitoreo atmosférico que conforman el subsistema de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA). Esta red opera continuamente y reporta en tiempo real los niveles de contaminación, para que se tomen las medidas necesarias y oportunas en caso de que los valores de concentración presenten niveles elevados y sea necesario reducir el nivel de exposición de la población. Nueve estaciones conforman la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA), cuyo objetivo es determinar los valores de concentración en muestras de partículas de diferentes tamaños: suspendidas totales (PST), que van de 10 hasta 100 micrómetros (µm); me

μm, conocidas como partículas finas (PM_{2.5}). La REDMA también permite evaluar la composición plomo (Pb) en 5 sitios con monitoreo de PST, y el carbono negro en muestras de PM_{2.5}.

Además de la RAMA y la REDMA, otros dos subsistemas forman parte del SIMAT (SEDEMA, 2018b), la Red de Meteorología y Radiación Solar (RED-MET) y la Red de Depósito Atmosférico (REDDA). La REDMET cuenta con 28 estaciones que miden continuamente los parámetros meteorológicos de temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, radiación solar, humedad relativa y presión barométrica; además, cuenta con un radar perfilador de viento. La REDDA cuenta con 16 sitios de muestreo que operan durante la fecha de inicio de su operación y los parámetros temporada de lluvia para caracterizar el depósi-

partículas gruesas (PM₁₀); y menores o igual a 2.5 to húmedo; es la única red de su tipo en el país y sirve para identificar el impacto de la contaminación atmosférica en el patrimonio cultural de las partículas muestreadas, el contenido de y en el suelo de conservación de la Ciudad de México.

> La Tabla 3.2 resume los objetivos específicos, el número de estaciones y los parámetros que miden cada uno de los subsistemas que integran al SIMAT. En la Figura 3.1 se muestra la ubicación de las estaciones que conforman a cada una de las redes. Para conocer a detalle los objetivos particulares de cada una de las redes, así como la descripción de la configuración actual del sistema y los recursos con los que opera el SIMAT, se puede consultar el Anexo 3.2, el cual también incluye el listado de estaciones de cada red, la que miden.

Tabla 3.2 Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México

Subsistema	Objetivo	Número de estaciones	Parámetros medidos
RAMA	Registrar la calidad del aire ambiente en la ZMVM con métodos de medición automáticos. Informar de manera oportuna a la población sobre los niveles de contaminación registrados.	34	O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO, SO ₂ , NO _X
REDMA	Registrar partículas suspendidas totales con métodos de medición manuales y complementar el registro de la RAMA. Determinar la variabilidad espacial y temporal de la deposición húmeda y seca, caracterizar el fenómeno de la lluvia ácida y validar los modelos de transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos.	9	PST, PM ₁₀ , PM _{2.5} , Pb
REDDA	Utilizar equipos semiautomáticos para la recolección de muestras de depósito seco (polvo sedimentable) y depósito húmedo (Iluvia, granizo, nieve, rocío) en los sitios de muestreo. En las muestras de depósito húmedo se realiza un análisis fisicoquímico para conocer las características físicas de la precipitación, su composición iónica y acidez.	16	Aniones, cationes, pH, nitratos, sulfatos y conductividad eléctrica
REDMET	Medir los parámetros meteorológicos que influ- yen en la dispersión, transporte y transformación de los contaminantes en la atmósfera. Medir la radiación solar para la investigación de procesos fotoquímicos.	28	Temperatura, humeda relativa, dirección y velocidad de viento, radiación solar (UV-A y UV-B), presión barométrica

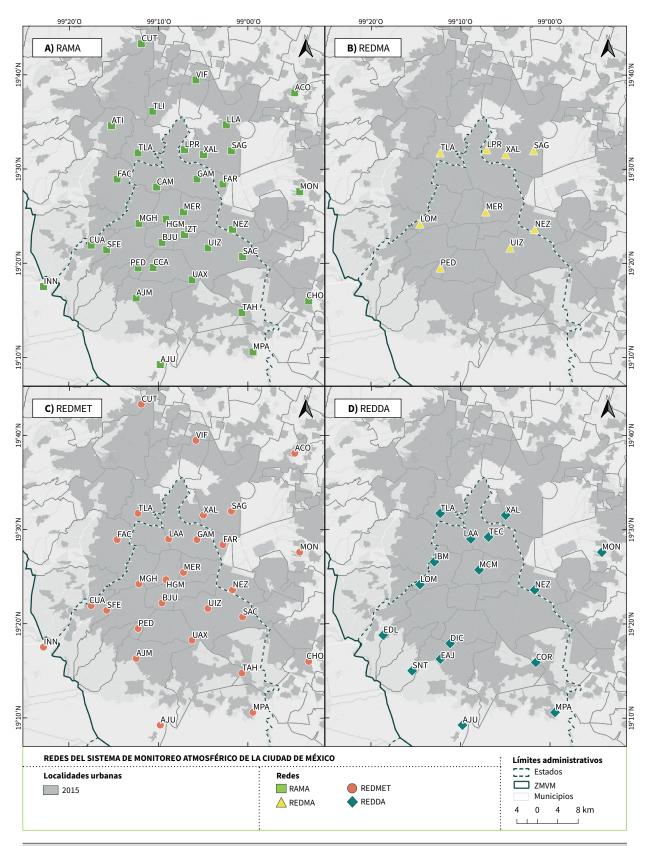


Figura 3.1 Ubicación de las estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico

Fuente: Catálogo de estaciones de monitoreo del SIMAT (SEDEMA, 2020a).

El Laboratorio para el Análisis Ambiental (LAA) del la validación, procesamiento y difusión de la infor-SIMAT cuenta con un área para la atención de los equipos de monitoreo y muestreo, un área para el acondicionamiento de muestras de partículas y del depósito atmosférico, así como espacios de oficinas y para el control de calidad. Asimismo, cuenta con equipo para las campañas de medición de aerosoles, equipo para realizar análisis elementales e identificar algunas especies químicas o compuestos, a través de cromatógrafos de gases-masa, líquidos, entre otros métodos de análisis. También cuenta con un cuarto para análisis gravimétrico y analizadores especiales para estudios de aerosoles atmosféricos y COV; adicionalmente, se tiene un área de procesamiento de datos para la difusión oportuna de la información recopilada por parte del Centro de Información de Calidad del Aire (CICA). El CICA es el repositorio de los datos generados por el SIMAT, responsable de

mación generada por el programa de monitoreo. Finalmente, el SIMAT también cuenta con una unidad móvil para el monitoreo en zonas fuera de la cobertura de las estaciones fijas.

El Laboratorio de Estándares es el lugar en donde inicia el control de calidad de la RAMA. Este cuenta con un centro de datos responsable de la comunicación de las estaciones hacia el CICA, así como de la operación de la nube y del supercómputo para el Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire de la Ciudad de México (AOFS-Mex), además de estar a cargo de los servicios de almacenamiento de otras páginas de la SEDEMA. El SIMAT mantiene alianzas con algunos laboratorios del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM, por medio de un convenio de coordinación para realizar estudios específicos con técnicas novedosas.

3.2.1 La calidad de los datos que genera el SIMAT

Auditorías y cumplimiento de la NOM-156-SEMARNAT-2012

La NOM-156-SEMARNAT-2012 tiene como principal objetivo especificar las condiciones mínimas que deben ser observadas para el establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire (DOF, 2012). La calidad de los datos que genera el sistema de monitoreo se verifica mediante auditorías que evalúan la efectividad del sistema y sus elementos, que buscan identificar fallas en el programa de aseguramiento de calidad. Las evaluaciones son aplicadas por personal calificado ajeno a la operación del sistema. Además, el SIMAT debe cumplir con el Procedi-

miento Federal para la Auditoría a los Sistemas de Medición de la Calidad del Aire. Para garantizar la generación de información confiable y precisa, a través de un proceso controlado bajo estándares de calidad, durante 2017 y 2018 se realizaron auditorías de desempeño a los analizadores de las estaciones de la RAMA. Estas auditorías fueron llevadas a cabo por "EPA Systems", un organismo independiente externo a la SEDEMA. Los resultados de las auditorías practicadas al SIMAT desde 2005 muestran una mejora importante en la operación del sistema (ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Resultados de las evaluaciones de desempeño a la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

	Diferencia absoluta de la media en la desviación de las mediciones					
Parámetro	Auditoría 2005	Auditoría 2012	Auditoría 2018			
O ₃	2.4 - 11.8 %	0.5 - 5.4%	0.5 - 3.7%			
NO ₂	6.3 – 28.1 %	NA	NA			
NO _x	NA	0.1 - 6.8%	0.3 - 4.6 %			
SO ₂	0.5 - 26.7%	0.9 - 6.0%	0.1-4.6 %			
со	2.3 - 11.4 %	0 - 4.3%	3.6 - 7.2 %			

Fuente: Evaluaciones de desempeño (EPA Systems, 2012, 2018; US EPA & Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS), 2005).

El valor límite de cumplimiento para una auditoría es de ±15%; mientras más cercano sea el valor de respuesta del instrumento a cero, la precisión en la medición es mejor. Cuando se presenta una desviación mayor a 15% significa que se debe aplicar una acción correctiva a todo el sistema.

ProAire ZMVM **2021 - 2030**

La auditoría más reciente del SIMAT (2018) concluyó que, en general, el sistema está bien administrado y opera de manera efectiva (EPA Systems, 2018). Las capacidades técnicas que tiene para rastrear datos, capacitar al personal de operaciones, administrar grandes conjuntos de datos, realizar actividades básicas de mantenimiento y calibración, así como rastrear y mantener datos de aseguramiento y control de

calidad, son ejemplares. Cabe señalar que al 2018, el SIMAT contaba con seis operadores para 32 sitios automatizados, o un operador por cada 5.3 sitios, a pesar de que la "regla de oro" normal es que una red debe tener aproximadamente un operador por cada tres sitios. Los resultados de la auditoría demuestran que, pese a la falta de personal, la administración de la red cumplió con los estándares establecidos. Dentro de las sugerencias para el mejoramiento de la RAMA están cambiar las tomas de muestra para evaluar todo el sistema de muestreo en las verificaciones automáticas, lo que permitiría simplificar la operación de los sitios de monitoreo y generar datos de mejor calidad (EPA Systems, 2018).

3.2.2 Sistema de pronóstico de la calidad del aire

El Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire de la Ciudad de México (AOFS-Mex) es una herramienta útil para la toma de decisiones y para informar a la población, de manera anticipada, sobre la posible concentración de los contaminantes atmosféricos durante el día actual y el siguiente. Con esta información la población puede tomar acciones de prevención con el fin de disminuir el riesgo a su salud. Esta herramienta fue desarrollada por la SEDEMA en colaboración con el Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona (BSC, por sus siglas en inglés) y su objetivo principal es elaborar un pronóstico meteorológico y de contaminantes para las siguientes 24 y 48 horas, utilizando el conocimiento actual sobre la química y dinámica atmosféricas de la región (Guevara et al., 2017; SEDEMA, 2018g). El sistema tiene como productos un pronóstico de la calidad del aire para ambos días, el cual presenta el máximo de O₃ por estación, junto con el color correspondiente de la escala del Índice Aire y Salud, un pronóstico meteorológico y, finalmente, un pronóstico por contaminante, para el cual se presenta el mapa con la distribución espacial de la concentración y su comportamiento horario durante ambos días. La descripción del conjunto de modelos que conforman el AQFS-Mex se presenta en la Tabla 3.4.

El desempeño de todo pronóstico de calidad del aire depende directamente del inventario de emisiones y de la simulación de las variables meteorológicas. Sin embargo, cualquier pronóstico conlleva una cantidad de procesos que se basan en estimaciones, por lo que sus salidas también deberán ser interpretadas como una estimación que guía la toma de decisiones y no como un valor exacto o determinante. El desempeño del sistema AOFS-Mex de la Ciudad de México es razonable, ya que en términos generales, el rendimiento del modelo, definido como el porcentaje de pronósticos categorizados como buenos y regulares, fue de 80% para el pronóstico de 24 horas y de 72% para el de 48 horas (SE-DEMA, 2018a).

Para el O₃ el pronóstico reproduce correctamente el perfil horario general y por estación; además, la tasa de aciertos (probabilidad de detección) fue cercana a 100 en ambos modelos (24 y 48 horas) lo que indica que el pronóstico para valores horarios superiores a 95 ppb fue bueno. En algunos casos presenta dificultades para pronosticar los episodios denominados de O₃-norte (SEDEMA, 2018a), aunque la mayoría de las veces reproduce correctamente el patrón de O₃. Actualmente el sistema no genera públicamente un pronóstico

Tabla 3.4 Sistema de Pronóstico de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México

Tipo de modelo	Descripción
Modelo meteorológico	Se utiliza el modelo WRF (Weather Research and Forecasting Model) para la predicción de las condiciones meteorológicas en la región, con el uso de la información del modelo global GFS (Global Forecast System). Se ejecuta en cuatro dominios anidados (27, 9, 3 y 1 km²) para generar el pronóstico de temperatura, campo de viento a 10 m y a diferentes niveles de presión, precipitación, radiación solar y altura de capa de mezcla.
Modelo de emisiones	Se utiliza un modelo de emisiones adaptado especialmente para la ZMVM. Los datos de entrada del modelo son el inventario de emisiones desarrollado por la SEDEMA y el Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio (INEM), elaborado por la SEMARNAT. Este modelo desagrega espacial y temporalmente las emisiones antropogénicas y biogénicas de NO _x , COV, CO, SO ₂ , NH ₃ y partículas suspendidas, entre otros contaminantes. El modelo se ejecuta en dos dominios anidados (3 y 1 km²) y genera la información necesaria para correr el modelo fotoquímico (de transporte químico)
Modelo de transporte químico	Se usa el modelo CMAQ (Community Multi-scale Air Quality), que fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) y el cual es soportado y distribuido por el Community Modeling and Analysis System (CMAS). El modelo fotoquímico utiliza las salidas del modelo meteorológico y de emisiones, y se ejecuta en dos dominios anidados (3 y 1 km²). Cuenta con un conjunto de mecanismos de reacción, que simulan las transformaciones químicas que ocurren en la atmósfera considerando las variables meteorológicas, para determinar la influencia de la dinámica atmosférica en los procesos químicos y de dispersión de contaminantes.

aún se encuentran en proceso. En cuanto a PM_{2.5}, en ocasiones se presenta una subestimación de la concentración debido a que las emisiones emisiones y, con esto, analizar y evaluar polítide partículas tienen un origen diverso; además, existen fuentes que no son contempladas en el la mejora de la calidad del aire a mediano y largo modelo, como los incendios repentinos, ya que no son predecibles y afectan la calidad del aire sodios críticos, como es el caso de los incendios

para PM₁₀, debido a que su evaluación y mejora

temporalmente. El modelo se evalúa diariamente y se realiza un ajuste con el filtro de Kalman. Actualmente se están desarrollando actualizaciones del sistema para mejorar su desempeño.

Fuente: Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire de la Ciudad de México (Guevara et al., 2017; SEDEMA, 2018f).

Además del pronóstico de calidad del aire que se realiza de manera operativa, el AQFS-Mex permite ejecutar escenarios de disminución de cas públicas actuales o futuras, encaminadas a plazo. El modelo también sirve para evaluar epiforestales; analizar la contribución de partículas; determinar fuentes externas de emisión, como es el caso de la contaminación de SO₂; y estudiar episodios de contingencias.

3.3 Indicadores de calidad del aire

En México, el estado de la contaminación atmosférica se evalúa a través de indicadores de la calidad del aire, calculados tanto por estación de monitoreo, como a nivel de ciudad o zona metropolitana. Los indicadores permiten comparar las concentraciones de los contaminantes en el aire ambiente, registradas por el SIMAT, contra los límites permisi-

bles de concentración establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental para los distintos contaminantes criterio. Los indicadores se calculan con diferentes tipos de datos en función del fenómeno que se quiera representar (INECC, 2010). Algunos de los indicadores de calidad del aire más comunes son los siguientes:

160 ProAire ZMVM 2021 - 2030

INDICADORES DE CALIDAD DEL AIRE

- Promedio horario: el promedio de datos minutales dentro de una hora.
- Promedio móvil de 8 o 24 horas: a partir de los datos horarios de concentración, se promedia el dato de la hora seleccionada con los datos registrados en las 7 o 23 horas previas, respectivamente.
- Percentil: es la medida estadística que indica el valor por debajo del cual se encuentra un porcentaje de observaciones ordenadas de menor a mayor. Por ejemplo, el percentil 90 representa el 90% de los datos, dejando arriba de este el 10% restante. Este indicador se puede obtener de un conjunto de promedios diarios u horarios.
- Concentración diaria: se calcula a partir de datos horarios. Se reportan los siguientes indicadores:
 - Máximo diario: es el valor más alto regisbien del promedio móvil.
 - Promedio diario: media aritmética de los 24 datos horarios registrados en un mismo día, de la hora 1 a 24, o bien, de 0 a 23 horas.

- Concentración anual: su cálculo depende del contaminante y se obtiene a partir de datos horarios o promedios diarios. Comúnmente se reportan los siguientes valores:
 - Máximo anual: es el valor más alto registrado de un determinado indicador (promedio horario, promedio móvil de 8 horas o los promedios diarios registrados en un año). De manera análoga, el 2.º máximo representa el segundo valor más alto, del mismo conjunto de datos.
 - Promedio anual: es la media aritmética de los datos de concentración en un mismo año; su cálculo depende del contaminante analizado y se obtiene a partir los promedios diarios o datos horarios.

Para el cálculo de estos indicadores es fundamental que la información cumpla con criterios de suficiencia de datos establecidos en las NOM trado dentro de los 24 valores horarios o de salud ambiental de cada contaminante. En el presente documento, la obtención de los indicadores de calidad del aire cumple con estos criterios de suficiencia por hora, día, mes, trimestre y año. Se considera como válido a un indicador cuando cuenta con una suficiencia mayor o igual al 75% (esto es, al menos 75% de los minutos, horas, días o trimestres, respectivamente).

3.3.1 Límites permisibles y normas de salud ambiental

Los estándares para la protección de la salud límites permisibles para cada uno de los contapública por los efectos de la contaminación at- minantes criterio, así como las metodologías de mosférica están publicados en las NOM de salud cálculo de los indicadores. La Tabla 3.5 resume los ambiental, de observancia obligatoria en todo el indicadores utilizados para evaluar el cumplimienpaís. Las NOM de salud vigentes establecen los to de las NOM de salud ambiental vigentes.

Tabla 3.5 Especificaciones técnicas y criterios de evaluación de las NOM de salud ambiental vigentes

Capítulo 3. Diagnóstico de la Calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México

161

	-				_	
Contaminante	NOM	Límite	Indicador y dato base	Forma de evaluación	Criterios de suficiencia	
0(0)	NOM 000 CCA1 0014	0.095 ppm	Máximo de los datos horarios (1 h)	No deben rebasarse	Al menos 75% de los	
Ozono (O₃)	NOM-020-SSA1-2014	0.070 ppm	Máximo de los promedios móviles (8 h)	durante el año.	datos horarios o los promedios móviles de 8 horas ^b .	
Monoxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	11.00 ppm	Máximo de los pro- medios móviles (8 h)	No debe rebasarse durante el año ^c .	Al menos 75% de lo promedios móviles 8 horas.	
		0.200 ppm	Máximo de los pro- medios móviles (8 h)	No debe rebasarse más de una vez al año (se utiliza el segundo máximo) ^d .	Al menos 75% de los promedios móviles 8 horas.	
	NOM-022-SSA1-2010	0.110 ppm	Máximo de los pro- medios diarios (24 h)	No debe rebasarse durante el año d.	Al menos 75% de los promedios de 24 hor	
Dioxido de		0.025 ppm	Promedio anual de los datos horarios	_	Al menos 75% de los datos horarios.	
azufre (SO ₂) ⁶	NOM-022-SSA1-2019	0.075 ppm	Promedio aritmético de 3 años consecuti- vos de los percentiles 99 anuales, obtenidos de los máximos (1 h) diarios.	-	Al menos 75% de los datos utilizados en e cálculo de los indica dores, con base en e	
		0.040 ppm	Máximo de 3 años consecutivos de los pro- medios diarios (24 h).	No debe rebasarse durante tres años consecutivos.	Anexo Normativo A de la norma respectiva.	
Dioxido de nitrógeno (NO ₂)	NOM-023-SSA1-1993	0.210 ppm	Máximo de los datos horarios (1 h).	No debe rebasarse durante el año ^e .	Al menos 75% de la datos horarios.	
Partículas menores a 10 micrómetros	NOM-025-SSA1-2014	75 μg/m³	Máximo de los pro- medios diarios (24 h).	No debe rebasarse durante el año.	Al menos tres trime tres con el 75% de los promedios de 24	
(PM ₁₀)		40 μg/m³	Promedio anual.	_	horas válidos.	
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	NOM-025-SSA1-2014	45 μg/m³	Máximo de los promedios diarios (24 h).	No debe rebasarse durante el año.	Al menos tres tri- mestres con el 75% de los promedios d	
		12 μg/m³	Promedio anual.	_	24 horas válidos.	
Plomo (Pb)	NOM-026-SSA1-1993	1.5 μg/m³	Promedio trimestral.	-	Al menos 75% de lo datos utilizados pa generar el indicado	

a.En las NOM para NO2 y CO, así como en la versión anterior de la NOM para SO2, no se especifica cómo realizar el manejo de datos y tampoco criterios de suficiencia de información, pero en congruencia con las especificaciones de las NOM de partículas y O3 se aplica, en la agregación de cada dato, el criterio de 75% de suficiencia de información para obtener los indicadores

b.En el caso del O3 en los numerales 5.2.3.1 y 5.2.3.2 de la NOM se especifica que aún en el caso en el que no se cumpla el criterio de suficiencia del 75% de los valores horarios o de los promedios móviles de 8 horas, se incumplirá la norma cuando al menos uno de los valores horarios sea mayor a 0.095 ppm o al menos uno de los valores de los promedios móviles de 8 horas sea mayor a 0.070 ppm.

c.Para CO la especificación menciona que la concentración "no debe rebasar el valor permisible de 11.00 ppm o lo que es equivalente a 12 595 µg/m³ en promedio móvil de ocho horas una vez al año", lo anterior se interpreta como que el valor límite no debe superarse durante el año.

d. Para el SO₂ la especificación menciona que el promedio de 24 horas "no debe rebasar el límite máximo normado de 288 µg/m³ o 0.110 ppm promedio en 24 horas, una vez al año", lo anterior se interpreta como que no debe rebasarse durante el año. Para el caso del promedio móvil de 8 horas la especificación menciona que la concentración "debe ser menor o igual a 524 µg/m³, o 0.200 ppm promedio horario para no ser rebasado dos veces al año"; el enunciado se interpreta como que la concentración del promedio de 8 horas no debe rebasarse más de una vez al año, por lo tanto, se utiliza el 2.º máximo

e.En el caso del NO₂ la especificación menciona que "no debe rebasar el límite máximo normado de 0.21 ppm o lo que es equivalente a 395 μg/m³, en una hora una vez al año". Para propósitos de esta evaluación se entiende que el valor límite no debe superarse durante el año.

Fuente: Elaborado a partir de las normas de salud ambiental publicadas en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 1993, 1994b, 1994a, 2009, 2014b, 2014a, 2019a) y reportes de calidad del aire (INECC, 2018; SEDEMA, 2018a).

