

An aerial photograph of Mexico City, showing a large, white, plume-like cloud or smoke rising from the city center. The sky is a deep blue, and the city below is partially obscured by a layer of white clouds. The text is centered over the image.

Calidad del aire en la Ciudad de México
Informe 2016

Miguel Ángel Mancera Espinosa
Jefe de Gobierno de la Ciudad de México

Tanya Müller García
Secretaria del Medio Ambiente

Beatriz Cárdenas González
Directora General de Gestión de la Calidad del Aire

Olivia Rivera Hernández
Directora de Monitoreo Atmosférico

Mónica Jaimes Palomera
Subdirectora de Análisis

Alfredo Alfonso Soler
Subdirector de Meteorología

Miguel Sánchez Rodríguez
Subdirector de Monitoreo

José Luis Del Río Jáuregui
Subdirector de Sistemas

Presentación

La Ciudad de México es el espacio que habitamos y compartimos más de ocho millones de personas, la preservación de sus recursos ambientales es una de las principales responsabilidades de la Secretaría del Medio Ambiente, en donde el aire es uno de los más importantes.

El deterioro de la calidad del aire es un problema común de los grandes centros urbanos alrededor del planeta, resultado de una demanda constante de servicios, transporte y energía. Es por ello que contar con un aire limpio es una de las principales aspiraciones de sus ciudadanos y uno de los retos más importantes para sus gobernantes. En el caso de la Ciudad de México, la mejora de la calidad del aire ha sido uno de los problemas más complejos a los que se han enfrentado diversas administraciones, a pesar de esto, se han conseguido logros importantes en las décadas recientes. Sin embargo, a medida que avanzamos en la solución del problema se presentan nuevos retos, que plantean nuevas preguntas científicas y que posiblemente requerirán soluciones novedosas. En la búsqueda de soluciones el monitoreo de la calidad del aire junto con los resultados de la investigación científica, proporciona el insumo más importante para entender los cambios en la dinámica atmosférica. Cada uno de los episodios de contaminación suele proporcionar lecciones valiosas sobre la complejidad de la gestión ambiental y proveer insumos importantes para mejorar las acciones y programas.

En los últimos años la gestión ambiental se ha dotado con más y mejores herramientas que incluyen modelos de simulación numérica, mejores inventarios de emisiones y más estaciones de monitoreo, esto con el propósito de fortalecer la actual toma de decisiones y generar mejor información que será de utilidad en el diseño de la siguiente generación de políticas ambientales.

En 2016 el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México cumplió 30 años de realizar la vigilancia continua de los niveles de contaminación del aire en la Ciudad de México y su área metropolitana, la información generada en este periodo es, sin duda, la evidencia más importante de los logros alcanzados. En este contexto, sirva este mensaje para presentar el Informe anual 2016 de la calidad del aire en la Ciudad de México.

La Dirección de Monitoreo Atmosférico

Redacción y diseño editorial
Armando Retama Hernández

Estadística
Mónica Jaimes Palomera, José Alberto Aguilar Juárez

Revisión
Olivia Rivera Hernández, Mónica Jaimes Palomera, Alfredo Alfonso Soler

D. R. © 2017
Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.
Plaza de la Constitución no. 1, 3^{er} piso, colonia Centro, delegación Cuauhtémoc, México D. F., C. P. 06068

La publicación en formato electrónico así como los compendios en archivos electrónicos que forman parte de esta publicación están protegidos bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.



Impreso y hecho en México
Printed and made in Mexico

La mención de marcas o compañías no implica que sean validadas o recomendadas por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. La Dirección de Monitoreo Atmosférico tomó todas las precauciones razonables para verificar la información contenida en esta publicación. La responsabilidad de la interpretación y uso del material recae en el lector. En ningún caso la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México podrá ser considerada responsable de daño alguno causado por el uso del documento por parte de terceros. Las opiniones expresadas por los autores, editores o grupos de expertos no representan necesariamente el criterio ni la política de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.

Citar este documento como:
Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. **Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2016**. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. Noviembre, 2017.

La información contenida en este documento es el resultado de un trabajo de equipo realizado por el personal técnico-operativo de la Dirección de Monitoreo Atmosférico, quienes cada día realizan un esfuerzo importante con dedicación y compromiso.

Dirección de Monitoreo Atmosférico

Olivia Rivera Hernández

Subdirección de Análisis

Mónica Jaimes Palomera, Isabel Graciela González Merino, Alejandro Jonathan Gallardo Pérez, Gerardo Samuel López Venegas, Eduardo Preciado Martínez, María Luisa Quintanar Chávez, David Javier González Bautista, José Alberto Aguilar Juárez.

Subdirección de Meteorología

Alfredo Alonso Soler, Marco Gabriel Hernández Hernández.

Subdirección de Monitoreo

J. J. Miguel Sánchez Rodríguez, Alfonso López Medina, Jorge Domínguez Ochoa, Arturo Galicia Zepeda, Juan Manuel Campos Díaz, Angélica Neria Hernández, Julio César Argueta Rodríguez, Fernando Alonso Vega Bernal, Raymundo Juárez Hernández, Adrián Pérez Narváez, Antonio Silva Hernández, José Gabriel Elías Castro, Salvador Cervantes Garduño, Eugenio Rafael López Arredondo, Eloy Contreras Sánchez, Jorge Hernández Hernández, Jorge Alberto Rodas Rivera, Jesusyael Jiménez Valdez, Ángel César Sánchez Martínez, Luis Adrián Cruz Alavez, Eloy Contreras Sánchez, Ernesto González Carmona, José Salvador Juárez Mendoza, María del Rocío Carmona Mártir, Fernando Serralde Medina, Jesús Arriaga Falconi, Oscar Hernández Castillo, Anabel Rivera Arenas, María Dolores Maya Rojas, Viviana Jacqueline Campos Torres, Donaldo Manuel Godínez Ángeles, Ulises Josué López Fabian.

Subdirección de Sistemas

José Luis del Río Jáuregui, Juan Manuel Arriaga Cosío, Mauricio Hernández Mote, Ramón Gaona Díaz, Leyda Castro Rodríguez, Julio César Martínez Alpizar, Gabriela Hernández Cruz, Miguel Ángel Veloz Lucas, María Gabriela Holguín Pacheco, Víctor Octavio Valdés Espinosa, Jorge Cornejo Martínez, Juan Carlos Rojano Gallardo.

Administración

Margarita Barrientos Contreras, Guadalupe Granados Gutiérrez, Francisco Serrano Vázquez, José Luis Cruz Fernández.

Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM (análisis del depósito atmosférico)

Dr. Humberto Bravo Álvarez, Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, Mtra. Ana Luisa Alarcón Jiménez, María del Carmen Torres Barrera.

Agradecemos a la Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventario de Emisiones por la información proporcionada para este documento.

