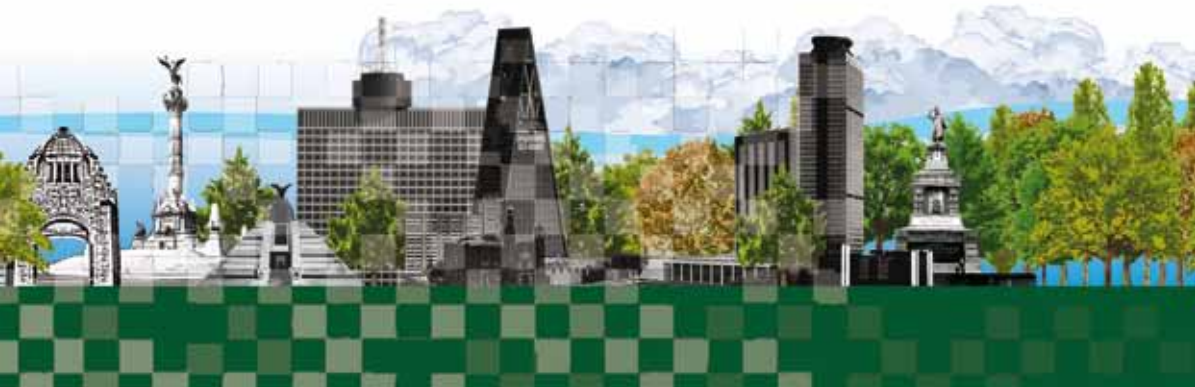
2006-2012

Secretaría del Medio Ambiente

GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL

LIBROS BLANCOS

INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE



DIRECTORIO

Marcelo Ebrard Casaubon
Jefe de Gobierno del Distrito Federal

Martha Delgado Peralta
Secretaria del Medio Ambiente

J. Víctor Hugo Páramo Figueroa
Director General de Gestión de la Calidad del Aire en el Distrito Federal

Armando Retama Hernández
Director de Monitoreo Atmosférico

Jorge Sarmiento Rentería
Director de Programas de Calidad del Aire e Inventarios de Emisiones

Sergio Zirath Hernández Villaseñor
Director de Transporte Sustentable y Fuentes Móviles

Participantes

Cristina Ortuño Mojica • José Luis del Río Jáuregui • Olivia Rivera Hernández • Alfredo Alfonso Soler • Saúl Rodríguez Rivera • María Cristina Ruíz Ramírez • Isabel Graciela González Merino • Juan Manuel Arriaga Cosío • Jorge Juan Domínguez Ochoa • Marco Gabriel Hernández Hernández • José Jesús Miguel Sánchez Rodríguez • Arturo Galicia Zepeda • Mónica Jaimes Palomera • Guadalupe Granados Gutiérrez • Alfonso López Medina • Mauricio Hernández Mote • Jorge Cornejo Martínez • Patricia Camacho Rodríguez • Miguel Ángel Flores Román • Francisco Hernández Ortega

Coordinación editorial

Adolfo Mejía Ponce de León
Director General de Planeación y Coordinación de Políticas

Gustavo Orpinel Guerra
Director de Planeación y Evaluación de Proyectos

Laura Patricia Mendicuti Castro
JUD de Estadísticas y Análisis Estratégico

Mauricio Sánchez Álvarez

María Eva Núñez Guzmán

D.R. © 2012, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.

Plaza de la Constitución núm. 1, tercer piso, Centro Histórico, C.P. 06068, Delegación Cuauhtémoc, México, Distrito Federal. Tels. (55) 5345 8187 y 5345 8188.

Impreso en México

Esta publicación no puede ser reproducida, ni total ni parcialmente, ni registrada o transmitida por ningún medio, sin el permiso previo y por escrito de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. Distribución gratuita. Prohibida su venta.

Introducción

Al llegar casi al final de la administración del licenciado Marcelo Ebrard Casaubon es pertinente realizar un recuento y una evaluación de las tareas llevadas a cabo en el ámbito de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA) durante el periodo 2006-2012. Para ello se han elaborado una serie de publicaciones dirigidas a los temas que consideramos de mayor importancia e interés para la ciudadanía y para los futuros funcionarios que continuarán abordando los temas ambientales del Distrito Federal. En este caso presentamos en esta publicación tres instrumentos fundamentales para la gestión de la calidad del aire de la ciudad: el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), los inventarios de emisiones y los modelos de simulación de la calidad del aire.

El monitoreo de la calidad del aire es un insumo fundamental para la toma de decisiones en la materia, pues permite "tomar la temperatura" del grado de limpieza que presenta el aire que respiran los ciudadanos del Distrito Federal y su área metropolitana. El SIMAT cumplió recientemente 25 años de operar ininterrumpidamente, y en esta publicación presentamos el estado actual y las acciones de reforzamiento, ampliación y modernización que se llevaron a cabo en nuestro periodo de actuación. Cabe mencionar que el SIMAT representa el sistema de monitoreo atmosférico más desarrollado de México y que su ámbito de actuación va más allá del servicio que brinda a la ciudad, pues numerosos grupos de investigación y académicos son asiduos usuarios de los productos y la información que genera.

Los inventarios de emisiones que desarrollamos en la Secretaría son también de los más avanzados en el país, tanto por su detalle y calidad, como por la frecuencia bianual con los que se elaboran; en este sentido, en nuestra administración se elaboraron los inventarios para los años 2006, 2008 y 2010. Nuestros inventarios de emisiones de contaminan-

tes criterio, contaminantes tóxicos y compuestos de efecto invernadero contienen la mejor información disponible en materia de las fuentes de emisión y los volúmenes de contaminantes que se producen por las actividades cotidianas en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Son uno de los insumos básicos para la elaboración y el diseño de las políticas de gestión de la calidad del aire de la ciudad y para los programas metropolitanos de mejoramiento de la calidad del aire. En esta publicación presentamos los avances metodológicos realizados en el periodo y los resultados generales de los inventarios para el año 2010.

Finalmente se describen los modelos de simulación matemática de que dispone la Secretaría para estudiar diferentes fenómenos de contaminación atmosférica que van, desde los modelos meteorológicos, hasta los modelos fotoquímicos complejos. En el documento se detallan aplicaciones relevantes como fue evaluar el impacto de medidas del nuevo Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020 (PROAIRE 2011-2020); determinar la afectación potencial de la quema de juegos pirotécnicos durante las celebraciones del Bicentenario de la Independencia de México, y estudiar el posible impacto en la calidad del aire del Valle de México de emisiones de dióxido de azufre provenientes de fuentes industriales y de la región de Tula, entre otras.

I
Monitoreo y calidad del aire

Antecedentes

El problema de la calidad del aire en la Ciudad de México tiene su origen en el desarrollo urbano y económico que ha experimentado la ciudad en el último medio siglo; ello ha provocado una demanda importante de bienes de consumo, energía eléctrica, servicios ambientales, fuentes de trabajo, transporte y vialidades.

Desde principios del siglo XX los combustibles derivados del petróleo han sido la principal fuente de energía para la industria, los servicios y el transporte. Sin embargo, la quema de combustibles en los motores de combustión interna y calderas, además de producir energía, generan subproductos que son arrojados a la atmósfera en forma de partículas, gases y vapores, alterando su composición natural. La presencia de estas sustancias contaminantes tiene un impacto desfavorable en la salud humana y, en general, en el medio ambiente.

Hasta antes de 1960, la Ciudad de México estaba limitada a una pequeña región dentro del Distrito Federal; sin embargo, la expansión de la mancha rebasó sus límites hacia el norte y oriente dentro del Estado de México. Actualmente la

Archivo DMA

Imagen de la Ciudad de México obtenida por la cámara Hazecam desde la sierra del Ajusco en un día con una calidad del aire y visibilidad favorables. Al fondo se aprecian las montañas de la sierra de Guadalupe.

Ciudad de México es una megalópolis de cerca de 20 millones de habitantes. En 2005 la Secretaría de Desarrollo Social, en el documento "Delimitación de las zonas metropolitanas de México", definió la Zona Metropolitana del Valle de México como el conglomerado urbano de la región central del país que abarca las 16 delegaciones del Distrito Federal, 59 municipios del Estado de México y un municipio del estado de Hidalgo. Antes de 2005, se definía como Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) una región que abarcaba las 16 delegaciones del Distrito Federal, 37 municipios del Estado de México y uno del estado de Hidalgo.

El término Ciudad de México es empleado para hacer referencia a la zona urbana del Distrito Federal; sin embargo, algunas personas utilizan el término para referirse a la zona metropolitana en los municipios conurbados. En términos ambientales, tanto el Distrito Federal como la zona conurbada del Estado de México, conviven dentro de un mismo entorno geográfico: el Valle de México. Es un hecho reconocido que el Distrito Federal padece los problemas provocados por la contaminación generada en la zona conurbada del Estado de México, que genera más de 50% de los contaminantes primarios y de los compuestos precursores de ozono y partículas. Por ese motivo, cualquier acción para mejorar la calidad del aire requiere de la participación de los gobiernos de ambas entidades federativas, además del gobierno federal, que tiene bajo su jurisdicción una cantidad importante de fuentes de emisión de contaminantes, principalmente la industria química y las plantas generadoras de energía.

Según el Censo de Población y Vivienda 2010, la denominada Zona Metropolitana del Valle de México cuenta con más de 20 millones de habitantes en un área de 7 852 km^2: 8 851 080 radican en el Distrito Federal; 11 168 301, en los municipios del Estado de México, y 97 461, en el municipio del estado de Hidalgo. De acuerdo con la Encuesta Origen-Destino, diariamente se realizan dentro de la zona metropolitana 21.6 millones de viajes. En este mismo lugar se asienta también alrededor de 20% de la industria nacional, la cual se localiza principalmente en la zona conurbada del Estado de México. El inventario de emisiones de contaminantes criterio de la SMA menciona que en un año se

consumen 50 millones de litros de gasolina equivalentes en la Ciudad de México, lo que genera la emisión a la atmósfera de más de 3 millones de toneladas de contaminantes criterio y precursores de contaminantes secundarios.

Hasta hace menos de dos décadas, la Ciudad de México era considerada como la ciudad más contaminada del planeta. En los primeros años de la década de 1990, el deterioro de la calidad del aire alcanzó niveles de emergencia ambiental, pues prácticamente 100% de los días del año registraban niveles de contaminación que superaban, por mucho, los límites nacionales e internacionales para la protección de la salud pública. Todos los contaminantes criterio rebasaban considerablemente la normativa vigente.

Con la implementación de acciones para la gestión de la calidad del aire, que se definieron dentro del Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica en el Valle de México (PICCA) en 1990, se inició un conjunto de actividades de corto, mediano y largo plazo orientadas a disminuir los niveles de los contaminantes en el aire ambiente. En función de los resultados obtenidos, periódicamente se renuevan estos programas de gestión, y hasta la fecha se han implementado cuatro programas para la mejora de la calidad del aire (véase el cuadro 1).

Como resultado de estos programas, en 1993 se logró el cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana (NOM) para plomo en partículas suspendidas; en 2001, el de la NOM para monóxido de carbono; en 2003, el de la NOM para dióxido de azufre, y en 2006, el de la NOM para dióxido de nitrógeno. Desde la década de 1990 se han disminuido considerablemente las concentraciones de partículas suspendidas y ozono en el aire ambiente; sin embargo, estos contaminantes aún se mantienen por encima de las recomendaciones de la normativa.

El monitoreo de la calidad del aire en la Ciudad de México

El monitoreo de la calidad del aire desempeña un papel fundamental en la protección de la salud pública y en la gestión ambiental. Es un proceso cuantitativo para evaluar la magnitud del deterioro de la calidad del aire, generar información para la protección de la salud, identificar

riesgos potenciales para el ser humano y el medio ambiente, y evaluar los programas de mejora y control.

El Gobierno del Distrito Federal (GDF) cuenta con una extensa red de monitoreo que cubre el territorio del Distrito Federal y una gran parte de la zona conurbada del Estado de México. Los primeros intentos formales para el monitoreo de la calidad del aire iniciaron en la década de 1950; sin embargo, fue a mediados de 1980, con la instalación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, cuando el gobierno federal consolidó un sistema con tecnología moderna, capaz de cumplir con las necesidades de la ciudad y proporcionar información de calidad y en tiempo real.

Actualmente, el SIMAT es la herramienta tecnológica de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, responsable de la medición continua y permanente del estado de la calidad del aire en la ciudad.

El SIMAT se consolidó en el año 2000 con la integración de las diferentes redes y programas de monitoreo que operaba la SMA. En su configuración actual, está integrado por los siguientes subsistemas (véase la figura 1):

- La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA): es responsable de la medición continua de los contaminantes criterio gaseosos (dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y ozono), así como de las partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) y menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$). Esta red emplea analizadores automáticos de operación continua y cuenta

Cuadro 1. Programas implementados en la ZMVM para mejorar la calidad del aire

Nombre del programa	Vigencia
Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica del Valle de México (PICCA)	1990-1994
Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (PROAIRE I)	1995-2000
Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (PROAIRE II)	2002-2010
Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (PROAIRE III)	2011-2020

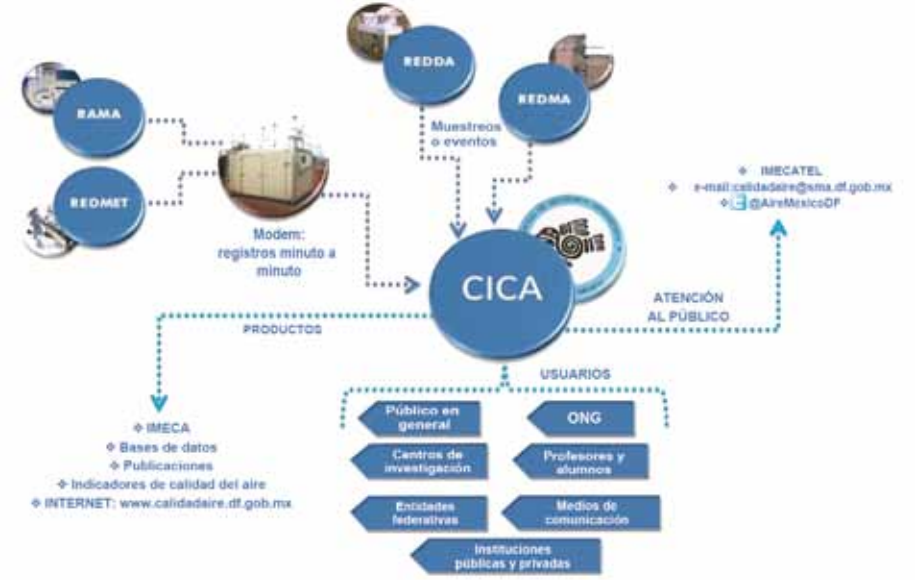
ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.

Fuente: DGGCA de la SMA.

con 29 estaciones de monitoreo, de las cuales 15 se ubican en el territorio del Distrito Federal, y 14, en los municipios conurbados del Estado de México. Los datos se recopilan cada hora y se emplean para generar el índice metropolitano de la calidad del aire (IMECA).

- La Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA): realiza la recolección de muestras físicas de las fracciones PM_{10} y $PM_{2.5}$ en periodos de 24 horas una vez cada seis días. La red consta de 13 sitios de monitoreo.
- La Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET): evalúa los parámetros meteorológicos de superficie (dirección y velocidad de viento, temperatura, humedad relativa y presión atmosférica) en 16 estaciones de monitoreo, así como de los parámetros de radiación solar ultravioleta en seis estaciones de monitoreo.
- La Red de Depósito Atmosférico (REDDA): se encarga de la recolección de muestras de depósito seco y depósito húmedo (lluvia) para su análisis fisicoquímico.

Figura 1. Componentes del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México



RAMA: Red Automática de Monitoreo Atmosférico; REDMA: Red Manual de Monitoreo Atmosférico; REDMET: Red de Meteorología y Radiación Solar; REDDA: Red de Depósito Atmosférico; CICA: Centro de Información de la Calidad del Aire; IMECA: índice metropolitano de la calidad del aire; ONG: organismos no gubernamentales.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Las muestras de depósito seco se colectan una vez cada mes, mientras que las de depósito húmedo se colectan cada semana durante la temporada de lluvia. La red cuenta con 16 estaciones fijas de monitoreo.

- El Centro de Información de la Calidad del Aire (CICA): recibe la información de calidad del aire generada por los diferentes componentes del SIMAT. Se encarga de la adquisición, la validación y la difusión de la información.
- Laboratorio móvil: cuenta con equipo de monitoreo de calidad del aire y sensores meteorológicos; está orientado, principalmente, al monitoreo de la calidad del aire en sitios remotos o en zonas en donde no se cuenta con estaciones de monitoreo. Se emplea también para la realización de campañas de corta duración y en apoyo a proyectos de investigación.

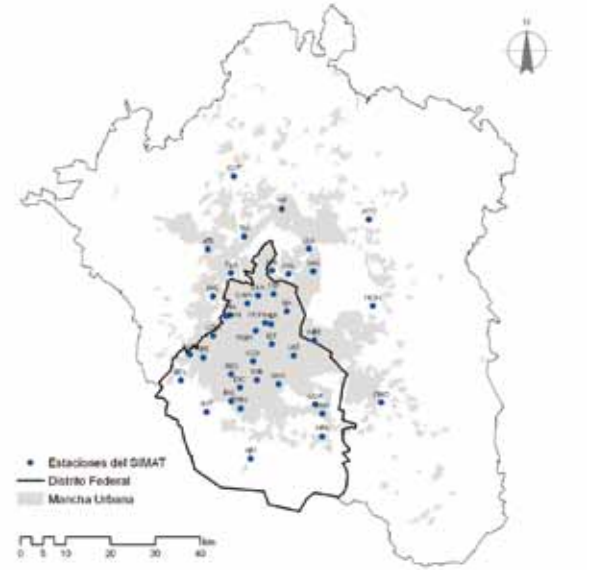
La misión del SIMAT es vigilar y evaluar el estado de la calidad del aire en la Ciudad de México, con el propósito de informar oportunamente a los habitantes de la ciudad y fortalecer la toma de decisiones en programas de prevención y mejoramiento de la calidad del aire.

Algunos de los objetivos del SIMAT relacionados con la salud pública son:

1. Evaluar el estado de la calidad del aire respecto a los contaminantes criterio establecidos por las normas oficiales mexicanas de salud ambiental.
2. Elaborar y difundir el IMECA cada hora, empleando los resultados del monitoreo.
3. Generar información para el seguimiento de las políticas y acciones para mejorar la calidad del aire en la Ciudad de México.

Actualmente, el SIMAT cuenta con 42 estaciones de monitoreo distribuidas en la zona metropolitana (véase la figura 2): en 29 de ellas se realiza el monitoreo continuo de los contaminantes criterio; en 18 se realiza el monitoreo de las variables meteorológicas de superficie; en 16 se recolectan muestras de depósito atmosférico, y en 13 se recolectan muestras de partículas suspendidas. En 2012, con

Figura 2. Zona urbana de la Ciudad de México y estaciones de monitoreo de la calidad del aire del Sistema de Monitoreo Atmosférico



Nota: para conocer el significado de las siglas, véase el glosario anexo.
Fuente: DGGCA de la SMA.

la aplicación de los resultados del diseño, la red sufrió algunos cambios en la distribución de las estaciones respecto a los años previos (esto se abordará con mayor detalle más adelante en el documento).

El SIMAT es la red de monitoreo de la calidad del aire más antigua del país y una de las más completas de Latinoamérica. Ha operado de manera ininterrumpida desde que inició operaciones en octubre de 1986.

En octubre de 2011 se celebraron 25 años de operación de la RAMA y 25 años del monitoreo continuo de la calidad del aire en la Ciudad de México. Cada sitio de monitoreo cuenta con toda la infraestructura física, eléctrica y de comunicaciones necesaria para garantizar la adecuada operación de los equipos. Las estaciones de la RAMA cuentan con casetas resistentes para resguardar los instrumentos de monitoreo, mientras que en el resto de las estaciones los equipos se encuentran expuestos directamente a la intemperie. Los sitios se ubican generalmente en escuelas y edificios públicos con seguridad adecuada y control de acceso.

En este documento se presenta un resumen general sobre el estado de la operación del SIMAT y la calidad del aire en la Ciudad de México entre 2006 y 2011.

Operación del Sistema de Monitoreo Atmosférico

El SIMAT, como cualquier herramienta tecnológica, está sujeto a problemas operativos y técnicos, por lo que requiere de un programa permanente de mantenimiento correctivo y preventivo en cada uno de sus componentes. Cada año se invierte una gran parte de los recursos de la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire (DGGCA) en el programa de mantenimiento.

Las estaciones de monitoreo están equipadas con sensores, analizadores, monitores, muestreadores y equipos de adquisición, todos ellos soportados por una infraestructura física y eléctrica adecuada. Un número importante de los componentes de los equipos empleados para el monitoreo están sujetos a estrés mecánico o eléctrico; los muestreadores y analizadores se encuentran expuestos interna o externamente al aire de la ciudad y sufren un daño gradual en la superficie de los sistemas analíticos, por la presencia de sustancias oxidantes y corrosivas.

Desempeño de los subsistemas

En el año 2006, al inicio de esta administración, el SIMAT contaba con 49 estaciones de monitoreo en operación, 36 de las cuales se encontraban en el Distrito Federal, y el resto, en municipios conurbados del Estado de México. En 2007 dos estaciones dejaron de operar: la estación Metro Insurgentes (MIN), ubicada en la Glorieta del Metro Insurgentes, y la estación Hangares (HAN), localizada cerca del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM).

La estación MIN dejó de funcionar debido a que el sitio era ocupado por personas en situación de calle que la empleaban como refugio o como baño público; la estación HAN, a que el terreno que ocupaba sería destinado a la construcción de obras relacionadas con la Terminal 2 del AICM. En ese mismo año se instalaron tres nuevas estaciones: Acolman (ACO), Iztacalco (IZT) y Chalco (CHO).

Entre 2008 y 2010, algunas estaciones no cumplieron con suficiencia de información por retrasos en la entrega

de refacciones, con excepción de la estación Montecillo (antes Chapingo), en donde la falta de información se debió a problemas con el acceso por la huelga que ocurrió en la institución en 2009.

Fue en el 2011 cuando se presentó el mayor número de estaciones con un porcentaje de captura bajo, debido a que en ese año se aplicó un proyecto para mejorar el SIMAT. Como se comentará más adelante, en ese año se aplicaron los resultados del estudio de rediseño del Sistema.

Este proyecto identificó problemas o deficiencias en la representatividad y cobertura espacial de las estaciones de monitoreo; como parte de los resultados, las siguientes estaciones concluyeron su operación: Azcapotzalco (AZC), Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Tacuba (TAC), Vallejo (VAL), Aragón (ARA), La Villa (LVI), Lagunilla (LAG), Plateros (PLA), Cerro de la Estrella (CES) y Taxqueña (TAX), y la estación Perla (PER) fue reubicada y cambió de nombre a NEZ (Nezahualcóyotl). Se identificaron zonas en donde era necesario reforzar el monitoreo y se incluyeron nuevos parámetros para esta actividad en las siguientes estaciones: Comisión Ambiental Metropolitana (CAM), Tlalnepantla (TLA), Tultitlán (TLI), Acolman (ACO), Los Laureles (LLA), La Presa (LPR), Montecillo (MON), NEZ, San Agustín (SAG), San Juan de Aragón (SJA), Villa de las

Archivo DMA

Estación de monitoreo de la calidad del aire de SIMAT.
Estación Hospital General de México, localizada en la Delegación Benito Juárez.

Flores (VIF), Xalostoc (XAL), Merced (MER), Coyoacan (COY), Cuajimalpa (CUA), Pedregal (PED), Tlalpan (TPN), Chalco (CHO), Tláhuac (TAH) y UAM-Iztapalapa (UIZ). En 2012 entraron en operación cinco nuevas estaciones: Santa Fe (SFE), Hospital General de México (HGM), UAM-Xochimilco (UAX), Ajusco (AJU) y Cuautitlán (CUT).

En el caso de la REDMA, sólo la estación UIZ registró una baja captura de datos en 2008, por la huelga que hubo en la Universidad, la cual dificultó el acceso a las instalaciones.

La operación de la REDMET registró la pérdida de datos por retrasos en la contratación del servicio de mantenimiento preventivo y correctivo.

La REDDA registró una operación constante con un porcentaje de datos válidos de más de 75% durante el periodo comprendido entre 2006 y 2011.

Auditorías externas

Desde la aparición de la RAMA en 1986, como un instrumento continuo para la vigilancia del estado de la calidad del aire en la Ciudad de México, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) aplicó, de manera periódica, auditorías externas. El propósito de estas auditorías era identificar fallas en la operación, el mantenimiento o el control de calidad de la red de monitoreo. Este diagnóstico permitió establecer programas de mejora en el proceso durante los primeros años de operación.

En 2005, con recursos de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), la EPA aplicó la última auditoría a la RAMA. Se verificó el desempeño de los analizadores de ozono, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y dióxido de azufre en 16 estaciones de monitoreo. Los resultados de esta auditoría comprobaron la eficacia de la RAMA para la medición de ozono y monóxido de carbono, e identificaron puntos de mejora en el monitoreo de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. En ese año, la EPA concluyó el programa de apoyo a la Red.