6 El 16 de febrero de 2020 entró en vigor la actualización de la NOM de salud ambiental para SO₂, la NOM-022-SSA1-2019, con límites más estrictos y nuevas metodologías de cálculo para los indicadores. Se indican los límites permisibles establecidos en la versión derogada (NOM-022-SSA1-2010) al ser el instrumento vigente para la evaluación de la calidad del aire por SO₂ en 2018.

162

3.3.2 Guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud

La Organización Mundial de la Salud (OMS), con el obietivo de ofrecer orientación sobre la manera de reducir los efectos de la contaminación atmosférica en la salud pública, define valores guía para la gestión de la calidad del aire. Las Guías de la Calidad del Aire (GCA) de la OMS son recomendaciones y están basadas en la información de estudios de dosis-respuesta o estimaciones del riesgo a la salud en diversas poblaciones por exposición a contaminantes atmosféricos. Para más información sobre las GCA de la OMS y los impactos a la salud por la contaminación atmosférica, se puede consultar el Capítulo 6 del ProAire.

Aunque los valores de las GCA de la OMS son más estrictos que los límites establecidos por las NOM de salud ambiental, se reconoce que en cada país, las normas y estándares nacionales pueden variar en función del enfoque adoptado

y los objetivos de las políticas de calidad del aire. Las guías no son obligatorias y la actualización de los límites permisibles de los contaminantes criterio debe evaluar la viabilidad de alcanzar los valores propuestos por la OMS, de tal forma que se establezcan valores límite que den mayor protección a la población. La aplicación de valores límite permisibles debe tener en cuenta las condiciones locales para equilibrar los riesgos a la salud, la viabilidad tecnológica, aspectos económicos, así como factores políticos y sociales (OMS, 2017). Las GCA se presentan solo con fines comparativos, dado que la calidad del aire se debe evaluar únicamente con la normatividad vigente en el país. La Tabla 3.6 presenta los valores de las GCA de la OMS por contaminante; se define el indicador o dato base utilizado para la evaluación de las guías y el límite equivalente establecido en las NOM de salud ambiental.

Tabla 3.6 Guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud

Contaminante criterio	Indicador y dato base	Guía de calidad del aire	Límite NOM
Dióxido de azufre (SO ₂)	Máximo de los promedios diarios (24 h)	20 μg/m³ (0.010 ppm*)	0.040 ppm (83 μg/m³ *)
Dióxido de nitrógeno	Máximo de los datos horarios (1 h)	200 μg/m³ (0.134 ppm*)	0.210 ppm (312 μg/m³ *)
(NO ₂)	Promedio anual	40 μg/m³ (0.027 ppm*)	No aplica
Monóxido de carbono	Máximo de los datos horarios (1 h)	30 000 μg/m³ (33.13 ppm*)	No aplica
(CO)	Máximo de los promedios móviles (8 h)	10 000 μg/m³ (11.04 ppm*)	11.00 ppm (9960 μg/m³ *)
Ozono (O ₃)	Máximo de los promedios móviles (8 h)	100 μg/m³ (0.064 ppm*)	0.070 ppm (109 μg/m³ *)
Partículas menores a	Máximo de los promedios diarios (24 h)	50 μg/m³	75 μg/m³
10 micrómetros (PM ₁₀)	Promedio anual (percentil 99)	20 μg/m³	40 μg/m³
Partículas menores a	Máximo de los promedios diarios (24 h)	25 μg/m³	45 μg/m³
2.5 micrómetros (PM _{2.5})	Promedio anual (percentil 99)	10 μg/m³	12 μg/m³

^{*} Para las guías de calidad del aire y los límites de la NOM, se incluyen los valores de concentración equivalentes en ppm o µg/m³ según aplica, a 17°C y 585 mmHg (condiciones locales de en la 7MVM)

Fuente: Guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1999, 2006).

3.3.3 Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud

El Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud es una herramienta para la comunicación de los niveles de contaminación en todo el país. Este tiene como objetivo homologar la generación y la difusión de los niveles de contaminación y los Ciudad de México, antes conocido como IMECA⁷, riesgos a la salud asociados. El índice relaciona los valores de concentración de cada contaminante criterio con una categoría y un nivel de riesgo, identificado por un color específico para su reporte, así como recomendaciones para la protección de grupos sensibles y la población en general. El cálculo y difusión de este índice, también denominado Índice Aire y Salud, está

normado por la NOM-172-SEMARNAT-2019 (DOF, 2019b), que entró en vigor el 18 febrero del 2020, y suple todos los índices de calidad del aire locales, como lo es el Índice de Calidad del Aire de la el cual contaba con un algoritmo similar al de la US EPA y se utilizaba para la difusión de los niveles de contaminación en la ZMVM, según lo indica la Norma Ambiental NADF-009-AIRE-2017 (Gobierno de la Ciudad de México, 2018). El Anexo 3.4 explica con mayor detalle el cálculo del Índice Aire y Salud y el Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México.

3.4 Diagnóstico de la calidad del aire

Dentro del diagnóstico del ProAire ZMVM 2021- lores de concentración y forma de evaluación de 2030 se presenta la evaluación del cumplimiento de las NOM de salud ambiental en la ZMVM por estación de monitoreo atmosférico y entidad federativa (Ciudad de México y área conurbada del Estado de México), con base en el Capítulo 1 del Informe Anual de Calidad del Aire de la Ciudad de México para el año 2018 (SEDEMA, 2020a). Dicha evaluación se elabora respecto de los siguientes contaminantes criterio: SO₂, NO₂, CO, O₃ y partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. A pesar de que el plomo (Pb) también es un contaminantes criterio, en esta sección no se aborda su diagnóstico debido a que sus concentraciones se han mantenido por debajo de los límites requeridos por la NOM de salud ambiental respectiva, con el retiro de este aditivo de la gasolina a partir de la década los 90.

Los resultados obtenidos de la evaluación se comparan con las GCA de la OMS y los límites permisibles de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, 2016). La comparación con los estándares de la US EPA se incluye dado que poseen similitudes con los límites permisibles de la normatividad mexicana en términos de va-

algunos indicadores. Posteriormente se presenta el comportamiento de la concentración de cada contaminante, su distribución especial y las tendencias por hora, día de la semana y época del año, para facilitar la determinación de patrones de los contaminantes y las posibles causas asociadas: toda la información presentada toma como base el Informe Anual de Calidad del Aire 2018 de la SEDEMA, así como sus versiones anteriores.

La tendencia en el comportamiento histórico de los niveles de contaminación también proviene del análisis descrito en el informe anual 2018 (SE-DEMA, 2020a), el cual utiliza los promedios mensuales de cada contaminante desde 1995 y hasta 2018, para posteriormente generar una línea de tendencia con el método LOESS⁸; este análisis se incluye en el Anexo 3.3. A manera de complemento, en el Anexo 3.4 se describen los valores registrados para el Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México en el año 2018 y una comparación con el nuevo Índice Aire y Salud para los contaminantes que superaron los límites establecidos en las NOM de salud ambiental durante ese mismo año.

⁷ Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).

⁸ También conocida como regresión local (Locally Estimated Scatterplot Smoothing).

3.4.1 Dióxido de azufre

Cumplimiento de la NOM de salud ambiental

En 2018 se mantuvo el cumplimiento de los tres límites establecidos en la NOM-022-SSA1-2010 para la concentración de SO₂ en todas las estaciones de monitoreo de la RAMA (ver Tabla 3.7). Se resalta que los niveles de concentración de SO₂ en la atmósfera cumplen con la NOM desde el año 2003 (SEDEMA, 2012); esto se asocia al cambio de combustibles con bajo contenido de azufre (Centro Mario Molina, 2013). Por ejemplo, en la ZMVM, PEMEX suministra únicamente

gasolina con bajo contenido de azufre (30 mg/ kg), mientras que el diésel automotriz suministrado se denomina de "ultra bajo azufre" y contiene como máximo 15 mg/kg. No obstante el cumplimiento de la normatividad, se superaron los niveles recomendados por las GCA de la OMS para el promedio de 24 horas, con máximos por encima del umbral de 20 µg/m³ (10 ppb a 17°C y 585 mmHg) en todas las estaciones; también se rebasó el estándar de la US EPA.

Tabla 3.7 Comparación de los máximos de dióxido de azufre con respecto a los valores límite de la NOM-022-SSA1-2010, la guía de la OMS y el estándar de la US EPA

		— Límite NOM —	GCA OMS —	US EPA —	
	Segundo máximo 8 h 200 ppb	Máximo (promedio 24 h) 110 ppb	Promedio anual máximo 25 ppb	Máximo (promedio 24 h) 20 μg/m³ *	Promedio trianual del Percentil 99 (máximos 1 h) 75 ppb
Ciudad de México	67 ppb (HGM)	42 ppb (MER)	6 ppb (MER)	87 μg/m³ (MER)	109 ppb (MER)
Área conurbada	125 ppb (CUT)	72 ppb (VIF)	8 ppb (TLA, TLI)	149 μg/m³ (VIF)	169 ppb (CUT)
ZMVM	125 ppb (CUT)	72 ppb (VIF)	8 ppb (TLA, TLI)	149 μg/m³ (VIF)	169 ppb (CUT)

^{*} Los resultados del monitoreo se expresan en ppb. Se calculó la concentración equivalente en µg/m³ a 17°C y 585 mmHg (condiciones locales de la ZMVM) para hacer la comparación

Entre paréntesis se muestra la clave de la estación donde se registró el valor máximo. En rojo se muestran los incumplimientos

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

límite actualizado del promedio de 24 horas (40 ppb) se superó en ambas entidades. Asimismo, ZMVM.

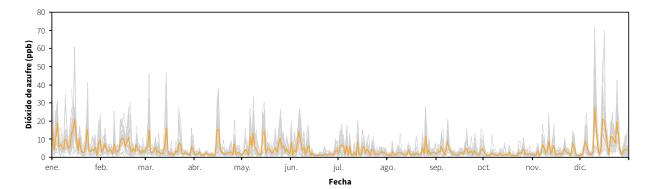
A título ilustrativo, si se evalúan los resultados el nuevo límite de exposición aguda, a partir de del año 2018 contra la NOM-022-SSA1-2019, la los máximos diarios de la concentración hora-ZMVM no cumple con los límites establecidos. El ria, es igual al estándar de la US EPA y, como se observa en la Tabla 3.7, también se rebasó en la

Distribución temporal y espacial de la concentración

los promedios diarios de SO₂. Como en años anteriores, en 2018 la variabilidad diaria se caracterizó por la presencia de picos de concentración

En la Figura 3.2 se muestra la serie de tiempo de a lo largo del año, pero con una mayor frecuencia durante los meses de la temporada seca-fría (noviembre a febrero). En esta época del año se presentan condiciones meteorológicas que faatmosféricos. Por el contrario, en la época de lluvias disminuye el número de picos de concentración: no obstante. la transformación de SO₂ a

vorecen el estancamiento de los contaminantes H₂SO₄ y la subsecuente deposición como lluvia ácida produce efectos negativos sobre la vegetación, el suelo, los cuerpos de agua y la infraestructura urbana.



Notas: La línea gruesa de color amarillo representa el promedio aritmético de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden a los valores de los promedios diarios de cada estación de monitoreo

Figura 3.2 Serie de tiempo de los promedios diarios de dióxido de azufre en 2018

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

El promedio anual de la concentración del contaminante fue de 4.3 ppb, menor que el de los dos años anteriores; en 2017 fue de 4.7 ppb y en 2016 de 4.6 ppb. En el análisis por entidad, el promedio en el área conurbada del Estado de a las 22:00 horas, en la estación Cuautitlán (CUT). México fue de 4.6 ppb, en tanto que en la Ciudad de México fue de 3.9 ppb. Para las estaciones ubicadas en el área conurbada del Estado de se registran con regularidad durante el periodo México, los promedios anuales por estación se nocturno, en la época seca-fría, cuando increvieron influenciados por valores extremos derimenta la frecuencia de inversiones térmicas y la vados en su mayoría por las contribuciones regionales originadas en el corredor industrial de Tula-Tepeji, localizado a aproximadamente 60 km al noroeste de la Ciudad de México.

Las estaciones que registraron el mayor promedio anual fueron Tlalnepantla (TLA) y Tultitlán (TLI) con 8.1 ppb. Los valores más altos de concentración se observan al noroeste de la zona metropolitana; las Villa de las Flores (VIF) registraron promedios por encima de 6.0 ppb (ver Figura 3.3). En esta región

se han llegado a registrar eventos de valores horarios mayores a 200 ppb, llamados "incrementos extraordinarios"; por ejemplo, el máximo horario registrado en 2018 fue de 354 ppb, el 15 de enero

Los valores horarios máximos del contaminante permanencia de la capa límite⁹ con altura baja hasta el mediodía, aunado a vientos dominantes provenientes del norte que favorecen el transporte desde la región de Tula hasta la ZMVM. En la Ciudad de México, las estaciones ubicadas en la región centro registran los valores más altos: Merced (MER), Hospital General de México (HGM) y Benito Juárez (BJU) presentaron promedios anuales en un rango de 4.9 a 5.7 ppb. En contrasestaciones de Atizapán (ATI), Cuautitlán (CUT) y te, las estaciones que se ubican al sur de la zona metropolitana presentan los valores mínimos, asociados a emisiones locales vehiculares.

9 Capa límite o capa límite planetaria: porción de la atmósfera donde predomina la mezcla turbulenta del aire y se mezclan los contaminantes, generada por el roce permanente con la superficie rugosa del suelo y por la elevación convectiva de burbujas de aire al calentarse.

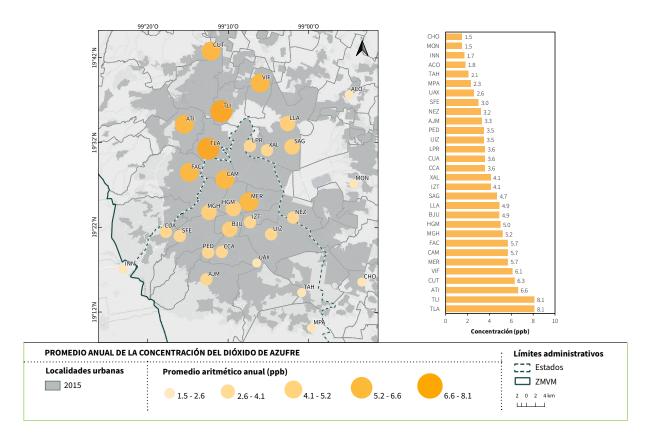
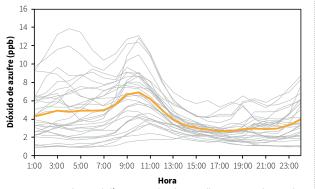


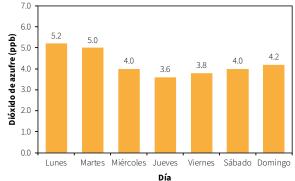
Figura 3.3 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de dióxido de azufre en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

El perfil horario (Figura 3.4) muestra un comportamiento unimodal con un incremento sustancial a partir de las 8:00 horas, con un máximo alrededor de las 10:00. El comportamiento por hora del día vate, las estaciones localizadas en al norte presentan madrugada, mientras que las estaciones que reciben el impacto de fuentes vehiculares muestran incrementos de concentración a partir de las 5:00 horas y alcanzan valores máximos cuando se registra mayor tránsito (alrededor de las 8:00) y, por ende, un mayor volumen de emisiones vehiculares.

Al analizar el comportamiento por día de la semana, en 2018 los promedios máximos se registraron el lunes y martes con 5.2 y 5.0 ppb, a diferencia del comportamiento en 2017 cuanría en cada estación; como se expuso anteriormen- do los promedios máximos se observaron en sábado y domingo, con 5.2 y 5.4 ppb, respectilos máximos de concentración durante la noche y vamente. El contaminante no tiene un patrón definido en cuanto al comportamiento por día de la semana; entre 2010 a 2018, todos los años presentaron diferentes patrones que se ven influenciados por los eventos extraordinarios (>200 ppb) registrados por día de la semana (ver Figura 3.4).





Comportamiento horario, la línea gruesa de color amarillo representa el promedio de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden al comportamiento en cada estación de monitoreo

Comportamiento semanal, las barras representan el promedio de la concentración por día de la semana para todas las estaciones de monitoreo

Figura 3.4 Comportamiento horario y por día de la semana de la concentración de dióxido de azufre en 2018 Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

3.4.2 Óxidos de nitrógeno

Cumplimiento de la NOM de salud ambiental

únicamente se establecen límites para el NO₂ y no estación Tlalnepantla (TLA) fue la única en toda la para NO ni la concentración total de NO_X. Durante ZMVM donde se superó el nivel recomendado por 2018, la concentración de NO₂ fue inferior al valor la OMS para el máximo horario, igual a 200 μg/m³ límite descrito en la NOM-023-SSA1-1993 para (equivalente a 134 ppb, a condiciones locales). todas las estaciones de la red. La concentración Si bien la NOM-023-SSA1-1993 no establece un máxima horaria, 141 ppb, se registró en la estación límite para el promedio anual, la OMS sí define Tlalnepantla (TLA) en el Estado de México, mien- una guía para este indicador, y este fue excedido tras que el máximo en la Ciudad de México fue de en estaciones ubicadas en ambas entidades; en 131 ppb, en la estación Cuajimalpa (CUA).

valores máximos con los límites de la NOM, las GCA dos del área conurbada (TLA y XAL).

Para fines de la evaluación de la normatividad, de la OMS y los estándares de la US EPA. La específico, se superó en cuatro estaciones de la La Tabla 3.8 presenta la comparación de los Ciudad de México (MER, CAM, HGM y MGH) y en

Tabla 3.8 Comparación de los máximos de dióxido de nitrógeno con respecto a los valores límite de la NOM-023-SSA1-1993, las guías de la OMS y los estándares de la US EPA

	Límite NOM —		GCA OMS —		US EPA	
	Máximo 1 h 210 ppb	Excedencias al máximo de 1 h	Máximo 1 h 200 μg/m³ *	Promedio anual 40 μg/m³ *	Percentil 98 del promedio de 1 h, evaluado en 3 años 100 ppb	Promedio anual 53 ppb
Ciudad de México	131 ppb (CUA)	0 h	195 μg/m³ (CUA)	$51 \mu g/m^3$ (MER)	106 ppb (MGH)	34 ppb (MER)
Área conurbada	141 ppb (TLA)	0 h	210 μg/m³ (TLA)	48 μg/m³ (TLA)	99 ppb (TLA)	32 ppb (TLA)
ZMVM	141 ppb (TLA)	0 h	210 μg/m³ (TLA)	51 μg/m³ (MER)	106 ppb (MGH)	34 ppb (MER)

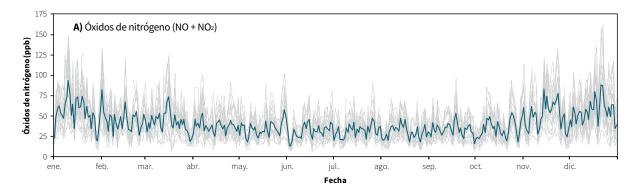
^{*} Los resultados del monitoreo se expresan en ppb. Se calculó la concentración equivalente en μg/m³ a 17°C y 585 mmHg para hacer la comparación Entre paréntesis se muestra la clave de la estación donde se registró el valor máximo. En rojo se muestran los incumplimientos

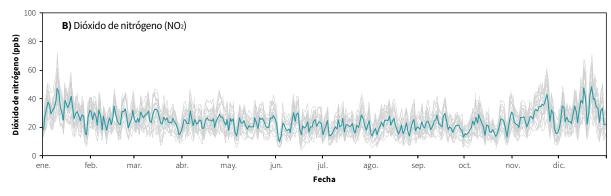
Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

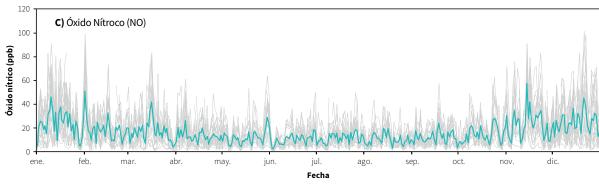
Distribución temporal y espacial de la concentración

El análisis de la distribución temporal y espacial de los óxidos de nitrógeno considera al NO y NO₂, así como a la suma de sus respectivos valores de concentración (NO_x). Se observa una estacionaseca-fría ocasionados por condiciones de estabilidad atmosférica y el estancamiento de los contaminantes, lo cual es provocado por un incremento en la intensidad y frecuencia de las inversiones

térmicas; en la Figura 3.5 se muestran las series de tiempo de los promedios diarios para los tres contaminantes. Durante los meses de la temporada de lluvia (mayo a octubre) los promedios dialidad marcada, con máximos en la temporada rios disminuyen considerablemente y los picos de concentración son menos pronunciados, aunque este fenómeno tiene consecuencias negativas por la deposición húmeda derivada de la formación de HNO3.







Nota: Las líneas gruesas de color azul representan el promedio aritmético de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden a los valores de los promedios

Figura 3.5 Serie de tiempo de los promedios diarios de óxidos de nitrógeno, dióxido de nitrógeno y óxido nítrico en 2018

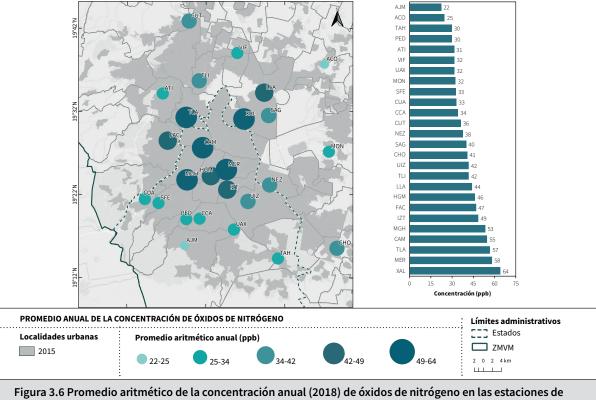
Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

Los promedios anuales de la concentración horaria de NO, NO₂ y NO_X para la zona metropolitana fueron de 16, 25 y 41 ppb. En comparación, en 2017 las concentraciones registradas fueron ligeramente mayores: 16, 25 y 42 ppb, respectivamente. La concentración máxima horaria de NOx en la ZMVM fue de 558 ppb, observada en la estación Xalostoc fue de 141 ppb el 17 de diciembre en la estación go (MGH) en la Ciudad de México. Tlalnepantla (TLA), en tanto que para NO fue de Xalostoc (XAL). Se observa que los máximos horarios coinciden con condiciones de estabilidad. durante la época seca-fría, al igual que ocurre con los promedios diarios. Es importante destacar que ambas estaciones (XAL y TLA) se ubican en los municipios conurbados del Estado de México y reciben influencia de vías con alto flujo vehicular.