Índice

Índice	6
Resumen ejecutivo	9
1. Comparación con las NOM	12
Efectos en la salud	14
Evaluación de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM)	19
2. El tiempo	26
Temperatura	27
Humedad relativa	31
Precipitación pluvial	32
Presión barométrica	34
Viento	35
Altura de mezclado	45
Radiación solar global	47
Índice de radiación solar ultravioleta	50
3. Calidad del aire	52
Dióxido de azufre	54
Óxidos de nitrógeno	58
Monóxido de carbono	63
Ozono	67
Partículas suspendidas	72
Índice de calidad del aire	78
Tendencias	81
4. Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas	94
Modificación de los valores de activación del PCAA	97
Eventos de activación del PCAA	98
Clasificación de los eventos	128
5. Depósito atmosférico	134
Composición iónica	137
Depósito atmosférico húmedo	140
Lluvia ácida	143
6. Carbono negro	146
7. Modelación	152
Antecedentes	153
Descripción del sistema	154
Modelo meteorológico	155
Modelo de emisiones	159
Modelo químico y de transporte	161
Referencias	165
Anexos	168

Dedicamos este informe a la memoria de dos queridas personas:

Dr. Humberto Bravo Álvarez (1930-2017) pionero del estudio de las ciencias ambientales en nuestro país, observador y crítico permanente de la gestión ambiental de nuestra ciudad, querido maestro y entrañable amigo.

Raymundo Juárez Hernández (1950-2016), compañero y amigo quien dedicó gran parte de su vida al monitoreo de la calidad del aire.

Resumen ejecutivo

El conglomerado urbano que integran la Ciudad de México y su área conurbada tiene un impacto desfavorable en la calidad del aire por la gran cantidad de fuentes de emisión que se concentran en un área geográfica relativamente pequeña, emitiendo grandes cantidades de contaminantes a la atmósfera. Esta situación se agrava por las características fisiográficas y meteorológicas de la cuenca de México que son propicias para la acumulación y transformación de la contaminación, principalmente durante la temporada seca. Es por ello que la contaminación del aire no puede entenderse como un problema exclusivo de la Ciudad de México, más bien se trata de un problema regional, como se ha demostrado a través de numerosas publicaciones científicas, inventarios de emisiones y resultados de modelación numérica. El área conurbada tiene un aporte importante a la emisión de contaminantes primarios y de precursores de compuestos secundarios, es por ello que cuando los flujos provienen del norte esta contribución se agrega a la generada por la Ciudad de México, acumulándose al sur por la presencia de las barreras físicas que forman las cadenas montañosas que rodean la cuenca, provocando eventos severos de contaminación que afectan a una población numerosa y a los bosques que aún sobreviven en esa región. Por otra parte, cuando las condiciones meteorológicas favorecen el movimiento de las masas de aire hacia el norte, las condiciones son favorables para la dispersión y en pocas ocasiones se presentan eventos graves de contaminación. Por lo tanto, el crecimiento continuo de la zona conurbada mantiene una presión constante sobre la calidad del aire de la Ciudad de México, es por ello que la reducción de la contaminación en la Ciudad de México requiere de la participación activa y coordinada con el gobierno del Estado de México y el Gobierno Federal, con esfuerzos proporcionales a la contribución de emisiones. La disparidad en las acciones de control por alguna de las partes tendrá un impacto negativo o atenuará los posibles beneficios de las acciones implementadas por la otra. La aportación de las fuentes de jurisdicción federal que tienen una contribución importante en la emisión de compuestos precursores del ozono y de los aerosoles secundarios. En este contexto, el monitoreo de la calidad del aire produce evidencia objetiva para proteger la salud pública, avanzar en el entendimiento de la dinámica atmosférica y el comportamiento de los contaminantes, así como evaluar los resultados de la gestión. Los datos del monitoreo se evalúan en un contexto regional, sin embargo, es importante identificar la situación por entidad por la responsabilidad que tiene cada una de ellas en el cumplimiento de la normatividad.

El año de 2016 se caracterizó por la presencia de sistemas meteorológicos de escala global y regional que tuvieron una influencia importante en los fenómenos asociados al problema de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México y su área metropolitana. Durante el primer semestre de 2016 el fenómeno de El Niño, en una de las fases más intensas registradas en las últimas décadas, tuvo una influencia importante en los registros de temperatura máxima en todo el país provocando valores récord en varias regiones. En marzo, la presencia de una inusual corriente de viento intenso asociada a la corriente de chorro subtropical, provocó días excepcionalmente limpios pero también cambios en el comportamiento de la capa límite atmosférica que, en presencia de condiciones anticiclónicas, provocaron un prolongado estancamiento de la contaminación que llevó a la activación de la Fase I del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.

Con respecto a la situación meteorológica el promedio de la temperatura anual fue de 16.4 °C, con una mínima de -4°C y máxima de 33.6 °C. El mes más cálido fue mayo con 19.5 °C, mientras que el más frío fue enero con 13.2 °C. El promedio de la humedad relativa fue de 57%. El promedio de la precipitación pluvial acumulada fue de 946 mm, alrededor del 85 % del volumen depositado se registró en la temporada de lluvia (mayo-octubre), las estaciones ubicadas al oeste registraron la mayor cantidad de lluvia. Durante la temporada de lluvia se observó la presencia de lluvia ácida. En cuanto al comportamiento del viento la velocidad promedio fue de 2.1 m/s, destaca el episodio ocurrido entre el 8 y el 11 de marzo cuando se observó un incremento importante en la velocidad del viento asociado a la corriente de chorro subtropical que provocó una calidad del aire inmejorable pero provocó daños importantes a la infraestructura urbana. Durante el año en alrededor del 60 % de los días la dirección predominante fue del norte, en aquellos días en los que se registraron velocidades bajas e intensa radiación solar se presentaron eventos severos de contaminación fotoquímica, en estos eventos el flujo canalizado de viento proveniente de Chalco fue determinante en la ubicación de las

concentraciones máximas de ozono. El valor promedio de la altura máxima de la capa límite atmosférica fue de 2746 msns, con un intervalo de 224 y 4414 msns, las mayores alturas se observaron entre marzo y mayo, mientras que noviembre registró las menores alturas. Por otra parte, en colaboración con el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (IG-UNAM) se instalaron 10 piranómetros para evaluar la radiación solar global en 10 sitios de monitoreo que forman parte de la REDMET, los resultados de los últimos dos años de medición indicaron que el promedio de la intensidad máxima diaria de la radiación global en 2015 fue de 845 W/m², mientras que en 2016 fue de 840 W/m². En cuanto a la radiación ultravioleta se registraron 27 días con una intensidad máxima en la categoría de ALTA, 196 días con intensidad máxima MUY ALTA y 131 días con una intensidad máxima EXTREMADAMENTE ALTA.

En cuanto al cumplimiento de la normatividad federal en materia de protección de la salud pública, los niveles de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono continuaron por debajo de los valores límite permisibles establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas vigentes. Mientras que las concentraciones de ozono, partículas menores a 10 µm y a 2.5 µm excedieron significativamente los valores límite de las normas respectivas. Con excepción del monóxido de carbono, las concentraciones del resto de los contaminantes superaron los valores guía de la Organización Mundial de la Salud.