A partir de 2008 la DGGCA, a través de la Dirección de Monitoreo Atmosférico (DMA), decidió continuar con el programa de auditorías externas. Para este propósito en 2009 realizó la contratación de la empresa EPA Systems, LLC., que

se especializa en el diseño de redes de monitoreo de la calidad del aire y servicios de auditoría de programas de monitoreo en Estados Unidos y otros países de Europa y Medio Oriente, con una trayectoria de más de 25 años.

La auditoría se ejecutó del 14 al 18 de diciembre de 2009 aplicando los mismos criterios que emplea actualmente la EPA; así se dio continuidad a las auditorías de 2000, 2003 y 2005, realizadas en México. La auditoría se aplicó a 40 instrumentos localizados en nueve estaciones de monitoreo y al Laboratorio de Transferencia de Estándares. En esta ocasión, y a diferencia de las auditorías anteriores, se realizó una auditoría de sistema la cual, además de incluir la operación de los analizadores, abarcó la verificación de la documentación, de los procedimientos de operación y del programa de control de calidad.

Los resultados de la auditoría externa indicaron que el GDF cuenta con un sistema efectivo para la operación y la calibración de las estaciones de monitoreo. Los resultados se encuentran debidamente documentados y los procesos se aplican de manera consistente. De acuerdo con el auditor, las estaciones cumplen con las condiciones necesarias para la operación, y se confirmó que existe competencia en el trabajo desempeñado por los técnicos en campo. En cuanto al desempeño de los instrumentos se encontró que las estaciones operan bien y generan datos de calidad comprobable. El monitoreo de PM_{10}, $PM_{2.5}$, ozono, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno se realiza de manera adecuada y dentro de los parámetros que marca la auditoría. Sólo en el caso del monitoreo de dióxido de azufre se reportaron desviaciones importantes en tres de las nueve estaciones verificadas, con incertidumbres mayores al objetivo de la auditoría de 15%. En el caso del analizador de ozono de la estación ENEP Acatlán se detectó una interferencia en el equipo de calibración que provocó una desviación en la respuesta del analizador; sin embargo, la revisión posterior del auditor y de los operadores de campo de la RAMA demostraron que no existían fallas en el equipo.

Después de la evaluación de los resultados, el auditor emitió recomendaciones menores en su reporte final relacionadas con la documentación en las estaciones. Sin

embargo, el aspecto más importante de la auditoría es que identificó un punto de mejora en el monitoreo de dióxido de azufre, por lo que recomendó la revisión cuidadosa de aquellos equipos que reportaron desviaciones importantes. En sus observaciones finales menciona que el GDF cuenta con una red de monitoreo con un sistema adecuado de control y aseguramiento de la calidad, y que los instrumentos operan de manera adecuada.

Con el propósito de asegurar que la auditoría se realizó de acuerdo con los estándares de la EPA, el reporte final fue sometido a una revisión de especialistas de la región 9 de esa agencia, con sede en el estado de Texas, Estados Unidos. La opinión de los revisores fue que la auditoría se realizó de acuerdo con los requerimientos de la EPA y con los mismos límites de control de calidad. Mencionaron también que concuerdan con los hallazgos y recomendaciones del auditor externo.

Los resultados de la auditoría indicaron que la Dirección de Monitoreo Atmosférico mejoró el monitoreo de los óxidos de nitrógeno; sin embargo, era necesario resolver problemas en el monitoreo de dióxido de azufre, para lo cual gradualmente se reemplazó alrededor de 60% de los equipos. El reporte íntegro se encuentra disponible para consulta en el sitio electrónico de la Dirección de Monitoreo Atmosférico: <http://www.calidadaire.df.gob.mx>.

Durante 2011 se inició el proceso para aplicar a los analizadores de gases una segunda auditoría que se llevaría a cabo en 2012; adicionalmente se contrató a un experto para la auditoría del desempeño de los equipos de monitoreo de partículas. Al momento de la elaboración de este libro no se contaba aún con los resultados de dicha auditoría; sin embargo, éstos se encontrarán disponibles al público en el sitio electrónico de la Dirección de Monitoreo Atmosférico.

Centro de Datos de la Dirección de Monitoreo Atmosférico

El Centro de Datos de la Dirección de Monitoreo Atmosférico alberga 32 servidores de cómputo y toda la infraestructura central de telefonía y redes; cuenta con un sistema de seguridad perimetral, temperatura controlada y un sistema redundante de energía eléctrica. El Centro de Datos es un

Archivo DMA

Centro de Datos de la Dirección de Monitoreo Atmosférico.

sistema de alta disponibilidad que resguarda los equipos, comunicaciones, procesos, páginas y bases de datos del SIMAT, pero también da servicio de alojamiento al portal de la Secretaría del Medio Ambiente y a gran parte de sus páginas asociadas. Resguarda gran parte de la información crítica de la SMA, como el Sistema de Verificación Vehicular (SIVEV).

Hasta diciembre de 2011, el Centro de Datos alojaba 56 páginas electrónicas de la Secretaría del Medio Ambiente: administraba el servicio de correo institucional con el dominio <sma.df.gob.mx>, con un total de 247 usuarios, y administraba la red interna de informática, con 210 usuarios.

Recursos humanos

La operación permanente del SIMAT no se puede entender sin su bien más preciado: el personal operativo. La Dirección de Monitoreo Atmosférico cuenta con 42 técnicos con capacidades y conocimientos específicos en diferentes campos, lo que representa una enorme ventaja porque garantiza la independencia y disminuye considerablemente los costos de operación. En la Subdirección de Monitoreo se encuentra el personal con mayor especialización, el cual es responsable de la operación y el manejo de los equipos de análisis y monitoreo, con una experiencia promedio superior a los 10 años; su capacidad técnica es única en

el país. La formación de cada uno de estos técnicos es un proceso lento que lleva más de un año.

La Dirección cuenta además con personal especializado en diseño gráfico web y editorial, para mantener la página y elaborar los materiales de difusión; en tecnologías de la información, para mantener el Centro de Datos, la red y los enlaces; en análisis de datos, para realizar la revisión y validación de los datos de calidad del aire; en meteorología, para el pronóstico de clima, dispersión de cenizas y calidad del aire, y en programación, para el desarrollo de aplicaciones y programas. Lo anterior permite una autonomía completa que garantiza, además del monitoreo atmosférico, la difusión de la información.

Calidad del aire en la Ciudad de México

La calidad del aire en la Ciudad de México ha registrado una mejora significativa respecto a los niveles que se tenían hasta antes del inicio de esta administración. En el transcurso de ésta se lograron avances importantes en el tema de la calidad del aire, a pesar del crecimiento que experimentó la ciudad y el parque vehicular. En esta administración se dio por concluido el PROAIRE II y se inició un nuevo paquete de acciones contenidas dentro del PROAIRE III. Los logros más importantes en el tema de la calidad del aire y la contaminación atmosférica se describen a continuación:

Archivo DMA

Los técnicos de monitoreo son el personal más especializado y se encargan de la operación permanente de los equipos localizados en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire.

Archivo DMA

Los técnicos de las subdirecciones de Sistemas, de Meteorología y de Análisis son los responsables de realizar todas las tareas necesarias para la adquisición, validación y difusión de la información, el pronóstico del tiempo y la calidad del aire, así como del mantenimiento y operación de la infraestructura informática.

1. Se mantuvo la tendencia descendente en la mayoría de los contaminantes criterio.
2. En el caso del ozono, se redujo la frecuencia en los picos de concentración y el número de horas que superaban el valor de la NOM para el promedio horario.
3. En 2008, 2009 y 2010 se alcanzó de manera consecutiva el mayor número de días en los que la concentración de ozono no rebasó el valor de la NOM para el promedio de una hora, superando en 50% los días del año con una calidad del aire favorable para ozono.
4. Se redujo de manera gradual el número de días con una calidad del aire *mala* o *muy mala*.
5. Se rediseñó el sitio electrónico en donde se difunde la información de la calidad del aire, de tal forma que se mejoró el diseño y la navegación.
6. Se mejoraron los informes de calidad del aire y se crearon nuevos materiales de difusión.

Al 31 de diciembre de 2011 se tienen nueve años con 103 días sin contingencia ambiental atmosférica por ozono (la última se registró el 18 de septiembre de 2002) y seis años con 363 días sin contingencia ambiental atmosférica por PM_{10} (la última se registró el 1 de enero de 2005).

Durante el periodo 2006-2011, la Comisión Ambiental Metropolitana realizó ajustes al Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA). Los cambios más importantes tienen que ver con la reducción en los nive-

les de activación de las diferentes fases, tanto para ozono como para PM_{10}.

Cumplimiento de las normas oficiales mexicanas de calidad del aire

La Secretaría de Salud federal cuenta con normas que establecen los valores límite para la protección de la salud pública contra los daños provocados por la presencia de sustancias contaminantes en el aire ambiente, que se conocen como normas oficiales mexicanas para la protección de la salud pública. Dependiendo del contaminante a evaluar, las NOM definen los indicadores, así como el periodo de evaluación. Los valores límite se fijaron en función del riesgo que tiene el contaminante para los grupos más sensibles de la población.

Las NOM son de aplicación federal, y los gobiernos estatales y municipales están obligados a instrumentar las acciones necesarias para su observación y cumplimiento. Los contaminantes descritos en las NOM se conocen como *contaminantes criterio*, e incluyen el ozono, el dióxido de azufre, el monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno, el plomo y las partículas suspendidas. En la Ciudad de México la Secretaría del Medio Ambiente, a través del SIMAT, es la responsable de evaluar el cumplimiento de las NOM, mediante el monitoreo continuo de las concentraciones de los contaminantes criterio. Los resultados se publican anualmente dentro de los informes anuales de calidad del aire, disponibles en <http://goo.gl/E9Zj9>.

La situación de la calidad del aire respecto a la normatividad federal se evalúa de manera anual, y el periodo de evaluación comprende de enero a diciembre. Para determinar el cumplimiento de la norma es necesario contar con la suficiencia mínima de datos para cada una de las estaciones de monitoreo. Cuando una estación de monitoreo no cumple con la norma, se considera que toda la ciudad está en incumplimiento en lo que se refiere a la calidad del aire. La ciudad cumple con la norma cuando en todas las estaciones de monitoreo la concentración del contaminante es menor al límite recomendado.

A continuación se describe el estado del cumplimiento de las normas para cada uno de los contaminantes criterio.

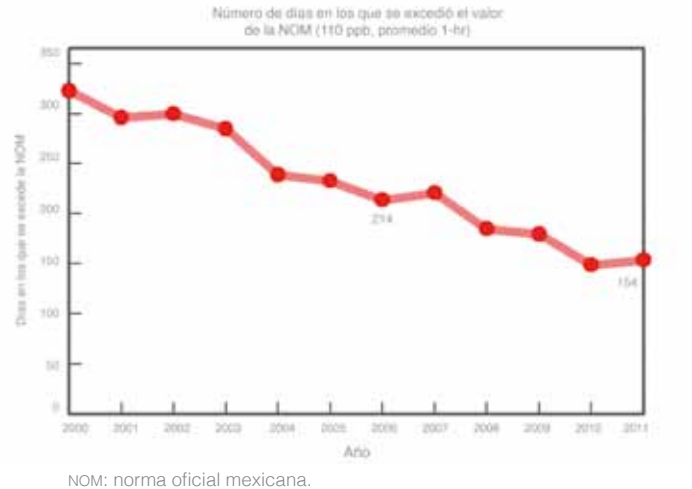
Ozono

Es un componente natural en la atmósfera; su concentración y distribución en la Ciudad de México es producto de la combinación de factores como: condiciones fisiográficas, patrones meteorológicos regionales, las características y la distribución de las fuentes de emisión de precursores y la capacidad oxidativa de la atmósfera. La contaminación por ozono y partículas suspendidas es actualmente el mayor reto para mejorar la calidad del aire en la Ciudad de México. Desde que inició el monitoreo sistemático de la contaminación del aire en 1986 no se ha registrado un solo año que cumpla con los límites establecidos en la NOM.

Durante los primeros años de la década de los noventa del siglo pasado los niveles de ozono alcanzaron los máximos históricos en la Ciudad de México, ya que registraron concentraciones de hasta cuatro veces el valor de la norma (0.110 ppm, promedio horario). La complejidad de los procesos que lo originan hace que la reducción de las concentraciones de este contaminante sea uno de los retos más difíciles para la gestión de la calidad del aire en la ciudad.

Como se puede observar en la gráfica 1, en el año 2000 más de 85% de los días del año excedían el valor para el indi-

Gráfica 1. Disminución en el número de días en los que se excede el valor límite establecido por la NOM para el valor de una hora en la Ciudad de México, durante el periodo 2000 a 2011



NOM: norma oficial mexicana.
Fuente: DGGCA de la SMA.

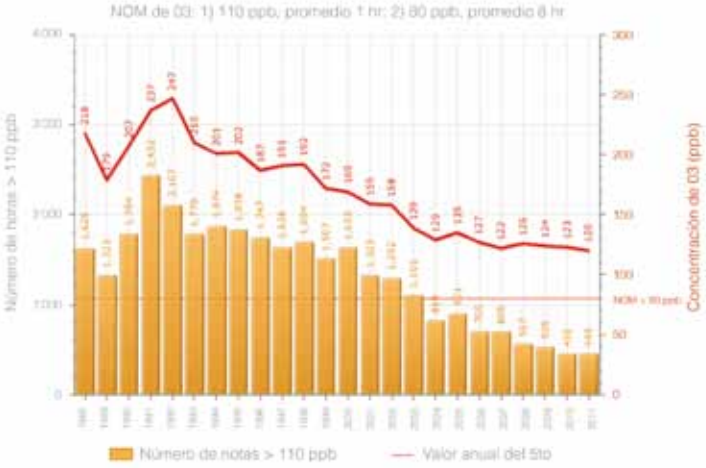
cador horario de la NOM (110 ppb). En 2006, al inicio de esta administración, se registraron 214 días en los que la contaminación por ozono superó el valor de la NOM y en 2011 se redujo esta cifra a 154 días (menos de 50% de los días del año).

La NOM-020-SSA1-1993 cuenta con dos indicadores para evaluar la concentración de ozono en el aire ambiente: el indicador de una hora con una concentración de 110 ppb, que no debe excederse durante el año, y el indicador basado en el promedio de ocho horas, que se evalúa anualmente a través del quinto máximo, el cual debe ser menor o igual a 80 ppb. La Ciudad de México aún no ha logrado el cumplimiento de ambos indicadores, si bien ambos mantienen una tendencia descendente (véase la gráfica 2).

En el periodo 2000 a 2011 mejoró significativamente la calidad del aire en la Ciudad de México; el número de días con una calidad del aire de *buena* a *regular* incrementó, y el número de días con una calidad del aire *mala* a *extremadamente mala* disminuyó significativamente (véase la gráfica 3).

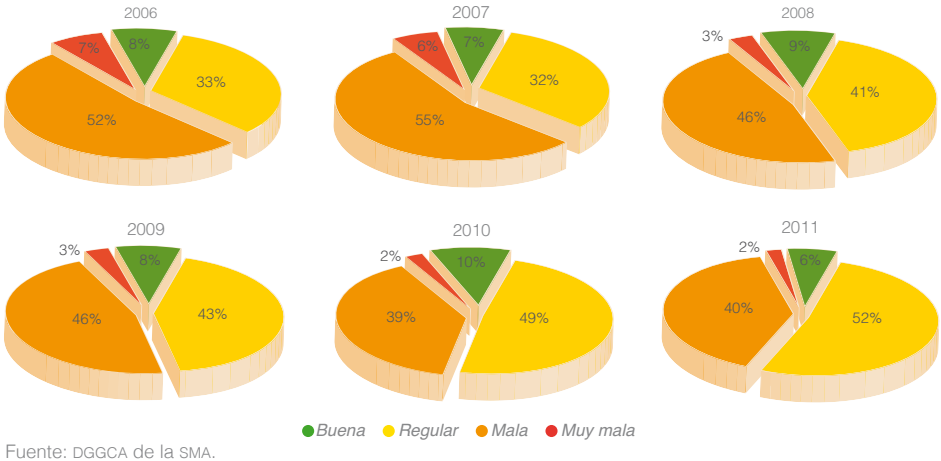
Entre 2006 y 2011 la Ciudad de México pasó de registrar 151 días con una calidad del aire favorable (menor a 100 pun-

Gráfica 2. Evolución de los indicadores de la NOM-020-SSA1-1993 para ozono. Ciudad de México, 1988-2011



Nota: Las barras corresponden al número de horas en las que se excedió el valor del promedio horario de 110 ppb, mientras que la línea corresponde al valor del quinto máximo anual para el promedio móvil de ocho horas.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Gráfica 3. Distribución de los días por categoría de calidad del aire para ozono. Ciudad de México, 2006-2011



Fuente: DGGCA de la SMA.

tos IMECA) a 211 días con esta condición, es decir que hubo un aumento de 60 días. El número de días con una calidad del aire *mala* (101 a 150 puntos) se redujo, en el mismo periodo, de 190 a 146, mientras que los días con calidad del aire *muy mala* (151 a 200 puntos) decrecieron de 24 a 8 días.

Con la disminución en los niveles de ozono se ha observado que las máximas concentraciones se registran entre los meses de marzo y abril, lo que está asociado a las condiciones meteorológicas predominantes en ese periodo. A partir del análisis de los patrones de distribución temporal del contaminante, se ha definido como "temporada de ozono" al periodo comprendido entre la segunda quincena de febrero y la primera quincena de junio (véase la gráfica 4). Durante esta temporada se registra el mayor número de excedencias a la norma y las concentraciones máximas del contaminante. Gran parte de las activaciones de la fase de precontingencia por ozono ocurren en este periodo.

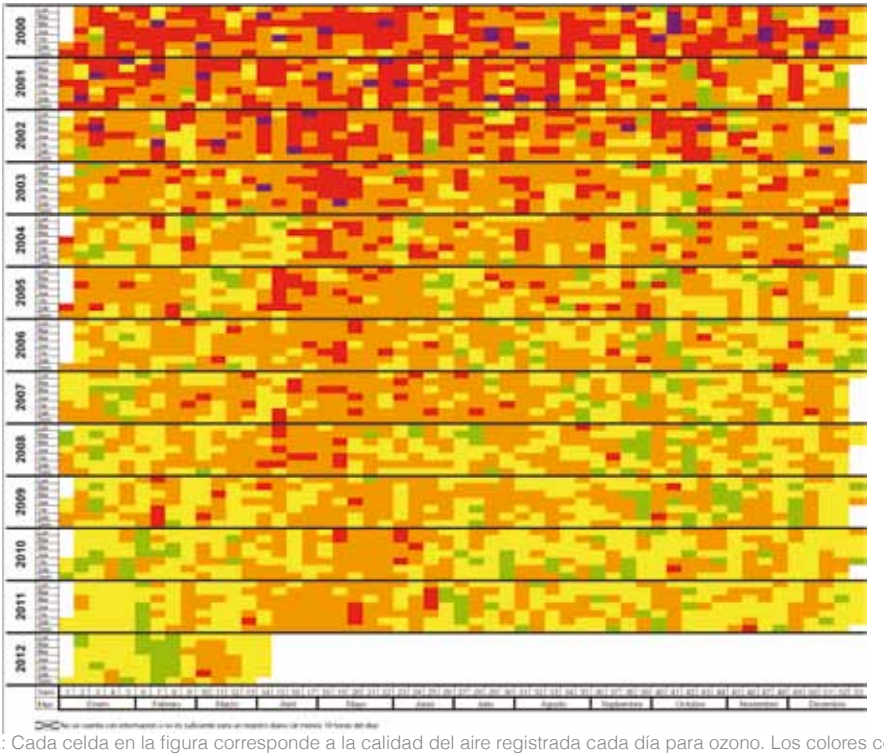
Monóxido de carbono

De acuerdo con el inventario de emisiones, los vehículos son la principal fuente de monóxido de carbono en la zona metropolitana y contribuyen con 99% de las emisiones totales, es decir, con 1 976 799 toneladas al año. El monóxido

de carbono, al igual que los hidrocarburos, tiene una contribución importante en la producción de ozono en un proceso similar al que sufren los hidrocarburos en la atmósfera.

Debido a que el daño que produce este contaminante está asociado con el efecto acumulativo al compuesto en el corto plazo, el valor de la norma refiere una exposición menor a 11 ppm en un promedio de ocho horas. Cuando el monóxido de carbono se acumula en el organismo y llega al torrente sanguíneo a través de la membrana alveolar, reacciona inmediatamente con la hemoglobina de la sangre y la inhabilita para el transporte de oxígeno hacia las células; a medida que el tiempo de exposición se incrementa, también disminuye el número de moléculas de hemoglobina disponibles para el transporte de oxígeno.

Gráfica 4. Mosaico de ozono para el periodo 2000 a marzo de 2012, Ciudad de México



Nota: Cada celda en la figura corresponde a la calidad del aire registrada cada día para ozono. Los colores corresponden a las diferentes categorías del IMECA. El color naranja corresponde a un día con una calidad del aire *mala*; el color rojo, a una calidad del aire *muy mala*, y el morado indica *extremadamente mala*.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Hasta cierto punto, este proceso es reversible una vez que cesa la exposición al contaminante.

A pesar del crecimiento sostenido del parque vehicular en la Ciudad de México y su área metropolitana, las concentraciones de monóxido de carbono mantienen una tendencia descendente en los últimos años. Esto se debe a que los vehículos nuevos que se integran al parque vehicular de la ciudad, cuentan con tecnologías de control cada vez más eficientes y reducen significativamente las emisiones de varios contaminantes primarios, entre los que se encuentran el monóxido de carbono y los hidrocarburos.

El monóxido de carbono fue uno de los primeros contaminantes del aire para los que se logró el cumplimiento de la normativa, y desde 2001 los niveles de este contaminante en la Ciudad de México cumplen con lo establecido en la NOM-021-SSA1-1993.

Durante esta administración, en los primeros años se mantuvo la tendencia descendente del contaminante (véase la gráfica 5); sin embargo, con la construcción de grandes proyectos de infraestructura vial en el Distrito Federal y el Estado de México se modificó de manera significativa el patrón de tránsito vehicular, y en las zonas en construcción

Grafica 5. Evolución del indicador de la NOM-021-SSA1-1993 para monóxido de carbono. Ciudad de México, 1988-2011

Nota: La norma establece una concentración de 11 ppm para el promedio de ocho horas.
Fuente: DGGCA de la SMA.

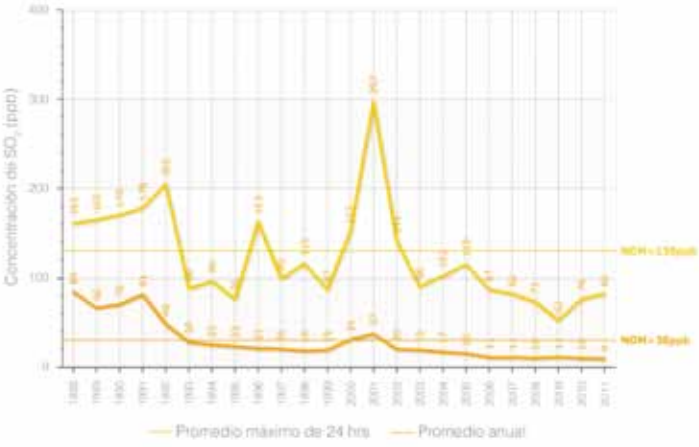
el tránsito se vio severamente afectado. Su impacto en la calidad del aire se refleja como un incremento en la concentración del contaminante en 2008, 2009 y 2010.

Dióxido de azufre

La concentración del dióxido de azufre en la atmósfera depende directamente de la cantidad de azufre presente en los combustibles empleados en la zona metropolitana y el consumo diario. Los principales combustibles utilizados en la Ciudad de México tienen un bajo contenido de azufre, y los que generalmente contienen altas concentraciones, como el combustóleo y el gasóleo, están prohibidos.

Desde 2003 la concentración de este contaminante se mantiene por debajo de lo establecido por la NOM-022-SSA1-1993 (véase la gráfica 6). Durante esta administración la concentración de este contaminante en el aire ambiente se mantuvo en cumplimiento; sin embargo, las estaciones localizadas al noroeste de la zona metropolitana, en particular en los municipios conurbados del Estado de México, reportan con frecuencia emisiones provenientes de la zona industrial del Estado de México y del corre-

Gráfica 6. Evolución de los indicadores de la NOM-023-SSA1-1993 para dióxido de azufre. Ciudad de México, 1988-2011



Nota: La norma propone dos indicadores: 30 ppb para el promedio anual y 130 ppb para el promedio de 24 horas. El cumplimiento de la norma aplica cuando se cubren ambos indicadores.
Fuente: DGGCA de la SMA.

dor industrial Tula-Tepeji. Los registros de altas concentraciones ocurren principalmente en la noche o durante las primeras horas del día y están asociados con días en los que los vientos tienen una dirección predominante de noroeste a sureste y bajo la influencia de inversiones térmicas de superficie. A pesar de que las concentraciones pueden alcanzar valores altos en periodos cortos, esto no ha tenido un impacto en el cumplimiento de la norma.