La fuente más importante de los NO_x son los motores de combustión interna. Por esta razón, las

estaciones que reciben el impacto del tránsito vehicular son las que registran las mayores concentraciones. Esto es evidente al comparar los promedios anuales de cada una de las estaciones de monitoreo. Las estaciones que presentan la mayor concentración de NO_x y NO son: Xalostoc (XAL) y Tlalnepantla (TLA) en el Estado de México, (XAL) el 1º de febrero. Para NO₂, el máximo horario y Merced (MER), Camarones (CAM) y Miguel Hidal-

508 ppb también el 1º de febrero en la estación Para NO₂, además de las estaciones antes mencionadas, se destaca el promedio anual en la estación Hospital General de México (HGM). El que favorecen la acumulación de contaminantes NO2 es predominantemente secundario, por lo que los valores de concentración más elevados en la región centro de la Ciudad de México son resultado de las emisiones de transporte provenientes desde el norte y el oriente, así como las generadas localmente. La distribución espacial de los promedios de las emisiones de NO_x, NO₂ y NO se representa en las Figuras 3.6, 3.7 y 3.8, respectivamente.



monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

170 ProAire ZMVM **2021 - 2030**

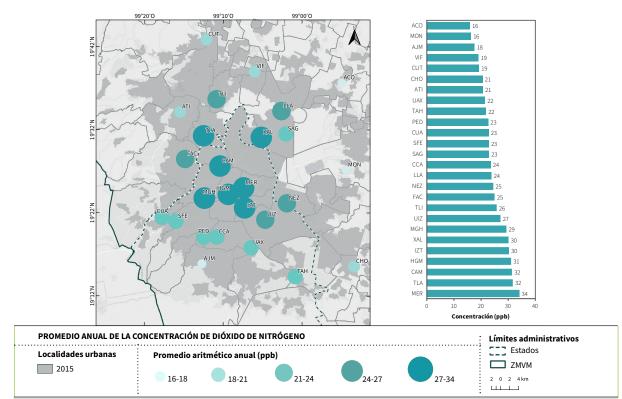


Figura 3.7 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de dióxido de nitrógeno en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

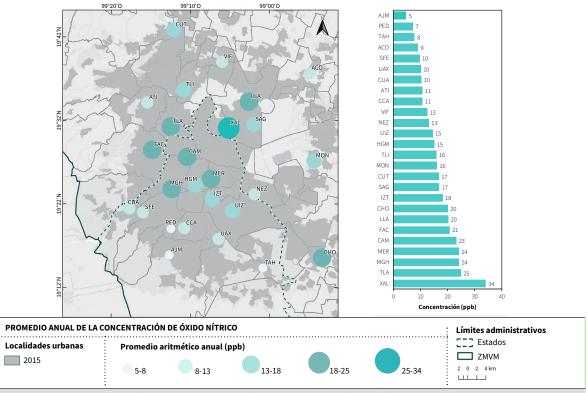


Figura 3.8 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de óxido nítrico en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

El perfil horario y semanal de los NO_x, el NO₂ y el 20:00 y las 22:00 horas debido a una disminución NO se muestra en la Figura 3.9. Cuando se analiza el comportamiento diurno de los óxidos de nitró- compresión de la atmósfera y un menor volumen geno, se observan variaciones entre el comportamiento de los tres contaminantes monitoreados. El NO, un compuesto predominantemente primario, muestra un pico de concentración muy pronunciado a las 8:00 horas, el cual se relaciona con el aumento de la actividad vehicular con fines de estudio v trabajo. El NO₂ se produce a partir de la oxidación fotoquímica del NO, por lo que el pico de concentración se registra unas cuantas horas después, a las 10:00 horas. A medida que progresa el día, el NO₂ participa en reacciones fotoquímicas donde se transforma principalmente en HNO₃, por lo que la concentración disminuye. Un segundo pico en la concentración de NO2 aparece entre las

de la altura de la capa límite, lo que ocasiona una para la dilución; estas condiciones se combinan con emisiones durante el segundo pico más importante de actividad vehicular, después de las 18:00 horas. Estas variaciones diurnas determinan el comportamiento del perfil horario de los NO_x: en las mañanas, la relación NO₂/NO_x es menor, con valores de aproximadamente 30% entre las 7:00 y 8:00, y valores máximos de 80% en torno a las 19:00 horas. En promedio, la relación NO₂/NO_X tiene valores de 60%, con una mayor proporción en sitios de monitoreo donde la contaminación por NO_x es predominantemente secundaria, como al sur de la Ciudad de México, o menor en sitios donde hay un impacto de las emisiones vehiculares.

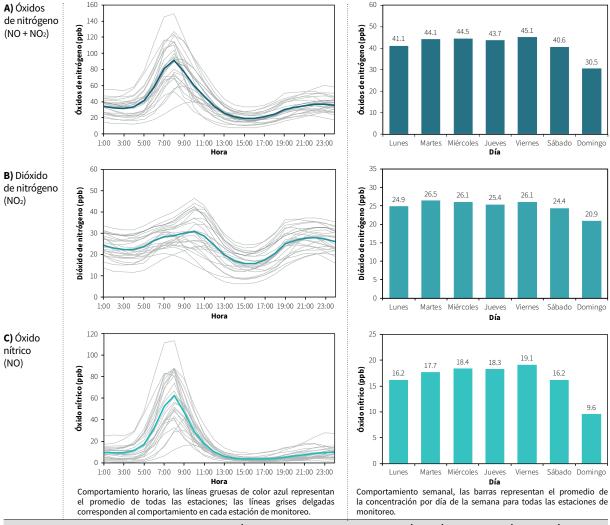


Figura 3.9 Comportamiento horario y por día de la semana de la concentración de óxidos de nitrógeno, dióxido de nitrógeno y óxido nítrico en 2018 Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

ferentes días de la semana, en donde el viernes centración de NO_X.

La variación semanal se caracteriza por niveles generalmente experimenta un incremento en la de contaminación más altos durante los días tarde y noche. No obstante, las variaciones enlaborales (lunes a viernes). Se observa un pico tre semana son pequeñas en comparación con de concentración los días viernes para el NO la disminución de la concentración en sábado y y los NO_x, y en martes para el NO₂. Estos cam- domingo, ligada a la reducción del tránsito vehibios están relacionados directamente con las cular durante el fin de semana. Históricamente, características del tránsito vehicular en los di- el domingo es el día que muestra la menor con-

3.4.3 Monóxido de carbono

Cumplimiento de la NOM de salud ambiental

En 2018 no se registraron valores superiores al lí- 2001, el CO no supera el valor límite de la mite establecido por la NOM-021-SSA1-1993 para norma; esto se asocia a la mejora tecnológica el promedio móvil de 8 horas de CO. En 2018, el de los vehículos y la renovación de la flota máximo de este indicador, 3.2 ppm, se registró vehicular (Centro Mario Molina, 2013). La en la estación Nezahualcóyotl (NEZ), mientras concentración de CO en 2018 tampoco que el máximo horario, 5.4 ppm, ocurrió en la rebasó las GCA establecidas por la OMS ni

estación Xalostoc (XAL). Se destaca que, desde el los estándares de la US EPA (ver Tabla 3.9).

Tabla 3.9 Comparación de los máximos de monóxido de carbono con respecto a los valores límite de la NOM-021-SSA1-1993, las guías de la OMS y los estándares de la US EPA

	Límite NOM —	GCA OMS		US EPA	
	Máximo 8 h 11.0 ppm	Máximo 1 h 30 000 μg/m³ *	Máximo 8 h 10 000 μg/m³ *	Máximo 1 h 35.0 ppm	Máximo 8 h 9.0 ppm
Ciudad de México	2.3 ppm (IZT)	4076 μg/m³ (UIZ)	2083 μg/m³ (IZT)	4.5 ppm (UIZ)	2.3 ppm (IZT)
Área conurbada	3.2 ppm (NEZ)	4892 μg/m³ (XAL)	2899 μg/m³ (NEZ)	5.4 ppm (XAL)	3.2 ppm (NEZ)
ZMVM	3.2 ppm (NEZ)	4892 μg/m³ (XAL)	2899 μg/m³ (NEZ)	5.4 ppm (XAL)	3.2 ppm (NEZ)

^{*} Los resultados del monitoreo se expresan en ppb. Se calculó la concentración equivalente en µg/m³ a 17°C y 585 mmHg para hacer la comparación.

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

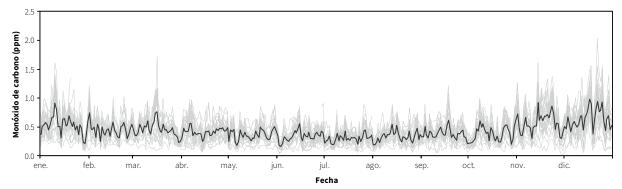
Distribución temporal y espacial de la concentración

La fuente más importante de este compuesto es la vacacionales y días festivos, en los cuales dismimayor parte del año, con excepción de los periodos

quema de combustibles fósiles en los automóviles. nuye el tránsito vehicular, la variabilidad diaria de-Por lo tanto, se considera como un indicador de pende fuertemente de la meteorología local. Esto emisiones vehiculares. Debido a que el comporta- explica el marcado comportamiento estacional de miento del tránsito vehicular es similar durante la la concentración diaria de CO, representado en la serie anual de los promedios diarios (Figura 3.10).

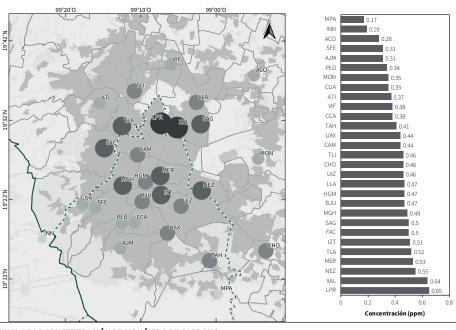
presentaron durante los meses de invierno, cuando una mayor densidad de tránsito vehicular son las son más frecuentes los días con estabilidad atmosférica y condiciones desfavorables para la disper- El promedio anual del contaminante, tomando en sión de contaminantes. Los valores mínimos se observaron durante los meses de la temporada de lluvia, con condiciones que propician la dispersión y remoción de la contaminación.

En 2018, los valores máximos del contaminante se Las estaciones de la RAMA ubicadas en zonas con que generalmente reportan los niveles más altos. cuenta todas las estaciones, fue de 0.4 ppm. En la Figura 3.11 se muestra la distribución espacial de los promedios anuales en las estaciones de la RAMA que miden este contaminante.



Nota: La línea gruesa de color gris representa el promedio aritmético de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden a los valores de los promedios diarios de cada estación de monitoreo

Figura 3.10 Serie de tiempo de los promedios diarios de monóxido de carbono en 2018 Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).



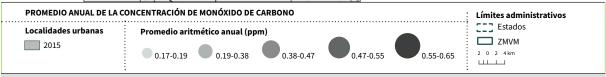


Figura 3.11 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de monóxido de carbono en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

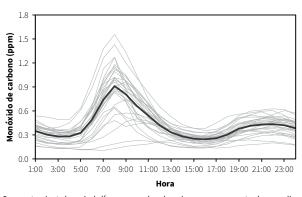
Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

174

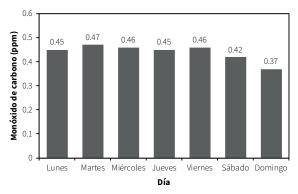
La Figura 3.12 muestra la distribución horaria y de la ZMVM, tales como el Centro de Ciencias de En el perfil horario se observa un pico muy pronunciado por la mañana, entre las 7:00 y 9:00 horas, y otro menor por la noche, entre las 20:00 y 22:00 horas. Al igual que los NO_x, el perfil horario conforme aumenta la temperatura de la atmósfe- sin un pico matutino definido. ra a lo largo del día, la altura de la capa límite se eleva y los contaminantes se dispersan y diluyen, por lo que disminuye la concentración. Las estaciones de monitoreo ubicadas en la parte central de la ZMVM, como Hospital General de México (HGM) o Benito Juárez (BJU), generalmente reportan el pico máximo una hora después que las estaciones de la periferia. Las estaciones ubicadas viento abajo de la zona urbana, al suroeste

por día de la semana de la concentración de CO. la Atmósfera (CCA) o Pedregal (PED), reportan su máximo de concentración hasta dos horas más tarde y con menor magnitud. Finalmente, otras estaciones como el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) o Milpa Alta (MPA), que está determinado por el nivel de emisiones du- se encuentran en zonas semi-rurales, presentan rante el día y la altura de la capa límite. El pico un perfil diferente, más alargado que el de las matutino se relaciona con la intensidad del trán- otras estaciones; el comportamiento de estos sisito vehicular y la baja altura de la capa límite; tios de monitoreo corresponde a las dos líneas

> En cuanto al comportamiento por día de la semana, es claro cómo disminuyen los niveles de contaminación durante el fin de semana, y el domingo es el día con menor contaminación. Se destaca que la diferencia entre los promedios de los días laborales no es significativa. Este comportamiento se explica por la disminución de la actividad vehicular durante el fin de semana.



Comportamiento horario, la línea gruesa de color gris oscuro representa el promedio de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden al comportamiento en cada estación de monitoreo.



Comportamiento semanal, las barras representan el promedio de la concentración por día de la semana para todas las estaciones de monitoreo

Figura 3.12 Comportamiento horario y por día de la semana de la concentración de monóxido de carbono en 2018 Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018: SEDEMA, 2020a).

3.4.4 Ozono

Cumplimiento de la NOM de salud ambiental

El ozono (O₃) es uno de los contaminantes que biental para O₃, la NOM-020-SSA1-2014 (ver Tabla supera continuamente los límites normados tan- 3.10). En total, el límite horario (95 ppb) se superó to en la Ciudad de México como en su zona me- en 744 horas; el máximo horario, 179 ppb, se retropolitana. En 2018, ninguna de las estaciones gistró en la estación Hospital General de México

del SIMAT cumplió con la norma de salud am- (HGM) el día 4 de mayo, durante la temporada

de ozono¹⁰ (15 de febrero al 15 de junio). Para el mado; el máximo de este indicador fue 120 ppb en promedio móvil de 8 horas, todas las estaciones la estación Pedregal (PED) el día 23 de noviembre. superaron el límite permisible de 70 ppb, con un Las estaciones de la ZMVM tampoco cumplieron total de 220 días del año durante los cuales al me- con la GCA de la OMS ni con los estándares de la nos una estación de la RAMA superó el valor nor-

US EPA para la concentración de O₃.

Tabla 3.10 Comparación de los máximos de ozono con respecto a los valores límite de la NOM-020-SSA1-2014, la guía de la OMS y el estándar de la US EPA

		Límite NOM		GCA OMS —	US EPA —
	Máximo 1 h 95 ppb	Excedencias al máximo de 1 h	Máximo 8 h 70 ppb	Máximo 8 h 100 μg/m³ *	4º máximo anual del prome- dio de 8 h, evaluado en 3 años 75 ppb
Ciudad de México	179 ppb (HGM)	653 h	120 ppb (PED)	186 μg/m³ (PED)	119 ppb (PED)
Área conurbada	149 ppb (FAC)	414 h	117 ppb (TLI)	182 μg/m³ (TLI)	105 ppb (FAC)
ZMVM	179 ppb (HGM)	744 h	120 ppb (PED)	186 μg/m³ (PED)	119 ppb (PED)

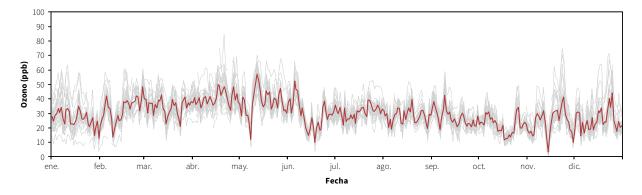
^{*} Los resultados del monitoreo se expresan en ppb. Se calculó la concentración equivalente en μg/m³ a 17°C y 585 mmHg para hacer la comparación Entre paréntesis se muestra la clave de la estación donde se registró el valor máximo. En rojo se muestran los incumplimientos

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

Distribución temporal y espacial de las concentraciones

El promedio anual de la concentración de O₃ en todos los sitios de monitoreo fue de 30 ppb, diarios de las concentraciones horarias fue de

100 ppb. Es importante enfatizar que las condiciones meteorológicas que se presentan duranmientras que el promedio anual de los máximos en la te el año tienen una influencia significativa en la concentración de O₃.



Nota: La línea gruesa de color rojo representa el promedio aritmético de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden a los valores de los promedios diarios de cada estación de monitoreo

Figura 3.13 Serie de tiempo de los promedios diarios de ozono en 2018

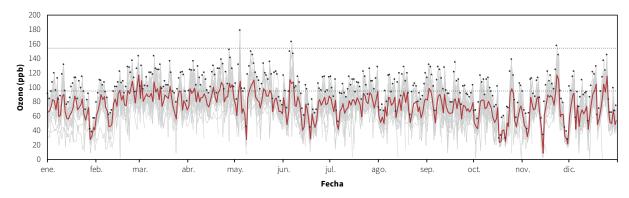
Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

10 El Informe Anual de Calidad del Aire 2015 de la SEDEMA analiza el porcentaje de diferencia entre el promedio diario de O₃ respecto del promedio anual desde el año 2000 y hasta el 2015. El resultado de este análisis permitió definir la duración de la temporada de O₃ en la ZMVM (SEDEMA, 2016).

La serie de tiempo del promedio diario por estación (Figura 3.13) muestra el incremento de la concentración en la temporada de O₃. Esta época se caracteriza por intensa radiación solar, temperaturas elevadas y sistemas meteorológicos anticiclónicos que ocasionan estabilidad atmosférica, vientos débiles y, en consecuencia, la acumulación de los compuestos precursores (NO_x y COV), por lo que se favorecen las reacciones de formación de O₃. Se aprecia que, a partir de junio, la concentración disminuye; en esta época del año hay más nubosidad y menos radiación solar, a la vez que se reducen las concentraciones de precursores como los NO_x por efecto de la lluvia típica de la temporada.

La serie de tiempo de los valores máximos diarios del promedio horario (Figura 3.14) muestra una oscilación de las concentraciones entre 28 y 179 ppb. Al igual que el comportamiento del promedio diario, se observa un marcado aumento de la concentración máxima en la temporada de

ozono. En 2018 únicamente se presentaron tres episodios de concentración horaria superior a 154 ppb, el límite para la activación de la Fase I de Contingencia; dos de estos dentro de la temporada de ozono (4 de mayo y 6 de junio) y el tercero el 23 de noviembre. Sin embargo, solamente el 6 de junio se activó el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) debido a la persistencia de condiciones meteorológicas adversas que favorecieron la acumulación de los precursores durante la mañana y poca dispersión del contaminante durante la tarde. En la temporada seca-fría (noviembre a febrero), el 23 de noviembre se alcanzó una concentración de 157 ppb; lo anterior se debió a un sistema anticiclónico que generó alta estabilidad atmosférica, lo que dificultó la dispersión del contaminante y propició su acumulación en la atmósfera por algunos días. Esto sucede ocasionalmente en esta época del año, debido a etapas de transición entre sistemas y temporadas meteorológicas.



Nota: La línea gruesa de color rojo representa el promedio aritmético de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden a los valores de cada una de las estaciones de monitoreo; las líneas punteadas marcan el límite de la NOM para la concentración horaria (95 ppb) y el valor de activación de las contingencias atmosféricas ambientales por ozono (155 ppb); finalmente, los puntos corresponden a los máximos diarios independiente

Figura 3.14 Serie de tiempo de los máximos diarios de ozono en 2018

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

Debido a las características fisiográficas y meteorológicas de la cuenca, el centro y sur de la de excedencias registradas; la estación Pedre-

gal (PED) y Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) presentaron más de 300 horas con valores Ciudad de México son las regiones más afecta- superiores a la NOM (ver Figura 3.15). De las 17 das por el contaminante. La distribución espa- estaciones de la Ciudad de México que midieron cial del número de horas con valores superiores O₃, 13 (76% del total) registraron más de 100 hoa 95 ppb, límite del indicador de una hora, mues-ras con concentraciones por encima de 95 ppb; tra que las estaciones del centro y suroeste de en el Estado de México, 3 de las 15 estaciones la zona metropolitana tienen el mayor número (20%) superaron el límite horario en más de 100 ocasiones. Las estaciones que registraron menos horas por encima del límite fueron Acolman lapa (UIZ) en la Ciudad de México. No obstante, (ACO) y Xalostoc (XAL) al norte, y Chalco (CHO) al sureste, en el Estado de México, y UAM Iztapa-

todas las estaciones de la RAMA superaron el valor de la NOM.

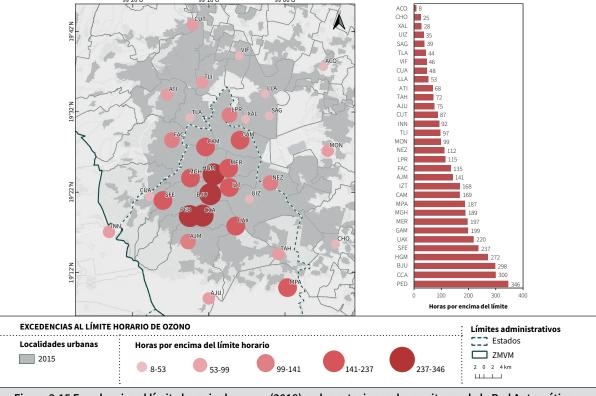


Figura 3.15 Excedencias al límite horario de ozono (2018) en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

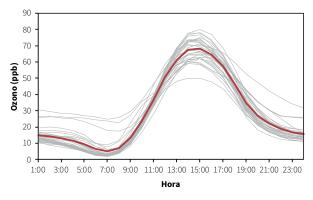
El O₃ es un contaminante secundario, por lo que su formación depende de la abundancia de sus precursores (NO_x y COV) y la radiación solar. La variabilidad diurna (ver Figura 3.16) muestra un incremento en los niveles de contaminación que inicia a las 9:00 horas, cuando comienzan las reacciones fotoquímicas, y que continúa hasta alcanzar los máximos niveles entre las 14:00 y 16:00 horas, periodo en el que se registra la mayor actividad fotoguímica. Por la tarde comienza el decremento de la concentración, que se relaciona con el descenso del sol y aumento de la velocidad del viento. Durante la noche y madrugada se ha observado que, en las estaciones ubicadas a mayor altitud de la ZMVM, las concentraciones nocturnas oscilan entre 20 y 35 ppb, y en ocasiones pueden superar el límite del promedio móvil de 8 horas (SEDEMA, 2017). En estas zonas puede haber un mayor aporte de fuentes naturales (asociado a

una mayor área con vegetación forestal); la concentración también puede estar influenciada por el O₃ residual diurno que queda estancado en las capas de la atmósfera y la concentración natural de fondo. La concentración mínima de O3 se observa a las 7:00 horas, debido a la titulación del ozono residual por las emisiones frescas de NO_x.

La distribución por día de la semana (ver Figura 3.16) muestra mayores concentraciones el fin de semana, en comparación con los días laborales. Entre los días de la semana se muestra poca variación, con un promedio de 29 ppb de lunes a viernes; el sábado el promedio aumenta en 1 ppb de concentración (30 ppb) con respecto a los días laborales y el domingo se registró el mayor promedio, con 32 ppb. Tanto la concentración promedio, como los niveles máximos horarios, son mayores en sábado y domingo en comparación con el res178

significativas. Este fenómeno se ha observado en otras ciudades con problemas de contaminación por O₃, donde el régimen de producción es sensible a COV; este fenómeno se conoce como efecto de fin de semana (Stephens et al., 2008). El impacto se observa claramente en las estaciones que se encuentran dentro del área urbana y, por el con-

to de la semana, con diferencias estadísticamente trario, en las estaciones ubicadas en la periferia el efecto es menor o está ausente, con diferencias que no son estadísticamente significativas para los diferentes días de la semana. Se destaca que la variación semanal en las estaciones urbanas fue inversa a la que se observó para los contaminantes primarios, en donde las concentraciones son menores durante los fines de semana.





Comportamiento horario, la línea gruesa de color rojo representa el promedio de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden al comportamiento en

Comportamiento semanal, las barras representan el promedio de la concentración por día de la semana para todas las estaciones de monitoreo

Figura 3.16 Comportamiento horario y por día de la semana de la concentración de ozono en 2018 Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico. 2018: SEDEMA, 2020a).