El promedio anual de la concentración de dióxido de azufre estimado para todas las estaciones de monitoreo fue de 4.6 ppb. En los sitios ubicados en el territorio de la Ciudad de México el promedio fue de 4.4 ppb, mientras que para los ubicados en la conurbación del Estado de México fue de 4.9 ppb. Los promedios anuales de las concentraciones horarias de óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) en la zona metropolitana fueron 19, 36 y 45 ppb, respectivamente. De manera desagregada los promedios de las concentraciones de NO, NO₂ y NO_x para los sitios ubicados en el territorio de la Ciudad de México fueron 17, 28 y 44 ppb, respectivamente. El promedio anual del monóxido de carbono fue de 0.67 ppm, en las estaciones ubicadas en la Ciudad de México fue de 0.65 ppm, mientras que en las ubicadas en la zona conurbada fue de 0.70 ppm. En el caso de ozono la concentración promedio anual fue de 30 ppb, mientras que el promedio anual de las concentraciones máximas fue de 76 ppb; el valor límite para el promedio de una hora se superó un total de 856 horas distribuidas en 212 días, mientras que el promedio móvil de 8 horas superó el valor de la norma en 202 días. Las fracciones PM₁₀, PM_{10-2.5} y PM_{2.5} reportaron promedios anuales en la zona metropolitana de 43, 20 y 23 µg/m³, respectivamente, mientras que en la Ciudad de México los promedios anuales fueron 38, 17 y 22 µg/m³, respectivamente. En cuanto al índice de calidad del aire durante el año se reportaron 84 días con una calidad del aire BUENA o REGULAR, 262 días con una calidad del aire MALA, 19 días con calidad MUY MALA y 1 día con calidad del aire EXTREMADAMENTE MALA. Este año el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas se activó en 14 ocasiones por ozono, cuatro por Fase de Precontingencia y diez por Fase I de Contingencia. Es importante mencionar que en abril de 2016 la CAME modificó el PCAA eliminando la Fase de Precontingencia y reduciendo el umbral de activación de 180 (184 ppb) a 150 puntos (154 ppb).

Con respecto al año previo se lograron reducciones moderadas en los promedios anuales de monóxido de carbono (-13%), óxidos de nitrógeno (-6%), PM_{2.5} (-3.5%), dióxido de nitrógeno (-3%), dióxido de azufre (-1%) y partículas suspendidas totales (-1%). En ozono y PM₁₀ se registraron incrementos de 7.5 y 3%, respectivamente; el promedio anual de las concentraciones diurnas se incrementó en 4.3% con respecto a 2015. La reducción en la concentración de los principales contaminantes primarios sugiere que las políticas vigentes mantienen un impacto favorable en el control de emisiones, esto a pesar del crecimiento de la ciudad y su área metropolitana. En cuanto a la tendencia, se mantuvo un comportamiento descendente en la mayoría de los contaminantes con excepción de ozono y PM₁₀ en donde se observó un leve incremento con respecto a los últimos años.

En cuanto al carbono negro reportado como carbono negro equivalente (CNe), el promedio anual fue de 2.5 µg/m³ que representó alrededor del 12 % de la masa total de las PM_{2.5}.



Vista aérea de la Ciudad del México desde el oriente.

1. Comparación con las NOM

Situación de la calidad del aire con respecto
a las Normas Oficiales Mexicanas

Las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental (NOM) establecen los límites máximos permitidos para las concentraciones de los principales contaminantes en el aire ambiente. El propósito de las NOM es proteger a la población, y particularmente a los grupos más sensibles, de los efectos de corto y largo plazo relacionados con la contaminación del aire. Su observación y cumplimiento es responsabilidad de los gobiernos locales, en este aspecto es importante mencionar que la Secretaría del Medio Ambiente no tiene gobernanza en la política ambiental en la conurbación del Estado de México. La Tabla 1.1 presenta el listado de las NOM vigentes.

En esta sección se describen los efectos en la salud que tienen los principales contaminantes del aire, así como la situación de la Ciudad de México y su área conurbada con respecto al cumplimiento de las NOM. Para evaluar el

cumplimiento de las normas se considera que una ciudad o región no cumple con la NOM cuando en cualquiera de las estaciones la concentración observada excede los valores límite. La comparación con la NOM se realiza por separado para la Ciudad de México y el área conurbada (Estado de México), pero también como Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) la cual comprende las 16 delegaciones de la Ciudad y 25 municipios de la zona conurbada. En el Anexo 4 se presentan los resultados de la evaluación por estación.

Adicionalmente se realiza una comparación con los estándares de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) y con los valores guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS). En las Tablas 1.2 a 1.8 se indican en color rojo aquellas concentraciones que son superiores a los valores límite

Tabla 1.1. Listado de las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental vigentes en 2016.

Contaminante	Norma Oficial Mexicana	Especificaciones	Última actualización
Ozono (O ₃)	NOM-020-SSA1-2014	95 ppb Promedio horario 70 ppb Promedio móvil de 8 horas	19 de agosto de 2014
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	11 ppm Promedio móvil de 8 horas	23 de diciembre de 1994
Dióxido de azufre (SO ₂)	NOM-022-SSA1-2010	110 ppb Promedio de 24 horas 200 ppb Promedio móvil de 8 horas, segundo máximo 25 ppb Promedio anual	8 de septiembre de 2010
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	NOM-023-SSA1-1994	210 ppb Promedio horario	23 de diciembre de 1994
Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)	NOM-025-SSA1-2014	75 µg/m ³ Promedio de 24 horas 40 µg/m ³ Promedio anual	20 de agosto de 2014
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	NOM-025-SSA1-2014	45 µg/m ³ Promedio de 24 horas 12 µg/m ³ Promedio anual	20 de agosto de 2014
Plomo	NOM-026-SSA1-1993	1.5 µg/m ³ Promedio trimestral	23 de diciembre de 1994

Efectos en la salud

El deterioro de la calidad del aire es un tema de relevancia en términos de salud pública. Los efectos adversos en la salud relacionados con la contaminación del aire incluyen afecciones respiratorias, cardiovasculares, reproductivas, neurológicas, cáncer y mortalidad prematura, entre otros. La evidencia que relaciona estos efectos con el deterioro de la calidad del aire se deriva de estudios epidemiológicos, toxicológicos, clínicos, así como de estudios controlados de laboratorio que involucran a humanos y animales.

Existe un número creciente de estudios enfocados a entender los mecanismos que están involucrados en la respuesta del cuerpo humano a la contaminación del aire, sin embargo, muchos de estos no se han identificado claramente.