Dióxido de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno están vinculados principalmente a las emisiones vehiculares; sin embargo, existe una contribución importante de las fuentes de área, las fábricas y la generación de energía en termoeléctricas. Estos compuestos exhiben un patrón característico por su asociación con las emisiones vehiculares, parecido al monóxido de carbono. Su distribución espacial depende del lugar en que se encuentren las vialidades en la ciudad.

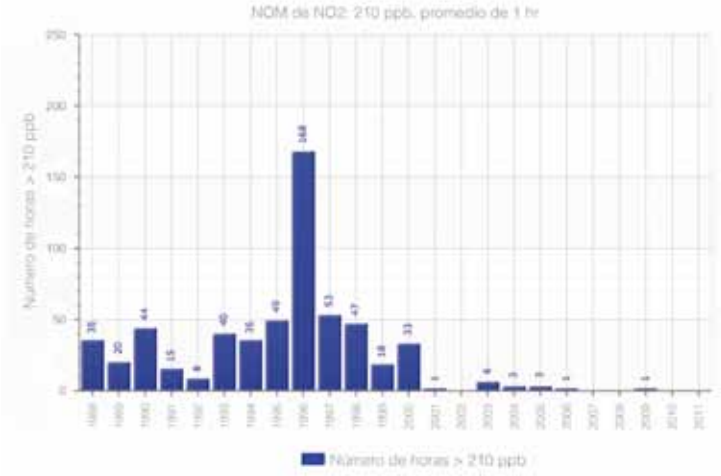
El dióxido de nitrógeno desempeña también un papel importante en la disminución de la visibilidad, ya que en altas concentraciones absorbe una parte importante de la luz visible provocando un color rojizo en la atmósfera.

Desde 2001 se ha observado una disminución importante en la concentración del dióxido de nitrógeno. En el año 2006 se logró que su concentración en el aire ambiente cumpliera con el valor propuesto por la NOM-023-SSA1-1993, de 210 ppb; desde entonces se ha mantenido dentro de los límites propuestos por dicha norma (véase la gráfica 7). A pesar de lo anterior, en los últimos años no se observa una tendencia clara en la concentración del contaminante. La NOM permite la excedencia de este contaminante sólo una hora durante el año calendario.

Partículas suspendidas

Con propósitos operacionales y de vigilancia basados en la evidencia científica sobre los daños a la salud, el monitoreo de la calidad del aire se enfoca en tres fracciones de las partículas suspendidas: las partículas suspendidas totales (PST), las PM_{10} y las $PM_{2.5}$ (véase la figura 3). La

Gráfica 7. Evolución del indicador de la NOM-023-SSA1-1993 para dióxido de nitrógeno. Ciudad de México, 1988-2011



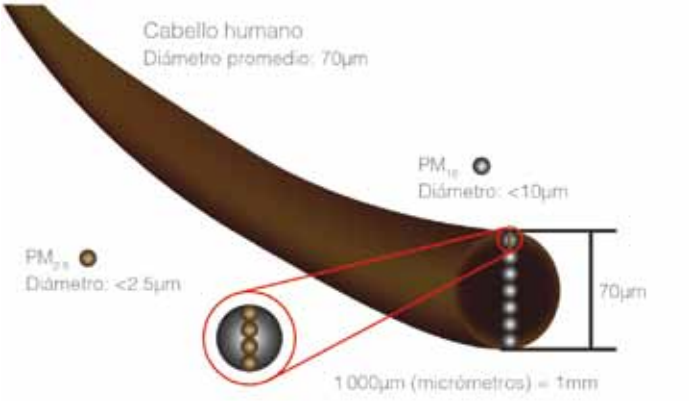
Nota: La norma establece un valor de 210 ppb para el promedio horario. La concentración de este contaminante presenta una tendencia descendente desde 1995; a partir de 2006 se logró el cumplimiento de la norma, y desde entonces los niveles de este contaminante se mantienen en cumplimiento.
Fuente: DGGCA de la SMA.

NOM-025-SSA1-1993 establece diferentes indicadores respecto a las tres fracciones para su evaluación.

Las partículas suspendidas, junto con el ozono, son los contaminantes responsables del deterioro de la calidad del aire en la Ciudad de México. La presencia de estas partículas en la ciudad es evidente por el impacto que tienen en el deterioro de la visibilidad, pues durante episodios de inversión térmica es posible observar una capa definida de contaminación por la presencia de este contaminante.

Las PST incluyen una gran parte de las partículas que se encuentran en suspensión en el aire ambiente y, aun cuando no tienen un límite superior específico, generalmente poseen un diámetro de alrededor de 50 micrómetros. Esta fracción de partículas contiene no sólo las fracciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$; también incluye las partículas del modo grueso con diámetros mayores a 10 micrómetros, las cuales generalmente son retenidas en la región superior del sistema respiratorio y están compuestas por polvo del suelo o por partículas generadas durante procesos mecánicos como la pulverización de roca, el sandblasteado, etc. La NOM-025-SSA1-1993 esta-

Figura 3. Comparación del tamaño de las diferentes fracciones de las partículas suspendidas



Nota: Las partículas suspendidas totales tienen un diámetro similar o menor al diámetro de un cabello humano, mientras que las PM_{10} y $PM_{2.5}$ son considerablemente menores. Entre más pequeña sea la partícula, más profundamente penetrará dentro del sistema respiratorio.
PM_{10}: partículas menores a 10 micrómetros; $PM_{2.5}$: partículas menores a 2.5 micrómetros.
Fuente: DGGCA de la SMA.

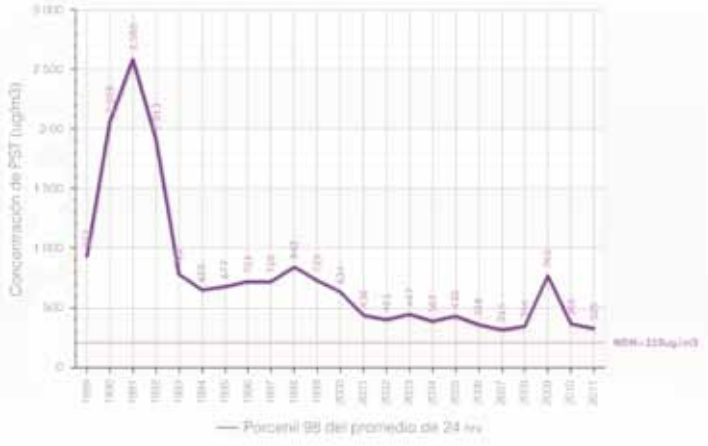
blece un valor máximo de 210 de microgramos por metro cúbico ($\mu g/m^3$) para la concentración promedio de 24 horas.

A pesar de que el contaminante presenta una tendencia descendente en las últimas décadas (véase la gráfica 8), su concentración continúa excediendo el valor recomendado por la NOM, y las estaciones localizadas en la zona conurbada del Estado de México son las que generalmente reportan las mayores concentraciones. En el periodo comprendido entre 2006 y 2007 se mantuvo la tendencia a la baja en la concentración del contaminante; sin embargo, en 2009 un evento asociado con los restos que dejó una inundación en el municipio de Ecatepec de Morelos, provocó un incremento considerable en las concentraciones máximas de partículas registradas durante ese año.

En el caso de las PM_{10}, la concentración del contaminante ha disminuido significativamente en los últimos años respecto a los niveles que se registraron durante la década de 1990; sin embargo, la Ciudad de México aún está lejos de garantizar su cumplimiento (véase la gráfica 9). Este contaminante, junto con la fracción de $PM_{2.5}$, es el único que no ha reportado una modificación sostenida en su tendencia.

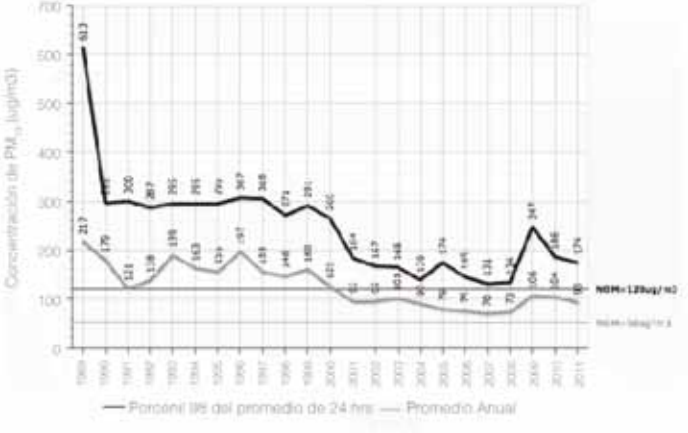
El impacto de las grandes obras realizadas en la ciudad provocó un incremento importante en todos sus indicadores. El año 2011 terminó con concentraciones similares a las registradas hasta antes de 2005.

Gráfica 8. Evolución del indicador de la NOM-025-SSA1-1993 para partículas suspendidas totales. Ciudad de México, 1989-2011



Nota: La norma establece un valor de 210 microgramos por metro cúbico para el promedio horario.
NOM: norma oficial mexicana; PST: partículas suspendidas totales.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Gráfica 9. Evolución de los indicadores de la NOM-025-SSA1-1993 para PM_{10}. Ciudad de México, 1989-2011



Nota: La norma establece un valor de 120 microgramos por metro cúbico para el promedio de 24 horas y de 50 microgramos por metro cúbico para el promedio anual.
PM_{10}: partículas menores a 10 micrómetros.
Fuente: DGGCA de la SMA.

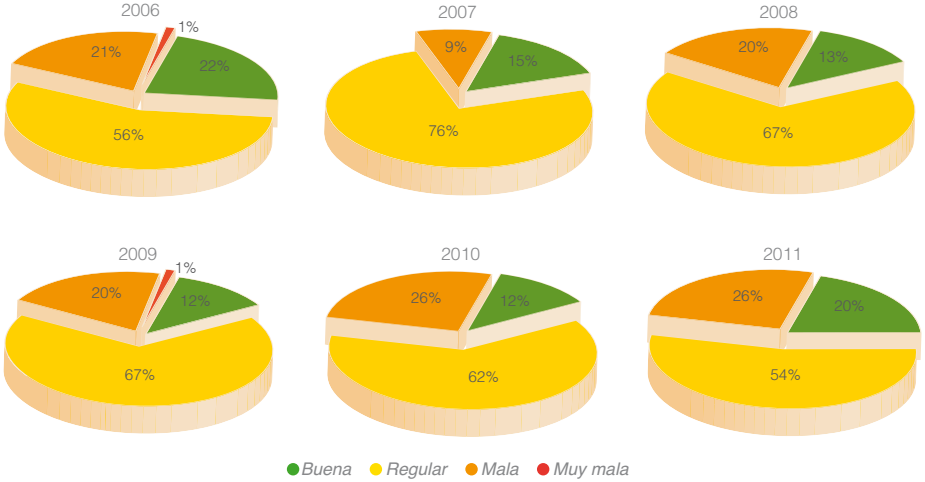
En el periodo 2008 a 2011 se observa una tendencia de incremento en los niveles de PM_{10} en el aire ambiente.

La NOM-025-SSA1-1993 establece dos indicadores para PM_{10}: el primero, de 120 µg/m^3 para el percentil 98 de la concentración promedio de 24 horas, y el segundo, de 50 µg/m^3 para la concentración promedio anual. Para el año 2011, ambos indicadores permanecían aún por encima de las recomendaciones de la norma.

Las PM_{10} desempeñan un papel importante en el deterioro de la calidad del aire: en 2006 eran responsables de 22% de los días con una calidad del aire cuyo índice resultó superior a los 100 puntos IMECA (120 µg/m^3, promedio de 24 horas). Debido a la gran variedad de fuentes de emisión su control es difícil. La concentración en el aire ambiente es muy sensible a los cambios en las condiciones meteorológicas, a los patrones de tránsito vehicular, a la calidad de los combustibles y a la distribución de sus precursores y fuentes. Al concluir 2011, el número de días por encima de los 100 puntos IMECA aumentó a 26% (véase la gráfica 10).

La NOM-025-SSA1-1993 define dos indicadores para la fracción de $PM_{2.5}$: uno para el promedio de 24 horas y otro para el promedio anual. Para el promedio de 24 ho-

Gráfica 10. Distribución de los días por categoría de calidad del aire para PM_{10}. Ciudad de México, 2006-2011



PM_{10}: partículas menores a 10 micrómetros.
Fuente: DGGCA de la SMA.

ras establece un valor de 65 μg/m^3, que se evalúa como el percentil 98 para el año calendario, mientras que para el indicador anual propone un valor de 15 μg/m^3.

La concentración de $PM_{2.5}$ empezó a medirse de manera rutinaria en agosto de 2003, y a partir de 2004 se contó con la información suficiente para la evaluación del cumplimiento de las NOM. De acuerdo con los resultados de los últimos años, desde 2004 el valor del indicador para 24 horas se mantiene dentro de los valores recomendados por la NOM; sin embargo, el promedio anual excede considerablemente el valor de dicha norma. En términos de tendencia, no existe un patrón definido en el comportamiento del contaminante en los últimos años (véase la gráfica 11).

Las $PM_{2.5}$ pueden ser de origen primario o secundario. Las de origen primario son emitidas directamente por las fuentes, tanto naturales como antropogénicas; las de origen secundario se forman en la atmósfera de las reacciones químicas y la interacción física entre los gases contaminantes y algunos componentes naturales de la atmósfera. Estas partículas se pueden generar también durante procesos fotoquímicos, por la coagulación de gases y vapores de los escapes y chimeneas, y de la oxidación de óxidos de azufre y de nitrógeno. Por su naturaleza pueden ser transportadas largas distancias y no se descarta la contribución de partículas generadas en otras ciudades o zonas industriales de la región centro del país, además de las generadas por los incendios forestales y el esmog volcánico. La complejidad de su origen dificulta la implementación de medidas efectivas para su control.

Se logra el cumplimiento de la NOM-025-SSA1-1993 cuando todos sus indicadores se encuentran por debajo de las concentraciones recomendadas. De acuerdo con los registros históricos no se ha logrado aún el cumplimiento de esta normativa. El impacto de las grandes obras de infraestructura vial desarrollados en la ciudad y su área metropolitana entre 2009 y 2011 tuvieron un claro impacto en la concentración de las diferentes fracciones de este contaminante, principalmente por el incremento en las emisiones vehiculares.

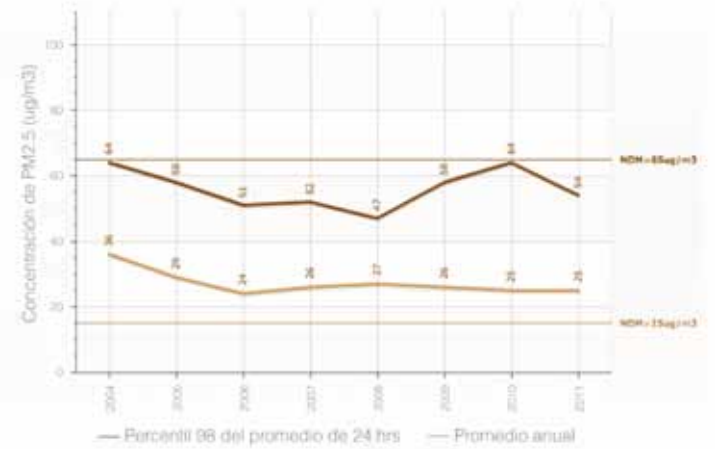
En términos del IMECA, el valor propuesto por la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006 es más estricto que el valor de la NOM-025-SSA1-1993.

La concentración asignada al valor de 100 puntos es de 40.4 μg/m^3, mientras que la NOM establece un valor de 65 μg/m^3. En 2006 se registraba 33% de los días del año con una calidad del aire *mala* y 9% de días con una calidad del aire *muy mala* (mayor a 150 puntos). Los cambios en la concentración de este contaminante no han sido significativos y las variaciones durante la presente administración fueron mínimos. En 2011 se registró 34% de días con *mala* calidad del aire y 6% de días con calidad del aire *muy mala* (véase la gráfica 12). Es necesario generar información sobre los niveles de precursores de $PM_{2.5}$ y proponer políticas para la reducción de este contaminante; sin embargo, de instrumentarse las acciones adecuadas los resultados serán positivos en el mediano y largo plazo.

Plomo

Hasta 1996, en la Ciudad de México se empleó el tetraetilo de plomo en las gasolinas como antidetonante y era la principal fuente de este contaminante, pero a partir de 1997 toda la gasolina que se distribuye en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México no contiene plomo. La tendencia de este contaminante indica una disminu-

Gráfica 11. Evolución de los indicadores de la NOM-025-SSA1-1993 para PM2.5. Ciudad de México,2004-2011



Nota: La norma establece un valor de 65 microgramos por metro cúbico para el promedio de 24 horas y de 15 microgramos por metro cúbico para el promedio anual.
$PM_{2.5}$: partículas menores a 2.5 micrómetros.
Fuente: DGGCA de la SMA.

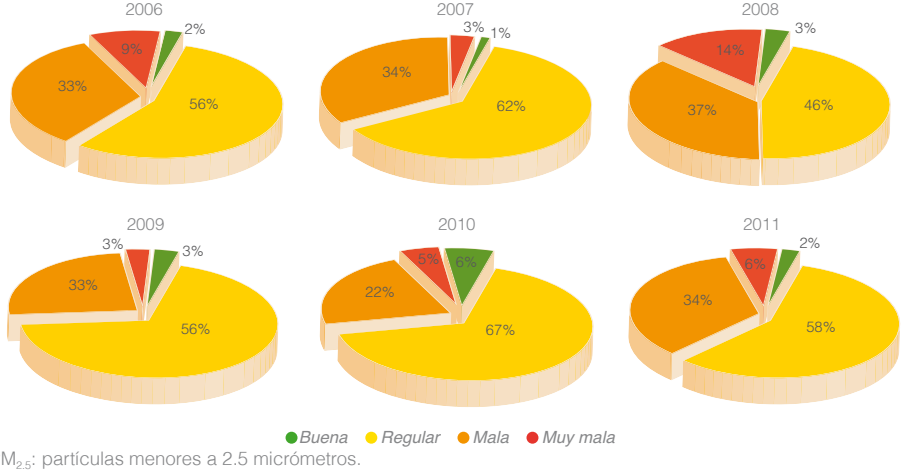
ción gradual en la concentración. Con excepción de las zonas industriales, en el resto de la ciudad la presencia del plomo está asociada a la resuspensión del polvo del suelo. Desde 1993 las concentraciones de este contaminante se encuentran dentro de las recomendaciones de la norma (véase la gráfica 13).

Eventos de activación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas

Entre 2006 y 2011, los umbrales del PCAA se han modificado con el propósito de hacer cada vez más estrictos los niveles de activación de cada una de las fases y de esa manera prevenir un episodio de emergencia ambiental que arriesgue la salud pública de la población en general sin comprometer la viabilidad de la urbe. El 31 de agosto de 2006 se redujeron los valores del PCAA, pues éstos no habían sido modificados desde el 23 de diciembre de 1999. Con los nuevos valores, la activación de la fase de precontingencia pasó de 199 puntos IMECA a 170 puntos, mientras que la fase I se redujo de 240 a 200, y la fase II, de 300 a 250 puntos.

El 30 de junio de 2008 se publicó el decreto por el que se expide el Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas en el Distrito Federal, en donde se establece que,

Gráfica 12. Distribución de los días por categoría de calidad del aire para $PM_{2.5}$. Ciudad de México, 2006-2011



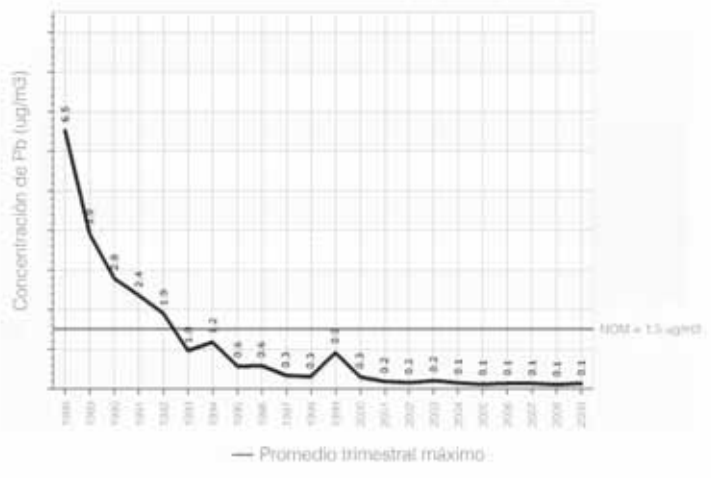
$PM_{2.5}$: partículas menores a 2.5 micrómetros.
Fuente: DGGCA de la SMA.

a partir de julio de 2008 y hasta julio de 2011, los valores de activación del PCAA se disminuirían gradualmente cada año.

En julio de 2011 los valores de activación de la fase de precontingencia quedaron en 150 puntos en la escala del IMECA, para ozono y PM_{10}. La fase I quedó en 180 para ozono y 175 puntos para PM_{10}. La fase II quedó en 230 puntos para ozono y PM_{10}.

La disminución en los valores de activación del PCAA asegura que se mantenga una tendencia descendente en la concentración y obliga a las autoridades ambientales a reforzar cada vez más sus programas de control y vigilancia en el área metropolitana; sin embargo, al establecer valores cada vez más estrictos, existe el riesgo de aumentar el número de activaciones del PCAA. Durante el periodo comprendido entre diciembre de 2006 y marzo de 2012, el PCAA se activó en 16 ocasiones (14 por ozono y 2 por PM_{10}), todas por la fase de precontingencia, siendo 2011 el año en el que se registró la mayor cantidad de precontingencias con un total de cinco: cuatro por ozono y una por PM_{10}. En el cuadro 2 se presentan los eventos de precontingencia ocurridos entre diciembre de 2006 y diciembre de 2011.

Gráfica 13. Evolución del indicador de la NOM-026-SSA1-1993 para plomo en partículas suspendidas totales. Ciudad de México, 1988-2009



Nota: La eliminación del tetraetilo de plomo tuvo un impacto importante en los niveles de plomo asociado a las partículas en el aire ambiente.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Cuadro 2. Histórico de las activaciones del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México, 2006-2011

Fecha de activación	Día de la semana	Contaminante	Estación, entidad federativa	Nivel alcanzado	Fase activada	Nivel de activación de la fase
14-abr-2007	sábado	Ozono	Pedregal, Distrito Federal	185	Precontingencia	170
23-jun-2007	sábado	Ozono	Pedregal, Distrito Federal	172	Precontingencia	170
27-jul-2007	viernes	Ozono	Tlalpan, Distrito Federal	184	Precontingencia	170
8-abr-2008	martes	Ozono	FES Acatlán, Estado de México	172	Precontingencia	170
10-may-2008	sábado	Ozono	Coyoacán, Distrito Federal	172	Precontingencia	170
13-feb-2009	viernes	Ozono	Pedregal, Distrito Federal	180	Precontingencia	165
3-nov-2009	martes	Ozono	Xalostoc, Estado de México	164	Precontingencia	160
3-may-2010	lunes	Ozono	FES Acatlán, Estado de México	168	Precontingencia	160
31-may-2010	lunes	Ozono	FES Acatlán, Estado de México	172	Precontingencia	160
4-jun-2010	viernes	Ozono	UAM Iztapalapa, Distrito Federal	165	Precontingencia	160
11-ene-2011	martes	PM_{10}	Xalostoc, Estado de México	156	Precontingencia	155
26-mar-2011	sábado	Ozono	Coyoacán, Distrito Federal	160	Precontingencia	155
12-may-2011	jueves	Ozono	Coyoacán, Distrito Federal Pedregal, Distrito Federal	161	Precontingencia	155
16-jun-2011	jueves	Ozono	Coyoacán, Distrito Federal	161	Precontingencia	155
13-nov-2011	domingo	Ozono	FES Acatlán, Estado de México Cuajimalpa, Distrito Federal	156	Precontingencia	150
2-mar-2012	viernes	Ozono	FES Acatlán, Estado de México	153	Precontingencia	150

Detección de eventos extraordinarios de contaminación

El SIMAT, como sistema de vigilancia, monitorea de manera permanente los niveles de los contaminantes del aire para detectar de forma inmediata incrementos en las concentraciones de los contaminantes que pudieran tener un impacto en la calidad del aire, indicar la liberación de algún compuesto tóxico o tener una incidencia en el cumplimiento de la normativa.

Tabla 1. Número de eventos extraordinarios registrados para cada contaminante en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México entre 2006-2011

	NO_2		SO_2		PM_{10}	
Año	**D.F.**	**Edomex**	**D.F.**	**Edomex**	**D.F.**	**Edomex**
2006	0	2	3	16	48	58
2007	0	0	1	15	2	14
2008	0	0	2	10	22	44
2009	1	0	0	6	18	52
2010	0	0	1	10	15	56
2011	0	1	1	13	21	61

Nota: Los eventos están separados por año y entidad federativa.

NO_2: dióxido de nitrógeno; SO_2: dióxido de azufre; PM_{10}: partículas menores a 10 micrómetros.

Fuente: DGGCA de la SMA.