3.4.5 Partículas suspendidas

Cumplimiento de la NOM de salud ambiental

La REDMA hace muestreo de PST, PM₁₀ y PM_{2,5} cada seis días, a través de equipo de operación manual o semiautomático; la información obtenida con esta red se utiliza para el control de calidad de los equipos continuos de la RAMA, para evaluar el cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014 y para determinar la composición de las partículas suspendidas. La cobertura de la REDMA se limita a sitios dentro de la Ciudad de México y estaciones en algunos municipios conurbados del Estado de México.

En cuanto al cumplimiento de la NOM, la evaluación muestra que tanto las partículas PM₁₀ como las PM₂₅ todavía son una problemática en la ZMVM y, junto con el O₃, son la principal causa de la mala calidad del aire en la región. En el caso de PM₁₀, los

valores para el promedio de 24 horas y el promedio anual superaron los valores límite de la NOM-025-SSA1-2014 en 2018 (ver Tabla 3.11). El máximo del promedio de 24 horas con el método de referencia (monitoreo manual) fue de 182 µg/m³, valor registrado al norte de la ZMVM en la estación Xalostoc (XAL), en el Estado de México; solamente dos estaciones, Pedregal (PED) y Lomas (LOM), en la Ciudad de México, presentaron valores por debajo del límite normado, con 62 y 69 μg/m³. Para el valor del promedio anual, el máximo también se registró en la estación XAL y corresponde a 71 μg/m³. En la Ciudad de México el promedio anual superó el límite solamente en dos estaciones (MER y UIZ), mientras que en el Estado de México todas las estaciones superaron el umbral normado.

situación similar ya que en ninguna estación se cumple con la NOM-025-SSA1-2014 (ver valores máximos en la Tabla 3.12). En cuanto al límite para el promedio de 24 horas, este se superó en la mayoría de las estaciones, excepto en Pedregal (PED) y San Agustín (SAG), las cuales presentaron PM_{2.5} con los límites de la NOM de salud ambiental, los valores mínimos con 44 y 43 µg/m³, respectivamente; el valor máximo del indicador de 24 horas fue de 70 μg/m³ en la estación Xalostoc (XAL). El límite permisible para el promedio anual se superó en todas las estaciones, con un valor máximo en la estación XAL en el Estado de México, igual a 27.7 μg/m³. A diferencia de las PM₁₀, se registró una menor variabilidad entre las concentraciones

En el caso de las partículas PM_{2.5} se observa una reportadas en las estaciones que midieron este contaminante; esto se debe a una menor influencia de fuentes primarias, dado que una fracción importante de las PM₂₅ es de origen secundario.

> La comparación de las concentraciones de PM₁₀ y las GCA de la OMS y los estándares de la US EPA se resume en la Tabla 3.11 y la Tabla 3.12, respectivamente. Se puede observar que en la ZMVM tampoco se cumplió con las GCA de partículas PM₁₀ y PM₂₅ para el promedio de 24 horas y el promedio anual recomendadas por la OMS. Se destaca que para PM₁₀ no se superó el estándar de la US EPA, aunque para PM_{2.5} este no es el caso.

Tabla 3.11 Comparación de los máximos de partículas PM₁₀ con respecto a los valores límite de la NOM-025-SSA1-2014, las guías de la OMS y el estándar de la US EPA

	Límit	e NOM	GCAC	GCA OMS —		
	Máximo 24 h 75 μg/m³	Promedio anual 40 μg/m³	Percentil 99 24 h 50 μg/m³	Promedio anual 20 µg/m³	Promedio trianual del 2º máximo 24 h 150 µg/m³	
Ciudad de México	$103\mu g/m^3$ (MER)	48 μg/m³ (MER)	$103\mu g/m^3$ (MER)	48 μg/m³ (MER)	$91\mu g/m^3$ (MER)	
Área conurbada	182 μg/m³ (XAL)	70 μg/m³ (XAL)	182 μg/m³ (XAL)	70 μg/m³ (XAL)	133 μg/m³ (XAL)	
ZMVM	182 μg/m³ (XAL)	70 μg/m³ (XAL)	182 μg/m³ (XAL)	70 μg/m³ (XAL)	133 μg/m³ (XAL)	

Entre paréntesis se muestra la clave de la estación donde se registró el valor máximo. En rojo se muestran los incumplimientos

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

Tabla 3.12 Comparación de las máximos de partículas PM_{2.5} con respecto a los valores límite de la NOM-025-SSA1-2014, las guías de la OMS y el estándar de la US EPA

	Lím	ite NOM	GC/	A OMS	US EPA			
	Máximo 24 h 45 μg/m³	Promedio anual 12 μg/m³	Máximo 24 h (percentil 99) 25 μg/m³	Promedio anual 10 μg/m³	Promedio trianual del 2º máximo (24 h) 35 μg/m³	Promedio trianual 12 μg/m³		
Ciudad de México	58 μg/m³ (UIZ)	23.2 μg/m³ (MER)	58 μg/m³ (UIZ)	23.2 μg/m³ (MER)	44 μg/m³ (MER)	23 μg/m³ (MER)		
Área conurbada	70 μg/m³ (XAL)	27.7 μg/m³ (XAL)	70 μg/m³ (XAL)	27.7 μg/m³ (XAL)	57 μg/m³ (XAL)	27 μg/m³ (XAL)		
ZMVM	70 μg/m³ (XAL)	27.7 μg/m³ (XAL)	70 μg/m³ (XAL)	27.7 μg/m³ (XAL)	57 μg/m³ (XAL)	27 μg/m³ (XAL)		

Entre paréntesis se muestra la clave de la estación donde se registró el valor máximo. En rojo se muestran los incumplimientos

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

Distribución temporal y espacial de la concentración

A diferencia de la evaluación del cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014, que utiliza los datos generados por la REDMA, el análisis de la calidad del aire, que incluye la distribución temporal y espacial de la concentración de partículas suspendidas, se realiza a partir de las mediciones de la RAMA¹¹. La RAMA tiene como objetivo evaluar la calidad del aire continuamente y, al tener un mayor número de estaciones que la REDMA, tiene una mayor cobertura, por lo que se pueden estudiar los patrones espaciales y temporales de los contaminantes.

Los promedios anuales del monitoreo continuo de partículas suspendidas en la ZMVM fueron de 44 $\mu g/m^3$ para PM_{10} , 21 $\mu g/m^3$ para partículas gruesas ($PM_{10\cdot 2.5}$) y 23 $\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$. Cuando se comparan los promedios por entidad federativa, se tiene que en la Ciudad de México los promedios anuales para las tres fracciones fueron 41, 18 y 23 $\mu g/m^3$, mientras que en el área conurbada del Estado de México los valores fueron iguales a 47, 27 y 24 $\mu g/m^3$, respectivamente. La diferencia en las concentraciones entre la Ciudad de México y el área conurbada del Estado de México se debe a la presencia de una mayor cantidad de fuentes de emisiones primarias en esta última.

Las series de tiempo de los promedios diarios de PM₁₀, PM_{10-2.5} y PM_{2.5} muestran que la temporada fría-seca (noviembre a febrero) es cuando se incrementa la concentración de partículas (Figura 3.17). Esto se debe al aumento en la frecuencia e intensidad de inversiones térmicas, condiciones de estabilidad atmosférica y disminución de la capa de mezcla en esta temporada. Las concentraciones más bajas se registran en la temporada de lluvia, debido al efecto de lavado asociado.

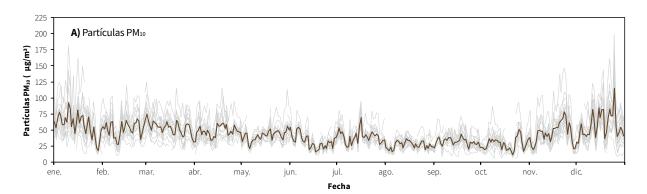
Es importante mencionar el impacto que tienen localizadas al sur. los juegos pirotécnicos sobre las concentraciones de partículas, especialmente durante las celebraciones de fin de año (25 de diciembre y nurbada del Esta

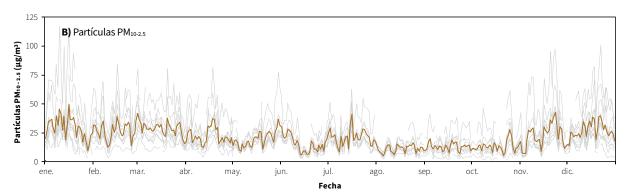
el 1 de enero). El uso de pirotecnia ocasiona la mayoría de los eventos de alta concentración por partículas; por ejemplo, en 2018 los valores máximos de los promedios de 24 horas de PM₁₀ y PM_{2.5} en estaciones automáticas se registraron el 25 de diciembre: 199 μg/m³ para PM₁₀, en la estación Villa de las Flores (VIF), y 118 μg/m³ para PM_{2.5} en la estación Nezahualcóyotl (NEZ), ambas ubicadas en el Estado de México. Durante este día, siete estaciones automáticas de la ZMVM presentaron promedios diarios mayores a 90 μg/m³ de PM_{2.5} (umbral que no fue superado en ningún otro día).

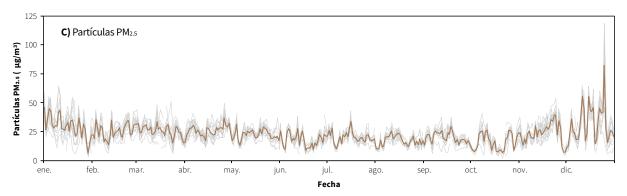
Las plumas de contaminación producidas por los juegos pirotécnicos contienen una gran cantidad de partículas finas menores a 1 µm, con metales traza y iones solubles en agua. Durante el periodo de mayor intensidad de actividad pirotécnica la composición de las partículas está dominada por tres iones inorgánicos -amonio, nitrato y sulfato- en cantidades que alcanzan el 26% del total de la masa de las PM_{2.5}, así como aerosoles orgánicos que contribuyen con el 25% (Retama et al., 2019). Las partículas que se forman debido a las emisiones de la pirotécnica tienen un alto potencial oxidativo que ocasiona efectos adversos en la salud de la población y un impacto negativo por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Fang et al., 2017; Yang et al., 2014).

En las Figuras 3.18, 3.19 y 3.20 se muestra la distribución espacial de los promedios anuales de las diferentes fracciones de partículas (PM₁₀, PM_{10-2.5} y PM_{2.5}, respectivamente). En términos generales, las estaciones ubicadas al norte de la zona metropolitana registran consistentemente concentraciones de partículas mayores que las localizadas al sur.

En 2018, las estaciones ubicadas en el área conurbada del Estado de México registraron los







Nota: Las líneas gruesas de color café representan el promedio aritmético de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden a los valores de los promedios diarios de cada estación de monitoreo.

Figura 3.17 Serie de tiempo de los promedios diarios de partículas PM₁₀, PM_{10-2.5} y PM_{2.5} en 2018

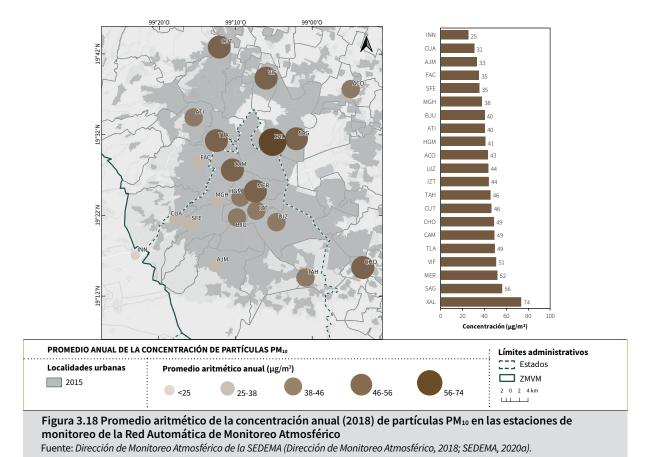
Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018: SEDEMA, 2020a).

¹¹ Esta distinción se debe a que la REDMA utiliza un método de referencia para la medición de la concentración de partículas suspendidas, mientras que la RAMA utiliza un método equivalente.

182 ProAire ZMVM **2021 – 2030**

mayores promedios de PM₁₀, con un máximo La medición de PM_{2.5} está centralizada al terrien Xalostoc (XAL) de 74 μg/m³, seguido de San torio de la Ciudad de México. Sin embargo, se Agustín (SAG) con 56 μg/m³. En la Ciudad de cuenta con mediciones en algunas estaciones México el máximo del promedio anual de PM₁₀ en el área conurbada. Los promedios anuales en se registró en la estación Merced (MER), igual a las estaciones de la Ciudad de México estuvieron 52 μg/m³. Los menores promedios anuales se en el intervalo de 19 a 26 μg/m³, con el máximo observaron al sur de la Ciudad de México, con en la estación Merced (MER). En el Estado de Mémínimos de 31 μg/m³ en la estación Cuajimalpa xico, el promedio anual máximo se registró en la (CUA) y 33 μg/m³ en Ajusco Medio (AJM). En el estación Xalostoc (XAL), igual a 29 μg/m³. Para caso de las partículas gruesas (PM_{10-2.5}) hay una partículas PM_{2.5} se observa una mayor homogeinfluencia importante de las emisiones locales neidad entre todas las estaciones; solo las que primarias. Al igual que para las PM₁₀, el valor se encuentran en el límite de la zona metropolimáximo en la Ciudad de México se registró en la tana al sur y poniente presentan valores de conestación Merced (MER), y en el Estado de México centración menores a 20 μg/m³, como es el caso en la estación Xalostoc (XAL).

de Ajusco Medio (AJM) y Santa Fe (SFE).



Capítulo 3. Diagnóstico de la Calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México

183

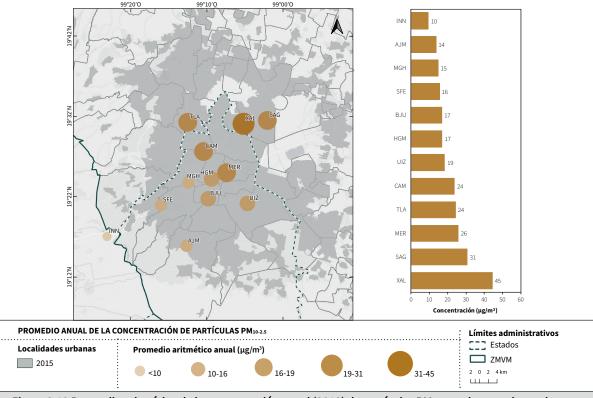
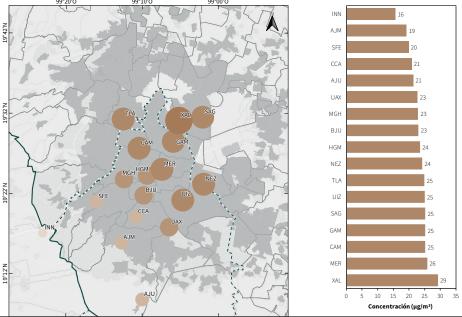


Figura 3.19 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de partículas PM_{10-2.5} en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).



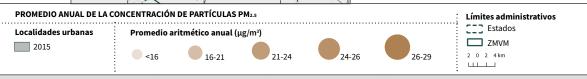


Figura 3.20 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de partículas PM_{2.5} en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

184

La variación horaria y por día de la semana de las concentraciones de partículas suspendidas se presentan en la Figura 3.21, en la cual se puede observar que, en la mayoría de las estaciones, el ciclo diurno de las fracciones PM₁₀ y PM_{10-2.5} presenta dos picos de concentración, el primero entre las 8:00 y 9:00 horas y el segundo alrededor de las 19:00 horas. Este comportamiento se asocia principalmente a las contribuciones provenientes de las emisiones vehiculares, lo que incluye la suspensión de polvos y las emisiones primarias del escape (p. ej. de carbono negro).

En el caso de PM_{2.5}, el perfil promedio se caracteriza por un pico único entre las 10:00 y las 12:00,

el cual se asocia a la formación secundaria de aerosoles inorgánicos (como los nitratos y sulfatos) y orgánicos (principalmente compuestos de baja presión de vapor con diversos grados de oxidación). En las estaciones que se ubican al sur o poniente de la zona metropolitana la duración del pico es más prolongado y en algunas estaciones decrece por la tarde, a partir de las 17:00 horas; por ejemplo, en las estaciones SFE, INN, AJM y AJU, que se ubican en los límites de la zona metropolitana, se observan picos relativamente más tarde, debido al arrastre de los contaminantes y la formación de aerosoles secundarios.

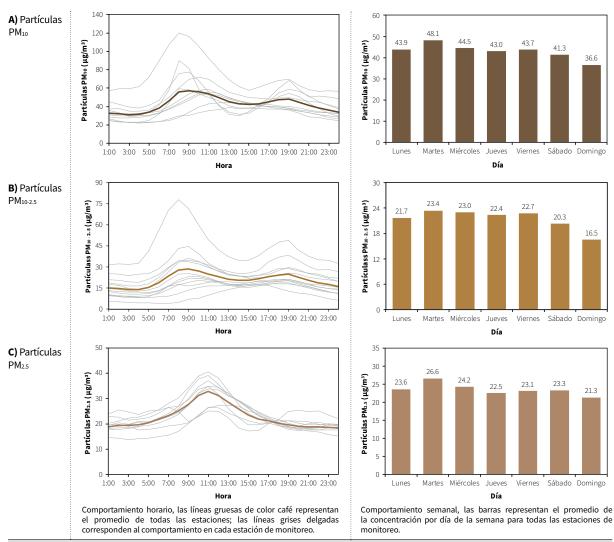
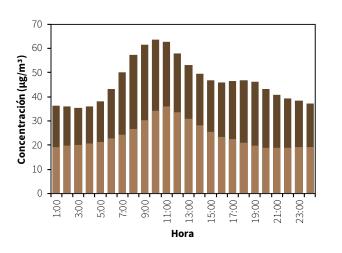


Figura 3.21 Comportamiento horario y por día de la semana de la concentración de PM10, PM10-2.5 y PM2.5 en 2018 Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).

Las PM₁₀ representan la suma de las fracciones fina y gruesa. De la masa total de estas, el 52% corresponde a PM_{2.5} y el 48% a PM_{10-2.5} (Figura 3.22). La proporción entre la fracción gruesa y fina de las partículas tiene un comportamiento variable durante el día, debido a que las emisiones primarias tienen un mayor impacto en la fracción gruesa; este tipo de emisiones aumenta la proporción de la fracción gruesa en dos periodos del día y se relacionan con las horas de mayor tránsito vehicular, por la mañana (de 7:00 a 9:00 horas) y en la tarde-noche (de 17:00 a 22:00 h). Por otro lado, la fracción fina tiene una importante contribución por la formación de aerosoles secundarios, fenó-

meno que se presenta entre las 11:00 y las 15:00 horas, por lo que esta fracción representa más del 55% durante este periodo del día. En las restantes horas del día la proporción entre ambas fracciones es prácticamente igual. Se destaca que la distribución de la proporción de las fracciones varía de acuerdo con la ubicación de los sitios de monitoreo. Cuando hay vialidades importantes en el área de representatividad de las estaciones, la fracción gruesa será mayor y el comportamiento horario será similar al de contaminantes primarios como el CO; en cambio, si el sitio se encuentra viento abaio de la formación de compuestos secundarios, el aporte de la fracción fina será más grande.



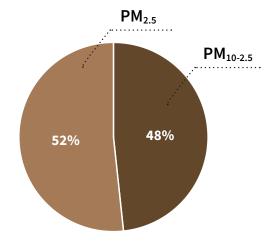


Figura 3.22 Contribución promedio de las partículas PM_{2.5} y PM_{10-2.5} a la masa total y por hora de las PM₁₀ Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018: SEDEMA, 2020a).

martes y el valor más bajo en domingo; la reducción similares para todos los días de la semana.

El comportamiento semanal de PM10 y PM10-2.5 es notoria los fines de semana y también se registra muestra un perfil similar al de contaminantes ga- un ligero incremento los viernes. Para las PM₂₅, si seosos como CO y NOx. Los dos tipos de fracciones bien el promedio más alto se registró en martes y presentan la concentración promedio más alta en el menor en domingo, las concentraciones fueron

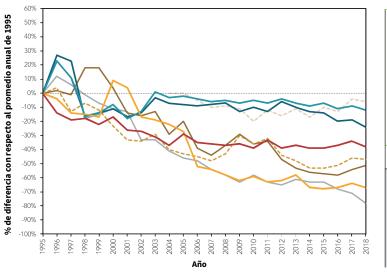
3.4.6 Tendencia histórica de calidad del aire

La tendencia, en términos de calidad del aire, se puede definir como el desplazamiento gradual de la concentración de los contaminantes a través de los años. Esta puede presentar una pendiente positiva, lo que indica el aumento de las concentraciones a lo largo de los años, o negativa cuando se registra una disminución. El análisis de

tendencia permite observar cambios en las concentraciones a través de los años, evaluar el impacto a largo plazo que han tenido los programas y políticas públicas dirigidas a reducir emisiones contaminantes y mejorar la calidad del aire, así como determinar patrones de comportamiento en los contaminantes, ya sean estacionales, cíclicos o, por el contrario, comportamientos aleatorios sin un patrón específico en el transcurso del tiempo (SEDEMA, 2020a).

En la ZMVM se mantiene una tendencia decreciente sino hasta los años 2000. La disminución en la conen los principales contaminantes desde la segunda mitad de la década de los 90, con reducciones más sustanciales en los primeros años, a partir de que inició la gestión de la calidad del aire en la zona metropolitana. La Figura 3.23 compara los porcentajes de reducción en la concentración promedio anual para SO₂, NO_x, NO₂, CO, O₃, PST y PM₁₀, con respecto al año 1995, a partir del cual las estaciones histó-

ricas¹² cuentan con datos consistentes. Para PM₂₅ el porcentaje de reducción se calculó a partir de la concentración promedio anual de 2004, debido a que el monitoreo de este contaminante no empezó centración de los contaminantes primarios sugiere que las políticas vigentes mantienen todavía un impacto favorable en el control de emisiones. La tasa de decremento ha sido más moderada, pero sostenida, en la última década; esto es meritorio, dado que la mejora en la calidad del aire ha continuado a pesar del crecimiento poblacional y la expansión del área urbana.



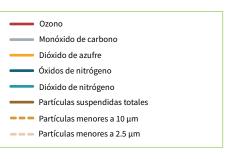


Figura 3.23 Porcentaje de diferencia del promedio anual de las concentraciones de contaminantes criterio con respecto al año base

Fuente: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (SEDEMA, 2020a).

En las tres décadas de operación del SIMAT, se 2004, un ligero incremento en 2005 y a partir de observa que las acciones de los programas de gestión de la calidad del aire han tenido un im- reducción, los cuales oscilan entre 34 y 39% con pacto positivo en la reducción de la contaminación atmosférica. Las concentraciones de Pb, SO₂, 2018 todos los contaminantes muestran un de-CO y NO₂ muestran una reducción significativa, cremento en comparación con 2017, con excepcon concentraciones por debajo de los límites ac- ción de las PST. Para el caso de las partículas PM₁₀ tuales de las NOM de salud ambiental, según se expuso anteriormente. El máximo porcentaje de sido aleatorio, sin una tendencia a la baja percepreducción en 2018 respecto del año 1995 es de 78% para CO, seguido de 67% para SO₂. Los contaminantes con menor reducción en el año 2018 traciones respecto del año 1995 (2004 para PM_{2.5}), son PM₁₀, PM_{2.5} y NO₂, con 16%, 9% y 12%, respectivamente. El O₃ presenta una reducción hasta

2006 se estabilizan los valores del porcentaje de diferencias estadísticamente no significativas. En y PM_{2.5}, el comportamiento en la última década ha tible. Asimismo, se destaca que para el caso de O₃, PM₁₀ y PM_{2.5}, pese al decremento en las concenno se ha logrado alcanzar los valores límite de sus respectivas normas de salud ambiental.