Dióxido de azufre

El dióxido de azufre (SO_2) es un contaminante gaseoso generado durante la quema de sustancias que contienen azufre, en ambientes urbanos la quema de combustibles fósiles es la principal fuente. Su presencia en el aire ambiente se relaciona con una variedad de efectos respiratorios como la disminución de la función pulmonar y el aumento de la resistencia de las vías respiratorias. Los estudios controlados en laboratorio en los que participan voluntarios, han identificado a los asmáticos como un grupo muy sensible a la exposición al dióxido de azufre. Los sujetos sanos no han demostrado ningún cambio funcional respiratorio en el corto plazo cuando se exponen a niveles de hasta 1.0 ppm durante 1-3 horas. En pruebas de ejercicio una breve exposición (5-10 minutos) a niveles entre 0.2-0.6 ppm de dióxido de azufre puede resultar en un aumento en la resistencia de las vías respiratorias y la disminución de la capacidad respiratoria, en asmáticos. La respuesta a la inhalación es observable dentro de los dos primeros minutos de la exposición, aumenta aún más con la exposición continua de hasta cinco minutos y luego permanece relativamente estable a medida que la exposición continúa. Por lo general, la exposición al dióxido de azufre no está asociada con reacciones retardadas o ataques asmáticos repetitivos (US EPA, 2008).

En estudios epidemiológicos realizados en niños y adultos se han reportado asociaciones entre las variaciones a corto plazo en las concentraciones de dióxido de azufre con aumentos en síntomas respiratorios, visitas al servicio de urgencias y hospitalizaciones por afecciones relacionadas con el aparato respiratorio. Aún existe incertidumbre sobre si el dióxido de azufre está directamente asociado con los efectos o si otros contaminantes coexistentes pueden explicarlos, aunque algunos estudios indicaron que los efectos del dióxido de azufre se mantuvieron incluso después de explicar los efectos de otros contaminantes, incluyendo las $\text{PM}_{2.5}$. Junto con los estudios clínicos en seres humanos, la evidencia sugiere que el dióxido de azufre puede desencadenar episodios asmáticos en individuos con asma preexistente (US EPA, 2008).

Algunos estudios epidemiológicos indican que la mortalidad cardiovascular asociada con las exposiciones a corto plazo al dióxido de azufre se redujo cuando se incluyeron otros contaminantes, aunque la evidencia aún sugiere una relación causal (US EPA, 2008). Existen pocos estudios epidemiológicos disponibles que evalúen los posibles efectos de confusión de otros contaminantes para la exposición de largo plazo.

Dióxido de nitrógeno

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un contaminante gaseoso que junto con el óxido nítrico (NO), forma parte de la familia de los óxidos de nitrógeno (NO_x). Se emite en menor cantidad durante los procesos de combustión en diversas fuentes (autos, industria y domésticas), la mayor contribución proviene de la formación secundaria en la atmósfera. Los óxidos de nitrógeno experimentan reacciones fotoquímicas para formar ozono y están involucrados en la formación de aerosoles. La evidencia de los efectos en la salud del dióxido de nitrógeno se deriva de estudios humanos y animales, que vinculan al contaminante con efectos respiratorios tales como la disminución de la función pulmonar, asma, el aumento en la respuesta de las vías respiratorias y la inflamación pulmonar (US EPA, 2016).

En la versión más reciente del documento *Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen – Health Criteria* de la US EPA (2016) se hace referencia a la coherencia de los resultados de una variedad de estudios con un mecanismo biológico plausible, en el que el dióxido de nitrógeno reacciona con el revestimiento respiratorio y forma productos de oxidación secundarios que aumentan la respuesta de las vías respiratorias y la inflamación alérgica, así como, de una relación causal entre la exposición a corto plazo y los ataques de asma. El vínculo entre la exposición de largo plazo con los síntomas respiratorios fue reforzado por estudios experimentales y epidemiológicos recientes. Por otra parte, la evidencia entre la exposición al dióxido de nitrógeno y la mortalidad no es concluyente. Varios estudios que relacionan la exposición al aire ambiente encontraron efectos en la salud asociados con los niveles ambientales de dióxido de nitrógeno, incluyendo síntomas respiratorios, enfermedades respiratorias, disminución de la función pulmonar, inflamación pulmonar, aumento de las consultas hospitalarias por asma y mortalidad cardiopulmonar. En asmáticos se observó un aumento en la tendencia de las vías respiratorias a contraerse, en respuesta a la exposición a concentraciones de 0.1 ppm de dióxido de nitrógeno durante 60 minutos o de 0.2-0.3 ppm durante 30 minutos, mientras que en individuos sanos se observó una respuesta similar a concentraciones entre 1.5 y 2.0 ppm (US EPA, 2016).

Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) es un contaminante del aire que tiene una fuerte afinidad para unirse con las proteínas responsables del transporte del oxígeno (hemoglobina y mioglobina). El monóxido de carbono es responsable de los efectos tóxicos asociados a la reducción en el suministro de oxígeno en el torrente sanguíneo. Estos efectos se han estudiado en ambientes controlados, que incluyen la exposición de seres humanos y animales, así como en estudios poblacionales sobre los efectos ambientales de la exposición. Se sabe que las personas con insuficiencia en el suministro de sangre al corazón (cardiopatía isquémica) son particularmente susceptibles a los efectos del monóxido de carbono. Se ha observa-

do que existe una posible relación causal entre la exposición de corto plazo y los efectos cardiovasculares, sin embargo, algunos estudios han relacionado las exposiciones de corto y largo plazo a otros problemas de salud (US EPA, 2010).

El monóxido de carbono inhalado no tiene efectos tóxicos evidentes en los pulmones, ejerce sus efectos al interferir con el transporte de oxígeno disminuyendo la cantidad de oxígeno que puede acarrear la sangre a los tejidos por la formación de carboxihemoglobina (COHb). La exposición se evalúa en términos de los niveles de COHb en la sangre, expresada como el porcentaje de hemoglobina total ligada al monóxido de carbono. Se estima que la COHb endógena es <1% en individuos sanos, sin embargo, dependerá de la condición de salud y el estado metabólico del individuo. Los mayores niveles de COHb se observaron entre fumadores y personas con enfermedades inflamatorias, los fumadores son un grupo severamente afectado por la exposición personal al monóxido de carbono (Hart *et al.*, 2006). Los sujetos sanos expuestos a concentraciones de monóxido de carbono suficientes para inducir un 5 % de COHb en condiciones controladas de laboratorio, mostraron una disminución en su rendimiento máximo durante el ejercicio, debido a la reducción en el suministro de oxígeno al corazón y a otros músculos. Estudios realizados en sujetos con enfermedad arterial coronaria, que realizaron ejercicio durante la exposición a monóxido de carbono, demostraron que a niveles de COHb tan bajos como 2.4 %, se puede inducir un inicio prematuro de los cambios electrocardiográficos indicativos de deficiencia en el suministro de oxígeno al corazón. Otros efectos de la administración limitada de oxígeno a los tejidos corporales incluyen dolor en el pecho y el aumento en su duración, dolor de cabeza, mareos, confusión y somnolencia (US EPA, 2000).

Varios estudios epidemiológicos han encontrado asociaciones entre los niveles de corto plazo del contaminante con el aumento de las admisiones hospitalarias y las visitas a los servicios de urgencias para cardiopatía isquémica, incluido el infarto de miocardio. En los estudios epidemiológicos que informaron resultados estratificados por edad y sexo, se observaron efectos más amplios entre los adultos mayores y entre los hombres (US EPA, 2010).