Cuando las PM_{10}, el dióxido de azufre o el dióxido de nitrógeno alcanza concentraciones iguales o mayores a 300 µg/m^3, 200 y 200 ppb, respectivamente, se emite una alerta que es enviada por correo electrónico a diferentes dependencias con el propósito de que los departamentos responsables de la vigilancia ambiental identifiquen la fuente de emisión, que pueden ser fijas como las termoeléctricas y las fábricas, tolvaneras, fugas o accidentes industriales, etc. Las áreas de salud deben estar alerta por cualquier posible riesgo a la salud derivado de la exposición a altos niveles.

Los registros indican que la mayor parte de los eventos se presentan en los municipios conurbados del Estado de México, tanto para dióxido de azufre como para PM_{10}. La mayoría de los eventos de dióxido de azufre están asociados con vientos que provienen del noroeste (véase la tabla 1).

Depósito atmosférico en la Ciudad de México

Con el propósito de conocer la distribución y el comportamiento de la lluvia ácida en la Ciudad de México, el SIMAT tiene instalados 16 colectores semiautomáticos de depósito atmosférico. Las muestras se colectan semanalmente y son analizadas para determinar su composición iónica, que es un indicador del intercambio gaseoso, y los niveles de conductividad y acidez. Los resultados indican que la Ciudad de México registra cada temporada de lluvia altos niveles de acidez, principalmente en la zona sur y poniente en donde se encuentra el suelo de conservación (véase la figura 4).

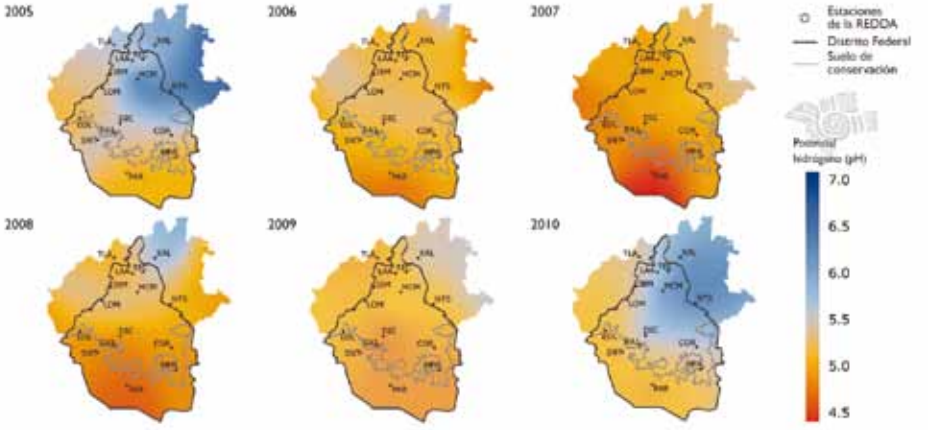
Durante el periodo de 2006 a 2011 no se registraron cambios significativos en la distribución de la lluvia ácida. Hasta antes de 2006, la mayor cantidad de episodios se registraban al sur y poniente del Distrito Federal; sin embargo, a partir de 2006 el área afectada por la lluvia ácida se extendió a la mayor parte del Distrito Federal e incluso se obtuvieron registros en algunos de los municipios del Estado de México en donde se realiza el monitoreo. En 2010 se registró una disminución significativa en los niveles de acidez.

Radiación solar ultravioleta

La REDMET cuenta actualmente con ocho estaciones en donde se realiza el monitoreo de la radiación solar ultravioleta; la información obtenida se emplea para generar el índice correspondiente (IUV). En 2011 el SIMAT decidió aplicar los criterios de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para reportar dicho índice (véase la figura 5).

La posición geográfica y altitud de la Ciudad de México la hacen susceptible de recibir una cantidad importante de radiación solar durante la mayor parte del año. La radiación ultravioleta registra con frecuencia valores en el IUV superiores a 6, que corresponden a una categoría denominada como *mala*, y que requiere protección adicional. La mayor intensidad en la radiación se presenta

Figura 4. DISTRIBUCIÓN DE LA ACIDEZ EN EL AGUA DE LLUVIA. CIUDAD DE MÉXICO, 2005-2010



REDDA: Red de Depósito Atmosférico.
Fuente: DGGCA de la SMA.

durante los meses de marzo a junio, cuando los días son más largos y las temperaturas más altas. En estos meses es frecuente que la intensidad alcance valores en el índice de 11 en la escala de la OMS, que corresponde a una intensidad *extremadamente alta*. En los últimos años, el valor de la intensidad ha alcanzado valores máximos de hasta 14, en una escala de 1 a 15.

Las horas en las que se registran los valores máximos ocurren cuando el sol se encuentra en el punto más alto del cielo, entre las 13:00 y las 14:00 horas; sin embargo, a partir de las 11:00, la radiación puede alcanzar intensidades de riesgo, principalmente para las personas de piel clara. La contaminación tiene un efecto de absorción de la radiación ultravioleta que provoca que en días muy contaminados los niveles de radiación se reduzcan.

La radiación solar ultravioleta tiene un patrón de distribución estacional a lo largo del año, proporcional a la duración del día. Existe poca variación a lo largo de los años y su comportamiento depende, principalmente, de la cantidad de contaminantes en el aire y de la salud de la capa de ozono estratosférico.

Figura 5. Categorías del IUV definidas por la Organización Mundial de la Salud y adoptadas por el SIMAT a partir de 2011

IUV: índice de radiación ultravioleta; SIMAT: Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México.
Fuente: Organización Mundial de la Salud, *Índice UV solar mundial. Guía práctica*, Recomendación conjunta de: Organización Mundial de la Salud s.l., Organización Meteorológica Mundial s.l., Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente s.l., Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante, 2003, p. 8.

Reforzamiento y modernización del Sistema de Monitoreo Atmosférico

Durante esta administración se invirtieron recursos por cerca de 78 millones de pesos para modernizar y reforzar el monitoreo en la Ciudad de México. Ésta es la inversión más grande que se ha realizado en la historia del monitoreo de la calidad del aire. Los recursos fueron obtenidos del Fideicomiso Ambiental 1490 y del Ramo 16, administrado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). En la tabla 2 se presenta un resumen de los diferentes proyectos financiados durante esta administración.

Diseño e instalación de una red de monitoreo para evaluar hidrocarburos tóxicos y reactivos en el aire ambiente de la ZMVM

El 25 de noviembre de 2008, el Fideicomiso Ambiental 1490 autorizó a la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal el proyecto "Diseño e instalación de una red de monitoreo para evaluar la distribución, composición y fuentes de hidrocarburos tóxicos y reactivos en el aire ambiente de la Zona Metropolitana del Valle de México". El objetivo de este proyecto fue adquirir la infraestructura necesaria para la instalación de una red capaz de generar información confiable y continua sobre la concentración y el comportamiento de algunos compuestos orgánicos tóxicos y de los principales compuestos precursores del ozono. El proyecto se ejecutó en un plazo de 16 meses contados a partir de diciembre de 2008.

Tabla 2. Descripción de los proyectos autorizados entre 2006 y 2011. Origen de los recursos y monto

Nombre del proyecto	Fuente de recursos	Monto autorizado (pesos)	Monto ejercido (pesos)
Diseño e instalación de una red de monitoreo para evaluar la distribución, composición y fuentes de hidrocarburos tóxicos y reactivos en el aire ambiente de la Zona Metropolitana del Valle de México. **Autorizado**: 25 de noviembre de 2008	FIDAM 1490	14 000 000.00	13 999 529.34
Rediseño del Sistema de Monitoreo Atmosférico. **Autorizado**: abril de 2010	Ramo 16	48 000 000.00	47 789 927.55
El impacto del tránsito vehicular en el ruido ambiental y la calidad del aire. **Autorizado**: 12 de enero de 2011	Ramo 16	26 000 000.00	25 910 404.93

Fuente: DGGCA de la SMA.

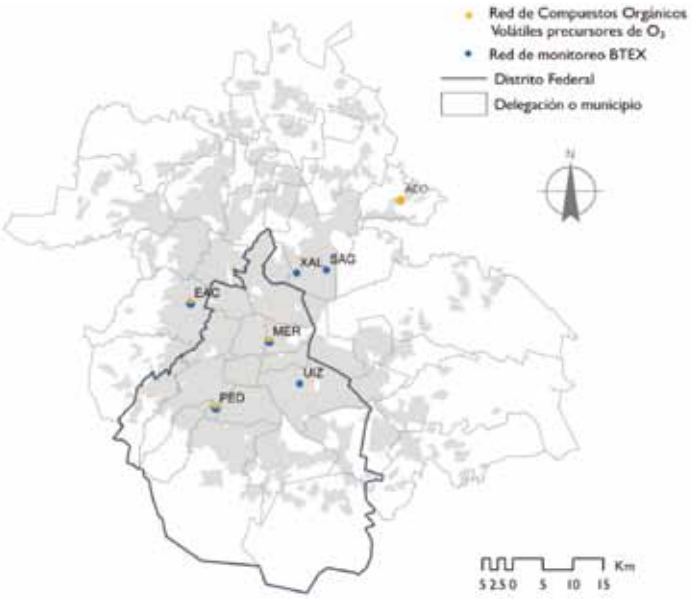
El diseño de la red de hidrocarburos se orientó principalmente a generar información para entender el problema del ozono en la Ciudad de México. El criterio para el diseño se basó en la selección de un arreglo de sitios localizados estratégicamente para evaluar el impacto de las emisiones de precursores de ozono de un área o región, referido a la dirección predominante del viento asociado a los eventos con elevadas concentraciones de ozono. En términos generales se espera que la red sea capaz de: proveer de información suficiente para que en el corto y mediano plazo sea posible desarrollar estrategias de control de ozono costo-efectivas; generar datos para la modelación fotoquímica; permitir la reconciliación o validación de los inventarios de emisiones; permitir la caracterización del ozono, los precursores de ozono y las tendencias meteorológicas, además de proveer de información adecuada para determinar la exposición de la población a los compuestos de toxicidad importante.

Los objetivos del monitoreo para precursores del ozono y compuestos tóxicos son:

1. Analizar la tendencia en la reducción de las emisiones de las especies reactivas involucradas en la producción de ozono, a través del monitoreo y los inventarios de emisiones.
2. Proveer de información adecuada para el desarrollo, la evaluación y la redefinición de las estrategias de control para el ozono.
3. Proveer de insumos a los modelos de pronóstico de los contaminantes fotoquímicos.
4. Generar datos confiables para evaluar y mejorar la predicción de los modelos fotoquímicos.
5. Analizar la tendencia de la calidad del aire y caracterizar la naturaleza y el alcance del problema del ozono.
6. Generar datos sobre la concentración de los compuestos orgánicos tóxicos presentes, para informar sobre los posibles riesgos a la salud.

En la selección de los sitios para la evaluación de los precursores del ozono se aplicaron las recomendaciones de la EPA en relación con las estaciones de monitoreo para la evaluación

Figura 6. Distribución de las estaciones que integran la red para el monitoreo de BTEX y para la evaluación fotoquímica de ozono



Nota: para conocer el significado de las siglas, véase el glosario anexo.
Fuente: DGGCA de la SMA.

fotoquímica de ozono (PAMS, por sus siglas en inglés). La red quedó integrada por las estaciones ACO, MER, PED y FES Acatlán (FAC). El monitoreo en estas estaciones está orientado a la caracterización del problema de ozono de la ciudad; por eso, dependiendo del tipo de sitio, cada uno de ellos se equipó con analizadores de ozono, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y algunos con analizadores de compuestos orgánicos volátiles C2 a C12. En un futuro próximo el monitoreo se complementará con óxidos de nitrógeno reactivos (NO_Y). La configuración inicial no es estática y está sujeta a la evaluación de los primeros resultados del monitoreo.

Por otra parte, la red para el monitoreo de compuestos orgánicos tóxicos incluye las estaciones SAG, MER, UIZ, PED y FAC. En un futuro inmediato se integrará la estación Xalostoc (XAL) a esta red (véase la figura 6). La red emplea analizadores automáticos basados en cromatografía de gases con detección de fotoionización para benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX), y un detector com-

Archivo DMA

Laboratorio de Análisis Ambiental de la Subdirección de Monitoreo.

binado de fotoionización e ionización a la flama para los compuestos orgánicos precursores de ozono.

Como parte del proyecto se adquirió también equipo de monitoreo para las fracciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$; consiste en un sistema para reducir la interferencia que provoca el material orgánico e inorgánico semivolátil presente en las partículas suspendidas, lo cual permitirá realizar una medición más exacta y precisa de ambos contaminantes. Además, estos equipos tienen capacidad para analizar la fracción de $PM_{10\text{-}2.5}$ (fracción gruesa o *coarse*), asociada con efectos negativos en la salud humana. Adicionalmente, se reforzó la infraestructura analítica del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Dirección de Monitoreo Atmosférico con la adquisición de un cromatógrafo para el análisis de gasolinas y un cromatógrafo acoplado a un espectrómetro de masas para el análisis de compuestos orgánicos volátiles.

Se adquirió, además, un nuevo desarrollo para la recopilación de datos, el cual reemplazó el antiguo sistema analógico que había operado en los últimos 15 años. El sistema de adquisición anterior se encontraba limitado en el número de canales, pues utilizaba tecnología obsoleta y tenía una capacidad de posprocesamiento limitada.

Rediseño del Sistema de Monitoreo Atmosférico

Desde 2007 la Dirección de Monitoreo Atmosférico inició un proceso con el objetivo de evaluar la capacidad del

Sistema de Monitoreo Atmosférico para generar información confiable y representativa. Como parte de este trabajo se analizó la situación de cada estación respecto a sus objetivos de monitoreo. En el caso de la RAMA, el análisis se realizó como parámetro de medición. Algunos componentes de este ejercicio se plantearon como un proyecto para el cual se solicitaron recursos al Ramo 16, mismo que fue autorizado durante el segundo trimestre de 2010 por un monto de 48 millones de pesos, los cuales se destinaron principalmente a la adquisición de equipo para la modernización y el reforzamiento del monitoreo.

Los resultados de la evaluación de la RAMA permitieron identificar estaciones redundantes, poco representativas o susceptibles para reforzamiento. Se identificaron 10 estaciones que no eran capaces de cumplir con los objetivos

Archivo DMA

Detalle de la construcción de la base para la instalación de la Estación de Monitoreo de Calidad del Aire Santa Fe (SFE) en el terreno del antiguo tiradero de basura. La estación se colocó dentro del relleno sanitario con una base de acero sobre una plancha de concreto.

Archivo DMA

Montaje de la Estación de Monitoreo de Calidad del Aire Cuautitlán (CUT) en Xochitla Parque Ecológico, en el Estado de México.

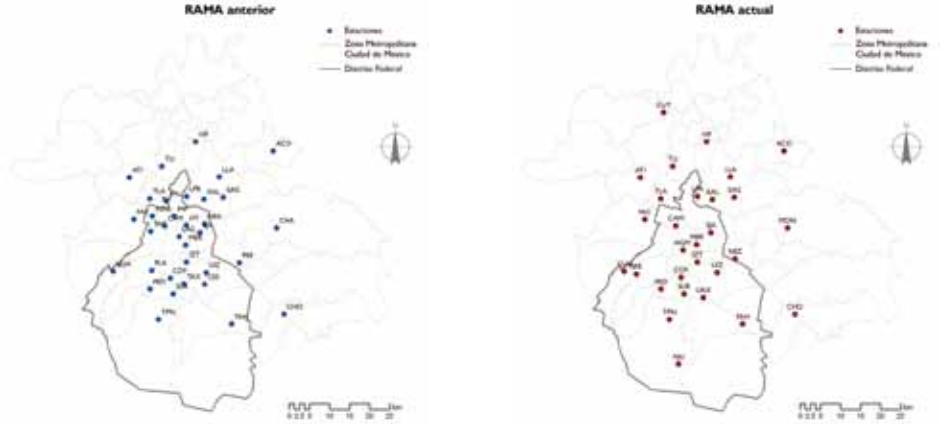
del monitoreo y se concluyó que era posible garantizar la misma cobertura con sólo 24 estaciones. A partir de 2010 las estaciones que suspendieron operaciones fueron: AZC, IMP, TAC, VAL, ARA, LVI, LAG, PLA, CES y TAX. La estación Perla (PER) fue reubicada dentro del municipio de Nezahualcóyotl y cambió su nombre a NEZ.

Un total de 20 estaciones se reforzaron con la instalación de equipo adicional para el monitoreo de los contaminantes criterio. La nueva configuración de la Red y la distribución de los equipos de monitoreo se presentan en la figura 7 y en el cuadro 3.

La ampliación de la red de monitoreo hacia zonas que se encontraban fuera de la cobertura por el crecimiento continuo de la ciudad inició en 2007 con la puesta en operación de tres nuevas estaciones de monitoreo: IZT, CHO y ACO. En 2011 se instalaron cinco nuevas estaciones: SFE, HGM, UAX, AJU y CUT; estas últimas estaciones iniciaron operaciones oficialmente en febrero de 2012.

Con los recursos del Ramo 16 se adquirió también equipo para reforzar el monitoreo de las variables meteorológicas de superficie y la radiación solar ultravioleta A y B, así como para la calibración de los analizadores de gases criterio y para la calibración de flujos.

Figura 7. Distribución de las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México



Nota: La imagen de la izquierda corresponde a la distribución antes del rediseño; la de la derecha corresponde a la distribución actual.
Nota: para conocer el significado de las siglas, véase el glosario anexo.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Cuadro 3. Distribución actual de los analizadores en las estaciones de calidad del aire, después de la etapa de rediseño del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México

Zona	Sitio	SO_2	O_3	CO	NO_X	PM_{10}	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$	Met	Radiación Solar UV
Noroeste	EAC	■	■	■	■	■			■	
	TLA	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	TLI	■	■	■	■	■	■			
	ATI	■			■					
	CAM	■	■	■	■	■	■	■		
	CUT	■			■				■	
Noreste	LLA	■	■	■	■					
	LPR	■	■	■	■					
	SAG	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	XAL	■	■	■	■	■	■	■	■	
	VIF	■	■	■	■	■			■	
	MON	■	■	■	■				■	■
	SJA	■	■	■	■		■			
	NEZ	■	■	■	■		■		■	
	ACO	■	■	■	■	■			■	
Centro	MER	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	IZT	■	■	■	■	■				
	HGM	■	■	■	■	■	■	■		
Suroeste	SUR	■	■	■	■	■			■	
	PED	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	CUA	■	■	■	■				■	■
	TPN	■	■	■	■				■	
	COY		■		■		■			
	AJU		■				■			
Sureste	UIZ	■	■	■	■	■	■	■	■	
	TAH	■	■	■	■	■			■	
	CHO	■	■	■	■				■	
	SFE	■	■	■	■	■	■	■	■	
	UAX	■	■	■	■	■	■	■	■	

Nota: para conocer el significado de las siglas, véase el glosario anexo.

Fuente: DGGCA de la SMA.

Con el propósito de generar información en el corto plazo sobre las partículas suspendidas se compró equipamiento para el monitoreo de la fracción gruesa de las partículas ($PM_{10-2.5}$); se adquirió un analizador automático para el

análisis continuo de la composición iónica de los aerosoles, un analizador de partículas en el modo ultrafino (menores a 1 micrómetro), además de equipos de referencia para el muestreo de $PM_{2.5}$.

Además de reforzar el monitoreo de los contaminantes criterio, se adquirió equipo para la medición de nuevos parámetros como los óxidos de nitrógeno reactivos y el carbono negro. Asimismo, se actualizó un analizador de espectroscopía diferencial óptica que se encontraba en desuso por falta de refacciones. También se obtuvo equipo para reforzar la adquisición de datos.

Se incluyó la compra de un radiómetro para medir de manera continua el perfil de temperatura y humedad relativa, y un radar perfilador para calcular el perfil vertical del viento en la capa límite. El radiómetro evalúa el perfil termodinámico en la región baja de la tropósfera con un sistema multicanal que opera entre 22 y 30 GHz para el vapor de agua, y entre 51 a 59 GHz para el oxígeno.

Archivo DMA

Con los recursos del proyecto del Ramo 16 2011, se reforzó también el monitoreo de la radiación ultravioleta.

Archivo DMA

Analizador de partículas ultrafinas (20-1000 nm) en la estación Xalostoc en Ecatepec de Morelos. Mide la concentración del número de partículas en seis intervalos de tamaño. Las partículas ultrafinas menores a 100 nm se consideran como nanopartículas.

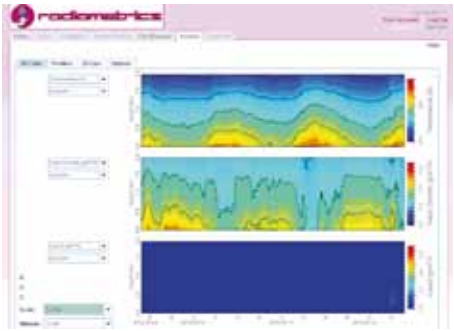
Analizador de carbono negro por el método de extinciometría fotoacústica.

El radar utiliza tecnología basada en el radar Doppler y opera en la frecuencia de los 915 GHz. La información que proporcionará la combinación de ambos equipos permitirá generar datos sobre la dinámica atmosférica en la región baja de la tropósfera y, en el mediano plazo, conocer la manera en que se comportan y dispersan los contaminantes con propósitos de pronóstico utilizando modelos numéricos.

Como parte del reforzamiento se adquirió también equipo de cómputo para actualizar la infraestructura informática de la DGGCA, el área de análisis de datos y el CICA, y conmutadores para la red de datos del edificio de Agricultura 21. Para el área de diseño y modelación se

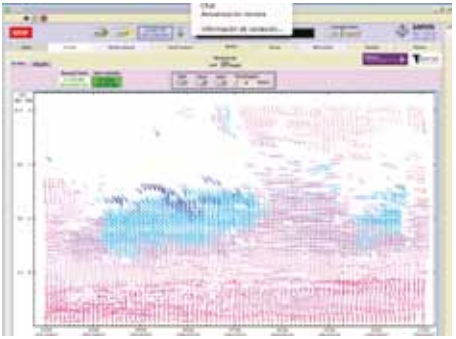
Archivo DMA

Radiómetro multicanal para el perfil termodinámico atmosférico. Estima la concentración de oxígeno y de agua a partir de la radiación emitida por ambos en la región de microondas. Tiene un alcance de 10 km y opera entre 20 y 30 GHz para el vapor de agua, y entre 50 y 59 GHZ para el oxígeno.



Archivo DMA

Detalle de la información proporcionada por el radiómetro. En la gráfica de la derecha se puede observar el perfil de la temperatura y la densidad de vapor a diferentes altitudes durante tres días de mayo de 2012.



Archivo DMA

Detalle de la información proporcionada por el radar perfilador de viento. En la gráfica se puede observar el perfil del viento entre las 3:00 y las 11:00 horas del día 3 de mayo de 2012.

Archivo DMA

Instalación del radar perfilador de viento en las instalaciones de la Subdirección de Monitoreo. Emite a la atmósfera un pulso de 915 MHz en tres diferentes posiciones; el sistema calcula la velocidad y la dirección del viento, y analiza los cambios en la intensidad de la señal de respuesta a diferentes alturas, utilizando el principio Doppler.

adquirieron estaciones de trabajo, un servidor con almacenamiento externo para el Centro de Datos, y vehículos para la operación de campo. En relación con el monitoreo de la visibilidad se colocó una cámara adicional para el monitoreo visual desde el Ajusco y una cámara de video para el monitoreo visual en puntos de conflicto en lugares con necesidades específicas.

El tránsito vehicular y su impacto en el ruido ambiental y la contaminación del aire en la Ciudad de México

El 9 de diciembre de 2011 la Secretaría del Medio Ambiente presentó el primer mapa estratégico de ruido para la Ciudad de México, elaborado por la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco (UAM-A). Este proyecto se realizó con recursos del Fideicomiso Ambiental 1490 para la Dirección Ejecutiva de Vigilancia Ambiental (DEVA). El mapa de ruido sirve para evaluar globalmente la exposición al ruido en una zona determinada en donde existen distintas fuentes de ruido o para realizar predicciones globales en una zona determinada a partir de las contribuciones individuales de las fuentes (véase la figura 8). Como parte de este proyecto se instaló una red piloto de estaciones para el monitoreo del ruido ambiental.

En 2011 se aprobó el proyecto "El tránsito vehicular y su impacto en el ruido ambiental y la contaminación del aire

en la Ciudad de México", el cual fue financiado con recursos federales del Ramo16, anexo 31, con un monto total de 26 millones de pesos. El proyecto tiene el objetivo de evaluar el impacto del tránsito del Distrito Federal en la contaminación del aire y en la auditiva. Además, pretende ampliar la cobertura de la red piloto de ruido ambiental, así como obtener insumos para reforzar el mapa de ruido; diseñar e implementar un sistema de monitoreo de tránsito vehicular, y realizar mediciones directas de las emisiones de contaminantes criterio. En diciembre de 2011 se adquirieron bienes y servicios para el desarrollo de dicho proyecto. Una vez realizado el estudio para la ubicación de los sitios de monitoreo, se llevará a cabo la instalación del equipo necesario.