12 Las estaciones que se consideraron para el análisis cuentan con registros de cada contaminante desde el año base y son: Atizapán (ATI), Camarones (CAM), Cuajimalpa (CUA), FES-Acatlán (FAC), Los Laureles (LLA), La Presa (LPR), Merced (MER), Montecillo (MON), Pedregal (PED), San Agustín (SAG), Tláhuac (TAH), Tlalnepantla (TLA), Tultitlán (TLI), UAM-Iztapalapa (UIZ), Villa de las Flores (VIF) y Xalostoc (XAL). No todos los sitios de monitoreo se utilizaron para todos los contaminantes, debido a que no los miden.

Adicionalmente se cuenta con las series de tiempo históricas de los promedios mensuales desde 1995 hasta 2018, así como su desviación estándar: este análisis se puede consultar en el Informe Anual de Calidad del Aire 2018 de la SEDEMA (2020a) v en el Anexo 3.3 del presente ProAire. En las series de tiempo se construyó una línea de tendencia con el método LOESS¹³, el cual permite remover la variación estacional a través de un análisis de series de tiempo (Cleveland, Cleveland, McRae, & Terpenning, 1990). De manera general. la tendencia en la reducción de la contaminación atmosférica ha sido consistente con la aplicación de medidas de reducción de emisiones y programas de calidad del aire, ya que desde finales de la década de los noventas se presentan decrementos para todos los contaminantes. Sin embargo, prácticamente todos los contaminantes, con excepción del CO, muestran una tendencia estable en la última década.

Dado que la tasa de reducción en los niveles de contaminación es menor que en décadas previas, las variaciones atribuibles a las políticas de gestión se traslapan con aquellas asociadas a variaciones climáticas locales (p. ej. cambios en el régimen pluvial, isla de calor urbano), regionales (p. ej. cambios en los sistemas sinópticos) y globales (p. ej. el fenómeno ENOS), por lo que no es posible atribuir la reducción a cualquiera de ellas. Para todos los contaminantes se identifica una fuerte variación estacional, con ciclos anuales determinados por el contraste meteorológico entre las temporadas seca-fría, seca-caliente y húmeda. Los contaminantes primarios presentan picos de concentración durante el invierno, mientras que para los contaminantes secundarios, particularmente O₃, ocurren en la primavera; en todos los casos los valores de concentración más bajos de cada contaminante coinciden con la temporada de lluvias (SEDEMA, 2018a).

3.4.7 Calidad del aire en el estado de Hidalgo

De las tres cuencas atmosféricas localizadas al Sur del Estado de Hidalgo, dos presentan interacciones importantes con la ZMVM:

- La cuenca de Pachuca, que exporta contaminantes hacía el Estado de México a través del corredor Texcoco-Amecameca y Ozumba, principalmente entre junio y diciembre¹⁴.
- La cuenca de Tula, al noroeste de la ZMVM, que registra emisiones significativas por la actividad en el corredor industrial Tula-Vito-Apasco. Este corredor se identifica en la normatividad mexicana como Zona Crítica (NOM-085-SEMARNAT-2011 y NOM-016-CRE-2016) por presentar altas concentraciones de contaminantes atmosféricos, y está conformada por los municipios de Tula de Allende, Tepeji del Río de Ocampo, Tlahuelilpan, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tlaxcoapan y Apaxco, en los estados de Hidalgo y de México. En específico, dentro del corredor se ubica la refinería Miguel Hidalgo de PEMEX, y la termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de la CFE, entre otras industrias.

El transporte transfronterizo de contaminantes entre estas dos cuencas y la ZMVM resalta la importancia de analizar los datos de monitoreo atmosférico generados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo (SEMAR-NATH), que opera el Sistema de Monitoreo Atmosférico del Estado de Hidalgo (SIMAEH). El SIMAEH está conformado por 20 estaciones de monitoreo atmosférico, 10 automáticas y 10 manuales, ubicadas principalmente al sur del Estado, con una cobertura de 12 municipios. En el Anexo 3.6 se detallan las características del SIMAEH.

¹³ La regresión de LOESS (Locally Estimated Scatterplot Smoothing) es una técnica no paramétrica que utiliza la regresión ponderada local para ajustar una curva suave a través de puntos en un diagrama de dispersión. Las curvas de LOESS pueden revelar tendencias y ciclos en los datos que pueden ser difíciles de modelar con una curva paramétrica.

¹⁴ UNAM & INECC. (2016). Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/208883/Informe_Final_AECAME_20161230.pdf

Diagnóstico de la calidad del aire en Tizayuca

El municipio de Tizayuca, que forma parte de la ZMVM, se ubica al sur del estado de Hidalgo y la cuenca atmosférica de Pachuca. Tizayuca presenta un crecimiento industrial, habitacional y de servicios, lo que se ve reflejado en la calidad del aire que se registra a través de la estación Tizayuca (TIZ) del SIMAEH, que es de tipo mixto y conjunta una estación automática y una manual para monitorear las concentraciones de contaminantes criterio en el aire ambiente. La siguiente tabla muestra el cumplimiento de las NOM de salud ambiental en la estación TIZ para el año 2018. En el Anexo 3.6 es posible de los diferentes indicadores de calidad del aire.

Para partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, no se rebasaron los límites permisibles para los promedio diarios de 24 horas, según datos de la red de monitoreo manual. Se destaca que en la estación automática sí se rebasó el límite para el promedio de 24 horas de PM₁₀ en 20 ocasiones; no obstante, el método de referencia para la evaluación del cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014 es a través de equipos de operación manual o semi-automática. En el caso del resto de los contaminantes, únicamente se incumplió con el límite permisible de O₃ para el promedio móvil de 8 horas, igual a 70 ppb según la NOMencontrar gráficas detalladas con los perfiles anuales 020-SSA1-2014. Se destaca que este límite se rebasó en 6 ocasiones.

Tabla 3.13 Cumplimiento de las NOM de salud ambiental en Tizayuca, Hidalgo, año 2018

Contaminante	Tipo de monitoreo	Indicador	Límite NOM	Valor máximo			
PM ₁₀	Manual	Máximo (promedio 24 h)	75 μg/m³	75 μg/m³			
L 14170	Maridat	Promedio anual (24 h)	40 μg/m³	ND			
PM _{2.5}	Manual	Máximo (promedio 24 h)	45 μg/m³	35 μg/m³			
1 1112.5	Maridat	Promedio anual (24 h)	12 μg/m³	ND			
O ₃	Automático	Máximo (datos horarios)	95 ppb	88 ppb			
	Automatico	Máximo (promedio móvil 8 h)	70 ppb	75 ppb			
NO ₂	Automático	Máximo (datos horarios)	210 ppb	83 ppb			
SO ₂	Automático	Máximo (promedio móvil 8 h)	200 ppb	58 ppb			
302	Automatico	Máximo (promedio 24 h)	110 ppb	17 ppb			
		Promedio anual (datos horarios)	25 ppb	4 ppb			
со	Automático	Máximo (promedio móvil 8 h)	11.0 ppb	3.8 ppm			
Fuente: Datos proporcionados por la SEMARNATH vía correo electrónico (2020).							

Diagnóstico de la calidad del aire en la cuenca de Tula

En el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, dentro de la naturales elementales, en la zona también se presencuenca de Tula, ocurren diversas actividades contamigeneración de energía eléctrica y la refinación de petrótodo el estado de Hidalgo, 27.8% y 18.4% de las partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, respectivamente, y 18.4% del total de NO_x. Además, por su potencial de caliza y otros recursos

tan actividades como la producción de cemento y cal, nantes. Las dos fuentes de emisión principales son la haciendo de la zona un polo de desarrollo importante, donde los volúmenes de emisiones conllevan afectaleo, que en conjunto aportan 93.1% del SO₂ emitido en ciones importantes en la calidad del aire. En la sección 5.5.1 del Capítulo 5 se profundiza sobre las emisiones de contaminantes en el corredor industrial referido.

Asimismo, al ubicarse vientos arriba del Estado de México, estos contaminantes tienen el potencial de ser transportados hacia la ZMVM. Por ejemplo, distintos estudios y campañas han evidenciado el aporte que tiene el corredor Tula-Vito-Apasco en las concentraciones de SO2 al noroeste de la ZMVM, lo cual también se observa en los resultados del monitoreo del SIMAT descritos en la sección 3.4.1. Para más información de la interacción entre las cuencas de la ZMVM y Tula, se puede consultar la sección 1.3 del Capítulo 1. Es así que resulta importante contar con evaluaciones de la calidad del aire en la cuenca de Tula, particularmente alrededor del corredor industrial. La descripción completa de los resultados históricos del monitoreo se presentan en el Anexo 3.6. Algunas conclusiones relevantes son las siguientes:

- Desde 2015, el muestreo manual de PM₁₀ (3 estaciones) y PM_{2.5} (4 estaciones) registra excedencias respecto de los límites permisibles para los promedios diarios, particularmente en la temporada seca-fría. En las cuatro estaciones de monitoreo automático en la región, que son Tula, Tepeji, Atotonilco y Atitalaguia, las concentraciones de PM₁₀ también rebasan el límite permisible de 24 horas de forma frecuente, particularmente en Atotonilco y Atitalaquia.
- El monitoreo automático muestra que en la temporada seca-caliente, el O₃ tiende a subir y rebasar los límites permisibles. Por ejemplo, en 2016 la estación Atotonilco registró 46 excedencias al límite horario de 95 ppb, seguido de Atitalaguia con 33; para 2019, estas dos estaciones contabilizaron 43 y 24 excedencias, respectivamente.
- Respecto del SO₂, los valores históricos registrados en las cuatro estaciones automáticas de Tula, Tepeji, Atotonilco y Atitalaquia tienden a ser elevados. Por ejemplo, si se toma como referencia el límite de 75 ppb establecido en la NOM-022-SSA1-2019, este prácticamente se rebasa por lo menos una vez al día en alguna de las estaciones, según datos para el año 2019.

3.5 Programa de **Contingencias Ambientales** Atmosféricas

Los Programas para Contingencias Ambientales Atmosféricas ayudan a las autoridades a informar a la población en caso de que se presente una alerta ambiental derivada de una situación eventual y transitoria ocasionada por concentraciones elevadas de O₃ y partículas suspendidas. El objetivo principal de estos programas es evitar que los niveles elevados de contaminación empeoren y, en su caso, mejorar la calidad del aire limitando fuentes de emisiones específicas, a la vez que se alerta a la población para disminuir el riesgo asociado con la exposición a dichos niveles de contaminación.

3.5.1 Revisión histórica del **Programa para Contingencias Ambientales**

A partir del 2019, la ZMVM cuenta con el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECAA) en la Ciudad de México y los 59 municipios del Estado de México que forman parte de la ZMVM; a este programa lo antecede el Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) creado desde 1986. El PPRECAA se activa con los insumos de las concentraciones de contaminantes atmosféricos y de las condiciones meteorológicas generados por el SIMAT. La Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) es quien activa y da a conocer las acciones a llevar a cabo en caso de presentarse un evento de contingencia ambiental atmosférica, para prevenir y proteger la salud de la población, en coordinación con el Gobierno Federal y los gobiernos de la Ciudad de México y del Estado de México.

En la ZMVM los niveles de algunos contaminantes secundarios son elevados durante gran parte del año; bajo ciertas condiciones meteorológicas y de emisiones, pueden registrarse eventos extraordinarios con un grave deterioro de la calidad del aire e impactos agudos sobre la salud de la población. Estos episodios de contaminación se suelen presentar cuando las condiciones meteorológicas son adversas para la dispersión de la contaminación, cuando ocurren episodios de alta emisión de contaminantes (naturales o la métrica de los índices que se difunden entre la antropogénicos) o por el acarreo de los contaminantes originados fuera de la cuenca del Valle de México (SEDEMA, 2016).

Desde su creación, el PCAA ha experimentado cambios en los valores de activación de sus distintas fases. En un principio los valores fueron definidos a partir de la distribución de la concentración máxima de O₃ y partículas, y solamente se contaba con dos fases de contingencia (Fase I y II). Conforme ha evolucionado el programa, los umbrales de los niveles de concentración de los contaminantes se han vuelto más estrictos, lo que ha cambiado los criterios de activación de las distintas fases y población en general. En la Tabla 3.13 se muestran las modificaciones de los valores de activación de contingencia por O₃ y PM₁₀ desde el 2006.

Tabla 3.14 Histórico de modificaciones a los valores de activación del PCAA para ozono y partículas PM₁₀

	Valor	de activa O³ (ppb)	ción		Valor de activación PM ₁₀ (μg/m³) Precontingencia Fase I Fase II		Valor de activación		
Periodo	Precon- tingencia	Fase I	Fase II				Fase combinada	Comentarios	
31 de agosto de 2006 a 30 de junio de 2008	≥188	≥221	≥276	≥ 242	≥272	≥ 400	≥198 ppb O ₃ ≥170 µg/m³ PM ₁₀	Algoritmo establecido en la NADF-009- AIRE-2006	
1 de julio de 2008 a 30 de junio de 2009	≥183	≥216	≥271	≥ 242	≥ 272	≥392	≥ 193 ppb O^3 ≥ 170 µg/ m^3 PM ₁₀	Continue	
1 de julio de 2009 a 30 de junio de 2010	≥177	≥210	≥ 265	≥ 242	≥ 272	≥384	≥ 187 ppb O ³ ≥ 170 µg/m ³ PM ₁₀	Se ajustan gradualmente los niveles de activación del PCAA en función al progreso en el control	
1 de julio de 2010 a 30 de junio de 2011	≥172	≥205	≥ 260	≥232	≥ 272	≥376	≥ 182 ppb O^3 ≥ 170 µg/m ³ PM ₁₀	de contaminantes.	
1 de julio de 2011 a 27 de octubre de 2014	≥166	≥199	≥ 254	≥222	≥ 272	≥368	≥ 176 ppb O^3 ≥ 170 µg/ m^3 PM ₁₀		
28 de octubre (para O ₃) y 29 de octubre (para PM ₁₀) de 2014 a 5 de abril de 2016	≥155	≥185	≥ 264	≥215	≥ 286	≥375	≥ 164 ppb O^3 ≥ 144 µg/m ³ PM ₁₀	Algoritmo establecido en la NADF-009-Al- RE-2006 ajustado a la actualización de la NOM de salud ambiental de O ₃ (NOM-020- SSA1-2014) y partículas suspendidas (NOM-25- SSA1-2014).	
A partir del 6 de abril de 2016	No aplica	≥ 155	≥ 205	No aplica	≥ 215	≥355	\geq 164 ppb O ³ \geq 144 µg/m ³ PM ₁₀	Se deroga la fase de precontingencia.	
A partir del 1º de julio de 2016	No aplica	≥ 155	≥205	No aplica	≥215	≥ 355	No aplica	Se deroga la fase combinada.	
Fuente: Elabora	ıdo a partir de	informaci	ón de la Se	cretaría del Me	dio Ambiei	nte (SEDEMA	A, 2016).		

El resultado de reducir y ajustar los niveles de activación de las contingencias es un aumento en el número de episodios de contingencia, al transformar, por ejemplo, lo que antes era una Fase I en una Fase II. De manera positiva, la percepción del agravamiento de la situación ambiental crea un escenario favorable para la aplicación de nuevas restricciones. Sin embargo, los límites más estrictos en el PCAA por sí mismos no garantizan la disminución de los niveles de contaminación, ya que para esto se requieren acciones tendientes a reducir las emisiones de contaminantes primarios y precursores de contaminantes secundarios.

Al 2016, el PCAA de la ZMVM contaba solamente con la activación de contingencias para dos contaminantes, O₃ o PM₁₀. La actualización más reciente al programa se realizó en 2019, cuando se dio a conocer el PPRECAA por las autoridades ambientales pertinentes: la SEDEMA en la Ciudad de México (Gobierno de la Ciudad de México, 2019) y la

SMAGEM en el Estado de México (Gobierno del Estado de México, 2019). En específico, se realizaron las siguientes modificaciones:

- La inclusión de la fase preventiva para la protección de la salud para partículas PM₁₀ y PM_{2.5}. Se establecieron nuevos criterios para la activación de la fase preventiva por O₃.
- La implementación de un protocolo de contingencia por PM_{2.5}.
- La inclusión de la Fase combinada por altos C niveles de contaminación por O₃ y partículas suspendidas (PM₁₀ y PM_{2.5}).
- El establecimiento de medidas para la disminución de contaminantes para el sector gubernamental, desde la fase preventiva, y el refuerzo de medidas en distintos sectores.

Tabla 3.15 Niveles de activación y suspensión del PPRECAA por contaminante y fase

		— Activación —		Suspensión —					
	Ínc	dice (concentracion	ies)		Índice				
Fase de contingencia	Ozono Promedio horario	PM ₁₀ Promedio móvil de 24 horas	PM₂.₅ Promedio móvil de 24 horas	Ozono Promedio horario	PM₁₀ Promedio móvil de 24 horas	PM₂.₅ Promedio móvil de 24 horas			
Fase I	> 150 puntos (154 ppb)	> 150 puntos (214 μg/m³)	> 150 puntos (97.4 μg/m³)	≤ 150 puntos con pronóstico meteorológico					
Fase II	> 200 puntos (204 ppb)	> 200 puntos (354 μg/m³)	> 200 puntos (150.4 μg/m³)	favorable para el d					
Fase	Ozono > 150 punto puntos (186 μg/m³			≤ 150 puntos y ≤ 140 puntos dependiendo del contaminante, con pronóstico meteorológico					
combinada	Ozono > 140 punto puntos (214 µg/m³			favorable para el día siguiente.					
Fase preventiva	Pronóstico de ozono para el día siguiente mayor a 140 puntos IMECA (142 ppb) con una probabilidad del 70% de ocurrencia	> 135 puntos (172 μg/m³)	> 135 puntos (81.4 μg/m³)	De manera automá tica al día siguiente a las 19:00 horas o con la emisión de u comunicado de Fas de contingencia.	sean < 135 pu cuente con ur teorológico fa	oncentraciones ntos IMECA y se n pronóstico me- ivorable para el y con la emisión cado.			

Nota: Los niveles de activación se expresan como puntos del Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México. Entre paréntesis se muestran las concentraciones expresadas en ppb o µg/m³, según aplique para cada contaminante. Para mayor información sobre el Índice de Calidad del Aire, consultar el Anexo 3.4 del presente documento.

Fuente: Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 28 de mayo de 2019 (Gobierno de la Ciudad de México, 2019).





En el nuevo PPRECAA se define el mecanismo mediante el cual se activan las Fases de Contingencia a través de la CAMe, en coordinación con el Gobierno Federal y los Gobiernos del Estado de México y de la Ciudad de México, así como las acciones a implementar por autoridades locales y federales, el sector industrial, comercios, servicios y la ciudadanía en general. Es importante mencionar que las contingencias ambientales tienen diferentes niveles de acciones según la gravedad y persistencia del problema. En la Tabla 3.14 se muestran los niveles actuales de activación y suspensión correspondientes a cada una de las distintas fases de contingencia, publicados en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México (Gobierno de la Ciudad de México, 2019).

En el Anexo 3.5 se resume el proceso de activación y suspensión de las diferentes Fases de Contingencia descritas en el PPRECAA; se incluyen también descripciones de las condiciones que llevaron a la activación del programa durante el periodo de 2016 a 2019, así como el registro histórico de contingencias ambientales atmosféricas en la ZMVM, por tipo de fase, contaminantes responsables, fechas de activación y suspensión.

Actualmente los valores de concentración –y no los del Índice de Calidad del Aire– son los que se usan de referencia para la instrumentación del PPRECAA en la ZMVM. Esto debido que a partir de la entra-

da en vigor del nuevo Índice Aire y Salud, regulado por la NOM-172-SEMARNAT-2019, se reemplazó al Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México. Si bien los dos índices comparten muchas similitudes en los colores de las categorías, el Índice Aire y Salud se basa en una escala de concentraciones distinta y no cuenta con un algoritmo ni una escala numérica. En algunos contaminantes las categorías de calidad del aire tienen valores más estrictos y diferentes indicadores estadísticos para determinar la categoría del Índice Aire y Salud; por ejemplo, para PM₁₀ y PM_{2.5} se utiliza un promedio móvil ponderado de 12 horas, el cual es un método de la US EPA conocido como NowCast (US EPA, s/f) y es utilizado para emitir avisos en tiempo real de la situación del nivel de partículas en casos de incendios; en comparación, el anterior Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México utilizaba promedios móviles de 24 horas y un algoritmo de cálculo similar al que utiliza la US EPA, el cual genera un valor numérico del índice en una escala de 0 a 500 puntos.

Al contrario del Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México, el Índice Aire y Salud no tiene vinculación con los límites de las NOM de salud ambiental ni con la aplicación del PPRECAA. Es importante fomentar la homologación de los diferentes mecanismos de difusión de los niveles de contaminación a la población con la instrumentación del PPRECAA.

3.6 Eventos extraordinarios de calidad del aire

3.6.1 Incendios de mayo de 2019

La quema de biomasa contribuye de manera importante a la contaminación del aire con emisiones de partículas, gases tóxicos y gases de efecto invernadero en todo el mundo. Esto da como resultado que la ciudadanía se expongan a altos niveles de concentración de diversos contaminantes del aire. Los contaminantes del aire (o sus precursores) que a menudo tienen mayor conexión con las exposiciones de la población en general son partículas (PM), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO₂) y monóxido de carbono (CO). Por ejemplo, las emisiones de compuestos basados en azufre y nitrógeno dependen de la eficiencia del proceso de combus-

tión y, la composición química de la vegetación quemada.

En mayo de 2019, se desarrolló un episodio importante de mala calidad del aire en la ZMVM que resultó del impacto de los incendios en varios estados de la República. Desde la madrugada del día 10 y hasta el día 16 de mayo, se registró una cantidad importante de incendios en los estados miembros de la CAMe (Estado de México, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, Morelos y Querétaro, además de la Ciudad de México) y estados circunvecinos como Guerrero, Michoacán y Oaxaca (Figura 3.24).

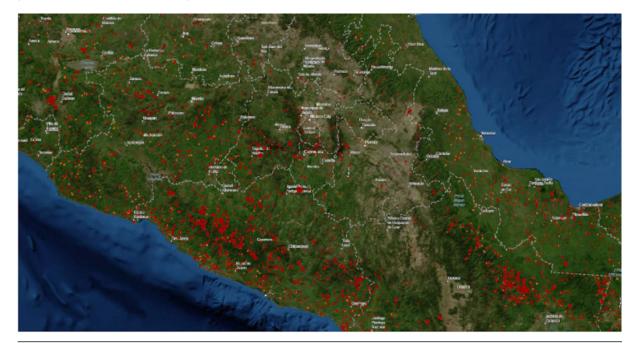


Figura 3.24. Imagen satelital con los puntos calientes del 10 al 12 de mayo Fuente: *Global Forest Watch Fires*.