Ozono

El ozono (O₃) es un compuesto altamente reactivo y un agente oxidante fuerte, se forma mediante reacciones fotoquímicas entre los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno, en presencia de la luz solar. El ozono, o sus productos de reacción, pueden penetrar en la región de intercambio gaseoso del pulmón, cuando entra en contacto con el tracto respiratorio reacciona con los tejidos causando daños en las vías respiratorias. Se han identificado efectos adversos en la salud asociados con los niveles de ozono en el aire ambiente (US EPA, 2013), estos incluyen aumento de los síntomas respiratorios, daño a las células del tracto respiratorio, disminución de la función pulmonar, mayor susceptibilidad a la infección respiratoria, aumento en los riesgos de hospitalización y mortalidad.

Las exposiciones de corto y largo plazo al ozono tienen una relación directa con los efectos respiratorios. Los efectos adversos de la exposición de corto plazo incrementan con una mayor actividad física, esto debido al aumento en la frecuencia respiratoria, la profundidad de las respiraciones y el volumen de aire que alcanza los pulmones. Los niños se consideran una población particularmente vulnerable debido a que sus pulmones se encuentran en desarrollo, pasan más tiempo al aire libre, son más activos físicamente y tienen una mayor tasa de ventilación en relación con su peso corporal (US EPA, 2013).

En el laboratorio, la exposición de los seres humanos a bajos niveles de ozono provoca una disminución reversible en la función pulmonar. Diversos estudios en los que voluntarios fueron expuestos a ozono a concentraciones entre 0.06 y 0.12 ppm durante 6.6 horas, reportaron disminuciones en la función pulmonar con el aumento de los niveles de exposición en condiciones de ejercicio moderado (Brown *et al.*, 2008; Schelegle *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011). Los efectos a bajas concentraciones de ozono son apenas perceptibles, sin embargo, a concentraciones superiores a 0.06 ppm la disminución reportada se encuentra entre el 2 y el 11 % en el volumen espiratorio forzado en un segundo (VEF1), indicando que a mayores concentraciones del contaminante aumenta la disminución en la función respiratoria.

Los estudios epidemiológicos realizados en

personas que realizan ejercicio al aire libre, incluidos los niños que asisten a campamentos de verano, demostraron asociaciones entre reducción de la función pulmonar y la exposición al ozono. La mayoría de los estudios observaron reducciones en la función pulmonar (VEF1) en el intervalo de aproximadamente <1 % a 2 % cuando se estandarizó a un aumento de 0.04 ppm para un máximo de una hora, un aumento de 0.03 ppm para un máximo de ocho horas y un aumento de 0.02 ppm para un promedio de 24 horas (US EPA, 2013). El aumento en la exposición a ozono en el corto plazo se asocia con efectos en la salud respiratoria de los niños, incluyendo el incremento en los síntomas respiratorios en niños con asma y en el ausentismo escolar (Gilliland *et al.*, 2001; Delfino *et al.*, 2003; US EPA, 2013). Numerosos estudios han encontrado asociaciones entre el incremento en los niveles de ozono de corto plazo e ingresos hospitalarios y admisiones de urgencias por síntomas respiratorios (Strickland *et al.*, 2010; US EPA, 2013).

En cuanto a los efectos cardiovasculares potenciales asociados a la exposición a corto plazo, los estudios controlados de exposición humana han descubierto que las exposiciones al ozono producen cambios en la función cardíaca y aumento de los biomarcadores en la sangre para la inflamación sistémica y el estrés oxidativo. Los efectos observados incluyen aumento de la variabilidad de la frecuencia cardíaca, arritmias, enfermedad vascular e inflamación y estrés oxidativo que conduce a la aterosclerosis que puede conducir a daño tisular debido a la isquemia y la reperfusión (US EPA, 2013).

Con respecto a la mortalidad, se ha reportado una probable relación causal con las exposiciones a concentraciones de ozono de corto plazo. Numerosos estudios han encontrado asociaciones positivas entre los aumentos de corto plazo en los niveles de ozono y el exceso de riesgo de mortalidad por todas las causas no accidentales, causas cardiovasculares y causas respiratorias (Bell *et al.*, 2004; Huang *et al.*, 2005; Ito *et al.*, 2005; Levy *et al.*, 2005; Bell *et al.*, 2008; Zanobetti *et al.*, 2008). Estas asociaciones persistieron incluso cuando se tuvieron en cuenta otras variables, incluyendo la temporada y los niveles de otros contaminantes del aire (Bell *et al.*, 2004; Katsouyanni *et al.*, 2009; Stafoggia *et al.*, 2010).

De acuerdo con la conclusiones de la versión más reciente del documento *Integrated Science Assessment of Ozone and Related Photochemical Oxidants* de la US EPA (2013), existe una probable relación causal entre la exposición a largo plazo al ozono y los efectos respiratorios. La evidencia que apoya esta determinación proviene de estudios epidemiológicos y toxicológicos, particularmente estudios de asma y síntomas relacionados, admisiones hospitalarias relacionadas con el asma, función pulmonar, inflamación pulmonar y estrés oxidativo. Se determinó que otros efectos sobre la salud de la exposición a largo plazo al ozono tenían evidencia *sugestiva* o *inadecuada* de causalidad, aunque los pocos estudios sobre la mortalidad respiratoria respaldan los efectos del ozono sobre la salud respiratoria.

En cuanto a la mortalidad se ha reportado una posible relación pero no existen pruebas concluyentes que vinculen la exposición de largo plazo al ozono con la mortalidad (Jerrett *et al.*, 2009; Zanobetti y Schwartz, 2011; US EPA, 2013).

Partículas suspendidas

Las partículas suspendidas son un complejo grupo de contaminantes con una gran variedad de características físicas, químicas y biológicas. Pueden originarse de fuentes asociadas a la actividad humana (quema de combustibles fósiles, actividades de construcción, minería, agricultura, etc.) o naturales (como los incendios forestales, el polen y las erupciones volcánicas).

Un cúmulo enorme de evidencia científica confirma las relaciones causales entre las partículas y diversos efectos en la salud, la preocupación se ha centrado en partículas cada vez más pequeñas. Existen pruebas sólidas que apoyan la relación causal entre la exposición a partículas finas ($PM_{2.5}$) con los efectos cardiovasculares y el incremento de la mortalidad. Los efectos cardiovasculares específicos incluyen muerte por problemas cardiovasculares, ingresos hospitalarios por cardiopatía isquémica e insuficiencia cardiaca congestiva, cambios en la variabilidad de la frecuencia cardiaca, marcadores de estrés oxidativo y marcadores de aterosclerosis. La evidencia científica también apoya una probable relación entre la exposición a $PM_{2.5}$ y los efectos respiratorios, como hospitalizaciones por enfermedad pul-

monar obstructiva crónica (EPOC) o infecciones respiratorias, desarrollo y exacerbación del asma o alergia, cáncer de pulmón, impactos en la función pulmonar, inflamación pulmonar, estrés oxidativo y la hiperreactividad de las vías respiratorias. Tanto la exposición de corto como la de largo plazo están relacionadas con efectos en la salud humana. Los niños, los adultos mayores y las personas con enfermedades respiratorias o cardiovasculares preexistentes son los más susceptibles a los efectos adversos de las partículas.