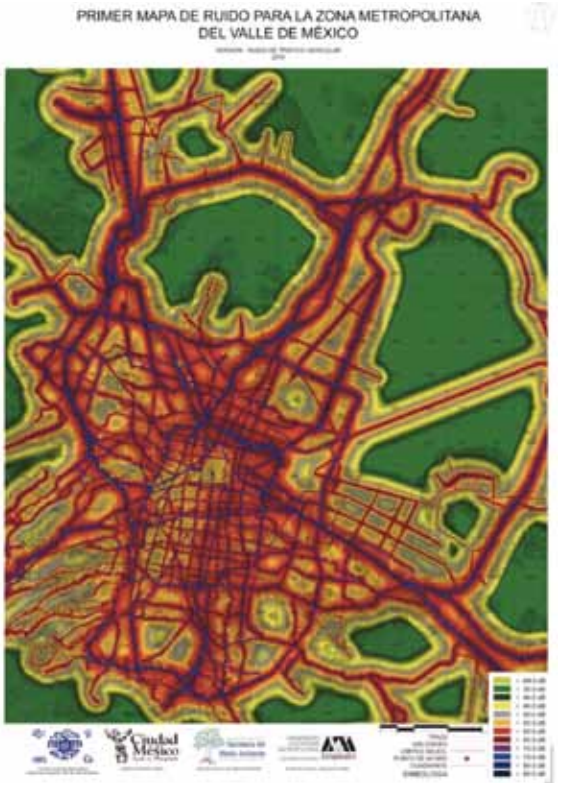
Los objetivos de este proyecto son: generar datos para identificar la influencia del tránsito vehicular en el ruido ambiental; conocer la influencia de sus emisiones a través de un aforo permanente en vialidades de interés; mejorar el inventario de emisiones de fuentes móviles, y generar datos para alimentar modelos numéricos.

Como parte del proyecto se compraron sensores de tránsito vehicular y ruido ambiental; además se adquirieron equipos portátiles para el monitoreo de contaminantes criterio, dos vehículos que podrán usarse para monitoreo móvil, un analizador de composición de aerosoles para la caracterización de especies presentes en las partículas suspendidas asociadas a las emisiones vehiculares, sensores de

Archivo DMA

Sensores de ruido ambiental. El sensor cuenta con un micrófono omnidireccional, un sonómetro y un sistema de transmisión de datos.

Figura 8. Mapa estratégico de ruido para la Ciudad de México



Fuente: UAM-Azcapotzalco/Dirección Ejecutiva de Vigilancia Ambiental.

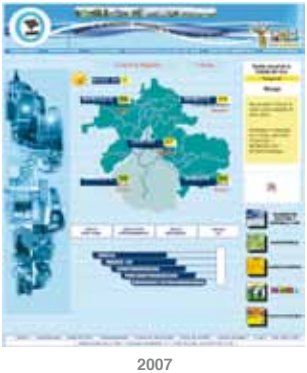
meteorología, una planta de emergencia para el laboratorio de la Subdirección de Monitoreo y equipos de espectroscopía MaxDOAS. También se destinaron recursos a la actualización de los sistemas de comunicación de las estaciones de monitoreo, la actualización de un equipo DOAS, el desarrollo de un sistema basado en inteligencia de negocios para el procesamiento y el despliegue de los nuevos parámetros medidos por la red, y la contratación de un estudio para la selección de los puntos de monitoreo de la red de ruido ambiental.

Durante el segundo semestre de 2012 se instalarán los sensores de tránsito vehicular y ruido ambiental en puntos estratégicos de la ciudad. En el primer semestre de 2013 se realizarán las pruebas piloto de la red para comenzar a generar información a partir del segundo semestre de 2013.

Difusión de la información

La Dirección de Monitoreo Atmosférico no sólo se encarga de la operación del SIMAT, también tiene bajo su responsabilidad la difusión de la información de la calidad del aire en la Ciudad de México. La difusión se realiza a través de diferentes medios, de los cuales el más importante es el sitio electrónico, que bajo esta administración ha tenido mejoras en su manejo y contenido. En cada actualización se hace uso de la tecnología disponible para acercar a los diferentes sectores de la población la información sobre el estado de la calidad del aire. Al inicio de la administración se registraban diariamente, en promedio, alrededor de 200 accesos a la página; al concluir ésta, el número de accesos directos es de alrededor de 8 000 (un número similar accede a la aplicación de Google Earth). Actualmente la página <http://www.calidadaire.df.gob.mx> es una de la fuentes de datos de calidad del aire en la ciudad y su área metropolitana, y una de las fuentes de información relacionada con la calidad del aire en el país. El sitio cuenta con el soporte de un sistema informático único en el Centro de Datos de la Dirección de Monitoreo Atmosférico, el cual cuenta con toda la infraestructura informática necesaria para la operación permanente del sistema.

A finales de 2009 se construyó el Centro de Información de la Calidad del Aire, un espacio que concentró las actividades de vigilancia que se realizaban en el Centro de Control, los procesos de adquisición y validación de datos, la



2007
http://www.sma.df.gob.mx/simat/

2009
http://www.sma.df.gob.mx/simat2/

2011
http://www.calidadaire.df.gob.mx

Evolución del sitio electrónico para la difusión de la calidad del aire en la Ciudad de México.

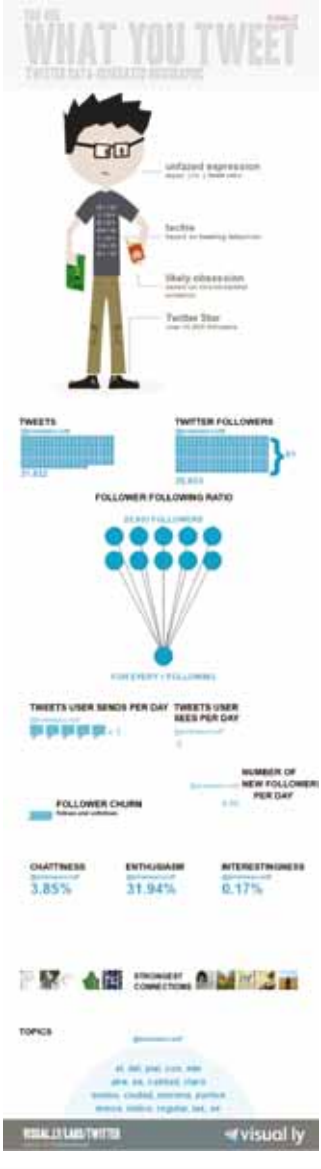
Archivo DMA

Inauguración del Centro de Información de la Calidad del Aire en el edificio de Agricultura núm. 21, piso 1, Col. Escandón, el día 23 de noviembre de 2009.

infraestructura informática, la atención telefónica, el diseño web, el desarrollo e implementación de nuevas aplicaciones y la capacitación. El espacio fue inaugurado por la licenciada Martha Delgado Peralta el 23 de noviembre de 2009.

Al inicio de la administración, la Dirección de Monitoreo Atmosférico observó que la mayoría de los accesos a la página eran realizados por personas involucradas en el tema de la contaminación atmosférica, funcionarios o reporteros. La entrada de la población en general era prácticamente nula. La difusión de la información de la calidad del aire a través de los medios de comunicación se limitaba a los días en los que se registraba alguna activación de las fases del PCAA o cuando existía alguna emergencia ambiental. Es por esto que se inició una estrategia para reforzar la difusión de la calidad del aire a un costo mínimo para la Secretaría del Medio Ambiente. Esta estrategia hizo uso de los recursos disponibles en la Dirección e inició con la mejora del portal en 2009, acción que incrementó el número de accesos en hasta 10 veces. En 2009 se modificó totalmente el formato y el contenido de los informes de calidad del aire. En 2010 se crearon nuevos materiales de difusión y una aplicación para Google Earth que permite desplegar la información de calidad del aire directamente en este servicio, y se creó la cuenta @AireMexicoDF, que actualmente cuenta con más de 25 000 seguidores. En 2011 se liberó un nuevo sitio electrónico con la dirección <http://www.calidadaire.df.gob.mx> con un gran número de mejoras y gran cantidad de materiales interactivos, y se crearon portales para dispo-

La calidad del aire en Twitter



El día 6 de enero de 2010 la Dirección de Monitoreo Atmosférico creó la cuenta @AireMexicoDF como una opción para la difusión de la información en un sector de la población con edades de entre 18 a 30 años, que tradicionalmente no tenían un acercamiento al tema de la calidad del aire. Sin embargo, éste es el sector más activo en las redes sociales. La cuenta se hizo pública en abril de 2010 sin ninguna difusión, permitiéndole un crecimiento natural en las redes sociales a través de la comunicación entre usuarios.

Actualmente @AireMexicoDF es un espacio activo, es la fuente más importante de difusión de la información de calidad del aire e interacción con la población.

La infografía fue creada por visual.ly

La cuenta @AireMexicoDF es uno de los espacios más importantes para difundir la información sobre la calidad del aire.

sitivos móviles como teléfonos inteligentes y tablets. En 2012, en colaboración con el canal de televisión pública del GDF, se inició la difusión de la calidad del aire en los noticiarios y diferentes espacios informativos del canal.

A lo largo de la administración se han mantenido los medios tradicionales de difusión de la información: cada hora se envía a los principales medios de comunicación de la capital y a un conjunto de instituciones con interés en la calidad del aire, el reporte de la calidad del aire y la radiación solar UV a través de correo electrónico; se mantiene activo el servicio telefónico de IMECATEL (5278 9931, ext. 1); el correo <calidadaire@sma.df.gob.mx> recibe diariamente solicitudes, comentarios y quejas por parte de los usuarios de la información; periódicamente se reciben visitas de estudiantes de educación media superior, superior y posgrado, tanto de instituciones privadas como públicas.

Para apoyar el desarrollo científico en el tema de la calidad del aire y la contaminación atmosférica, la Dirección de Monitoreo Atmosférico colaboró con los principales grupos de investigación relacionados, de instituciones como: la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto Politécnico Nacional (IPN), la UAM, el Colegio de Postgraduados, el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) y la Universidad de Michigan.

Recomendaciones

A continuación se presenta una serie de recomendaciones puntuales que permitirá al SIMAT seguir consolidándose como un sistema confiable, evolutivo y de utilidad para la sociedad:

a) Continuar con el rediseño del SIMAT para la REDMET, REDDA y REDMA.
b) Realizar una revisión del rediseño de la RAMA a partir de los datos obtenidos entre 2012 y 2014.
c) Continuar con el reforzamiento en el monitoreo de ozono, partículas suspendidas y sus precursores.
d) Iniciar el monitoreo de formaldehído con el método DOAS.

e) Consolidar la red de monitoreo con el método Max-DOAS, en colaboración con el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

f) Consolidar la red para el monitoreo de tránsito y ruido vehicular con la instalación, la operación y la puesta en marcha de los sensores. Avanzar en su reforzamiento.

g) Definir un programa de campañas de monitoreo para la evaluación de precursores de ozono y partículas suspendidas.

h) Buscar colaboraciones con instituciones nacionales e internacionales para reforzar la investigación sobre los problemas ambientales relacionados con la calidad del aire en México.

i) Establecer un programa permanente de auditorías internas y externas para las redes de monitoreo.

j) Continuar con las gestiones necesarias para la edificación de un espacio adecuado para la operación de la Dirección de Monitoreo Atmosférico en las instalaciones del Centro 5 en Vallejo.

k) Continuar con el desarrollo y la implementación de modelos de última generación para el pronóstico de calidad del aire y del clima.

l) Mantener y reforzar el monitoreo del perfil atmosférico a través de la capacitación adecuada para la explotación de la información.

m) Reforzar las áreas de meteorología, sistemas y análisis a través de la revisión de las capacidades y perfiles del personal en cada una de ellas.

n) Mejorar la plataforma de inteligencia de negocios para la explotación de la información que genera el SIMAT.

o) Actualizar los servidores del Centro de Datos y el servicio del conmutador.

p) Incrementar el presupuesto para la adquisición de licencias de paquetes de software para la Subdirección de Sistemas.

q) Desarrollar e implementar un método avanzado para la validación de los datos que genera el SIMAT.

r) Implementar procesos estadísticos y de minería de datos para la explotación de la información que genera el SIMAT.

s) Mejorar los mecanismos de difusión de la información a través de recursos basados en tecnologías de la información y redes sociales.

t) Realizar una actualización de los productos editoriales y electrónicos que elabora la Dirección de Monitoreo Atmosférico.

u) Realizar las gestiones necesarias para incrementar el presupuesto destinado al mantenimiento y la operación del SIMAT.

v) Realizar las gestiones necesarias para equilibrar los salarios del personal operativo con sus responsabilidades, y capacitar a los operadores del SIMAT.

II
Inventarios de emisiones de la ZMVM

Los inventarios de emisiones de contaminantes criterio, tóxicos y de compuestos de efecto invernadero son una herramienta fundamental para conocer el origen de la contaminación atmosférica, además de que se utilizan para diseñar, implementar y evaluar medidas para la reducción de emisiones y la mejora de la calidad del aire.

Con la finalidad de aumentar el conocimiento sobre la contaminación del aire de la Ciudad de México, desde el año 1972, con la creación de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente de la entonces Secretaría de Salubridad y Asistencia, se inició el desarrollo de los inventarios de emisiones. De 1990 a la fecha, los resultados de los inventarios de emisiones han sido el insumo principal de los programas para mejorar la calidad del aire que se han instrumentado en la ZMVM. A partir de la publicación del inventario de 1998, la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal desarrolla y publica bianualmente los inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos. En seguimiento a esta actividad, y con el fin de fortalecer los esfuerzos realizados para mejorar la calidad del aire de dicha zona metropolitana, en la presente administración la SMA, a través de la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, elaboró los inventarios de emisiones de contaminantes criterio, contaminantes tóxicos y compuestos de efecto invernadero (gases de efecto invernadero y carbono negro) de la ZMVM de los años 2006, 2008 y 2010; además, elaboró el "Registro de emisiones de gases de efecto invernadero del Distrito Federal", para el año 2010.

Es importante destacar que los resultados de los inventarios de emisiones del año 2006, además de dar a conocer la cantidad de emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero, fueron el insumo básico para evaluar la reducción de emisiones incluidas en algunas estrategias del Plan Verde de la Ciudad de México. Asimismo, con los resultados del inventario del año 2008, se evaluaron: la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), derivada de las medidas tomadas en el sector transporte,

como parte de los avances registrados por el Programa de Acción Climática de la Ciudad de México; los beneficios ambientales como resultado de la instrumentación de las medidas del PROAIRE 2002-2010; el mejoramiento de la calidad del aire derivado de la propuesta de ampliar el programa Hoy No Circula a los días sábados; asimismo, el inventario de 2008 se tomó como base para proponer las medidas del nuevo Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la ZMVM 2011-2020 y evaluar la reducción de emisiones para el año 2020, en correspondencia con las medidas seleccionadas para modelar la calidad del aire.

Con los inventarios también se elaboró el cuaderno técnico "Guía de cálculo y datos necesarios para estimar la reducción de emisiones de los programas de transporte del Gobierno del Distrito Federal", con la finalidad de homologar criterios utilizados por todas las instancias del GDF para estimar la reducción de emisiones; ello permite dar a conocer cifras oficiales y equivalentes en relación con la mejora de la calidad del aire, derivada de las acciones que se realizan en el sector transporte.

Con la instrumentación de las medidas referidas en el cuaderno técnico,[1] se estima que, del año 2007 a 2010, en el sector transporte se ha alcanzado una reducción de emisiones de 128 000 toneladas de contaminantes criterio y 453 000 toneladas de gases de efecto invernadero. Esto sólo considerando la reducción directa de emisiones debido a la sustitución de vehículos viejos por unidades más nuevas. Referente a las emisiones de fuentes móviles registradas en el Distrito Federal en el año 2008, esta reducción de emisiones representa 1% de PM_{10}, 2.6% de dióxido de azufre (SO_2), 15.3% de monóxido de carbono (CO), 11.3% de óxido de nitrógeno (NO_X), 8.5% de compuestos órgánicos volátiles (COV) y 3.3 de CO_2.

Inventarios de contaminantes criterio

[1] Dichas medidas incluyen: sustitución de taxis por unidades menos contaminantes, sustitución de microbuses por autobuses de mediana capacidad, sustitución de microbuses por autobuses en el corredor reforma, sustitución de microbuses por autobuses en el Periférico, corredor cero emisiones Eje Central, sustitución de microbuses por autobuses articulados (Metrobús ampliación Insurgentes Línea 1), sustitución de microbuses por autobuses articulados (Metrobús Tepalcates-Tacubaya Línea 2) y sustitución de autobuses de la Red de Transporte de Pasajeros.

Los contaminantes criterio fueron los primeros en ser estudiados sistemáticamente en varios países, incluyendo México, debido a la evidencia que empezó a obtenerse sobre sus efectos dañinos en la salud humana. En los inventarios de contaminantes criterio que se elaboraron para la ZMVM, se incluyeron las emisiones de: PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, CO, NO_X, COV y compuestos orgánicos totales (COT); éstos son generados por las actividades cotidianas que se realizan dentro de los centros urbanos, como: el arreglo personal, el aseo del hogar, el uso de la estufa para la cocción de los alimentos, el uso del calentador de agua, el uso del transporte particular o colectivo para trasladarse de un lugar a otro, así como las actividades industriales, comerciales, de servicios, agrícolas y ganaderas; también se incluyen las emisiones generadas por los incendios forestales y estructurales, por la erosión eólica, por la disposición de basura, por el tratamiento de agua, etcétera.

Mejoras metodológicas

El Distrito Federal y la ZMVM cuentan con varios inventarios de emisiones atmosféricas que se actualizan bianualmente para fortalecer con información reciente la toma de decisiones del GDF en materia de gestión de la calidad del aire; se tiene como premisa incorporar en las nuevas actualizaciones: mejores prácticas para aumentar el aseguramiento y el control de calidad de los resultados; revisar, evaluar e incorporar actualizaciones metodológicas nacionales e internacionales, y recopilar información reciente y suficiente para mejorar o incorporar al inventario nuevos sectores de importancia.

Como una de las principales mejoras realizadas al inventario de emisiones durante esta administración, se desarrolló un sistema interno con base en el lenguaje de programación SQL para agilizar y aumentar la desagregación y confiabilidad de la flota vehicular obtenida de las bases de datos del Programa de Verificación Vehicular Obligatoria. Con ello se consolidó, para la estimación de emisiones, una clasificación por fuente más amplia; por ejemplo: debido al aumento de camionetas SUV, éstas se incorporaron en una categoría propia; por la importancia que tiene el transporte

de carga, se desagregó este sector en varias categorías con base en el peso bruto vehicular; como el transporte público de pasajeros ha cambiado, a las categorías vehiculares de este sector se les reasignó un factor de emisiones de acuerdo con el peso bruto vehicular actual (por ejemplo, los vehículos que se incluyen en la categoría de combis). Actualmente la mayor parte del transporte público de pasajeros está conformado por camionetas tipo panel de mayor capacidad y peso bruto vehicular, a las que les corresponde un factor de emisión más alto; de igual forma, por el peso bruto de los microbuses, éstos cambiaron de una categoría de emisión de vehículos ligeros a una de vehículos pesados.

Con base en estadísticas nacionales del mercado de recubrimientos y tintas, se elaboraron factores de emisión locales para mejorar la estimación de emisiones de COV en el recubrimiento de superficies arquitectónicas, el recubrimiento de superficies industriales, las artes gráficas, la pintura automotriz, la pintura en tránsito y las pinturas en aerosol.

Referente al cálculo de emisiones de polvo fugitivo (partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$) provenientes de las vialidades pavimentadas, se mejoró la estimación por el empleo de metodologías recientemente publicadas por la EPA; además, se amplió la utilización de datos locales que demanda esta metodología.

Tabla 3. Inventario de emisiones por sector de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2010

Sector/categoría	Emisiones [t/año]						
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	NO_X	COT	COV
Industrial	5721	1219	7423	6324	13953	169514	150933
Servicios/comercios	349	298	245	11441	5878	44593	35557
Habitacional	905	880	19	4427	4274	203913	164747
Transporte en vialidades	3720	2769	411	1587662	169005	200010	188414
Vialidades sin/con pavimento	17046	2615	NA	NA	NA	NA	NA
Disposición de residuos sólidos	NA	NA	NA	153	NA	330557	16090
Otros	3865	1466	17	7505	21742	46822	46688
Total	**31606**	**9247**	**8115**	**1617512**	**214852**	**995409**	**602429**

PM_{10}: partículas menores a 10 micrómetros; $PM_{2.5}$: partículas menores a 2.5 micrómetros; SO_2: dióxido de azufre; CO: monóxido de carbono; NO_X: óxidos de nitrógeno; COT: compuestos orgánicos totales; COV: compuestos orgánicos volátiles; NA: no aplica.

Fuente: DGGCA de la SMA.

Por otro lado, por recomendaciones de investigadores en materia ambiental como el doctor Mario Molina y su grupo de colaboradores, se recopiló y procesó información para agregar al inventario la estimación de emisiones de nuevas categorías relacionadas con los sectores agrícola, ganadero y de la construcción.

Además, con la finalidad de mejorar la aplicación de los modelos de calidad del aire que se tienen en operación, se actualizó, con base en los resultados de la Encuesta Origen-Destino que realizó el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en 2007, la distribución espacial y temporal de las emisiones vehiculares.

Inventario de emisiones 2010

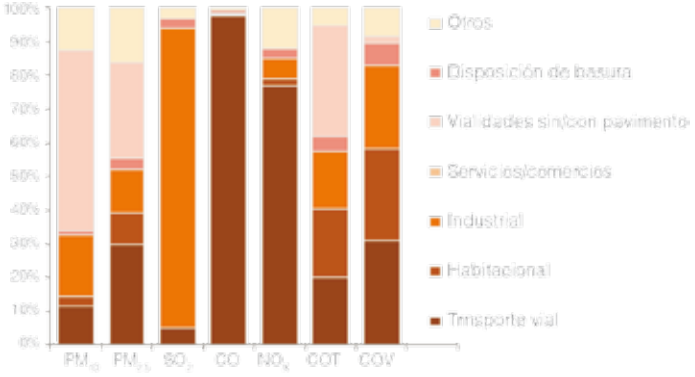
Las emisiones de contaminantes criterio inventariadas en el año 2010 para la Zona Metropolitana del Valle de México, que comprende las 16 delegaciones del Distrito Federal y 59 municipios del Estado de México,[2] corresponden a las actividades cotidianas realizadas por más de 20 millones de personas, 5.3 millones de viviendas, 5 millones de vehículos, 79 000 industrias y 650 000 establecimientos comerciales y de servicio, así como un consumo energético anual de 527 petajoules (PJ) generados con combustibles fósiles.

Es importante mencionar que en el inventario más reciente –que corresponde al año 2010–, a diferencia de los anteriores, se incluye una nueva clasificación para identificar de forma más precisa a los sectores o categorías emisoras (véase la tabla 3). Con esta nueva clasificación resulta que la mayor parte de las emisiones de CO y de NO_X son generadas por el sector transporte que circula en vialidades; las emisiones de COV se emiten en cantidades no muy distantes por los sectores transporte, industria y habitacional; en el caso de las PM_{10}, éstas provienen en su mayoría del polvo que se desprende de las vialidades por el paso vehicular, así como del sector industrial. A diferencia de las PM_{10}, cantidades importantes de $PM_{2.5}$ provienen del sector transporte y de la industria.

[2] Para fines del inventario no se tomó en cuenta el municipio de Hidalgo que está integrado a la ZMVM.

En la gráfica 14 se muestran los sectores o categorías dominantes por contaminante. En ella se puede observar que con la reducción de emisiones provenientes de las vialidades con/sin pavimento, se podría mejorar sustancialmente la calidad del aire por partículas PM_{10}, y para mejorar la calidad del aire por $PM_{2.5}$ es necesario, además, agregar medidas de reducción del sector transporte e industrial. Referente a la calidad del aire por ozono, ésta mejoraría en gran medida con la reducción de emisiones de NO_X y COV del sector transporte, además de reducir emisiones de COV en la industria y el sector habitacional.

Gráfica 14. Contribución porcentual de emisiones por sector de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2010



PM_{10}: partículas menores a 10 micrómetros; $PM_{2.5}$: partículas menores a 2.5 micrómetros; SO_2: dióxido de azufre; CO: monóxido de carbono; NOx: óxidos de nitrógeno; COT: compuestos orgánicos totales; COV: compuestos orgánicos volátiles.
Fuente: DGGCA de la SMA.

En la tabla 4 se muestran, de forma desagregada, las emisiones de todas las categorías registradas en el inventario de emisiones de contaminantes criterio.

Con la finalidad de mejorar el análisis del comportamiento de las emisiones, se realizó una nueva distribución temporal y espacial de los contaminantes, lo cual nos permite desarrollar escenarios más precisos de la calidad del aire. Asimismo, estos cambios actualizaron la cantidad de contaminantes liberados en cada hora del día, así como la localización de las fuentes o zonas donde se generan las emisiones.