Adicionalmente, las condiciones meteorológicas propiciaron que el humo de los incendios vecinos se transportara hacia la ZMVM y quedara retenido; los fenómenos causantes fueron: 1) la presencia de un sistema anticiclónico, característico de la primavera, el cual propició que a diferentes alturas sobre el centro del país los flujos de

viento convergieran hacia el Valle y transportaran el humo de los incendios; 2) el anticiclón generó condiciones de gran estabilidad atmosférica tanto en superficie como en los siguientes 3000 metros de altura por encima del Valle, por lo que se acumularon los contaminantes día y noche.

194

Asimismo, la alta y constante radiación solar durante el día en consecuencia de la poca nubosidad que predominó, condujo a la mayor formación de ozono e incremento la concentración de partículas. En la Figura 3.25 se observa

cómo se va incrementando la concentración de las partículas PM₂₅ y el ozono a partir del 13, 14 y 15 de mayo, cuando las condiciones meteorológicas fueron más adversas para la dispersión de los contaminantes.

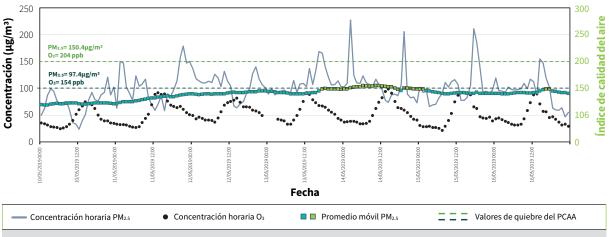


Figura 3.25 Serie de tiempo que muestra el comportamiento de las partículas PM_{2.5} y ozono durante el evento del 10 al 16 de mayo

Fuente: Proporcionado por la SEDEMA de la Ciudad de México a través de comunicaciones directas por correo electrónico.

El día 14 de mayo la CAMe publicó el comunicado donde activó la contingencia ambiental extraordinaria por partículas (PM_{2.5}) en la ZMVM, debido a que la estación Nezahualcóyotl (NEZ) al oriente de la Ciudad registró un valor de 105 μg/m³ del promedio móvil de PM_{2.5}, que equivalen a 158 puntos del índice de calidad del aire vigente en 2019 (NADF, 2017). Con este comunicado se agregaron acciones para reducir la emisión de los contaminantes. Sin embargo, las condiciones meteorológicas que prevalecieron en el Valle de México no fueron favorables para la dispersión de los contaminantes y la corriente de viento del suroeste sobre la cuenca de México se mantuvo. A nivel de superficie se presentaron vientos débiles por la mañana y hasta antes del mediodía.

Después del mediodía, una corriente débil del sureste creó un flujo hacia el poniente, que acumuló los contaminantes al sureste y noreste de la Ciudad de México. Este flujo del sureste se fortaleció gradualmente a medida que avanzó la tarde, hasta formar una corriente fuerte que disminuyó la concentración de los contaminantes después de las 16:00. En cuanto a PM_{2.5}, se mantuvo el flujo

de masas de aire contaminando desde el suroeste del país, por lo que no se observó una disminución importante de los valores máximos en las estaciones ubicadas al oriente (este) de la ZMVM.

Debido a las condiciones adversas para la dispersión de los contaminantes, el valor máximo de ozono que se alcanzó fue de 153 ppb (149 puntos del índice) en la estación Tultitlán (TLI); desde las 15:00 la estación Pedregal, al sur de la Ciudad, ya había alcanzado las 142 ppb (140 puntos). La corriente de viento trasladó la masa de contaminantes hacia el norte, lo que ocasionó que se registraran concentraciones más altas.

Las PM₂₅ en la estación NEZ incrementaron hasta alcanzar su máximo a las 9:00 horas, registrando 108 μg/m³ (161 puntos del índice); la estación Santiago Acahualtepec (SAC) también registró valores por arriba de 97.4 μg/m³ (150 puntos del índice) llegando a 102 μg/m³ (155 puntos del índice) como máximo a las 12:00; las estaciones del oriente y sureste fueron las que presentaron las concentraciones más altas. También se registraron concentraciones altas de PM_{2.5} en el Valle de



Toluca, Puebla e Hidalgo, debido a la gran cantidad de incendios, junto con las condiciones meteorológicas prevalecientes.

Debido a las altas concentraciones por ozono ese mismo día se activó la contingencia ambiental

atmosférica extraordinaria por partículas (PM_{2.5}) y ozono en la ZMVM, esto fue dado a conocer por la CAMe en un comunicado de las 15:00. Con esta contingencia se decretó la restricción vehicular para reducir la emisión de los precursores de ozono, así como otras acciones relacionadas.

3.6.2 Pandemia causada por SARS-CoV2 (COVID-19)

La pandemia causada por SARS-CoV2 (COVID-19) fue declarada por la OMS, el 11 de marzo del 2020. En México, la aparición del primer caso de importación fue el 27 de febrero del 2020; en esta fecha se dieron a conocer las fases de contagio y las medidas de control que se implementarían en cada una de estas (Secretaría de Salud, 2020); y la tendencia síndrome COVID-19. el 23 de marzo del 2020 se declaró la fase 2 (dispersión comunitaria) y con ello la denominada Jornada Nacional de Sana Distancia (JNSD).

El 31 de marzo de 2020 se declaró Emergencia Sanitaria y, con esto, fueron seleccionadas las actividades esenciales y no esenciales que tendrían que suspenderse temporalmente. El 19 de abril se declaró la fase 3, continuando con las restricciones en la movilidad y de aglomeraciones, además de monitorear la capacidad hospitalaria para atender los casos de COVID-19. El 31 de mayo se finalizó

la JNSD; sin embargo, se implementó un sistema de semáforo nacional, en el que se determinó la activación de algunas actividades económicas y sociales de acuerdo con cuatro indicadores epidemiológicos: ocupación hospitalaria, positividad al SARS-CoV-2, tendencia de casos hospitalizados

La Ciudad de México tiene una alta densidad poblacional, así como una gran afluencia de trabajadores y estudiantes que, todos los días, se movilizan desde el Estado de México hacia sus centros de trabajo o estudio dentro de la Ciudad, por lo que desde el 19 de marzo de 2020 se aplicaron medidas para la mitigación y prevención del contagio. Entre las acciones más importantes se decretó que los trabajadores de las dependencias locales, alcaldías y otras entidades de la Administración Pública en la Ciudad de México, con

de aislarse y trabajar desde casa; de igual mane- presenta el porcentaje de reducción del tránsito ra, se invitó a trabajar desde casa a personas con vehicular ZMVM, el cual fue calculado a partir de padecimientos respiratorios, servidores públicos la estimación de una semana típica (lunes a docon hijos en educación básica y trabajadores con mingo) y se comparó con el tránsito registrado en alguna condición de riesgo, como mujeres em- cada día desde que comenzaron las restricciones barazadas, personas con discapacidad, hiper- y medidas de la JNSD. tensión, diabetes o enfermedades crónicas que reduzcan la capacidad inmunitaria.

vehicular en la Ciudad de México (Gobierno de

síntomas compatibles con COVID-19, deberían la Ciudad de México, 2020). En la Figura 3.26 se

Se puede observar la reducción en los días correspondientes al 9 y 16 de marzo, en los cuales Algunas dependencias del Gobierno Federal y se presentó el paro nacional de mujeres y un día local de la Ciudad de México, así como oficinas de asueto, respectivamente. A partir del 19 de e industrias del sector privado, cuyas actividades marzo de 2020 comenzó una reducción gradual, se podían realizar de manera remota, se sumaron acentuándose el 26 y 27 de marzo, posterior al a las restricciones de movilidad. Como resultado, decreto nacional de suspensión temporal de lase observó una clara disminución del tránsito bores. La mayor reducción se registró el viernes santo (10 de abril, con el 80%).



Figura 3.26 Diferencia porcentual del tránsito vehicular con respecto a días típicos en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: Proporcionado por la SEDEMA de la Ciudad de México a través de comunicaciones directas por correo electrónico.

abril y mayo, meses con las mayores restricciones. 2019) contra 2020.

La reducción en la movilidad ocasionada por las En la Tabla 3.16 y 3.17 se muestran las compararestricciones tuvo un impacto en la concentración ciones de las concentraciones promedio y los de todos los contaminantes atmosféricos durante máximos diarios considerando cinco años (2015 a

Tabla 3.16 Comparación de concentraciones promedio por contaminante (abril y mayo) y porcentaje de cambio.

Concentraci	Porcentaje de cambio			
Años anteriores (2015-2019)	Durante abril y mayo (2020)	r orcentaje de cambio		
40.13	44.7	+11%		
28.7	24.6	-14%		
51.1	41.2	-19%		
0.55	0.26	-52%		
13.4	5.1	-62%		
24.7	15.8	-36%		
38.2	21.3	-44%		
3.5	1.8	-48%		
	Años anteriores (2015-2019) 40.13 28.7 51.1 0.55 13.4 24.7 38.2	40.13 44.7 28.7 24.6 51.1 41.2 0.55 0.26 13.4 5.1 24.7 15.8 38.2 21.3		

Fuente: Proporcionado por la SEDEMA de la Ciudad de México a través de comunicaciones directas por correo electrónico.

Tabla 3.17 Comparación de concentraciones máximas diarias por contaminantes (abril y mayo) y porcentaje de cambio.

Cantaninanta	Concentraci	Devenutaio de cambio		
Contaminante	Años anteriores (2015-2019)	Durante abril y mayo (2020)	Porcentaje de cambio	
O ₃ (ppb)	122	114	-6%	
PM _{2.5} $(\mu g/m^3)$	78	69	-12%	
PM₁₀ (μg/m³)	191	189	-1%	
(ppm)	2.6	1.3	-50%	
NO (ppb)	188	94	-50%	
NO ₂ (ppb)	71	50	-30%	
NO _x (ppb)	233	129	-44%	
SO ₂ (ppb)	41	21	-48%	
Nota: No se consideran las estaciones de trans	sports: ACO A III INN MON y MPA	·	·	

Fuente: Proporcionado por la SEDEMA de la Ciudad de México a través de comunicaciones directas por correo electrónico.

Se observa claramente una reducción en los contaminantes primarios relacionados con la movilidad, como el CO, NO, NO₂ y NO_X. En las partículas PM₁₀ y PM_{2.5} es importante mencionar que durante los En la Figura 3.27 se muestra el perfil horario típimeses secos y cálidos se presenta una mayor frecuencia de incendios, lo que ocasiona que estos var que los máximos no tienen una reducción de la es de alrededor del 15%.

COV; esto significa que cuando se reducen en una relación mayor los NO_x con respecto a los COV, se O₃ (observado desde el inicio de los años 2000 en

las campañas lidereadas por el Dr. Mario Molina y la Dra. Luisa Molina).

co de ozono y el observado durante la contingencia sanitaria por COVID-19. En comparación con contaminantes se incrementen, y se puede obser- el comportamiento regular, no se alcanzan valores tan bajos de concentración en las primeras misma magnitud que otros contaminantes; sin em- horas de la mañana; esto se debe a la reducción bargo, en la concentración promedio, la reducción en los NO_x, que también actúan como sumideros de O₃. Al registrarse menos cantidades de NO_x, la reacción de consumo de O₃ por NO₂ no se lleva a En cuanto al ozono, se observa un incremento en cabo en la magnitud que se presentaba antes de las concentraciones promedio, debido a que la la contingencia. En consecuencia, el O₃ se man-ZMVM en general tiene una atmósfera sensible a tiene por más tiempo en el aire ambiente; este fenómeno se traduce en una curva del perfil horario más amplia, donde la formación de O₃ copresenta un incremento en las concentraciones de menzó más temprano y su eliminación tardó más por la falta de NO₂.

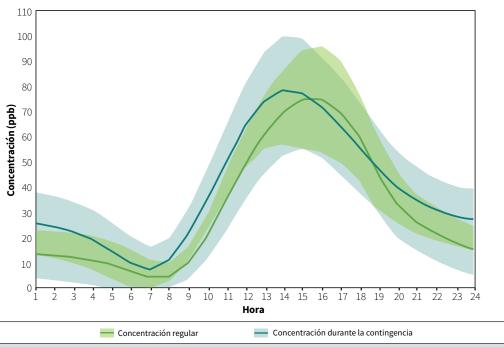


Figura 3.27 Perfil horario de la concentración de ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México durante la contingencia sanitaria

Fuente: Proporcionado por la SEDEMA de la Ciudad de México a través de comunicaciones directas por correo electrónico.

movilidad y en las actividades de económicas la Ciudad, ocasionaron la reducción de las concentraciones máximas de todos los contaminantes. Este análisis muestra la complejidad de la atmósfera en la ZMVM, ya que la reducción de la acti-

Es importante destacar que la reducción en la vidad de las diferentes fuentes de contaminación no significa que todos los contaminantes van a reducirse de la misma manera, ya que su comportamiento se ve afectado por otros fenómenos como la meteorología y la radiación solar.

3.7 Evaluación del ProAire ZMVM 2011-2020

Con el objetivo de mejorar la gestión de la calidad del aire, el ProAire ZMVM 2021-2030 retoma Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del SEMARNAT, 2011). Este último se caracterizó por incorporar un nuevo enfoque en la gestión de la calidad del aire, al tener como eje rector un manejo ecosistémico de la ZMVM para fortalecer la gestión de calidad del aire. En el ProAire anterior se relacionó la estructura urbana con el sistema de generación de contaminantes y se colocó a la protección de la salud de la población como el punto estratégico y prioritario para mejorar la calidad del aire en la ZMVM.

Se reconoce la importancia de retomar acciones pasadas que mostraron efectividad en la mejora de la calidad del aire y la reducción de emisiones contaminantes, para así poder ampliar su efectividad en esta nueva iteración de políticas públicas. Es crucial detectar los obstáculos principales que evitaron la materialización de algunas acciones

planteadas en el pasado, así como las problemáticas que no fueron atendidas por políticas y las experiencias del Programa para Mejorar la acciones de gestión de la calidad del aire, ya sea porque todavía no se había identificado clara-Valle de México 2011-2020 (SEDEMA, SMAGEM, & mente la problemática y sus causas, o porque se priorizaron otros temas con base en el diagnóstico integrado en ese entonces. Con estos puntos en mente, para la integración del ProAire ZMVM 2021-2030, se evaluó el ProAire ZMVM 2011-2020 en términos de los siguientes elementos:

- Porcentaje de avance en la implementación de las acciones definidas en el ProAire ZMVM 2011-2020.
- Impacto de la implementación de las acciones del ProAire ZMVM 2011-2020 en la reducción de emisiones contaminantes.
- Impacto de la implementación de las acciones del ProAire 7MVM 2011-2020 en la calidad del aire.

3.7.1 Avances en la implementación de acciones del ProAire ZMVM 2011-2020

El ProAire ZMVM 2011-2020 contaba con 116 ac- te en la gestión de la calidad del aire. A continuaestrategias¹⁴. Cada estrategia trazaba una ruta a 2011-2020 y su número de medidas: seguir para avanzar cuantitativa y cualitativamen-

ciones específicas, agrupadas en 81 medidas y 8 ción se enlistan las estrategias del ProAire ZMVM



Estrategia 1. Ampliación y refuerzo de la protección a la salud: 9 medidas.



Estrategia 2. Disminución estructural del consumo energético de la ZMVM: 4 medidas.

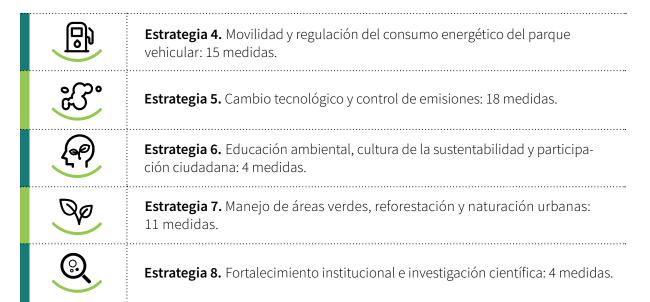


Estrategia 3. Calidad y eficiencia energéticas en todas las fuentes: 16 medidas.

14 Para más información sobre cada medida individual, consultar el ProAire ZMVM 2011-2020 (SEDEMA et al., 2011).

200 ProAire ZMVM **2021 - 2030**

201 Capítulo 3. Diagnóstico de la Calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México



De las 81 medidas, 13 se catalogaron de competencia federal, mientras que las 68 restantes tenían que ser implementadas por dependencias dentro de los gobiernos estatales de la Ciudad de México o el Estado de México¹⁵. Algunas de las acciones específicas de las medidas de jurisdicción estatal implicaban acciones de responsabilidad federal: sin tomar en cuenta estas últimas, las 68 medidas de competencia local comprendían 98 de las 116 acciones del ProAire¹⁶.

las medidas de competencia local y federal del ProAire, la SEDEMA, la SMAGEM y la SEMARNAT realizaron una valoración en donde clasificaron el avance de implementación de cada medida bajo un Código de Valoración del Avance¹⁷ para las medidas bajo su responsabilidad y asignaron un porcentaje al progreso de implementación.

Según la valoración de la SEDEMA, considerando solamente las medidas de competencia local, 58 se han implementado en su totalidad, en tanto que las 10 restantes se encontraban demoradas, con fecha de corte en abril de 2020 (SEDEMA. 2020b); sin embargo, el avance individual de las

medidas no completadas era superior al 70% en todos los casos y, al ponderar su progreso, se obtuvo un avance global del 98% en la implementación del ProAire ZMVM 2011-2020. En cuanto a la valoración de las medidas federales realizada por la SEMARNAT, siete medidas contaban con un avance favorable (con fecha de corte en 2018), una medida con implementación demorada, cuatro de ellas en peligro de realizarse y no se contaba con información para una de ellas; el mismo informe señala que se tenía un avance óptimo del En cuanto al progreso de implementación de 53.8% en la implementación de las medidas de jurisdicción federal (SEMARNAT, 2020).

> Por otro lado, es importante señalar que la SMA-GEM también evaluó el progreso de las 68 medidas de jurisdicción local establecidas en el ProAire ZMVM 2011-2020, aplicando el mismo código de clasificación y con fecha de corte a junio de 2020. Para cada medida se asignó un porcentaje de avance igual a 100%, > 50%, < 50% o 0%, por lo que se tiene un estimado del progreso de implementación, mas no un porcentaje específico de avance. La evaluación indicó que, de las 68 medidas clasificadas como locales, 28 (41.2%) estaban completas o a tiempo de implementarse, en tan

to que 40 (58.8%) se encontraban demoradas. Se destaca que, de las medidas locales, 20 se reportan como completas (SMAGEM, 2020).

La Figura 3.28 representa el avance en la implementación de todas las medidas de competencia local (evaluación de la Ciudad de México y el EdoMex) y federal (evaluación de la SEMARNAT) según la estrategia a la que pertenecen. Se observa que la Estrategia 3 es la que tiene la mayor proporción de medidas completadas o a tiempo. La Estrategia 5 tiene el mayor número de medi-

das, de las cuales 12 son de competencia local y 6 federales. Alrededor de la mitad de las medidas de esta estrategia se encuentran a tiempo para completarse; se observa un gran número de medidas con un avance parcial (demoradas), en específico en el Estado de México, en tanto que las dos medidas en riesgo son de competencia federal. La medida de la Estrategia 4 con la que no se cuenta información es la no. 44 y corresponde a una política de jurisdicción federal. Por su parte, las Estrategias 3 y 7 cuentan con el mayor porcentaje de medidas a tiempo o concluidas.

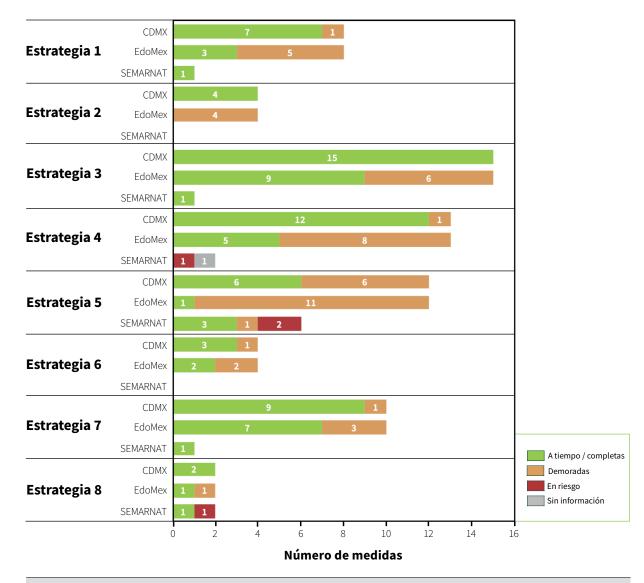


Figura 3.28 Avance de implementación por estrategia del ProAire ZMVM 2021-2030

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA, 2020b), Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México (SMAGEM, 2020) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2020).

¹⁵ Cuando se elaboró el ProAire anterior, el municipio de Tizayuca, Hidalgo, no estaba considerado como parte de la ZMVM.

¹⁶ Se consideran como medidas y acciones de competencia federal las siguientes: 2.1, 19.1, 19.2, 41.1, 44.1, 45.1, 46.1, 50.1, 53.1, 61.1, 62.1, 69.1, 80.1 y 81.1. Las medidas 14 y 79 contaban con acciones de competencia federal, en específico la 14.2, la 14.3 y la 79.5, pero para las evaluaciones por medida se consideraron como medidas locales.

¹⁷ El código le asigna una letra a la medida dependiendo del grado de avance de implementación que esta tenía a la fecha en la que se realizó la evaluación. La letra "A" indica que la medida está a tiempo de implementarse en su totalidad, la letra "B" que su implementación está demorada, la letra "C" que se encuentra en riesgo de realizarse y, finalmente, la letra "D" indica indica que no se tienen metas en el periodo a evaluar o que no se cuenta con información para la evaluación

Tabla 3.18 Reducción de emisiones asociada a medidas y acciones selectas del ProAire ZMVM 2011-2020, entre 2012 y 2020

Reducción de emisiones (toneladas/años) ————————————————————————————————————					Reducción de emisiones (toneladas/años)						
Medida o acción	PM ₁₀	PM _{2.5}	co		NOx	cov	SO ₂	CN	CO ₂	CO ₂ e ¹⁸	
Medida 14. Modernización y homologación del programa de verificación vehicular (PVVO).	1685.84	1278.53	600 409.88		79 885.88	28 740.14	228.95	479.13	17 571 025.08	17 737 333.26	
Acción 15.1 Fortalecer la aplicación del programa para la sustitución de convertidores catalíticos.	N/A	N/A	132 195.88		6835.75	12 297.58	N/A	N/A	124 284.98	5763.75	
Acción 16.1 Fortalecer el programa ostensiblemente contaminante con nuevo equipo para su operación y tecnología de detección.	88.58	63.04	6544.57		1405.53	819.96	3.94	24.17	221 068.76	222 455.30	
Medida 18. Modernización del programa "Hoy No Circula" (HNC).	1485.32	907.67	166 660.27		26 416.12	19 266.43	58.53	289.39	4 545 210.56	4 649 031.62	
Acción 22.1. Renovar la flota vehicular de transporte de pasajeros de baja, mediana y alta capacidad de la ZMVM.	61.10	50.06	10 349.79		1238.48	1123.60	-0.05	11.82	-11 045.66	-4738.24	
Acción 23.1. Promover el uso de combustibles menos contaminantes en vehículos de transporte público de pasajeros y de carga.	30.67	24.13	144.51		525.58	22.48	0.09	15.01	29 211.55	27 273.38	
Acción 25.1. Fortalecer el programa de autorregulación de vehículos a diésel.	284.65	219.01	1547.85		3674.58	337.84	1.66	98.46	288 059.86	288 280.45	
Acción 30.3. Continuar con Fortalecer el programa de autoAcción 30.3. Continuar con el establecimiento de rutas exprés, locales y metropolitanas de transporte público, así como continuar promoviendo la construcción de los sistemas de transporte público de alta capacidad y eficiencia.	61.57	33.33	9606.71		956.58	945.61	5.11	7.87	221 952.17	227 143.72	
Acción 39.1. Promover el uso de la bicicleta como un medio de transporte en la ZMVM.	0.75	0.24	83.43		9.95	9.30	0.05	0.04	3757.20	3796.66	
Acción 47.1. Establecer instrumentos de reducción adicional de emisiones con la iniciativa privada.	4194.14	1397.38	N/A		1192.22	1324.88	N/A	162.06	N/A	N/A	
SUBTOTAL	7892.62	3973.39	927 542.89		122 140.67	64 887.82	298.28	1087.95	22 993 524.50	23 156 339.90	

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2020.