En 1996 la *American Thoracic Society* publicó una revisión y análisis de la literatura epidemiológica sobre los efectos adversos agudos de las partículas suspendidas, en la que se enumeraron varios efectos adversos asociados con la exposición a partículas menores a $10\ \mu m$ (PM_{10}). La revisión también encontró que los adultos mayores o con enfermedades pulmonares o cardíacas preexistentes, son más susceptibles que otros a los efectos adversos de las PM_{10} . Desde entonces, muchos estudios más recientes han proporcionado pruebas adicionales de que el exceso de mortalidad y morbilidad se asocian con la exposición a corto plazo a PM_{10} y $PM_{2.5}$ (Pope *et al.*, 2006; US EPA, 2004; US EPA, 2009; Lu *et al.*, 2015; Shah *et al.*, 2015; Cai *et al.*, 2016).

Las estimaciones de los efectos en la mortalidad por la exposición de corto plazo a PM_{10} se encuentran entre 0.3 y 1.7 % para un incremento de $10\ \mu g/m^3$ en la concentración promedio de 24 horas. Los estudios de exposiciones a corto plazo a partículas menores a $2.5\ \mu m$ ($PM_{2.5}$) indican una asociación importante entre este contaminante y los efectos en la mortalidad. En su revisión de 2009, la US EPA determinó que las estimaciones para $PM_{2.5}$ están en el intervalo de 0.29 a 1.21 % de aumento en las muertes totales por cada incremento $10\ \mu g/m^3$ en el promedio de 24 horas. Las estimaciones de la mortalidad relacionada con el sistema cardiovascular varían de 0.03 a 1.03 % por incremento de $10\ \mu g/m^3$, mientras que las estimaciones de mortalidad respiratoria varían entre 1.01 y 2.2 % por incremento de $10\ \mu g/m^3$ en el promedio de 24 horas de $PM_{2.5}$ (US EPA, 2009).

Varios estudios han evaluado la asociación entre la exposición a partículas y los índices de morbilidad como: ingresos a hospitales, visitas a salas de urgencias o a consultorios médicos por enfermedades respiratorias o cardiovasculares.

Los resultados indicaron que las estimaciones de los efectos en la morbilidad son generalmente mayores que las estimaciones para la mortalidad. Se ha reportado efectos observados con diferentes fracciones de partículas suspendidas que incluyen a las PM_{10} , $PM_{2.5}$ (partículas finas) y $PM_{10-2.5}$ (partículas gruesas). La exposición de corto plazo se asocia con cambios en la función pulmonar (capacidad pulmonar y volumen respiratorio), síntomas respiratorios superiores (ronquera y dolor de garganta), síntomas respiratorios más bajos (aumento del esputo, dolor torácico y sibilancias). La gravedad de estos efectos es variada y depende de la población estudiada. Los individuos sensibles, como los que padecen asma o enfermedades respiratorias preexistentes, pueden padecer síntomas aumentados o agravados asociados con la exposición de corto plazo.

Brook *et al.* (2010) describe tres vías probables a través de las cuales las partículas ejercen sus efectos en la salud cardiovascular: pueden activar vías inflamatorias y causar estrés oxidativo sistémico, dando lugar a la producción de citoquinas proinflamatorias; pueden perturbar el sistema nervioso autónomo, lo que conduce a un aumento de la presión arterial, aumento del potencial arritmico y disminución de la variabilidad de la frecuencia cardíaca. Las partículas más pequeñas ($<1 \mu m$), o alguno de sus componentes, por su tamaño pueden ingresar al torrente sanguíneo y causar una mayor constricción de los vasos sanguíneos, así como un aumento de la presión sanguínea. Cada una de estas vías también puede conducir a la formación de especies reactivas oxigenadas que podrían provocar la oxidación del ácido desoxirribonucleico (ADN) e inflamación sistémica. Algunos componentes prooxidantes, como los metales, pueden desencadenar una respuesta inflamatoria en las células (Eiguren-Fernández *et al.*, 2015).

En cuanto a la exposición de largo plazo, numerosos estudios han demostrado que existe una asociación entre la exposición a $PM_{2.5}$ con los efectos respiratorios, cardiovasculares y la mortalidad. En la última revisión del documento *Integrated Science Assessment for Particulate Matter* la US EPA (2009) revisó 15 estudios que evaluaron las exposiciones a $PM_{2.5}$, dos estudios en donde se consideraron las exposiciones a $PM_{10-2.5}$ y cinco para las exposiciones a PM_{10} . La revisión concluyó

que los estudios recientes proporcionan evidencia para apoyar una determinación causal entre la exposición a largo plazo a $PM_{2.5}$ y un incremento en el riesgo de mortalidad, en el caso de la fracción gruesa ($PM_{10-2.5}$) las pruebas son insuficientes para confirmar que existe una relación con el incremento en el riesgo de mortalidad.

Numerosos estudios reportan evidencia que indica que la exposición a partículas suspendidas durante el embarazo podría estar asociada con efectos adversos en el producto, con evidencia relativamente consistente que vincula las exposiciones a $PM_{2.5}$ y PM_{10} con el bajo peso al nacer (Sram *et al.*, 2005; Stieb *et al.*, 2012). Estudios realizados en Estados Unidos, Brasil, México, la República Checa, Corea del Sur, Japón y Taiwán han encontrado que la exposición neonatal y postnatal temprana a las partículas puede conducir a un aumento de la mortalidad infantil (US EPA, 2009).

Algunos estudios han encontrado un vínculo entre la contaminación del aire exterior y efectos en el sistema nervioso central, que incluyen la disminución de la función cognitiva, la enfermedad de Alzheimer y la enfermedad de Parkinson, así como efectos en el comportamiento y desarrollo en infantes (Block *et al.*, 2012). Los estudios toxicológicos sugieren que el daño puede ser causado vía estrés oxidativo y sugieren que las partículas pueden ser inhaladas hacia los pulmones y trasladadas al cerebro, y que las partículas ultrafinas pueden alcanzar al cerebro a través del nervio olfativo (Peters *et al.*, 2006).

La evidencia sobre los efectos en la salud indica que algunos grupos de la población son más sensibles a los daños por la exposición a $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Existe una mayor susceptibilidad entre los niños (por efectos respiratorios), los adultos mayores (por efectos cardiovasculares), individuos con condiciones cardiovasculares o respiratorias preexistentes, e individuos con ciertos polimorfismos genéticos que controlan la respuesta antioxidante, regulan la actividad enzimática o regulan los procoagulantes (US EPA, 2009). Algunas pruebas sugieren que algunos factores adicionales podrían aumentar la susceptibilidad de una persona, como condiciones inflamatorias crónicas (por ejemplo, diabetes y obesidad) y el estadio de vida, siendo las mujeres embarazadas y los fetos *in utero* potencialmente más susceptibles.