Tabla 4. Inventario de emisiones de contaminantes criterio, desagregado por categoría. Zona Metropolitana del Valle de México, 2010

Sector	Emisiones [t/año]						
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	NO_X	COT	COV
Fuentes puntuales	5721	1219	7423	6324	13953	141262	136668
Industria alimentaria	821	110	109	225	740	5183	4952
Fabricación de insumos textiles y acabado de textiles	418	14	142	81	185	10257	10238
Industria de la madera	126	26	135	11	31	1760	1742
Industria del papel	98	54	676	411	1075	14234	14127
Impresión e industrias conexas	31	1	NS	14	30	9561	8793
Fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón	27	NS	15	8	20	2910	2745
Industria química	1226	249	871	382	1057	42036	40549
Industria del plástico y del hule	150	6	15	105	189	30873	30617
Fabricación de productos a base de minerales no metálicos	1515	377	4804	906	1439	1125	930
Industrias metálicas básicas	292	77	353	959	2059	2015	1491
Fabricación de productos metálicos	229	27	126	323	411	4568	4563
Fabricación de accesorios, aparatos eléctricos y equipo de generación de energía eléctrica	116	8	13	92	238	2381	2376
Fabricación de equipo de transporte	281	42	48	445	173	5906	5596
Fabricación de muebles, colchones y persianas	24	3	NS	4	10	2597	2594
Generación de energía eléctrica	199	199	16	2198	5995	289	143
Otras industrias manufactureras	168	26	100	160	301	5567	5212
Fuentes de área	21654	5151	281	23526	26868	609363	232573
Combustión de equipos agrícolas	1	1	NS	18	32	2	2
Operación de aeronaves	37	35	243	6127	4237	1961	1882
Recubrimiento de superficies industriales	NA	NA	NA	NA	NA	5278	5214
Pintura automotriz	NA	NA	NA	NA	NA	5077	5052
Recubrimiento de superficies arquitectónicas	NA	NA	NA	NA	NA	35726	33763
Limpieza de superficie industrial	NA	NA	NA	NA	NA	22974	9051
Lavado en seco	NA	NA	NA	NA	NA	20709	12012
Artes gráficas	NA	NA	NA	NA	NA	5403	5403
Distribución y almacenamiento de gas LP	NA	NA	NA	NA	NA	3927	3864
Fugas en instalaciones de GLP	NA	NA	NA	NA	NA	34323	27877
HCNQ en la combustión de gas LP	NA	NA	NA	NA	NA	34498	33946
Rellenos sanitarios	NA	NA	NA	153	NA	326889	12716
Vialidades pavimentadas	6428	1553	NA	NA	NA	NA	NA
Vialidades sin pavimentar	10618	1062	NA	NA	NA	NA	NA
Productos de cuidado personal	NA	NA	NA	NA	NA	22887	15792
Productos de consumo doméstico	NA	NA	NA	NA	NA	21683	14961
Plaguicidas	NA	NA	NA	NA	NA	25056	17347

Continúa en la página siguiente

Viene de la página anterior

Sector	Emisiones [t/año]						
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	NO_X	COT	COV
Maquinaria	681	626	7	5825	16650	1677	1608
Asados al carbón	243	195	NA	4649	229	28	28
Agricultura	2098	464	NA	NA	NA	187	187
Ganadería	112	13	NA	NA	NA	NA	NA
Otras fuentes de área	1436	1202	31	6754	5720	14094	13236
Fuentes móviles	3720	2769	411	1587662	169005	200010	188414
Autos particulares	551	253	152	429474	44045	57988	55752
Camionetas SUV	155	77	49	152670	14092	17256	16506
Taxis	200	92	49	225744	27318	17706	17024
Vagonetas y combis	52	28	19	91498	6735	8092	7351
Microbuses	80	57	34	126929	8776	13958	12287
Pick up y vehículos de carga hasta 3.8 t	127	72	45	190323	11406	20966	19419
Tractocamiones	1375	1215	4	22818	14189	4005	3833
Autobuses	374	329	11	46493	25311	7195	6816
Vehículos de carga mayores a 3 t	677	572	40	154421	13174	13749	12578
Motocicletas	120	67	8	147189	3635	39039	36794
Metrobús	9	7	NS	103	324	56	54
Fuentes naturales	511	108	NA	NA	5026	44774	44774
Vegetación	NA	NA	NA	NA	5026	44774	44774
Erosión eólica del suelo	511	108	NA	NA	NA	NA	NA
Total	**31606**	**9247**	**8115**	**1617512**	**214852**	**995409**	**602429**

PM_{10}: partículas menores a 10 micrómetros; $PM_{2.5}$: partículas menores a 2.5 micrómetros; SO_2: dióxido de azufre; CO: monóxido de carbono; NO_X: óxidos de nitrógeno; COT: compuestos orgánicos totales; COV: compuestos orgánicos volátiles; HCNQ: hidrocarburos no quemados; NA: no aplica; NE: no estimado; NS: no significativo. Fuente: DGGCA de la SMA.

En la tabla 5 y la gráfica 15 se muestra un panorama de la nueva distribución de las emisiones generadas por las actividades que se desarrollan en la ZMVM durante el día, de acuerdo con los horarios de actividad de la población.

Cabe mencionar que el perfil horario de las emisiones muestra que durante el transcurso del día se presentan cinco horas de máxima generación de emisiones, las cuales contribuyen con 29% de las emisiones diarias. Además, entre las 6:00 y las 8:00 horas, cuando inician los viajes escolares y laborales, se emite 8% de las emisiones diarias. Un pico de emisiones importantes fluctúa entre las 13:00 y las 14:00 horas, coincidiendo principalmente con el horario de salida de las escuelas y, finalmente, otra emisión importante ocurre a las 18:00 horas, cuando se termina la mayor parte de las jornadas de trabajo.

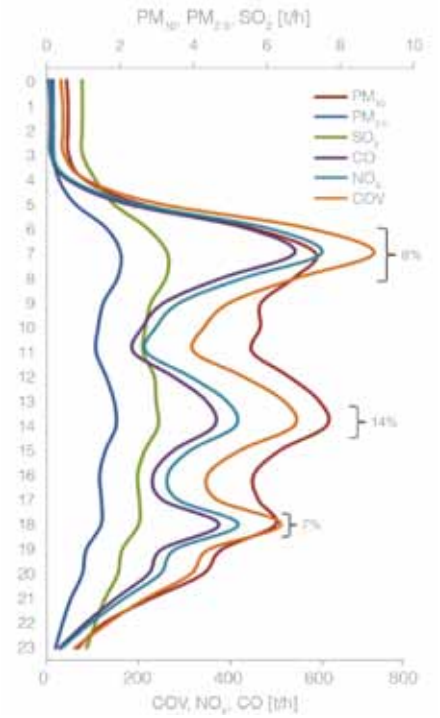
Referente a la distribución espacial de las emisiones, en la figura 9 se observa que las principales emisiones de partículas PM_{10} se distribuyen en las regiones más pobladas de la ZMVM, siendo más intensas en donde se tiene un mayor flujo vehicular e intensidad industrial y en la periferia por la presencia de caminos no pavimentados. En particular, en los municipios de Naucalpan y Tlalnepantla y algunas zonas aisladas del norte (áreas de color intenso), se suman las

Tabla 5. Emisiones promedio horarias de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2010

Hora	Emisiones [t/h]					
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	NO_X	COV
0	0.5	0.2	1.0	5.0	7.6	31.4
1	0.6	0.2	1.0	8.4	11.4	35.9
2	0.6	0.2	1.0	8.8	11.8	36.3
3	0.6	0.2	1.0	9.7	12.8	38.0
4	1.0	0.3	1.3	43.2	49.9	83.0
5	2.5	0.8	1.8	171.0	191.1	243.0
6	5.6	1.6	2.7	436.1	483.9	571.0
7	7.3	2.0	3.3	541.7	601.0	714.5
8	6.8	1.9	3.3	384.9	432.5	549.3
9	5.9	1.6	2.9	257.6	292.1	401.2
10	5.8	1.4	2.7	209.7	239.4	344.3
11	5.6	1.4	2.6	189.4	217.0	321.3
12	6.6	1.6	2.9	275.8	312.4	428.2
13	7.4	1.8	3.0	348.9	393.1	517.9
14	7.6	1.9	3.0	366.5	412.5	540.2
15	6.4	1.6	2.7	277.1	313.6	421.4
16	5.6	1.4	2.5	232.6	264.4	351.1
17	5.8	1.5	2.5	253.0	286.8	372.5
18	6.2	1.5	2.5	376.3	418.5	511.6
19	4.8	1.1	2.1	251.4	280.5	354.2
20	4.3	1.0	1.9	222.3	248.2	315.0
21	2.8	0.7	1.6	150.6	168.7	216.0
22	1.6	0.4	1.3	84.5	95.5	133.1
23	0.8	0.2	1.1	27.9	32.9	61.2
Total/día	**103**	**27**	**52**	**5132**	**5778**	**7592**

PM_{10}: partículas menores a 10 micrómetros; $PM_{2.5}$: partículas menores a 2.5 micrómetros; SO_2: dióxido de azufre; CO: monóxido de carbono; NO_X: óxidos de nitrógeno; COT: compuestos orgánicos totales; COV: compuestos orgánicos volátiles.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Gráfica 15. Emisiones promedio horarias de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2010



PM_{10}: partículas menores a 10 micrómetros; $PM_{2.5}$: partículas menores a 2.5 micrómetros; SO_2: dióxido de azufre; CO: monóxido de carbono; NO_X: óxidos de nitrógeno; COT: compuestos orgánicos totales; COV: compuestos orgánicos volátiles. Fuente: DGGCA de la SMA.

emisiones provienentes de la actividad industrial, como la fabricación de productos a base de minerales no metálicos.

El patrón de distribución de las emisiones de partículas $PM_{2.5}$ es similar al de las emisiones de PM_{10}, con una mayor intensidad de emisiones en las vialidades primarias de más flujo vehicular, que es por donde circula gran parte del transporte pesado, como los tractocamiones y autobuses, los cuales generan cantidades significativas de $PM_{2.5}$ por el diesel que consumen. Las emisiones en la periferia también son liberadas por las vialidades sin pavimentar.

En la figura 10, se muestra la distribución espacial y los principales emisores de los precursores de ozono, como los óxidos de nitrógeno, que son generados en su mayoría

por los vehículos automotores (79% del total de la ZMVM), principalmente por los vehículos particulares, taxis, autobuses y tractocamiones; es por esto que su variación espacial es más intensa en las zonas de mayor tránsito vehicular como la zona encerrada con un círculo amarillo.

La generación de emisiones de COV se atribuye a las actividades de combustión, tanto vehicular como industrial; a las relacionadas con el uso de solventes y el aprovechamiento del gas LP, y a la vegetación, que también es generadora de estos compuestos como parte de los procesos naturales. En particular, las principales categorías emisoras son los automóviles particulares, las motocicletas, la industria química y los hidrocarburos no quemados en la combustión del gas LP.

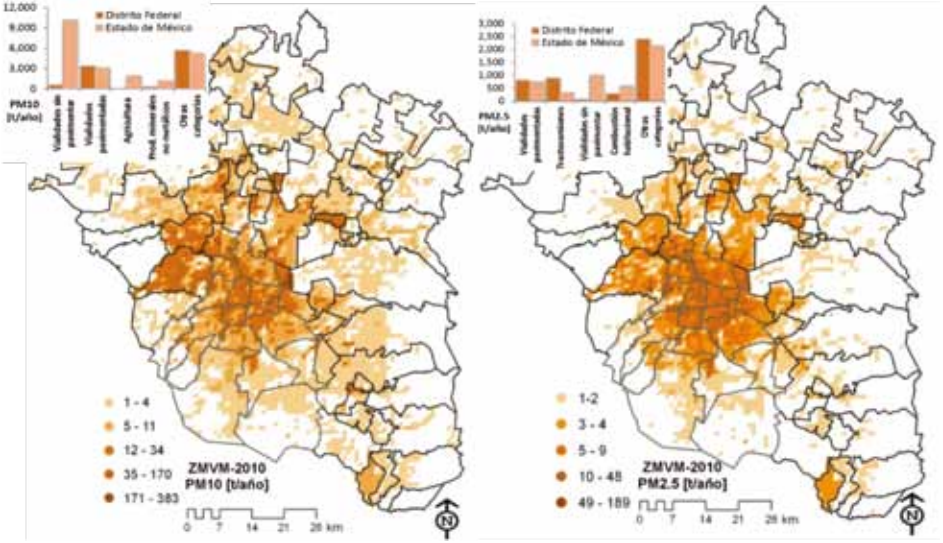
Debido a que gran parte de las emisiones de COV provienen de la combustión interna de los autos y de las actividades cotidianas de la población, las emisiones se distribuyen con base en la densidad poblacional e intensidad del flujo vehicular; las más altas son las emisiones de las pequeñas áreas aisladas de color intenso que se observan en la figura 10 y que corresponden a zonas con actividad industrial importante.

La figura 11 muestra que 98% de las emisiones de CO es generado por los vehículos automotores, principalmente por los autos particulares, que son muy numerosos, y por el uso intensivo del transporte de carga y de los taxis. Debido a esto, la distribución geográfica de estas emisiones es acorde con la presencia de vialidades; el color más intenso presente en la figura 11 indica mayor densidad de vialidades importantes o un flujo vehicular más intenso.

Por lo anterior, en las delegaciones Cuauhtémoc, Benito Juárez, Venustiano Carranza, Iztacalco, el norte de Iztapalapa y la colindancia de Gustavo A. Madero con Azcapotzalco, además de los municipios de Nezahualcóyotl, Tlalnepantla de Baz y la colindancia de Naucalpan de Juárez con el Distrito Federal, se tienen las zonas de mayor generación de emisiones de CO, las cuales son consideradas, además, como los principales puntos atractores y generadores de viajes.

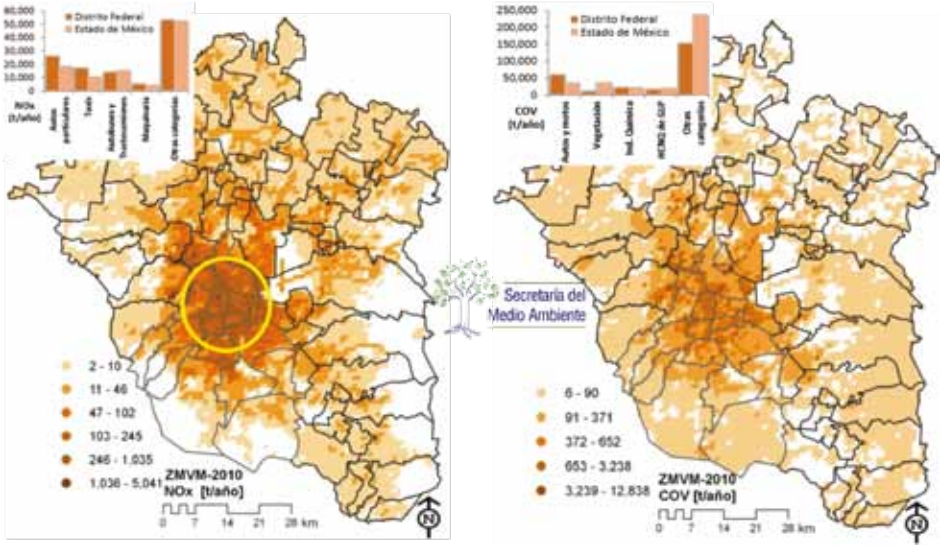
También esta figura muestra que la mayor parte de las emisiones de SO_2 es generada por la actividad industrial, en particular por las empresas dedicadas a la fabricación de productos a base de minerales no metálicos ubicadas en el

Figura 9. Distribución espacial de las emisiones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$. Zona Metropolitana del Valle de México, 2010



PM_{10}: partículas menores a 10 micrómetros; $PM_{2.5}$: partículas menores a 2.5 micrómetros.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Figura 10. Distribución espacial de las emisiones de precursores de ozono (COV y NOx). Zona Metropolitana del Valle de México, 2010



NO_X: óxidos de nitrógeno; COV: compuestos orgánicos volátiles.
Fuente: DGGCA de la SMA.

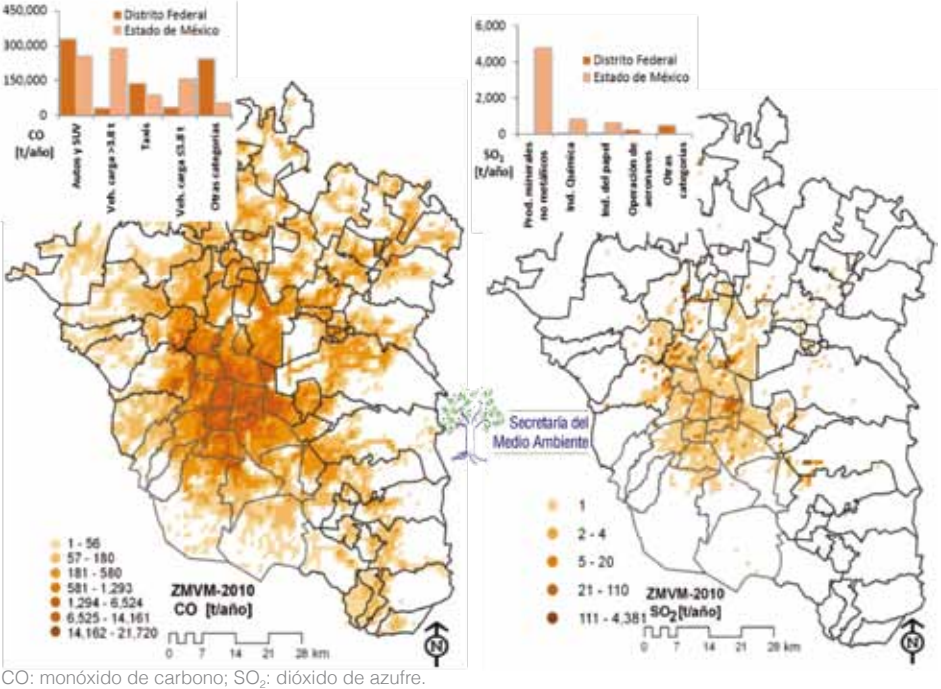
Estado de México, y en menor intensidad por la industria química y del papel situada dentro de la misma entidad.

De manera general, en la mayor parte de las áreas coloreadas que se muestran en la figura 11 se registran emisiones de SO_2 debido a la actividad vehicular, y en particular en las áreas de color más intenso del norte de la ciudad también se generan emisiones importantes provenientes de la actividad industrial. En el Distrito Federal, en la delegación Venustiano Carranza, donde se ubica el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, también se generan emisiones importantes de SO_2 debido a las actividades de aterrizaje, desplazamiento y despegue de las aeronaves que llegan o salen de este aeropuerto.

Evolución de las emisiones 2000-2010

Debido a que en el inventario del año 2010, comparado con los ya elaborados, aumentó el nivel de desagregación para

Figura 11. Distribución espacial de las emisiones de CO y SO_2. Zona Metropolitana del Valle de México, 2010



CO: monóxido de carbono; SO_2: dióxido de azufre.
Fuente: DGGCA de la SMA.

estimar las emisiones de fuentes móviles, y además se emplearon metodologías actualizadas en la estimación de emisiones de algunos sectores, en la presente administración fue necesario desarrollar nuevos inventarios para los años 2000, 2006 y 2008; lo anterior se hizo con el fin de mantener una referencia comparativa respecto al comportamiento reciente de la generación de emisiones y dar respuestas ante las causas que ocasionan los incrementos o decrementos de los niveles de contaminantes en el aire de la ZMVM.

Como la calidad del aire está estrechamente ligada a la generación de emisiones, es importante analizar su evolución para contribuir al entendimiento de la problemática de la calidad del aire de esta zona.

La evolución que ha tenido la generación de emisiones desde el año 2000 hasta el 2010 se presenta en la tabla 6. En ella se puede apreciar la disminución de emisiones de PM_{10}, SO_2, CO, y COV; no obstante, las emisiones de los NO_X no muestran reducción.

El decremento de las emisiones de CO y de COV es consecuencia, principalmente, del cambio tecnológico del parque vehicular, ya que el número de vehículos que cuentan con un sistema de control para estos contaminantes ha aumentado paulatinamente; asimismo, esta reducción puede deberse a un mayor control en los programas de verificación vehicular obligatorios y al cambio de convertidores catalíticos caducos.

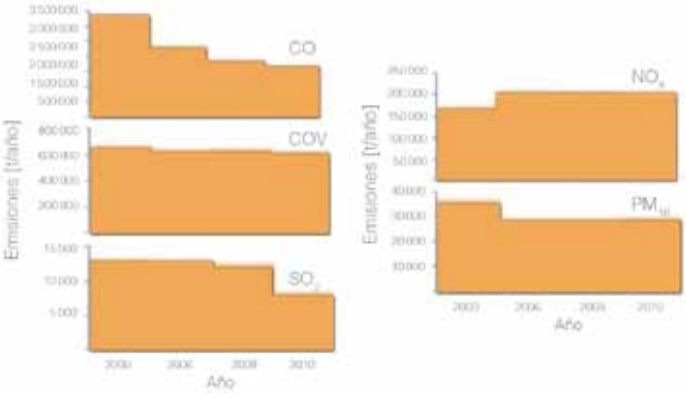
La disminución de las emisiones de SO_2 se debe a la reducción del contenido de azufre de los combustibles vehiculares pues, de acuerdo con los datos proporcionados por PEMEX, en el año 2010 se distribuyeron en la ZMVM gasolinas y diesel de ultrabajo contenido de azufre (UBA).

Tabla 6. Tendencia de la emisión de contaminantes en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2000-2010

	Emisiones [T/año]				
Año	PM_{10}	SO_2	CO	NO_X	COV
2000	34 956	12 792	3 258 847	163 609	642 592
2006	27 556	12 667	2 237 110	201 174	617 504
2008	27 670	12 193	1 792 031	200 180	623 477
2010	28 201	8 108	1 607 038	197 973	600 605
Reducción 2000-2010	**-19%**	**-37%**	**-51%**	**+21%**	**-7%**

PM_{10}: partículas menores a 10 micrómetros; SO_2: dióxido de azufre; CO: monóxido de carbono; NO_X: óxidos de nitrógeno; COV: compuestos orgánicos volátiles.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Gráfica 16. Tendencia de las emisiones generadas en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2000, 2006, 2008 y 2010



CO: monóxido de carbono; COV: compuestos orgánicos volátiles; SO_2: dióxido de azufre; NO_X: óxidos de nitrógeno; PM_{10}: partículas menores a 10 micrómetros.
Fuente: DGGCA de la SMA.

La gráfica 16 nos permite observar el comportamiento de las emisiones por tipo de contaminante para el año 2000, 2006, 2008 y 2010; resalta la reducción paulatina de emisiones de CO, el aumento de los óxidos de nitrógeno al año 2006 y la reducción de SO_2 en el año 2010. También esta gráfica nos permite observar que en los seis años previos a 2010 las emisiones de las partículas PM_{10} y de los precursores de ozono (COV y NO_X) variaron ligeramente, por lo que se considera que es necesario aplicar más medidas para reducir las emisiones de estos contaminantes.

Inventarios de contaminantes tóxicos

Las emisiones de COV representan uno de los principales problemas de contaminación del aire de la ZMVM, toda vez que estos compuestos son precursores del ozono troposférico. Este problema se hace más complejo ya que algunos de ellos son considerados contaminantes tóxicos; de la misma manera que las emisiones de COV, las emisiones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ es otro de los principales problemas de contaminación del aire de la ZMVM, el cual también es agravado debido a que una fracción de estas partículas son tóxicas.

El término de compuestos tóxicos del aire es utilizado para referirse a un compuesto o grupo de compuestos

químicos nocivos para la salud que se encuentran en la atmósfera; por ejemplo, el benceno, el tolueno, el xileno y el etilbenceno, que forman parte de los compuestos orgánicos. También existe un cierto número de compuestos tóxicos gaseosos que pueden no ser compuestos orgánicos, como el amoniaco y el cloro; y, además, hay emisiones de otros compuestos formados por partículas de metales pesados como: el plomo, el cromo y el cadmio.

Mejoras metodológicas

Las emisiones de los contaminantes tóxicos son una fracción de las emisiones de partículas y de COV, por lo que las mejoras metodológicas para estimar estos contaminantes –como la actualización de los factores de emisión de COV en algunas categorías de fuentes de área y la mayor desagregación de las fuentes móviles– repercuten en un mejor cálculo de los contaminantes tóxicos.

Además, con base en el estudio y la revisión continua de los procesos industriales y actividades que generan COV, se ha logrado, durante la presente administración, aumentar el número de compuestos tóxicos inventariados, de 84 a 137.

Debido a que la EPA actualiza continuamente las fuentes principales de información de donde se obtienen los factores de emisión de compuestos tóxicos (FIRE[3] y SPECIATE[4]), fue necesario revisar e incorporar al inventario los cambios provenientes del FIRE, versión 6.25; SPECIATE, versión 3.2, y SPECIATE, versión 4.2. También se incorporaron factores de emisión provenientes del AP-42 Air CHIEFF, versión 12, para algunos contaminantes que no se habían contemplado y otras actividades para las cuales no se contaba con factor de emisión; además se tomaron en cuenta los resultados de un estudio realizado en México por Reza, Salazar y Trejo,[5] el cual proporciona un perfil de especiación para los solventes empleados en la ZMVM.

[3] Se refiere al software Factor Information Retrieval.
[4] Se refiere a las bases de datos de factores de emisión de la EPA.
[5] J. Reza, G. Salazar y A. Trejo, "Evaluation of composition and evaporation behavior of commercial thinner samples expended in Mexico City", *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 13, núm. 2, 1997, pp. 87-95. [fecha de consulta: 17 de marzo de 2010] Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/370/37013205.pdf>.