3.7.2 Reducción de emisiones contaminantes

No todas las acciones definidas dentro de un la actualización de marcos legales, el monitoreo ProAire tienen un impacto directo sobre la reduc- de la calidad del aire, la prevención de riesgos y ción de emisiones de contaminantes primarios y la disminución de la exposición de la población a precursores de contaminantes secundarios. Por episodios de contaminación atmosférica severa. ejemplo, algunas de las acciones pueden estar Para la evaluación de los beneficios directos en la orientadas hacia el fortalecimiento institucional, reducción de emisiones contaminantes, se tomó en cuenta la reducción por contaminante entre 2012 y 2020, para 10 acciones del ProAire ZMVM 2011-2020, las cuales contaban con una meta de reducción específica. Los resultados de la evaluación se resumen en la Tabla 3.15.

¹⁸ El dióxido de carbono equivalente (CO2e) es una métrica que se utiliza para expresar el total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), medidos por su equivalencia en CO₂. Se determina multiplicando la masa de emisiones de un GEI en específico –por ejemplo el CH₄ o el óxido nitroso (N2O) - por su potencial de calentamiento global; este resultado es comparable con las emisiones de otros GEI expresadas como CO2e, por lo que se

En cuanto a la reducción de emisiones de precursores de O₃, la SEDEMA, en colaboración con el BSC, realizó una evaluación del impacto del ProAire ZMVM 2011-2020 sobre los niveles de O₃ en la ZMVM (BSC-SEDEMA, 2017). Se modelaron los impactos de aplicar 1319 acciones del ProAire, consideradas de gran potencial para la reducción de precursores de O₃ (NO_x y COV). La evaluación concluyó que las medidas más efectivas del ProAire se relacionan con las fuentes móviles, en específico la modernización del Programa de Verificación Vehicular Obligatoria (PVVO) y la aplicación del programa "Hoy No Circula" (HNC), lo que implica una reducción mucho más elevada de NO_x que de COV. Este factor, aunado a que en la ZMVM la formación de O₃ está limitada por COV, provoca reducciones no significativas (e inclusive incrementos) en la concentración de O₃ en el aire ambiente.

Evaluaciones previas han concluido que, en el caso de las partículas, las políticas han priorizado la reducción de emisiones primarias, ya que estas solían tener una mayor contribución a la masa total de partículas suspendidas. Sin embargo, actualmente los resultados del monitoreo indican que los aerosoles de origen secundario tienen una aportación significativa, particularmente en la fracción fina (<2.5 μm). Las acciones del ProAire ZMVM 2011-2020 se enfocaron en el control de fuentes primarias, por lo que el impacto fue menor en la reducción de concentraciones de partículas PM_{2,5} en comparación con el impacto global sobre los niveles de PM₁₀. La reducción de emisiones primarias de PM_{2.5} estuvo ligada principalmente a medidas efectivas para el control de emisiones de fuentes móviles.

3.7.3 Mejoras en la calidad del aire

Aunque es posible cuantificar la reducción de emisiones asociada a la implementación de las medidas del ProAire ZMVM 2011-2020, el análisis de las tendencias en la calidad del aire²⁰ a través de las mediciones directas del SIMAT es la principal herramienta que permite evaluar el impacto a largo plazo que han tenido los programas y políticas públicas sobre la reducción en los niveles de contaminantes criterio en el aire ambiente. lo cual conlleva una disminución de la exposición de la población a concentraciones peligrosas.

Desde 2010, prácticamente todos los contaminantes, con excepción del CO, muestran una tendencia estable. Esto evidencía que la instrumentación de acciones encaminadas a reducir la contaminación atmosférica ha tenido un impacto positivo. La estabilización de la concentración de los contaminantes atmosféricos no es un indicador de una mala gestión de la calidad del aire, sino que se debe de tomar en cuenta el crecimiento poblacional, el aumento progresivo en

el parque vehicular y la expansión urbana en la ZMVM durante la última década, factores que, en ausencia de cualquier medida de gestión de la calidad del aire, derivarían en un aumento en los niveles de contaminación. Este comportamiento moderado contrasta con las reducciones significativas en la concentración de contaminantes criterio que se habían observado a partir de la década de los noventa.

La tendencia descendente para CO y NO_x se ha mantenido en la última década, lo que refleja el efecto que han tenido las medidas del ProAire ZMVM 2011-2020 dirigidas a controlar las emisiones de fuentes móviles. La modernización del programa de detección y retiro de vehículos ostensiblemente contaminantes, la renovación de las flotas vehiculares de transporte de pasajeros de baja, mediana y alta capacidad, el fortalecimiento del programa de sustitución de convertidores catalíticos, la mejora tecnológica en los vehículos, el PVVO y el programa HNC han tenido, en conjunto, un impacto positivo sobre la calidad del aire respecto de emisiones provenientes de fuentes móviles; es importante mencionar que el PVVO y el HNC son los políticas que aportan las No obstante, el análisis de tendencia de la conmayores reducciones de contaminantes.

En relación con la concentración de O₃, esta se ha de 2010 ha sido poco significativo. Desde 2008, la mantenido prácticamente constante y, desde el 2006, las variaciones en el promedio mensual del contaminante no han sido estadísticamente significativas. Sin embargo, se observa una tendencia incipiente en el aumento de los niveles de O₃ a partir de 2015. Esto puede ser ocasionado por diferencias en el impacto que han tenido las políticas de reducción de emisiones de precursores de O₃: solamente los NO_xmuestran una tendencia ligera a La colaboración entre el BSC y la SEDEMA para la baja, mientras que el impacto del ProAire ZMVM 2011-2020 sobre la reducción de COV ha sido menor en comparación. Por lo tanto, en una región como la ZMVM, donde la formación de O3 está limitada por COV, las medidas planteadas resultan insuficientes para observar una disminución en la concentración de O₃, aunado al impacto que tienen las condiciones meteorológicas y topográficas en la acumulación de contaminantes atmosféricos.

Con el propósito de contribuir al desarrollo del ProAire para la ZMVM 2011-2020, durante su elaboración se realizó una simulación de escenarios con y sin la aplicación de algunas de las medidas que se incluyeron en el programa (disponible en el Anexo 8 del ProAire anterior). La simulación se realizó con la finalidad de estimar el beneficio esperado que se tendría en la calidad del aire por O₃, derivado de la instrumentación del ProAire²¹. Los principales resultados de la simulación muestran que, sin la implementación de las medidas analizadas, habría un ligero aumento de la contaminación por O₃ a las 15:00 horas, cuando normalmente se registran los picos más altos del contaminante. También se concluyó que la aplicación de las medidas de control sobre las emisiones vehiculares proyec-

tadas al 2020 tendrían efectos favorables en la mitigación de la contaminación.

centración de O₃ muestra que el impacto en la reducción de los niveles de contaminación desvariación en el registro de horas por encima del límite normado de 95 ppb durante la temporada de O₃ no muestra una tendencia a la baja. Las variaciones observadas pueden responder a cambios en la meteorología regional o global (p. ej. el fenómeno ENOS) y a los cambios en la química atmosférica por la relación entre NO_x y COV.

la evaluación del ProAire tuvo conclusiones consistentes con los datos observados. Bajo las condiciones meteorológicas y topográficas de la ZMVM, la aplicación de las acciones de reducción de emisiones de precursores de O₃ planteadas en el ProAire ZMVM 2011-2020 inclusive podrían implicar aumentos en las concentraciones máximas horarias del contaminante (hasta +10 ppb, dependiendo de las condiciones meteorológicas), derivado de reducciones de NO_x muy superiores a las reducciones de COV (BSC-SEDEMA, 2017) y un cambio en la relación COV/ NO_x.

No obstante, se determinó que en el caso de no haberse realizado ninguna medida del ProAire entre los años 2012 a 2016, las emisiones de NO_x y COV se hubieran incrementado en un 130% y 32%, respectivamente. Por ejemplo, la Figura 3.25 compara la distribución espacial de la concentración de NO₂ en la ZMVM con y sin la aplicación de las medidas del ProAire ZMVM 2011-2020; el modelo estimó un incremento promedio de 26 ppb de NO₂ en la ZMVM de no haberse instrumentado el ProAire y un aumento diario máximo de hasta 80 ppb. También se muestra el resultado de la simulación de concentraciones promedio horarias en la estación Iztacalco (IZT), un sitio de monitoreo urbano.

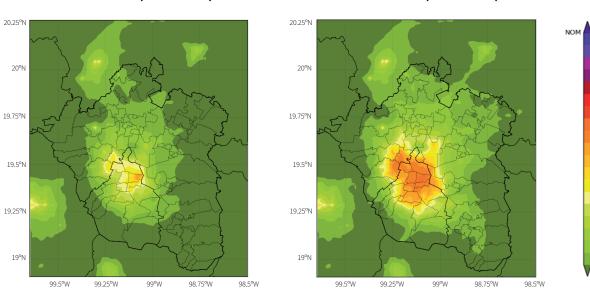
¹⁹ Las acciones evaluadas se enmarcan mayoritariamente dentro de la Estrategia 3 (Calidad y eficiencia energética en todas las fuentes; acciones 14.1, 15.1, 16.1, 17.1, 18.1, 22.1, 23.1, 25.1) y en menor medida en la Estrategia 4 (Movilidad y Regulación del consumo energético del parque vehicular; acciones 30.3, 30.4, 37.1, 39.1) y la Estrategia 5 (Cambio tecnológico y control de emisiones; acción 47.1).

²⁰ Consultar el análisis de tendencia en el apartado 3.4.6 del presente Capítulo y el Anexo 3.3 del ProAire. También se puede revisar el análisis completo en el Capítulo 3 del Informe Anual de Calidad del Aire 2018 de la SEDEMA.

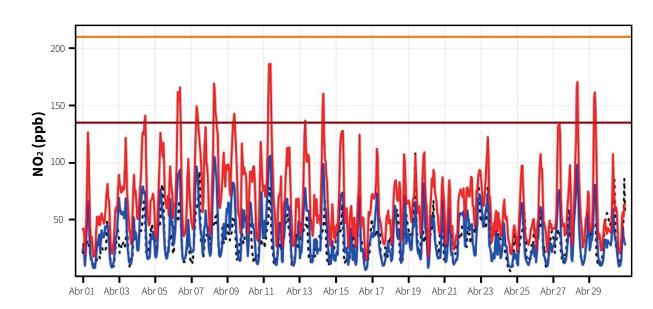
²¹ Se recomienda consultar el Anexo 8 del Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020 (SEDEMA et al., 2011).

Con ProAire (abril 2016)

Sin ProAire (abril 2016)



Nota: Promedio horario de NO₂ (ppb) para todo el mes de abril bajo distintos escenarios de aplicación del ProAire ZMVM 2011-2020



Nota: Concentraciones promedio horarias de NO₂ (ppb) observadas (negro) y simuladas utilizando el escenario de aplicación del ProAire ZMVM 2011-2020 (azul) y sin ProAire (rojo) en la estación urbana Iztacalco (IZT) para abril de 2016. La línea horizontal naranja representa el límite horario de la NOM-023-SSA1-1993; la línea horizontal roja corresponde a la guía de la OMS para la concentración horaria.

Figura 3.29 Impacto de la implementación del ProAire ZMVM 2011-2020 en el promedio horario de dióxido de nitrógeno

Fuente: BSC-SEDEMA, 2017.

Si se continúa con las acciones y programas actuales, se esperan reducciones al 2020 del 21% de NO_X y 8% de COV. En cuanto a la formación de O₃ se presentarían disminuciones en los promedios horarios de alrededor de 2.2 ppb en la ZMVM y de 1.5 ppb en la Ciudad de México durante las horas de máximas concentraciones (14:00 a 16:00 horas). Se concluye que una reducción más significativa de concentraciones de O₃ solo se podrá lograr con medidas adicionales que disminuyan las emisiones de COV, por lo que se recomienda la implementación de acciones exclusivas para este contaminante.

Para partículas suspendidas, el análisis de tendencia muestra una disminución ligera en la concentración de PM₁₀, en tanto que la concentración de PM_{2.5} se mantuvo estable en la última década. La evaluación del ProAire ZMVM 2011-2020 realizada por la SEDEMA y el BSC concluyó que el impacto principal de la implementación de las acciones descritas en el ProAire anterior fue sobre emisiones de partículas primarias provenientes de fuentes móviles. Por ejemplo, se determinó que la aplicación del Programa durante 2017-2020 implicó una reducción promedio de PM_{2.5} en la ZMVM de $-0.5 \mu g/m^3$ (-2%). El escaso impacto se asocia a una baja reducción de emisiones primarias de PM_{2.5} (-7%), el aporte de fuentes de área con un mayor grado de complejidad en su control y reducción de emisiones, así como la elevada contribución de aerosoles orgánicos secundarios formados por la oxidación de COV. Es así que la baja reducción de emisiones de COV observada en la ZMVM (-8%) justifica el impacto limitado del ProAire. Dado que las PM_{2.5} tienen una importante contribución de partículas secundarias, un nuevo reto implica el estudio de los procesos responsables de la formación de aerosoles secundarios, así como la identificación y control de sus principales precursores, los cuales incluyen NO_x, SO₂ y COV (SEDEMA, 2018a).



3.7.4 Lecciones aprendidas

De la evaluación del ProAire ZMVM 2011-2020 se desprenden las siguientes conclusiones y lecciones aprendidas:

- Se redujo efectivamente los niveles de contaminación por NO₂ y, en menor medida, de PM₂.5, en la ZMVM. La mayor efectividad en la reducción de emisiones derivó de acciones dirigidas hacia fuentes móviles, como la modernización del PVVO y el programa HNC.
- Dentro de las acciones con impactos directos en la reducción de precursores de O₃, se destaca la reducción de NO_x por el control de emisiones de fuentes móviles. Se reconoce que estas acciones han logrado contener un incremento acelerado de los niveles de concentración de O₃, mas no disminuirlos, por lo que estas regulaciones no han sido suficientes para dar respuesta a los problemas de O₃ que existen actualmente en la ZMVM. Esto no implica que deban dejarse de aplicar medidas de reducción de emisiones para fuentes móviles. Este sector es una de las principales fuentes de partículas PM_{2.5} primarias, como el carbono negro, y de precursores de aerosoles secundarios y O₃, como los NO_x y COV.
- Debido a que los niveles de O₃ en la última década se han mantenido estables, para lograr que la contaminación disminuya de manera significativa en la ZMVM, las políticas deben de priorizar el control de precursores, particularmente COV. Las políticas destinadas a reducir las emisiones derivadas de fuentes móviles se deben combinar con políticas de reducción de emisiones de COV procedentes de fuentes de área y, en particular, del uso de

- solventes en productos utilizados a nivel residencial, comercial, servicios e industrial, así como del consumo de gas L.P.
- Se deben seguir impulsando medidas para el control de COV procedentes de fuentes industriales locales y federales. En el caso de las emisiones generadas en el sector industrial, en enero de 2020 se publicó la norma NADF-011-AMBT-2018, que establece los criterios para la reducción de las emisiones a la atmósfera de COV emitidos por fuentes fijas de competencia de la Ciudad de México. Sin embargo, se debe impulsar la generación de políticas públicas que apliquen a toda la ZMVM o, en dado caso, de manera nacional.
- Es necesario mantener actualizadas las medidas destinadas a disminuir las emisiones de fuentes móviles (p. ej. el PVVO y el HNC), para impactar en una mayor cantidad de vehículos circulantes y promover el uso de tecnologías más limpias y eficientes.
- Un ProAire debe evaluar las medidas y acciones propuestas en él, mediante herramientas que simulen la reducción de emisiones y su impacto en la calidad del aire, con base en un inventario de emisiones actualizado, así como sus respectivas proyecciones a futuro. Esto fortalece el proceso de toma de decisiones para establecer metas viables y alcanzables, así como específicas y cuantitativas, en términos de la reducción de contaminantes primarios y precursores.

- Se debe fortalecer el trabajo colaborativo entre la Ciudad de México, el Estado de México y Tizayuca, Hidalgo, ya que en el ProAire ZMVM 2011-2020 el seguimiento y evaluación solo se pudo hacer de manera exhaustiva para las acciones aplicadas dentro de la Ciudad de México.
- Para la implementación del total de las medidas propuestas en el ProAire, la colaboración entre los gobiernos locales de la ZMVM y el Gobierno Federal es imprescindible, puesto que muchas fuentes están relacionadas con sectores o productos regulados a nivel federal. Un ejemplo de esto es la normatividad para limitar emisiones de COV por el uso de productos.
- Es fundamental reforzar el marco normativo, la vigilancia y el reporte de acciones de jurisdicción local, así como el establecimiento de sanciones para el cumplimiento de la normatividad y programas vigentes.
- Se debe fortalecer el trabajo colaborativo entre la Ciudad de México, el Estado de México y Tizayuca, Hidalgo, para mejorar la cobertura del monitoreo y homologar las prácticas de operación de los equipos.
- Se deben buscar mecanismos de financiamiento para el apoyo de las políticas y actividades que permitan su implementación y seguimiento.
- Se requiere mayor participación de todos los involucrados en la aplicación de las estrategias y comunicación entre áreas.

- Es fundamental incorporar el principio de igualdad sustantiva y lograr la transversalidad de la perspectiva de género en el ProAire ZMVM 2021-2030, por lo que se recomienda que futuras evaluaciones caractericen la relación entre las evaluaciones de calidad del aire e indicadores socioculturales que evidencien los impactos diferenciados de la contaminación atmosférica tanto en territorios, como entre mujeres y hombres. Asimismo, será importante documentar como factores ligados al género se relacionan con los procesos antropogénicos que dan origen a la contaminación atmosférica, como el uso y generación de energía, el transporte, las actividades industriales, el uso de productos químicos, actividades agropecuarias y la disposición de residuos.22
- Se deben fortalecer los esquemas de gobernanza para hacer frente a la problemática de calidad del aire en la Megalópolis, con el objetivo de sumar los esfuerzos que realizan los distintos gobiernos locales, en conjunto con el Gobierno Federal. En específico, es necesario ampliar la gestión de la calidad del aire a las cuencas atmosféricas aledañas a la ZMVM, particularmente en la cuenca de Tula, e implementar acciones y medidas ambiciosas que respondan a la evidencia científica disponible y que limiten el impacto negativo en la calidad del aire asociado al corredor industrial Tula-Vito-Apasco, catalogado como Zona Crítica por sus niveles de emisiones.

3.8 Evidencia científica reciente sobre calidad del aire y química atmosférica en la ZMVM

A nivel global, se tiene un progreso sustancial en la mejora del entendimiento científico sobre las características de las fuentes de emisión de contaminantes del aire, el transporte y transformación de estos en la atmósfera, y su impacto en la salud humana, los ecosistemas y el clima. Asimismo, el desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido mitigar las emisiones contaminantransporte y los procesos industriales. Sin embargo, queda mucho por comprender acerca de los complejos procesos de química atmosférica y los mecanismos que derivan en la formación En la ZMVM se han realizado diversos estudios y de especies como el O₃ y aerosoles secundarios, particularmente aquellos que contienen especies orgánicas (Molina, 2021). Adicionalmente, se debe generar más conocimiento sobre las fuentes de emisión emergentes y los cambios en los perfiles de emisión que resultan de la implementación de cambios tecnológicos y regulatorios, para evaluar su impacto en la química atmosférica. También se destaca la relevancia de continuar investigando las posibles interacciones entre el cambio climático, la calidad del aire y la salud pública.

Entender los procesos que rigen el comportamiento de la contaminación atmosférica es de particular interés en megaciudades como la ZMVM, donde se registran tasas elevadas de emisiones que ponen en riesgo a la salud de la población e implican costos económicos y sociales elevados. En este sentido, las políticas de calidad

del aire deben basarse en información científica y técnica para maximizar la efectividad en el control de la contaminación y proteger la salud pública. Los estudios de campo intensivos periódicos son una herramienta fundamental que, en conjunto con los inventarios de emisiones actualizados, el monitoreo continuo de la calidad del aire y los modelos numéricos, permiten abordar tes asociadas a distintas actividades como el las causas que desencadenan la contaminación del aire y apoyar el diseño de políticas de control de emisiones rentables (Velasco et al., 2021).

> campañas de campo intensivas que han permitido identificar y caracterizar los procesos químicos y meteorológicos que influyen en la formación de O₃, partículas secundarias y otros contaminantes, así como su transporte y transformación en la atmósfera. En específico, se resaltan los resultados de la campaña MCMA-2003 (Molina et al., 2007), conducida por un equipo multidisciplinario del Instituto Tecnológico de Massachusetts, y la campaña MILAGRO-2006, liderada por Luisa Molina (Molina et al., 2010). Desde entonces, han habido relativamente pocos estudios de campo en la ZMVM, aunque el SIMAT de la Ciudad de México y distintos centros de investigación, como el CCA de la UNAM, han desarrollado estudios especiales para ampliar el entendimiento de los procesos de química atmosférica en la ZMVM. A continuación, se resumen algunas de las conclusiones principales de estas campañas, así como de estudios relacionados (Molina et al., 2019):

Meteorología: Las campañas permitieron definir una clasificación para los episodios de contaminación (ver Figura 1.15 en el Capítulo 1) y evaluar cómo la meteorología regional y de gran escala influye en los niveles de O₃ (de Foy et al., 2005, 2008). También se ha identificado una variabilidad estacional en los niveles de O₃ producto de los cambios en la nubosidad en la tropósfera alta, fenómeno que es modulado por la Oscilación Madden – Julian (Barrett & Raga, 2016), así como intrusiones de O₃ estratosférico en la capa límite (Barrett et al., 2019). Por otro lado, García-Yee et al. (2018) caracterizó cómo los límites permisibles nacionales para O₃ no se excedían durante días con sistemas de baja presión, mientras que los sistemas anticiclónicos o de alta presión se asociaron a

excedencias de los límites normados. Se destaca también la necesidad de evaluar cómo el incremento en la temperatura, registrado por el SIMAT en años recientes, impacta la calidad del aire, y determinar si los cambios en la calidad del aire se deben a variaciones en la meteorología, modificaciones en las emisiones o cambios en la química atmosférica.