Evaluación de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM)

Dióxido de azufre

La norma NOM-022-SSA1-2010 define con tres concentraciones límite, cada una de ellas asociada a diferentes intervalos de tiempo (8 horas, 24 horas y anual). Para evaluar el cumplimiento de la NOM es necesario que en el área de estudio las concentraciones de los tres indicadores sean menores a los valores límite. Estos valores pueden corresponder a diferentes sitios de monitoreo siempre y cuando se encuentren dentro del mismo territorio evaluado.

En 2016 las concentraciones máximas observadas para este contaminante fueron menores a los valores de la NOM, tanto en los sitios ubicados en el territorio de la Ciudad de México como en los ubicados en la zona conurbada del Estado de

México. En la Tabla 1.2 se indican los valores máximos correspondientes a cada uno de los intervalos de tiempo evaluados. El dióxido de azufre es un contaminante que se encuentra controlado, desde 2006 las concentraciones son menores que los valores límite de la norma.

Por otra parte, cuando se compararon las concentraciones máximas para el promedio de 24 horas con el valor guía de la OMS, se observó que éstas superaron la recomendación de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (calculada a las condiciones locales), tanto en la Ciudad de México como en la zona conurbada. De igual manera, con respecto al estándar de la US EPA, el valor del percentil 99 del promedio de 1 hora superó el valor del estándar de 75 ppb, en las dos entidades que conviven en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Tabla 1.2. Comparación de las concentraciones de dióxido de azufre con los límites permisibles de la NOM-022-SSA1-2010, la US EPA y los valores guía de la OMS.

	NOM			OMS	US EPA
	Máximo 24 h	2° máximo 8 h	Promedio anual	Máximo 24 h	Percentil 99 del promedio de 1 h, evaluado en 3 años
Límite permisible	110 ppb	200 ppb	25 ppb	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ *	75 ppb
ZMCM	55 ppb	111 ppb	8 ppb	113 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	162 ppb
Ciudad de México	44 ppb	80 ppb	6 ppb	90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	118 ppb
Área conurbada	55 ppb	111 ppb	8 ppb	113 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	162 ppb

* Equivalencia a 18°C y 584 mmHg.

Dióxido de nitrógeno

El valor límite de la NOM-023-SSA1-1994 es de 210 ppb para el promedio de una hora, el cual no debe ser rebasado en un año. De acuerdo con los resultados del monitoreo, durante 2016 esta concentración no fue superada en ninguno de los sitios de monitoreo en la zona metropolitana (Tabla 1.3). La concentración máxima del contaminante se registró en la estación FAC con un valor de 150 ppb.

Los valores guía de la OMS para los prome-

dios horario y anual son 200 y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Las concentraciones máximas para el promedio horario y anual fueron mayores que los límites de la OMS, tanto en la Ciudad de México, como en la zona conurbada. En el caso del estándar de la U. S. EPA, que recomienda una concentración de 100 ppb para el promedio horario y de 53 ppb para el promedio anual, el valor del percentil 99 para el promedio horario durante los últimos tres años fue de 108 ppb, mientras que el valor del promedio anual fue menor al requerido por la norma.

Tabla 1.3. Comparación de las concentraciones de dióxido de nitrógeno con los límites permisibles de la NOM-023-SSA1-1994, la US EPA y los valores guía de la OMS.

	NOM	OMS		US EPA	
	No exceder el máximo de 1 h	Máximo	Promedio anual	Percentil 99 del promedio de 1 h, evaluado en 3 años	Promedio anual
Límite permisible	210 ppb	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ *	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ *	100 ppb	53 ppb
ZMCM	0 h	221 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	108 ppb	35 ppb
Ciudad de México	0 h	214 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	108 ppb	35 ppb
Área conurbada	0 h	221 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	107 ppb	33 ppb

* Equivalencia a 18°C y 584 mmHg.

Monóxido de carbono

Los vehículos son la principal fuente de emisión de monóxido de carbono el cual proviene de la combustión incompleta de la gasolina. En las últimas dos décadas se ha observado un crecimiento continuo en el parque vehicular en la zona metropolitana, sin embargo, la concentración de monóxido de carbono ha mantenido una tendencia descendente. Lo anterior se explica por la renovación continua del parque vehicular ya que los autos modernos cuentan con tecnologías más eficientes para el aprovechamiento del combustible y mejores componentes para el control de las emisiones de gases contaminantes. El Programa de Verificación Vehicular (PVV) contribuye también a

mantener las emisiones dentro de intervalos estrictos en función de la edad y la tecnología de control del vehículo.

Las concentraciones de monóxido de carbono en la Ciudad de México y su área metropolitana muestran una disminución continua desde la segunda mitad de la década de los noventa. Desde 2001 la concentración máxima no ha superado el valor límite de la NOM-021-SSA1-1993, que es de 11 ppm para el promedio de ocho horas. En 2016, la concentración máxima reportada para el promedio móvil de 8 horas fue de 7.0 ppb.

El monóxido de carbono es el único contaminante cuyas concentraciones son menores a los valores recomendados por la OMS y el estándar de la US EPA.

Tabla 1.4. Comparación de las concentraciones de monóxido de carbono con los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana, la US EPA y los valores guía de la OMS.

	NOM	OMS		US EPA	
	Máximo 8 h	Máximo 1 h	Máximo 8 h	Máximo 1 h	Máximo 8 h
Límite permisible	11 ppm	30 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ *	10 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ *	35 ppm	9 ppm
ZMCM	7.0 ppm	8975 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	6283 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10.0 ppm	7.0 ppm
Ciudad de México	5.7 ppm	6911 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5116 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	7.7 ppm	5.7 ppm
Área conurbada	7.0 ppm	8975 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	6283 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10.0 ppm	7.0 ppm

* Equivalencia a 18°C y 584 mmHg.

Ozono

La combinación de las características fisiográficas de la cuenca y los patrones meteorológicos de la región, junto con la fuerte capacidad oxidativa de la atmósfera y los importantes volúmenes de emisiones de precursores (óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles), tienen como consecuencia una intensa formación de *smog* fotoquímico, del cual forma parte el ozono. En la Ciudad de México durante la mayor parte del año se presentan condiciones favorables para la formación de *smog* fotoquímico, pero entre marzo y junio aumenta la frecuencia en el número de días en los que su concentración supera el valor de la norma. Este periodo se conoce como *temporada de ozono* y se caracteriza por la presencia de sistemas sinópticos de circulación anticiclónica en la región central del país que favorecen estabilidad atmosférica y cielos despejados. A lo largo del año, durante el periodo diurno la dirección predominante del viento en superficie es del norte, sin embargo, la presencia de montañas al sur, poniente y oriente limita la dispersión de la contaminación favoreciendo su acumulación en la porción sur de la cuenca (en el Capítulo 2 se abordará con mayor detalle el comportamiento de la meteorología durante 2016). Lo anterior tiene como consecuencia que los sitios de monitoreo ubicados al sur, sean los que generalmente registren las concentraciones máximas y, por lo tanto, superen con mayor frecuencia los valores límite de la NOM-020-SSA1-2014.