Para mejorar la estimación de contaminantes tóxicos provenientes de las fuentes móviles, mediante el estudio y el análisis de las metodologías respectivas y la revisión continua de la información, también se adecuó el modelo Mobile6-México con los contenidos de aromáticos, olefinas y metil-terbutil-éter que contienen las gasolinas que se distribuyen en la ZMVM.

Para aumentar la confiabilidad y la calidad de este inventario se realiza un análisis continuo del consumo de solventes en la ZMVM; por ejemplo, este análisis nos indica qué cantidades importantes de emisiones de compuestos tóxicos provienen del uso del tolueno, metil etil cetona, xileno, acetaldehído, poliol, acetato de vinilo, polivinilo, acetato de metilo, butilo, isobutilo, metil isobutil cetona, gas nafta, ácido acético, alcohol metílico y etilenglicol.

Inventario de emisiones 2010

Se estima que en la ZMVM se generan poco más de 190 000 toneladas anuales de contaminantes tóxicos. En la tabla 7 se observa que el transporte que circula sobre vialidades es el sector que más genera emisiones, con un aporte de cerca

Tabla 7. Emisiones de contaminantes tóxicos. Zona Metropolitana del Valle de México, 2010

Sector o categoría	Emisiones		Contaminante	Emisiones	
	[t/año]	[%]		[t/año]	[%]
Industrial	45 347	23.8	Tolueno	48 041	25.2
Transporte carretero	56 419	29.6	Metanol	18 429	9.7
Servicios y comercios	20 569	10.8	Isómeros de xileno	15 374	8.1
Habitacional	47 349	24.9	N-hexano	10 229	5.4
Construcción	793	0.4	Percloroetileno	9 518	5.0
Agrícola	109	0.1	Metil etil cetona	7 942	4.2
Ganadero	2	NS	2,2,4-trimetilpentano	6 775	3.6
Disposición de residuos	9 214	4.8	M-xileno	6 194	3.3
Vialidades sin/con pavimento	44	N/S	Benceno	6 134	3.2
Incendios	51	N/S	1,1,1-tricloroetano	5 998	3.2
Vegetación	10 503	5.5	Metil t-butil éter	5 791	3.0
Erosión eólica del suelo	2	N/S	Otros	49 977	26.2
Total	**190 402**	**100**	**Total**	**190 402**	**100.0**

Fuente: DGGCA de la SMA.

Tabla 8. Inventario de emisiones de contaminantes tóxicos desagregado por categoría. Zona Metropolitana del Valle de México, 2010>

Sector	[t/año]
Sector industrial	27 884
Industria alimentaria	39
Industria de las bebidas y del tabaco	10
Fabricación de insumos textiles y acabado de textiles	199
Fabricación de productos textiles, excepto prendas de vestir	22
Fabricación de prendas de vestir	7
Curtido y acabado de cuero y piel, y fabricación de productos de cuero, piel y materiales sucedáneos	30
Industria de la madera	240
Industria del papel	2 369
Impresión e industrias conexas	8 331
Fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón	7
Industria química	6 026
Industria del plástico y del hule	1 376
Fabricación de productos a base de minerales no metálicos	231
Industrias metálicas básicas	316
Fabricación de productos metálicos	1 907
Fabricación de maquinaria y equipo	123
Fabricación de equipo de computación, comunicación, medición y de otros equipos, componentes y accesorios electrónicos	684
Fabricación de accesorios, aparatos eléctricos y equipo de generación de energía eléctrica	1 173
Fabricación de equipo de transporte	3 035
Fabricación de muebles, colchones y persianas	780
Otras industrias manufactureras	683
Generación de energía eléctrica	296
Fuentes de área	95 594
Combustión comercial/institucional	10
Combustión habitacional	51
Combustión de equipos agrícolas	NS
Operación de aeronaves	958
Recubrimiento de superficies industriales	3 561
Pintura automotriz	3 533
Recubrimiento de superficies arquitectónicas	19 969
Limpieza de superficie industrial	13 902
Lavado en seco	12 341
Artes gráficas	3 030
Distribución y almacenamiento de gas LP	2
Fugas en instalaciones de gas LP	22
HCNQ en la combustión de gas LP	23
Rellenos sanitarios	7 533
Vialidades pavimentadas	25

Continúa en la página siguiente

Viene de la página anterior

Sector	[t/año]
Vialidades sin pavimentar	19
Productos de cuidado personal	638
Productos de consumo doméstico	2926
Plaguicidas	9540
Productos para el cuidado automotriz	9150
Adhesivos y selladores	4340
Otras fuentes de área	3938
Asados al carbón	6
Construcción	1
Agricultura	74
Ganadería	2
Fuentes móviles	56419
Autos particulares	14547
Camionetas SUV	4368
Taxis	5489
Vagonetas y combis	2238
Microbuses	1478
Pick up y vehículos de carga ligeros ≤ 3.8 t	5445
Tractocamiones	597
Autobuses	1302
Vehículos de carga pesados > 3.8 t	2698
Motocicletas	18249
Metrobús	8
Vegetación y suelos	10505
Vegetación	10503
Erosión eólica del suelo	2
Total	**190402**

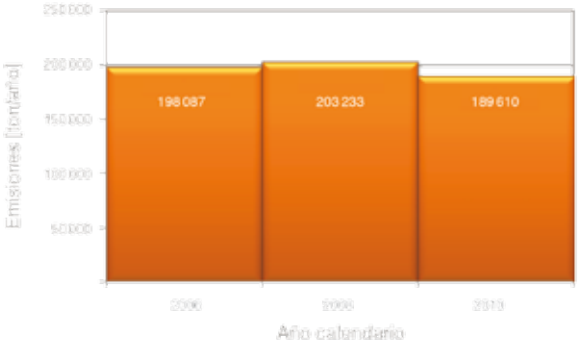
HCNQ: hidrocarburos no quemados; NS: no significativo.
Fuente: DGGCA de la SMA.

de 30%, y le siguen muy de cerca el sector habitacional y el industrial, con un aporte de 25 y 24%, respectivamente.

También en esta tabla se muestra que los compuestos tóxicos que más se emiten en la ZMVM es el tolueno, con 48 000 t; el metanol, con 18 400 t, y los isómeros de xileno, con 15 300 t, que en suma aportan 43% de las emisiones totales de contaminantes tóxicos. En la tabla 8 se muestran de forma desagregada las emisiones de todas las categorías registradas en el inventario de emisiones de contaminantes tóxicos.

Es importante mencionar que las emisiones de contaminantes tóxicos se empezaron a calcular a partir del año 2004, y que en esta administración se elaboró la estima-

Gráfica 17. Tendencia de las emisiones de tóxicos generadas en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2006, 2008 y 2010



Fuente: DGGCA de la SMA.

ción correspondiente a los años 2006, 2008 y 2010. En la gráfica 17 se muestra que la generación de emisiones de contaminantes tóxicos disminuyó ligeramente en los cuatro años previos a 2010.

Inventarios de compuestos de efecto invernadero

En la actualidad, el cambio climático es un problema ambiental que presenta un desafío a superar por la sociedad en general pues, a medida que aumentan las concentraciones de compuestos de efecto invernadero, los cambios en el clima se tornan más agresivos. Entre dichos cambios se pueden mencionar: el aumento de la temperatura, las sequías o lluvias intensas, el deshielo en los polos, la disminución de la biodiversidad y el daño en cultivos, con sus respectivas consecuencias económicas y sociales, entre otros.

Los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y los estudios de cambio climático se han enfocado generalmente en los principales gases compuestos, que son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Sin embargo, recientemente el carbono negro[6] proveniente de las partículas suspendidas ha sido identificado por su participación en el calentamiento global, además de ser un contaminante tóxico.[7]

[6] Es un componente de las partículas con importantes efectos en el cambio climático, por su propiedad refractaria y capacidad de absorción de la luz para convertirla en calor.
[7] T. C Bond, *Testimony for the hearing on black carbon and climate change*, s.l., U.S. House Committee on Oversight and Government, 2007. [fecha de consulta: 26 de marzo de 2011]. Disponible en: <http://oversight-archive.waxman.house.gov/documents/20071018110647.pdf>.

Consideraciones metodológicas

La metodología empleada para el cálculo de las emisiones de GEI, se basó en la establecida por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y su grupo de expertos en:

- Directrices para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.[8]
- Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.[9]

Para el caso de las emisiones de carbono negro, éstas fueron estimadas con base en perfiles de especiación de las $PM_{2.5}$.[10]

Emisiones de gases de efecto invernadero 2010

En la ZMVM, durante el año 2010, se generaron 54.7 millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (CO_2). Dichas emisiones son producidas básicamente por el consumo de energéticos (gasolinas, diesel, gas natural y gas licuado de petróleo), así como por la descomposición de la basura en los rellenos sanitarios.

Desglosando las emisiones por sector (véase la tabla 9), tenemos que la mayor cantidad de gases de efecto invernadero es generada por el sector transporte con 22.9 millones de toneladas equivalentes de CO_2, lo que representa 42% de las emisiones de la ZMVM, y por la industria con 11.9 millones, es decir, 22% del total; otra emisión importante se genera por la disposición de la basura en los rellenos sanitarios, en don-

[8] H. S. Eggleston, L. Buendía, K. Miwa *et al.*, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 5 vols., s.l., IGES, 2006 [fecha de consulta: 16 de marzo de 2011]. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>.

[9] J. Penman, D. Kruger e I. Galbally, *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, Sidney, IGES, 2000, 513 pp. [fecha de consulta: 16 de marzo de 2011]. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/gpgaum_es.html>.

[10] Y. Hsu y F. Divita Jr., *SPECIATE 4.2. Speciation Database Development Dowmentation*, s.l., EPA, 2009, 218 pp. [fecha de consulta: 14 de marzo de 2011]. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttnchie1/software/speciate>; W. Battye y K. Boyer, *Methods for Improving Global Inventories of Black Carbon and Organic Carbon Particulates*, s.l., EPA, 2002, 15 pp. [fecha de consulta: 13 de marzo de 2011]. Disponible en: <http://www.climatechangeinsights.com/uploads/file/additional%20information%20on%20inventories%20of%20US%20black%20carbon.pdf>.

Tabla 9. Emisiones de gases de efecto invernadero. Zona Metropolitana del Valle de México, 2010

Sector/categoría	Emisiones equivalentes de CO_2	
	[t/año]	[%]
Industrial	11 916 721	21.8
Transporte en vialidades	22 945 132	41.9
Servicios y comercios	2 206 756	4.0
Habitacional	4 557 266	8.3
Construcción	2 501 357	4.6
Agrícola	34 401	0.1
Ganadero	340 669	0.6
Disposición de residuos	10 212 968	18.7
Incendios	13 790	NS
Total	**54 729 060**	**100.0**

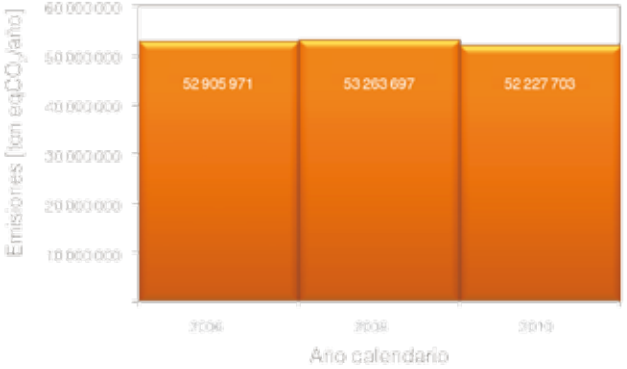
CO_2: dióxido de carbono; NS: no significativo.
Fuente: DGGCA de la SMA.

de se producen 10.2 millones de GEI, que representan 19% de las emisiones totales equivalentes de CO_2.

En la tabla 10 se muestran, de forma desagregada, las emisiones de todas las categorías registradas en el inventario de emisiones de GEI.

En la gráfica 18 se muestra la tendencia de la generación de emisiones de GEI, la cual nos indica que de 2006 a 2010 ocurrieron ligeros cambios.

Gráfica 18. Tendencia de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2006, 2008 y 2010



Fuente: DGGCA de la SMA.

Tabla 10. Inventario de emisiones de CO_2 equivalente desagregado por categoría. Zona Metropolitana del Valle de México, 2010

Sector	Emisiones [t CO_2-eq/año]
Industrial	**11 916 771**
Industria alimentaria	717 373
Industria de las bebidas y del tabaco	157 738
Fabricación de insumos textiles y acabado de textiles	177 442
Fabricación de productos textiles, excepto prendas de vestir	24 055
Fabricación de prendas de vestir	234 836
Curtido y acabado de cuero y piel, y fabricación de productos de cuero, piel y materiales sucedáneos	3 767
Industria de la madera	27 287
Industria del papel	718 627
Impresión e industrias conexas	61 493
Fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón	30 596
Industria química	812 764
Industria del plástico y del hule	257 995
Fabricación de productos a base de minerales no metálicos	1 984 655
Industrias metálicas básicas	2 027 060
Fabricación de productos metálicos	419 011
Fabricación de maquinaria y equipo	15 695
Fabricación de equipo de computación, comunicación, medición y de otros equipos, componentes y accesorios electrónicos	2 534
Fabricación de accesorios, aparatos eléctricos y equipo de generación de energía eléctrica	147 302
Fabricación de equipo de transporte	453 959
Fabricación de muebles, colchones y persianas	123 968
Otras industrias manufactureras	267 447
Generación de energía eléctrica	3 251 117
Fugas en instalaciones a gas LP	NS
HCNQ en la combustión de gas LP	50
Servicios y comercios	**847 743**
Combustión	847 668
Fugas en instalaciones a gas LP	NS
HCNQ en la combustión de gas LP	75
Habitacional	**4 557 141**
Combustión	4 555 916
Fugas en instalaciones a gas LP	650
HCNQ en la combustión de gas LP	575
Transporte carretero	**22 945 132**
Autos particulares	8 133 871
Camionetas SUV	2 672 186
Taxis	2 569 101
Vagonetas y combis	1 001 587
Microbuses	1 281 625

Continúa en la siguiente página

Viene de la página anterior

Sector	Emisiones [t CO_2-eq/año]
Pick up y vehículos de carga hasta 3.8 t	2 243 828
Tractocamiones	1 017 111
Autobuses	2 162 289
Vehículos de carga mayores a 3.8 t	1 706 502
Motocicletas	127 639
Metrobús	29 393
Ganadería	**340 669**
Fermentación entérica	316 175
Manejo de estiércol	24 494
Desechos	**10 212 968**
Rellenos sanitarios	8 695 343
Tratamiento de aguas residuales	1 517 625
Otras fuentes	**3 908 636**
Total	**54 729 060**

NS: no significativo. CO_2: dióxido de carbono; HCNQ: hidrocarburos no quemados.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Emisiones de carbono negro 2010

El carbono negro es un aerosol primario y se emite principalmente por procesos de combustión incompleta en la quema de combustibles fósiles, y aunque presenta un forzamiento radiativo tanto positivo como negativo,[11] su potencial calorífico es 460 veces más potente que una cantidad equivalente de CO_2. Asimismo, la emisión del carbono negro varía de acuerdo con la fuente que lo genera, y depende del tipo de combustible y de las estrategias de control utilizadas. Los resultados de algunos estudios mencionan que el contenido de carbono negro en la ZMVM oscila entre 11 y 20% de las partículas.[12] Sin embargo, hay que considerar que las proporciones de car-

[11] El forzamiento radiativo positivo favorece el calentamiento global (más energía recibida que emitida) y el forzamiento radiativo negativo produce enfriamiento (más energía perdida que recibida).

[12] A. Retama, O. Rivera, F. Aldape *et al.*, "Black carbon and fine particle $PM_{2.5}$ elemental composition behavior in samples collected at two sampling sites in Mexico City", *10th. International Conference on Particle Induced x-ray Emission and its Analytical Applications PIXE 2004*, Portoroz, Eslovenia, 4 al 8 de junio de 2004 [fecha de consulta: 11 de febrero de 2011]. Disponible: <http://pixe2004.ijs.si/proceedings/htm/pdf/0925.pdf>; J. C. Chow, J. G. Watson, S. A. Edgerton *et al*; "Chemical composition of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Mexico City during winter 1997"; *The Science of the Total Environment*, vol. 287, núm 3, 2002, pp. 177-201 [fecha de consulta: 9 de febrero de 2011]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969701009822>; D. Salcedo, T. B. Onasch, K. Dzepina *et al.*, "Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA-2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: results from the CENICA Supersite", *Atmospheric Chemistry Physics*, vol. 6 2006, pp. 925-946 [fecha de consulta: 2 de marzo de 2011]. Disponible: < http://www.atmos-chem-phys.net/6/925/2006/acp-6-925-2006.html>.

bono negro en las partículas dependen de la abundancia y el tipo de fuentes contaminantes que se localicen en los sitios de muestreo, así como de los horarios de operación.

Las emisiones de carbono negro en la ZMVM durante el año 2010 se estimaron en 2 021 t, siendo el sector transporte, con 76%, el que aporta la mayor cantidad de esta emisión. La tabla 11 presenta las emisiones de carbono negro en la ZMVM, desagregadas por sector.

Cabe destacar que el carbono negro emitido por el transporte en las vialidades de la ZMVM representa 55% de las emisiones de partículas $PM_{2.5}$ que genera este mismo sector.

En la tabla 12 se muestran, de forma desagregada, las emisiones de todas las categorías registradas en el inventario de carbono negro.

Tabla 11. Emisiones de carbono negro en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2010

Sector o categoría	Emisiones	
	t/año	%
Industrial	165	8.2
Servicios/comercios	97	4.8
Habitacional	18	0.9
Transporte vial	1 535	76.0
Vialidades sin/con pavimento	33	1.6
Otros	173	8.6
Total	**2 021**	**100.0**

Fuente: DGGCA de la SMA.

Inventario de emisiones carbon*n*

De manera adicional al ejercicio de elaboración de los inventarios metropolitanos, y con la finalidad de dar cumplimiento al artículo cuarto del Pacto Climático Global de Ciudades o Pacto de la Ciudad de México, firmado el 21 de noviembre de 2010, se desarrolló el registro de emisiones de GEI del año 2010 para el Distrito Federal. Con esta información se reportan anualmente los avances y se rellena el Registro Climático de las Ciudades Carbon*n* (CCR Carbon*n*), que se encuentra ubicado en la Ciudad de Bonn, Alemania, y ha sido el registro a través del cual las ciudades miden, reportan y verifican las reducciones de sus emisiones de gases efecto invernadero para el cumplimiento de los compromisos en dicho Pacto.

Tabla 12. Inventario de emisiones de carbono negro desagregado por categoría. Zona Metropolitana del Valle de México, 2010

Sector	Emisiones [t/año]
Fuentes puntuales	**165**
Industria alimentaria	7
Industria de las bebidas y del tabaco	2
Fabricación de insumos textiles y acabado de textiles	5
Fabricación de productos textiles, excepto prendas de vestir	NS
Fabricación de prendas de vestir	4
Curtido y acabado de cuero y piel, y fabricación de productos de cuero, piel y materiales sucedáneos	7
Industria de la madera	1
Industria del papel	14
Impresión e industrias conexas	1
Fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón	NS
Industria química	14
Industria del plástico y del hule	2
Fabricación de productos a base de minerales no metálicos	47
Industrias metálicas básicas	7
Fabricación de productos metálicos	4
Fabricación de maquinaria y equipo	NS
Fabricación de equipo de computación, comunicación, medición y de otros equipos, componentes y accesorios electrónicos	NS
Fabricación de accesorios, aparatos eléctricos y equipo de generación de energía eléctrica	2
Fabricación de equipo de transporte	2
Fabricación de muebles, colchones y persianas	NS
Otras industrias manufactureras	1
Generación de energía eléctrica	45
Fuentes de área	**310**
Combustión comercial/institucional	3
Combustión habitacional	18
Combustión de equipos agrícolas	NS
Operación de aeronaves	25
Caminos pavimentados	15
Caminos sin pavimentar	18
Otras fuentes de área	171
Asados al carbón	59
Construcción	1
Agricultura	NS
Fuentes móviles	**1 535**
Autos particulares	70
Camionetas SUV	23
Taxis	25
Vagonetas y combis	9

Continúa en la página siguiente

Viene de la página anterior

Sector	Emisiones [t/año]
Microbuses	17
Pick up y vehículos de carga hasta 3.8 t	20
Tractocamiones	904
Autobuses	163
Vehículos de carga mayores a 3.8 t	282
Motocicletas	18
Metrobús	4
Vegetación y suelos	**NS**
Erosión eólica del suelo	NS
Total	**2010**

NS: no significativo.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Por las actividades que desarrollan los habitantes del Distrito Federal, se emiten 36 millones de toneladas equivalentes de GEI (véase la tabla 13). Esta cantidad incluye, además de las emisiones generadas por las fuentes ubicadas dentro del Distrito Federal, las emisiones originadas fuera del área de estudio por el consumo de electricidad que demandan las actividades desarrolladas dentro del territorio del Distrito Federal y las emisiones causadas por la disposición final de la basura en el relleno sanitario Bordo Poniente.

La tabla 13 muestra que, en los 36 millones de toneladas equivalentes de GEI generados, las actividades de la comunidad en suma contribuyen con 73%, y las del gobierno local, con 27%. La comunidad tiene una contribución importante con los sectores: transporte (37.8%), industria (17.3%) y residencial (11.2%), que en total aportan 63.3% de las emisiones; y, por su parte, el gobierno local, a través de los sectores de desechos y transporte, aporta 17.4 y 7.7%, respectivamente.

Entre las actividades del GDF que generan emisiones de GEI están: el servicio público proporcionado a la comunidad en edificios e instalaciones de gobierno; la operación de la infraestructura de alumbrado público y semaforización vial; el bombeo de agua, y la disposición final de residuos. El GDF también tiene a su cargo otras fuentes y servicios que son emisores de GEI, como la maquinaria y el equipo de construcción, y en el contexto de movilidad, tiene a su cargo vehículos como apoyo para el desarrollo de sus actividades; además brinda al público servicios de transporte

de pasajeros a través del Sistema de Transporte Colectivo-Metro, la Red de Transporte de Pasajeros, el Servicio de Transportes Eléctricos, el Metrobús y dirige la operación de algunas industrias.

Las actividades realizadas por el GDF en el año 2010 generaron 9.8 millones de toneladas de GEI. En la tabla 14 se muestran las categorías que contribuyen en mayor proporción a la emisión total del GDF, las cuales corresponden a la disposición final de residuos sólidos, con 63%; a los vehículos que no circulan por vialidades, con 26.0%; la energía

Tabla 13. Emisiones totales de gases de efecto invernadero. Distrito Federal, 2010 (Carbonn)

Sector		Emisiones	
		t eq CO_2	%
Gobierno local	Edificios	167 545	0.5
	Instalaciones	547 609	1.5
	Transporte	2 789 037	7.7
	Desechos	6 264 460	17.4
	Otras emisiones	21	NS
	Total gobierno	9 768 672	27.1
Comunidad	Residencial	4 019 200	11.2
	Comercial	1 978 725	5.5
	Industria	6 210 483	17.3
	Transporte	13 593 716	37.8
	Desechos	405 951	1.1
	Otras emisiones	24 756	0.1
	Total comunidad	26 232 831	72.9
Total		**36 001 503**	**100.0**

CO_2: dióxido de carbono; NS: no significativo.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Tabla 14. Contribución por categoría de gases de efecto invernadero generados por las actividades del gobierno en el Distrito Federal, 2010 (Carbonn)

Categoría	Emisiones [t eq CO2]	%
Disposición de residuos sólidos	6 173 761	63.2
Vehículos que no circulan por vialidades	2 536 912	26.0
Bombeo de agua (energía)	351 461	3.6
Vehículos que circulan por vialidades	252 125	2.6
Alumbrado público y semáforos	185 477	1.9
Edificios no residenciales	189 145	1.7
Otros sectores	167 545	1.0
Total	**9 856 426**	**100.0**

CO_2: dióxido de carbono.
Fuente: DGGCA de la SMA.

Tabla 15. Contribución por categoría de gases de efecto invernadero generados por las actividades de la comunidad en el Distrito Federal, 2010 (Carbonn)

Sector	Emisiones [t eq CO_2]	%
Vehículos que circulan por vialidades	12 173 081	46.4
Otras plantas industriales	6 103 226	23.3
Casas independientes	3 877 783	14.8
Comercial	1 978 725	7.5
Vehículos que no circulan por vialidades	1 420 635	5.4
Otras	679 381	2.6
Total	**26 232 831**	**100.0**

CO_2: dióxido de carbono.
Fuente: DGGCA de la SMA.

asociada con el bombeo de agua genera 3.6% y otras actividades aportan el 7.2% restante.

Las emisiones de GEI atribuibles a la comunidad se generan por las actividades cotidianas que realiza la sociedad dentro del Distrito Federal. En general, se pueden listar los procesos de combustión industrial, de consumo de electricidad y uso de transporte como las principales actividades generadoras de GEI. En la tabla 15 se observa que los vehículos que circulan por vialidades contribuyen con la mayor cantidad de emisiones totales, con un aporte de 46.4%; el sector industrial y las viviendas independientes contribuyen con 23.3 y 14.8%, respectivamente. El resto de las categorías aportan, en conjunto, el 15.5% restante.