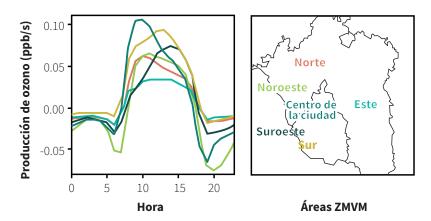
Compuestos orgánicos volátiles: Se midieron múltiples especies de COV durante las campañas MCMA-2003 (Jobson et al., 2010; Velasco et al., 2007) y MILAGRO-2006 (Apel et al., 2010; Bon et al., 2011; de Gouw et al., 2009; Fortner et al., 2009). Por ejemplo, las campañas determinaron que el consumo de gas L.P. es una fuente de alcanos de bajo peso molecular, mientras que las emisiones evaporativas en fuentes móviles e industriales generan COV aromáticos y metanol. Desde entonces, se han generado datos muy limitados sobre la especiación de COV, aunque se resalta que el SIMAT ha realizado campañas para medir hidrocarburos distintos del metano. Un estudio reciente midió 64 COV y reportó que la mayoría de las emisiones provienen de emisiones vehiculares y el uso de solventes (Garzón et al., 2015).

Fotoquímica urbana y regional: La formación de O₃ en la ZMVM depende no solo de la concentración de COV y NO_x, sino de su relación. Las mediciones de las campañas MCMA-2003 y MILA-GRO-2006 mostraron cómo la formación de O₃ estaba generalmente limitada por COV en la zona urbana, y mayoritariamente limitada por NO_x en las periferias, dependiendo de las condiciones meteorológicas (Lei et al., 2008; Song et al., 2010; Tie et al., 2007). Cuando la formación de O₃ es sensible a NO_x, un incremento en los COV generalmente provoca aumentos en la concentración de O₃, mientras que si los NO_x se elevan, el O₃ disminuye; el régimen de O₃ limitado por COV es frecuentemente observado en áreas urbanas densamente pobladas, como la ZMVM. Asimismo, se caracterizó el papel del nitrato de peroxiacilo en la regeneración de los NO_x y su contribución a la producción regional de O₃ (Mena-Carrasco et al., 2009).

Partículas suspendidas: Se encontró que en el centro de la ZMVM la fracción fina de partículas estaba compuesta principalmente por material orgánico (50%), inorgánico secundario (25%), carbono negro y partículas minerales. En contraste, la fracción mineral fue más importante (36%) en las afueras de la ciudad, mientras que el carbono negro también mostró concentraciones levemente superiores (Aiken et al., 2010; Querol et al., 2008). Volkamer et al., (2006) observó que la producción de aerosoles orgánicos secundarios en la ZMVM era más rápida y alta de lo esperado, según modelos atmosféricos y simulaciones de laboratorio. Los aerosoles orgánicos secundarios representan una gran fracción de las partículas, y su formación, evolución e impactos climáticos requieren mayor comprensión e investigación. En este sentido, el SIMAT ha realizado estudios para determinar la composición química de las partículas y generar información para mejorar la gestión de la calidad del aire. Un estudio de campo de 2015 señaló que la formación de aerosoles secundarios podría tener una variabilidad espacial sustancial (Salcedo et al., 2018). Además de estudiar esta variabilidad espacial, también se necesitan estudios a largo plazo para verificar la variabilidad estacional en la química de los aerosoles. Además, otra prioridad es estudiar las propiedades radiativas de las partículas suspendidas, puesto que la quema de biomasa puede tener impactos importantes en la absorción o calentamiento por la emisión de carbono negro a escala urbana y regional. Paredes-Miranda et al. (2013) compararon la variación diaria de los coeficientes de absorción y dispersión de carbono negro en cinco ciudades de todo el mundo y encontró que la Ciudad de México tenía los valores más altos. Por su parte, Retama et al. (2015) encontraron una fuerte variación estacional en las concentraciones de carbono negro en la ZMVM.

evidencian los cambios en la química atmosférica y la sensibilidad de las reacciones fotoguímicas que producen O₃, respecto de sus precursores. En específico, un estudio reciente de Zavala et al. (2020) concluyó que la reactividad de los COV se ha reducido durante las primeras horas de la mañana en la zona urbana, con variabilidades espaciales significativas. Esto implica que la producción de O₃ y su sensibilidad a los COV y NO_X también varía regionalmente dentro de la ZMVM (ver Figura 3.30). Si bien los alcanos provenientes de las fugas e hidrocarburos no quemados durante el consumo de gas L.P. siguen siendo un contribuyente clave en la reactividad de los COV en la atmósfera, el aporte de compuestos aromáticos y alguenos ha disminuido de forma consistente con la reducción de emisiones en fuentes móviles. Los

Respecto de la formación de O₃, estudios recientes cambios en la producción de O₃ sugieren que los elevados niveles de O3 en años recientes se asocian al incremento en la contribución relativa de COV oxigenados emitidos por el uso de solventes en productos cosméticos y de cuidado personal, de uso doméstico, comercial e industrial. El estudio también encontró un aumento significativo en la relación NO₂/NO, lo cual podría ocasionar cambios en la acumulación nocturna de radicales e impactar la fotoguímica durante las primeras horas de la mañana. Estos resultados muestran la necesidad de nuevos estudios de campo intensivos para investigar el comportamiento de radicales y la formación de especies secundarias, así como expandir la medición de COV y generar datos de monitoreo para apoyar estudios de modelación y el diseño de nuevas políticas de gestión de la calidad del aire.



Nota: Se muestra el perfil horario de la producción de ozono, en ppb/s

Figura 3.30 Variación espacial de la producción de ozono en la ZMVM Fuente: Zavala et al. (2020).

A raíz de la pandemia por COVID-19, la suspensión de actividades y las restricciones en la circulación de vehículos para limitar los contagios, se registraron reducciones en las emisiones de contaminantes del aire en todo el mundo (Bauwens et al., 2020), en particular gases de combustión como los NO_x y el CO que provienen en su mayoría de fuentes móviles, así como de partículas suspendidas. No obstante, en algunas ciudades, los niveles de contaminantes secundarios no mejoraron, dada la compleja relación entre las emisiones, la meteorológica y la química atmosférica (Kroll et al., 2020;

Le et al., 2020). Es así que esta situación representó una oportunidad excepcional para estudiar de forma naturalista las complejas interacciones entre las emisiones, la meteorología y los procesos de química atmosférica que derivan en el deterioro de la calidad del aire, con el objetivo de identificar retos y aprovechar oportunidades.

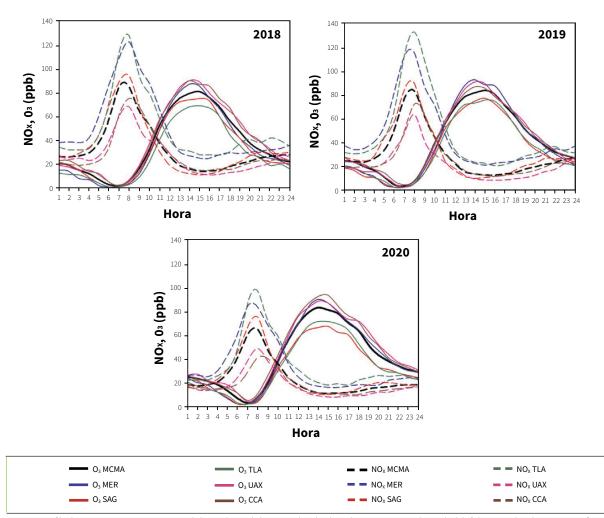
Anteriormente se resumieron los datos del monitoreo del SIMAT durante marzo y abril de 2020, meses donde se registraron las mayores reducciones en el tránsito vehicular en la ZMVM (ver sección 3.6.2)

por la contingencia sanitaria. Además, se destaca que el inicio de las restricciones empató con la temporada de O₃ en la ZMVM. El monitoreo comprobó que la concentración promedio de todos los contaminantes disminuyó, a excepción del O₃. Este comportamiento es similar a lo observado en otras megaciudades y regiones del mundo (Molina, 2021), y se puede asociar a condiciones fotoguímicas favorables para la formación de O₃, por ejemplo:

— Mayor incidencia de radiación solar por la reducción en emisiones primarias de contaminantes.

Disminución en la concentración de NO_x, que provoca aumentos en la concentración de O₃ en atmósferas sensibles a COV.

La Figura 3.31 muestra cómo el perfil horario de O₃ entre marzo y mayo de 2020 se mantuvo prácticamente igual a lo observado en los dos años anteriores, pese a las reducciones en la concentración de NO_x. El estudio de Peralta *et al.* (2021) concluyó que la disminución en los niveles de NO_x fue tan drástica que la formación de O₃ y la relación COV/NO_x se desplazó hacia un régimen sensible a NO_x.



Nota: Los perfiles horarios se construyeron a partir de las medianas de los promedios de 1 hora de O3 y NOX, para el periodo del 1º de marzo al 31 de mayo. Se grafican datos para toda la ZMVM y para cinco estaciones selectas

Figura 3.31 Cambios en el perfil horario de ozono y óxidos de nitrógeno en la ZMVM durante la contingencia sanitaria por COVID-19

Fuente: Peralta et al. (2021).

Peralta et al. (2021) también resaltan la importancia de evaluar los cambios en las emisiones de COV y su impacto en la relación COV/NO_x. Es claro que la contaminación por O₃ en la ZMVM no puede atribuirse exclusivamente al transporte, sino que también influyen otras fuentes que deben ser atendidas por los programas de gestión de la calidad del aire. Durante la pandemia, se puede asumir que el uso doméstico de combustibles para la cocción de alimentos aumentó, aunque se registró una disminución global en la emisión de otras fuentes, especialmente por la combustión de gasolina en fuentes móviles. Los cambios en las emisiones por la quema de diésel pudieron haber sido menores, puesto que este combustible transporte público y de carga. Asimismo, es posible que hubiesen incrementos en emisiones de COV por el uso de productos de limpieza y desinfección, y que las altas temperaturas de la temporada incrementaran las emisiones biogénicas. El estudio concluyó que, para desarrollar estrategias efectivas que reduzcan la contaminación por O₃, se deben seguir estudiando las complejas relaciones entre los COV y NO_x, así como los cambios en las emisiones urbanas y rurales. En este sentido, la falta de datos de monitoreo de COV en la ZMVM es una de las principales barreras para generar datos que faciliten el diseño de políticas focalizadas.

El INECC, la CAMe y la SEMARNAT también organizaron un taller para revisar hallazgos científicos sobre la calidad del aire durante la contingencia sanitaria por COVID-19. Además de resaltar puntos similares a lo discutido anteriormente, las memorias del taller (SEMARNAT et al., 2020) puntualizaron el papel que tuvieron las fuentes fijas contaminantes y los incendios forestales como generadores de precursores de O₃ en marzo y abril de 2020, y la necesidad de diseñar acciones más eficientes para limitar la emisión de precursores, por ejemplo, a través de nuevas normas nantes no vehiculares.

La ZMVM también enfrenta retos en la gestión de cuantifican muertes evitables y los beneficios ecola calidad del aire por la contribución regional a la contaminación de fuentes externas y el transporte

transfronterizo de contaminantes en cuencas de la Megalópolis (Molina, 2021). En este contexto, el monitoreo de la calidad del aire y los estudios de contaminación atmosférica son más escasos y limitados fuera de la ZMVM, lo cual complica la evaluación de la calidad del aire a nivel regional (Molina et al., 2019). Por ejemplo, los incendios forestales y agrícolas en estados aledaños son una fuente de aerosoles orgánicos, COV y otras especies reactivas que afectan la calidad del aire en la ZMVM, como se describió en la sección 3.6.1. La quema de biomasa es otra fuente importante de aerosoles orgánicos primarios y secundarios, así como carbono elemental (Lei et al., 2013).

se usa principalmente en vehículos pesados de No obstante, en años anteriores, el INECC ha preparado diagnósticos sobre la calidad del aire en la región centro del país y el transporte transfronterizo de contaminantes (UNAM & INECC, 2016). Las implicaciones del transporte de masas de aire contaminadas entre la cuenca del Valle de México y cuencas aledañas se describieron de forma general en la sección 1.3. Asimismo, en el Capítulo 5 se profundiza sobre el impacto en la calidad del aire de la ZMVM por la contribución regional de SO₂ transportado desde la cuenca de Tula, Hidalgo, donde la generación de electricidad y la refinación del petróleo generan volúmenes significativos de este contaminante.

También se puntualiza que es sumamente importante considerar la evidencia científica más reciente sobre las interacciones entre la calidad del aire, el cambio climático y la salud. El Capítulo 4 del ProAire presenta una revisión bibliográfica de evidencia reciente que muestra cómo el aumento de la temperatura media global, los cambios en patrones de viento y precipitación, entre otros impactos del cambio climático, pueden provocar una penalización o aumento de la contaminación por O₃ y PM_{2.5}, independientemente de las modificaciones en las emisiones. Por otra parte, el Capíambientales para controlar las fuentes contami- tulo 6 sintetiza evidencia epidemiológica reciente sobre los impactos a la salud por la mala calidad del aire y resume los resultados de estudios que nómicos que se observarían en caso de mejorar la calidad del aire en la ZMVM; además, presenta

información sobre la relación entre la calidad del aire y el riesgo de infección por COVID-19, dado que distintos estudios han encontrado una relación directa entre los niveles de contaminación, la propagación del virus y la severidad de los síntomas de esta enfermedad.

Es importante comprender que mejorar la calidad del aire en la ZMVM requiere de un gran esfuerzo por parte de las entidades federativas involucradas y el Gobierno Federal, que deben basar sus decisiones y políticas de gestión de la calidad del aire en evidencia científica. Sin embargo, también entran en juego distintos retos institucionales, económicos y sociales que deben ser atendidos para poder desplegar cambios tecnológicos y regulatorios que reduzcan las emisiones en los sectores prioritarios según la evidencia científica. Ejemplo de estos retos es que, en 2006, el Centro Mario Molina publicó un informe para apoyar la elaboración de políticas y estrategias de mejora de la calidad del aire en la ZMVM (CMM, 2006). Muchas de las propuestas integradas en ese entonces siguen siendo vigentes, como lo demuestra la revisión de la literatura presentada y las lecciones aprendidas del ProAire anterior (ver sección 3.7). Algunas de las recomendaciones destacadas del informe son:

- Reducir las emisiones de partículas finas provenientes de procesos de combustión.
- Sustituir las unidades vehiculares más antiguas.
- Mejorar la movilidad y el transporte público de pasajeros, a través de incentivos de renovación vehicular, para reducir las emisiones de partículas finas y precursores de O₃. Se requieren normas y verificaciones más estrictas, y estandarizar los programas de detección de

vehículos ostensiblemente contaminantes. Otras propuestas son el otorgamiento de certificaciones e incentivos a vehículos con mejor desempeño ambiental y rendimiento, definir requisitos tecnológicos de emisión y operativos para taxis, y aplicar programas de chatarrización. También se debe atender el tráfico inducido a causa del crecimiento urbano; esto se debe a la construcción y expansión de nuevas vialidades como resultado del crecimiento poblacional y el continuo uso de autos particulares, sin esquemas de desarrollo urbano sostenible.

- Limitar la contaminación de motocicletas, a través de su regulación y restricciones a su circulación.
- Ampliar el uso de combustibles con bajo contenido de azufre; esto requiere de vehículos con mejor tecnología y esquemas para promover la renovación de unidades.
- Controlar las emisiones de fuentes de área, como las fugas domésticas de gas L.P y emisiones evaporativas por el consumo de productos con contenido de COV (solventes, pinturas y barnices, por poner algunos ejemplos); también se deben expedir normas que regulen el contenido de COV en este tipo de productos.
- Aplicar medidas de gestión de la calidad del aire en cuencas atmosféricas alenadas a la ZMVM, especialmente en Tula.
- Reducir las emisiones de maquinaria agrícola y de construcción a través de normas y procedimientos de control de emisiones.

216 ProAire ZMVM **2021 – 2030**

217

La siguiente sección enlista los documentos de interés consultados para integrar la presente sección:

Aiken, A.C. *et al.* 2010. Mexico city aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0) – Part 2: Analysis of the biomass burning contribution and the non-fossil carbon fraction. Atmospheric Chem. Phys. 10, 5315–5341. https://doi.org/10.5194/acp-10-5315-2010

Apel, E.C. *et al.* 2010. Chemical evolution of volatile organic compounds in the outflow of the Mexico City Metropolitan area. Atmospheric Chem. Phys. 10, 2353–2375. https://doi.org/10.5194/acp-10-2353-2010

Barrett, B.S., Raga, G.B., 2016. Variability of winter and summer surface ozone in Mexico City on the intraseasonal timescale. Atmospheric Chem. Phys. 16, 15359–15370. https://doi.org/10.5194/acp-16-15359-2016

Barrett, B.S. *et al.* 2019. A Multiscale Analysis of the Tropospheric and Stratospheric Mechanisms Leading to the March 2016 Extreme Surface Ozone Event in Mexico City. J. Geophys. Res. Atmospheres 124, 4782–4799. https://doi.org/10.1029/2018JD029918

Bauwens, M. et al. 2020. Impact of Coronavirus Outbreak on NO2 Pollution Assessed Using TROPOMI and OMI Observations. Geophys. Res. Lett. 47, e2020GL087978. https://doi.org/10.1029/2020GL087978

Bon, D.M. *et al.* 2011. Measurements of volatile organic compounds at a suburban ground site (T1) in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign: measurement comparison, emission ratios, and source attribution. Atmospheric Chem. Phys. 11, 2399–2421. https://doi.org/10.5194/acp-11-2399-2011

CMM, 2006. Elaboración de Políticas y Estrategias para la Comunicación orientadas al mejoramiento de la calidad del aire en la ZMVM. Disponible en: https://centromariomolina.org/calidad-del-aire-2/elaboracion-de-politicas-y-estrategias-para-la-comunicacion-orientadas-al-mejoramiento-de-la-calidad-del-aire-en-la-zmvm/

de Foy, B. et al. 2005. Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign. Atmos Chem Phys 5, 2267–2288. https://doi.org/10.5194/acp-5-2267-2005

de Foy, B. *et al.* 2008. Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis. Atmos Chem Phys 8, 1209–1224. https://doi.org/10.5194/acp-8-1209-2008

de Gouw, J.A. *et al.* 2009. Emission and chemistry of organic carbon in the gas and aerosol phase at a sub-urban site near Mexico City in March 2006 during the MILAGRO study. Atmospheric Chem. Phys. 9, 3425–3442. https://doi.org/10.5194/acp-9-3425-2009

Fortner, E.C. *et al.* 2009. Measurements of Volatile Organic Compounds Using Proton Transfer Reaction – Mass Spectrometry during the MILAGRO 2006 Campaign. Atmospheric Chem. Phys. 9, 467–481. https://doi.org/10.5194/acp-9-467-2009

García-Yee, J.S. *et al.* 2018. Characterization of NOx-Ox relationships during daytime interchange of air masses over a mountain pass in the Mexico City megalopolis. Atmos. Environ. 177, 100–110. https://doi.org/10.1016/j.atmoseny.2017.11.017

Garzón, J.P. *et al.* 2015. Volatile organic compounds in the atmosphere of Mexico City. Atmos. Environ. 119, 415–429. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.014

Jobson, B.T. *et al.* 2010. Comparison of aromatic hydrocarbon measurements made by PTR-MS, DOAS and GC-FID during the MCMA 2003 Field Experiment. Atmospheric Chem. Phys. 10, 1989–2005. https://doi.org/10.5194/acp-10-1989-2010

Kroll, J.H. et al. 2020. The complex chemical effects of COVID-19 shutdowns on air quality. Nat. Chem. 12, 777–779. https://doi.org/10.1038/s41557-020-0535-7

Le, T. et al. 2020. Unexpected air pollution with marked emission reductions during the COVID-19 outbreak in China. Science 369, 702–706. https://doi.org/10.1126/science.abb7431

Lei, W., Li, G., Molina, L.T., 2013. Modeling the impacts of biomass burning on air quality in and around Mexico City. Atmospheric Chem. Phys. 13, 2299–2319. https://doi.org/10.5194/acp-13-2299-2013

Lei, W. et al. 2008. Characterizing ozone production and response under different meteorological conditions in Mexico City. Atmos Chem Phys 8, 7571-7581. https://doi.org/10.5194/acp-8-7571-2008

Mena-Carrasco, M. et al. 2009. Assessing the regional impacts of Mexico City emissions on air quality and chemistry. Atmospheric Chem. Phys. 9, 3731–3743. https://doi.org/10.5194/acp-9-3731-2009

Molina, L.T., 2021. Introductory lecture: air quality in megacities. Faraday Discuss. 226, 9–52. https://doi.org/10.1039/D0FD00123F

Molina, L.T. et al. 2007. Air quality in North America's most populous city – overview of the MCMA-2003 campaign. Atmospheric Chem. Phys. 7, 2447–2473. https://doi.org/10.5194/acp-7-2447-2007

Molina, L.T. et al. 2010. An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. Atmospheric Chem. Phys. 10, 8697–8760. https://doi.org/10.5194/acp-10-8697-2010

Molina, L.T. et al. 2019. Experience from Integrated Air Quality Management in the Mexico City Metropolitan Area and Singapore. Atmosphere 10. https://doi.org/10.3390/atmos10090512

Paredes-Miranda, G. et al. 2013. Black Carbon Aerosol Concentration in Five Cities and Its Scaling with City Population. Bull. Am. Meteorol. Soc. 94, 41–50. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00225.1

Peralta, O. et al. 2021. Ozone over Mexico City during the COVID-19 pandemic. Sci. Total Environ. 761, 143183. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143183

Querol, X. et al. 2008. PM speciation and sources in Mexico during the MI-LAGRO-2006 Campaign. Atmospheric Chem. Phys. 8, 111–128. https://doi.org/10.5194/acp-8-111-2008

Retama, A. et al. 2015. Seasonal and diurnal trends in black carbon properties and co-pollutants in Mexico City. Atmospheric Chem. Phys. 15, 9693–9709. https://doi.org/10.5194/acp-15-9693-2015

Salcedo, D. et al. 2018. PM1 Chemical Characterization during the ACU15 Campaign, South of Mexico City. Atmosphere 9, 232. https://doi.org/10.3390/atmos9060232

SEMARNAT, CAMe, INECC, 2020. Taller Virtual: Hallazgos Científicos sobre la Calidad del Aire durante COVID-19. Memoria. Viernes 22 de septiembre de 2020. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/601193/MemoriaTallerHallazgosAireCOVID_dic17_2020.pdf

Song, J. et al. 2010. Ozone response to emission changes: a modeling study during the MCMA-2006/MILAGRO Campaign. Atmos Chem Phys 10, 3827–3846. https://doi.org/10.5194/acp-10-3827-2010

Tie, X. et al. 2007. Characterizations of chemical oxidants in Mexico City: A regional chemical dynamical model (WRF-Chem) study. Atmos. Environ. 41, 1989–2008. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.053

UNAM, INECC, 2016. Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/up-loads/attachment/file/208883/Informe_Final_AECAME_20161230.pdf

Velasco, E. *et al.* 2007. Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 & 2003 field campaigns. Atmospheric Chem. Phys. 7, 329–353. https://doi.org/10.5194/acp-7-329-2007

Velasco, E. *et al.* 2021. Intensive field campaigns as a means for improving scientific knowledge to address urban air pollution. Atmos. Environ. 246, 118094. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118094

Volkamer, R. et al. 2006. Secondary organic aerosol formation from anthropogenic air pollution: Rapid and higher than expected. Geophys. Res. Lett. 33. https://doi.org/10.1029/2006GL026899

Zavala, M. et al. 2020. Changes in ozone production and VOC reactivity in the atmosphere of the Mexico City Metropolitan Area. Atmos. Environ. 238, 117747. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117747