Recomendaciones

Los resultados nos indican que son 12 categorías de fuentes emisoras las que generan las mayores cantidades de emisiones multicontaminantes (contaminantes criterio, tóxicos y compuestos de efecto invernadero) las cuales representan, del total que se genera en la ZMVM, 74 y 66% de las emisiones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente; de los precursores de ozono, 56% de los óxidos de nitrógeno y 35% de compuestos orgánicos volátiles; de los contaminantes tóxicos, 39%; del carbono negro, 64%, y de gases de efecto invernadero, 55 por ciento.

Por lo anterior, para obtener un mayor beneficio ambiental es recomendable que los programas, medidas y acciones que se implementen en la ZMVM para reducir las

emisiones estén dirigidos a las categorías de fuentes mostradas en el cuadro 4.

Para potenciar aún más la reducción de emisiones de COV y contaminantes tóxicos, podemos agregar medidas dirigidas a reducir las emisiones de los productos de uso doméstico como los de limpieza, los del cuidado personal, los que sirven para el cuidado del auto, adhesivos, selladores y plaguicidas, dado que el uso de estos productos aportan 11% de los COV y 14% de los tóxicos generados por todas las fuentes emisoras ubicadas en la ZMVM.

En general, es necesario realizar estudios de las diferentes fuentes de emisión para actualizar los perfiles de emisiones horarias en todas las fuentes o sectores contaminantes; asimismo, contar con la asignación de un presupuesto que permita la elaboración de factores de emisión locales como fuentes móviles, industria química, industria alimentaria, erosión del suelo, uso de solventes, emisiones de polvo fugitivo de las vialidades pavimentadas y no pavimentadas.

Con la finalidad de continuar fortaleciendo los inventarios de emisiones se requiere realizar estudios que arrojen datos de actividad local en relación con los procesos de cocción de alimentos en comercios ambulantes, y las actividades de demolición y construcción de obras.

Es necesario elaborar estudios que permitan cuantificar y caracterizar los niveles de actividad de la flota vehicular, además de considerar el número de unidades foráneas que circulan en la ZMVM.

En específico, para mejorar la cuantificación de las emisiones de partículas, es preciso desarrollar estudios y hacer mediciones continuas relacionadas con los suelos, como

Cuadro 4. Categorías de fuentes estratégicas para el control de emisiones multicontaminantes y de efecto invernadero. Zona Metropolitana del Valle de México, 2010

Núm.	Categoría de fuente	Núm.	Categoría de fuente
1	Autos particulares (sedan y camionetas SUV)	7	Fabricación de productos a base de minerales no metálicos
2	Taxis	8	Procesos de combustión habitacional de estufas y boilers
3	Tractocamiones	9	Recubrimiento de superficies arquitectónicas
4	Autobuses	10	Rellenos sanitarios
5	Motocicletas	11	Caminos pavimentados
6	Industria química	12	Caminos sin pavimentar

de la humedad y la cantidad de material que se puede suspender. Estos datos deberán obtenerse para diferentes áreas y estaciones del año, ya que, si bien las características del suelo son factores importantes, las condiciones meteorológicas hacen una gran diferencia en su acumulación.

Se recomienda incluir en la base de datos del Programa de Verificación Vehicular Obligatoria (PVVO) la lectura del odómetro para conocer con menor grado de incertidumbre los datos de actividad de la flota vehicular.

Asimismo, se requiere consensuar con la SEMARNAT y las autoridades ambientales de los estados ubicados en la zona centro de México, el desarrollo de un inventario regional de emisiones que permita la modelización numérica de la dispersión de contaminantes para mejorar los resultados de episodios de interés o con fines de establecer un pronóstico de la calidad del aire a corto plazo en la ZMVM.

Para aumentar la capacidad de desarrollo de esta herramienta de gestión de la calidad del aire, es necesario fortalecer con recursos económicos, humanos y técnicos a la Dirección de Área encargada de desarrollar los inventarios de emisiones.

Se deberán instrumentar medidas para incentivar al sector industrial y de servicios en la entrega del informe o reporte que contiene la información relacionada con la elaboración del inventario de emisiones de estos sectores.

También habrá de gestionarse la integración actualizada de una base única y común del sector industrial entre las diferentes autoridades ambientales (local y federal) de la ZMVM. Es imprescindible establecer estrategias de control de calidad de dicho reporte para disminuir el grado de incertidumbre en el cálculo de las emisiones de fuentes puntuales y de servicios.

Se requiere, asimismo, desarrollar un programa de capacitación para el personal encargado de elaborar los inventarios de emisiones.

Por último, deberá iniciarse el desarrollo de los inventarios de emisiones de dioxinas y furanos, y proporcionarse capacitación para el mejoramiento del inventario de carbono negro.

III
Modelación de la calidad del aire

Modelos operativos

Para proporcionar el servicio de modelación numérica y estimar el beneficio derivado de la implementación de medidas de control de emisiones, y para analizar otros factores relacionados con la calidad del aire en la Ciudad de México, actualmente se dispone de modelos matemáticos para evaluar las condiciones meteorológicas (MM5, WRF y CALMET), la dinámica tridimensional de las concentraciones de contaminantes atmosféricos (MCCM), determinar el origen y destino de emisiones extraordinarias (HYSPLIT), y simular la dispersión de contaminantes en escala urbana (CALPUFF) y microescala (CALPUFF y AERMOD).

Multiscale Climate Chemistry Model (MCCM)

Los modelos numéricos fotoquímicos, como el MCCM, están orientados al análisis de la dinámica atmosférica que determina las concentraciones de las especies químicas en superficie y en altura.

Dentro de los escenarios modelados con el MCCM en la presente administración, se pueden citar los siguientes:

a) Variación de las concentraciones de ozono por la aplicación de medidas de restricción vehicular.
b) Estimación de las concentraciones de ozono al aplicar medidas de control de emisiones incluidas en el Plan Verde.
c) Contribución de las principales medidas de control de emisiones incluidas en el PROAIRE 2011-2020.
d) Estimación de ozono asociado con la aplicación del PVVO en la ZMVM.

Modelos meteorológicos Mesoscale Modeling System (MM5) y Weather Research Forecasting (WRF)

MM5 está basado en las ecuaciones de conservación de masa, vapor de agua, energía, momento y la ecuación de estado de los gases ideales, y utiliza un sistema de coordenadas vertical que sigue la topografía del terreno. Permite simular y predecir los campos de viento desde la escala sinóptica hasta la microescala.

WRF es un modelo que comparte muchos fundamentos de MM5, pero que está programado de una forma más estructurada y modular, lo que permite la incorporación de innovaciones técnicas y científicas de forma más simple.

Cabe mencionar que MM5 o WRF son utilizados para generar los campos meteorológicos tridimensionales requeridos en la aplicación del modelo HYSPLIT para el análisis de los incrementos extraordinarios de SO_2.

Modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)

En la presente administración se consolidó la aplicación del modelo de trayectoria FLEXPART para detectar la ubicación de las posibles fuentes asociadas con las concentraciones extraordinarias de SO_2. A partir del año 2009 y hasta la fecha, para reforzar esta actividad se incorporó el uso del modelo HYSPLIT por su potencial gráfico en el análisis de resultados.

La figura 12 muestra la distribución geográfica de los municipios y delegaciones donde se estimó que pudieron haberse originado las emisiones vinculadas con las concentraciones extraordinarias de SO_2 en el periodo 2007 a 2012. Como se puede apreciar en dicha figura, Cuautitlán Izcalli es el municipio donde pueden estar establecidas más fuentes relacionadas con estas emisiones, seguido de Tepeji del Río, Tula de Allende y Tultitlán. Es decir, se estima que tales emisiones tienen su origen principalmente en la parte sur-suroeste del estado de Hidalgo y la región noreste del Estado de México, al norte de la Ciudad de México.

En cuanto a los casos de incrementos extraordinarios de SO_2 que se han analizado durante los últimos años, los

resultados señalan que las estaciones de monitoreo donde han sido medidas concentraciones de SO_2 promedio horario superiores a 200 ppb son TLI, VIF, LLA, VAL, FAC, SAG, TLA y CAM. TLI es el sitio con más concentraciones extraordinarias (13), seguido de VIF (6) y de las estaciones restantes. También se confirmó que tales concentraciones superiores a 200 ppb de SO_2 son detectadas por la noche en el periodo de las 23:00 a las 5:00 horas.

Asimismo se estimó que, en casi 75% de los episodios modelados, las emisiones extraordinarias fueron liberadas de las 21:00 a las 3:00 horas del día siguiente, por lo que, al observar los periodos de medición de concentraciones extraordinarias y de generación de las emisiones asociadas a estas concentraciones, se aprecia que las últimas suelen transportarse comúnmente entre dos y seis horas antes de llegar a alguna de las estaciones de monitoreo atmosférico del Norte de la ZMVM.

AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD)

En el 2010, en nuestra ciudad capital, se realizaron las principales celebraciones de los 100 años de la Revolución mexicana y 200 años de la Independencia de México. Por

Figura 12. Municipios determinados como origen de emisiones extraordinarias, 2007-2012

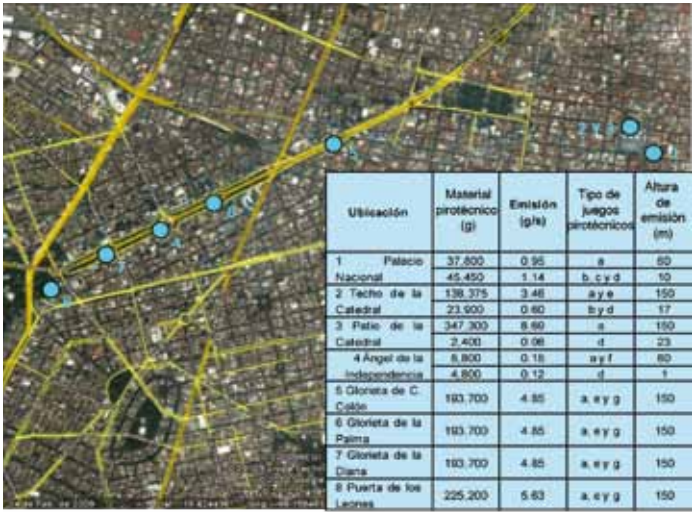
Municipio ó Delegación	Año y número de emisiones extraordinarias
Tula de Allende	2007 (3) y 2012 (2)
Atotonilco de Tula	2010 (1)
Tepeji del Río	2010 (1) y 2011 (4)
Huehuetoca	2012 (1)
Teloyucan	2010 (1)
Nextlalpan	2011 (1)
Cuautitlán	2008 (4)
Cuautitlán Izcalli	2007 (2), 2009 (2) y 2011 (2)
Tultitlán	2008 (2) y 2011 (1)
Coacalco	2008 (1)
Naucalpan	2007 (1)
Melchor Ocampo	2010 (1)
Azcapotzalco	2007 (1)
Gustavo A. Madero	2007 (1)

Fuente: DGGCA de la SMA.

ese motivo, durante los festejos llevados a cabo para conmemorar el segundo evento, la quema de fuegos artificiales fue mayor a la de otras festividades similares de años previos. En este sentido, para obtener una proyección sobre el posible impacto que tendrían las emisiones liberadas en las festividades mencionadas, se optó por calcular la contaminación asociada con la quema de juegos pirotécnicos durante la conmemoración de los 200 años de la Independencia mediante la aplicación del modelo AERMOD.

La figura 13 muestra las cantidades de material pirotécnico que se quemaron a las 23:00 horas del 15 de septiembre de 2010 en el entorno del Zócalo capitalino y varios puntos de Paseo de la Reforma.

Figura 13. Sitios donde se realizó la quema de juegos pirotécnicos, altura de emisión de los mismos y emisiones estimadas* por la combustión de dicho material



Ubicación	Material pirotécnico (g)	Emisión (g/s)	Tipo de juegos pirotécnicos	Altura de emisión (m)
1 Palacio Nacional	37,600	0.95	a	60
	45,450	1.14	b, c y d	10
2 Techo de la Catedral	138,375	3.46	a y e	150
	23,900	0.60	b y d	17
3 Patio de la Catedral	347,300	8.69	a	150
	2,400	0.06	d	23
4 Ángel de la Independencia	6,800	0.18	a y f	60
	4,800	0.12	d	1
5 Glorieta de C. Colón	193,700	4.85	a, e y g	150
6 Glorieta de la Palma	193,700	4.85	a, e y g	150
7 Glorieta de la Diana	193,700	4.85	a, e y g	150
8 Puerta de los Leones	225,200	5.63	a, e y g	150

*Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventario de Emisiones-Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, septiembre de 2010.
a: Cometa, b: Mina, c: Bengala/Cascada, d: Fuentes, e: Crisantemo, f: Jetts y g: Candela.
Fuente: DGGCA de la SMA.

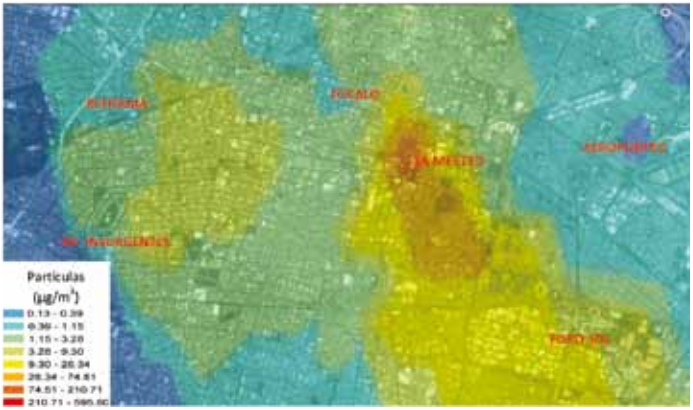
La modelación de dispersión de partículas provenientes de la quema de juegos pirotécnicos en el Zócalo y en Paseo de la Reforma mostró que el transporte de partículas sería

principalmente hacia el sureste de su origen; de este modo, se estimó que las concentraciones de partículas más agudas se podrían presentar a una distancia de 800 m al sureste de la Bandera Nacional. La zona con concentraciones agudas (área roja en la figura 14) tendría una cobertura de afectación menor a 900 m^2; así se estimó que tales concentraciones no perdurarían más allá de la hora en que se dio la emisión y que, por su ubicación al sureste del Zócalo, la zona de La Merced sería alcanzada por concentraciones de entre 74 y 210 $\mu g/m^3 \cdot h$, provenientes de los juegos pirotécnicos. Se estimó que los niveles de concentración de partículas asociadas con las emisiones producidas en la quema de estos juegos en el Zócalo y Reforma, no alcanzarían niveles para declarar precontingencia ambiental.

Otros modelos (CALMET/CALPUFF)

Los modelos numéricos de calidad del aire descritos previamente han consolidado la capacidad operativa en materia de modelización numérica de la dispersión de contaminantes, para estimar la contribución de fuentes de emisión a las concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos, así como de otros factores ambientales que influyen en la calidad del aire. En este sentido, los modelos CALMET y CALPUFF son sistemas que por sí mismos pueden apoyar la generación de información para caracterizar las condicio-

Figura 14. Transporte de partículas de la quema de juegos pirotécnicos durante las festividades del Bicentenario



Fuente: DGGCA de la SMA.

nes que determinan la contaminación atmosférica de una región. Por ello han sido incorporados como herramientas para apoyar el análisis de dispersión en los incrementos extraordinarios de SO_2 y para generar micrometeorología de la ZMVM a partir de mediciones en la región.

Recomendaciones

Es necesario:

- Ampliar la infraestructura del área de modelación con personal, equipo de computación y sistemas de información geográfica para apoyar las actividades de esta área.
- Dar continuidad a la actualización y la implementación de los modelos de dispersión ya instalados y explorar el uso de otros.
- Incorporar modelos de transporte para conocer con mayor precisión el comportamiento de las emisiones de este sector, a fin de aumentar el análisis de emisiones de fuentes móviles.
- Impulsar la instalación de los sistemas de monitoreo vehicular en tiempo real para alimentar y calibrar los modelos de transporte y poder evaluar con mayor precisión las medidas para reducción de tramos de viaje.

Bibliografía

Battye, W. y K. Boyer, *Methods for Improving Global Inventories of Black Carbon and Organic Carbon Particulates*, s.l., EPA, 2002 15 pp. [fecha de consulta: 13 de marzo de 2011]. Disponible en: <http://www.climatechangeinsights.com/uploads/file/additional%20information%20on%20inventories%20of%20US%20black%20carbon.pdf>

Bond, T. C., *Testimony for the Hearing on Black Carbon and Climate Change*, s.l., U.S. House Committee on Oversight and Government, 2007 [fecha de consulta: 26 de marzo de 2011]. Disponible en: <http://oversight-archive.waxman.house.gov/documents/20071018110647.pdf>.

Chow J.C., J.G. Watson, S.A. Edgerton *et al.*, "Chemical composition of PM2.5 and PM10 in Mexico City during winter 1997", *The Science of the Total Environment*, vol. 287, núm. 3, 2002, pp. 177- 201 [fecha de consulta: 9 de febrero de 2011]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969701009822>.

Eggleston H.S., L. Buendia, K Miwa *et al.*, 2006 IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 5 vols., s.l., IGES, 2006 [fecha de consulta: 16 de marzo de 2011]. Disponible en:< http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>.

Hsu, Y., F. Divita Jr., *SPECIATE 4.2. Speciation Database Development Documentation*, s.l., EPA, 2009, 218 pp. [fecha de consulta: 14 de marzo de 2011]. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttnchie1/software/speciate/>.

Penman J., D. Kruger e I. Galbally, *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, Sydney, IGES, 2000, 513 pp. [fecha de consulta: 16 de marzo de 2011]. <Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/gpgaum_es.html>.

Retama, A. y O. Rivera, "Black carbon and fine particle $PM_{2.5}$ elemental composition behavior in samples collected at two sampling sites in Mexico City", *10th International Conference on Particle Induced X-ray Emission and its Analytical Applications PIXE 2004*, Portoroz, Eslovenia, 4 al 8 de junio de 2004

[fecha de consulta: 11 de febrero de 2011]. Disponible en: <http://pixe2004.ijs.si/proceedings/htm/pdf/0925.pdf>

Reza, J., G. Salazar y A. Trejo, "Evaluation of composition and evaporation behavior of commercial thinner samples expended in Mexico City", *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 13, núm.2, 1997, pp. 87-95 [fecha de consulta: 17 de marzo de 2010]. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/370/37013205.pdf>.

Salcedo, D., T. B. Onasch, K. Dzepina *et al.*, "Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA-2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: results from the CENICA Supersite", *Atmospheric Chemistry Physics*, vol. 6, 2006, pp. 925-946 [fecha de consulta: 2 de marzo de 2011]. Disponible en:< http://www.atmos-chem-phys.net/6/925/2006/acp-6-925-2006.html>.

Glosario

Siglas	Definición
ACO	Estación Acolman
AEROMOD	AMS/EPA Regulatory Model
AICM	Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México
AJU	Estación Ajusco
ARA	Estación Aragón
ATI	Estación Atizapán
AZC	Estación Azcapotzalco
BTEX	Benceno, tolueno, etilbenceno, xileno
CAM	Estación Camarones
CAM	Comisión Ambiental Metropolitana
CCR Carbon*n*	Registro Climático de las Ciudades Carbon*n*
CES	Estación Cerro de la Estrella
CH_4	Metano
CHO	Estación Chalco
CICA	Centro de Información de Calidad del Aire
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
COR	Estación Corena
COT	Compuestos orgánicos totales
COV	Compuestos orgánicos volátiles
COY	Estación Coyoacán
CUA	Estación Cuajimalpa
CUT	Estación Cuautitlán
DEVA	Dirección Ejecutiva de Vigilancia Ambiental de la SMA
DIC	Estación Diconsa
DGGCA	Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire
DMA	Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SMA.
DOAS	Espectroscopía de absorción diferencial óptica
EAC	Estación ENEP Acatlán
EAJ	Estación Ecoguardas Ajusco
EDL	Estación Desierto de los Leones
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
FAC	Estación FES Acatlán
GDF	Gobierno del Distrito Federal
GEI	Gases de efecto invernadero
HAN	Estación Hangares
HGM	Estación Hospital General de México

Siglas	Definición
HYSPLIT	Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory
IBM	Estación IBM
IMECA	Índice metropolitano de calidad del aire
IMP	Estación Instituto Mexicano de Petróleo
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INSP	Instituto Nacional de Salud Pública
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
IPN	Instituto Politécnico Nacional
IUV	Índice de radiación solar ultravioleta
IZT	Estación Iztacalco
LAG	Estación Lagunilla
LLA	Estación Los Laureles
LOM	Estación Lomas
LPR	Estación La Presa
LVI	Estación La Villa
MCCM	Multiscale Climate Chemistry Model
MCM	Estación Museo de la Ciudad de México
MER	Estación Merced
MIN	Estación Metro Insurgentes
MM5	Mesoscale Modeling System
MON	Estación Montecillo
MPA	Estación Milpa Alta
NEZ	Estación Nezahualcóyotl
NO	Monóxido de nitrógeno
NO_2	Dióxido de nitrógeno
N_2O	óxido nitroso
NOM	Norma Oficial Mexicana
NO_X	Óxidos de nitrógeno
O_3	Ozono
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PB	Plomo
PCAA	Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas
PED	Estación Pedregal
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PER	Estación Perla
PICCA	Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica en el Valle de México
PM_{10}	Partículas menores a 10 micrómetros
$PM_{10-2.5}$	Partículas gruesas
$PM_{2.5}$	Partículas menores a 2.5 micrómetros
PROAIRE	Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México
PST	Partículas suspendidas totales

Siglas	Definición
PVVO	Programa de Verificación Vehicular Obligatoria
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
REDDA	Red de Depósito Atmosférico
REDMA	Red Manual de Monitoreo Atmosférico
REDMET	Red de Meteorología y Radiación Solar
SAG	Estación San Agustín
PLA	Estación Plateros
SFE	Estación Santa Fe
SHA	Estación Secretaría de Hacienda
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico
SIVEV	Sistema de Verificación Vehicular
SJA	Estación San Juan de Aragón
SMA	Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal
SNT	Estación San Nicolás Totoloapan
SO_2	Dióxido de azufre
SUR	Estación Santa Úrsula
TAC	Estación Tacuba
TAH	Estación Tláhuac
TAX	Estación Taxqueña
TEC	Estación Cerro del Tepeyac
TEP	Estación Tepeyac
TLA	Estación Tlalnepantla
TLI	Estación Tultitlán
TPN	Estación Tlalpan
UAM	Universidad Autónoma Metropolitana
UAX	Estación UAM Xochimilco
UBA	Ultrabajo contenido de azufre
UIZ	Estación UAM Iztapalapa
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UV	Radiación solar ultravioleta
VAL	Estación Vallejo
VIF	Estación Villa de las Flores
WRF	Weather Research Forecasting
XAL	Estación Xalostoc
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

Índice

Introducción 3

I. Monitoreo y calidad del aire 5
- Antecedentes 5
  - El monitoreo de la calidad del aire en la Ciudad de México 7
- Operación del Sistema de Monitoreo Atmosférico 12
  - Desempeño de los subsistemas 12
  - Auditorías externas 14
  - Centro de Datos de la Dirección de Monitoreo Atmosférico 16
  - Recursos humanos 17
- Calidad del aire en la Ciudad de México 18
  - Cumplimiento de las normas oficiales mexicanas de calidad del aire 20
  - Ozono 21
  - Monóxido de carbono 23
  - Dióxido de azufre 26
  - Dióxido de nitrógeno 27
  - Partículas suspendidas 27
  - Plomo 33
  - Eventos de activación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas 34
  - Detección de eventos extraordinarios de contaminación 36
  - Depósito atmosférico en la Ciudad de México 37
  - Radiación solar ultravioleta 38
- Reforzamiento y modernización del Sistema de Monitoreo Atmosférico 40
  - Diseño e instalación de una red de monitoreo para evaluar hidrocarburos tóxicos y reactivos en el aire ambiente de la ZMVM 40
  - Rediseño del Sistema de Monitoreo Atmosférico 43
  - El tránsito vehicular y su impacto en el ruido ambiental y la contaminación del aire en la Ciudad de México 49
  - Difusión de la información 52
- Recomendaciones 55

II. Inventarios de emisiones de la ZMVM 58
- Inventarios de contaminantes criterio 60
  - Mejoras metodológicas 60
  - Inventario de emisiones 2010 62
  - Evolución de las emisiones 2000-2010 70
- Inventarios de contaminantes tóxicos 72
  - Mejoras metodológicas 73
  - Inventario de emisiones 2010 74
- Inventarios de compuestos de efecto invernadero 77

Consideraciones metodológicas 78
Emisiones de gases de efecto invernadero 2010 78
Emisiones de carbono negro 2010 81
Inventario de emisiones carbon*n* 82
Recomendaciones 86

III. Modelación de la calidad del aire 89
Modelos operativos 89
Multiscale Climate Chemistry Model (MCCM) 89
Modelos meteorológicos Mesoscale Modeling System (MM5) y Weather Research Forecasting (WRF) 90
Modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) 90
AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD) 91
Otros modelos (CALMET/CALPUFF) 93
Recomendaciones 94

Bibliografía 95

Glosario 97