En 2016 se registraron 212 días con concentraciones mayores al valor límite para el promedio de una hora (95 ppb), acumulando un total de 856 horas en toda el área metropolitana. Mientras que el valor máximo para el promedio de 8 horas fue de 152 ppb (la norma establece un límite de 70 ppb, para el promedio de 8 horas). El valor límite para el promedio de 8 horas se superó 202 días.

La forma del valor límite de la NOM para el promedio horario está definida en términos del número de excedencias y establece que el valor de 95 ppb no debe superarse en más de 1 hora durante el año. En 2016 el valor horario se superó en todas las estaciones en donde se midió este contaminante. Las estaciones Benito Juárez (BJU), Coyoacán (COY), Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), Pedregal (PED), UAM-Xochimilco (UAX) y Ajusco Medio (AJM), ubicadas al sur de la ciudad, rebasaron el valor de 95 ppb en más de 390 horas. El mayor número de horas por encima del valor de la norma se observó en la estación de AJM con 479 horas; mientras que la estación Cuautitlán (CUT), ubicada al noroeste en los límites de la zona metropolitana, registró cuatro horas con valores mayores a 95 ppb. La concentración máxima para el promedio horario fue de 210 ppb y se presentó en la estación Cuajimalpa (CUA) el 14 de marzo, este valor activó la Fase I de Contingencia Ambiental Atmosférica.

Las concentraciones máximas superaron significativamente los valores recomendados por la OMS para el promedio móvil de 8 horas y por el estándar de la US EPA (ver Tabla 1.5).

Tabla 1.5. Comparación de las concentraciones de ozono con los límites permisibles de la NOM-020-SSA1-2014, la US EPA y los valores guía de la OMS.

	NOM		OMS	US EPA
	No exceder el máximo de 1 h	Máximo 8 h	Máximo 8 h	4° máximo anual del promedio de 8 h, evaluado en 3 años
Límite permisible	95 ppb	70 ppb	100 µg/m ³ *	75 ppb
ZMCM	856 h	152 ppb	234 µg/m ³	115 ppb
Ciudad de México	800 h	152 ppb	234 µg/m ³	115 ppb
Área conurbada	501 h	134 ppb	206 µg/m ³	107 ppb

* Equivalencia a 18°C y 584 mmHg.

Partículas menores a 10 μm (PM_{10})

Con la última actualización de la NOM-025-SSA1-2014 se fijaron valores más estrictos para las concentraciones límite de los promedios de 24 horas ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y anual ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Debido a que las concentraciones de PM_{10} aún superaban los valores de la norma previa, con la actualización se incrementó el número de días y estaciones en los que no se cumple la norma.

Con propósitos de consistencia con la información histórica y debido a la falta de una norma técnica que defina el uso de los datos derivados de los monitores continuos para la evaluación de la norma de salud, la evaluación se realizó utilizando los datos reportados por la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA), que emplea Métodos de Referencia para la medición del contaminante. Las concentraciones se reportaron a las condiciones locales de presión y temperatura.

La concentración máxima del promedio de 24 horas se presentó el 24 de febrero con un valor de $123 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Xalostoc (XAL), ubicada en el corredor industrial de Xalostoc en Ecatepec de Morelos, Estado de México. En ese sitio se registró también el promedio anual máximo de $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De los 8 sitios en donde se realizó el monitoreo de PM_{10} , solo la estación Pedregal (PED) logró el cumplimiento de la NOM con valores de 66 y $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los promedios de 24 horas y anual, respectivamente. En términos generales las concentraciones de las estaciones ubicadas en la zona conurbada del Estado de México fueron mayores en comparación con las reportadas para las estaciones en la Ciudad de México. Las concentraciones para el percentil 99 de los valores de 24 horas y el promedio anual, fueron superiores a los valores guía de la OMS. Mientras que con respecto al estándar de la US EPA, las concentraciones máximas fueron menores al valor del estándar.

Tabla 1.6. Comparación de las concentraciones de PM_{10} con los límites permisibles de la NOM-025-SSA1-2014, la US EPA y los valores guía de la OMS.

	NOM		OMS		US EPA
	Máximo 24 h	Promedio anual	Percentil 99 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del 2° máximo 24 h
Límite permisible	$75 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$150 \mu\text{g}/\text{m}^3$
ZMCM	$123 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$61.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$123 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$61.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$109 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Ciudad de México	$103 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$44.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$103 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$44.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$85 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Área conurbada	$123 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$61.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$123 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$61.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$109 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Partículas menores a 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$)

Después del ozono, las partículas menores a 2.5 micrómetros ($\text{PM}_{2.5}$) son las responsables del mayor número de días con una calidad del aire desfavorable en la Ciudad de México y su área metropolitana. La exposición a altas concentraciones de este tipo de partículas implica un riesgo importante para la salud humana.

La actualización de la NOM-025-SSA1-2014 también disminuyó los valores límite para los promedios de 24 horas y anual con concentra-

ciones de 45 y $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Al igual que en caso de PM_{10} , la mayoría de las estaciones de monitoreo reportaron concentraciones superiores a la norma anterior y con la actualización se incrementó el número de días y sitios que superaron el valor de la NOM.

Al igual que para PM_{10} , la evaluación de la NOM se realizó con los datos de la REDMA que utiliza Métodos de Referencia para la medición del contaminante. Todas las concentraciones se reportaron a las condiciones locales de presión y temperatura.

Las concentraciones máximas para los promedios de 24 horas y anual fueron de 96 y 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Ambas superaron los valores límite de la NOM. El valor máximo para el promedio de 24 horas se registró el 1° de enero en la estación Tlalnepantla (TLA), ubicada en el municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México, este incremento en la concentración fue provocado por la quema de pirotecnia durante las celebraciones de Año Nuevo. En el caso del promedio

anual, el máximo se observó en la estación Xalostoc (XAL), en Ecatepec de Morelos. En términos generales las concentraciones en la zona conurbada fueron mayores que en la Ciudad de México. De las siete estaciones en las que se midió $\text{PM}_{2.5}$ ninguna reportó concentraciones menores a lo que especifica la NOM. De igual manera, las concentraciones máximas en todas los sitios de monitoreo superaron los los valores guía de la OMS y el estándar de la US EPA (ver Tabla 1.7)

Tabla 1.7. Comparación de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ con los límites permisibles de la NOM-025-SSA1-2014, la U. S. EPA y los valores guía de la OMS.

	NOM		OMS		US EPA	
	Máximo 24 h	Promedio anual	Percentil 99 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del 2° máximo	Promedio trianual
Límite permisible	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
ZMCM	96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ciudad de México	85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	21.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	21.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Área conurbada	96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Partículas suspendidas totales

Con la actualización de la NOM-025-SSA1-2014 se derogó el uso de un indicador para las partículas suspendidas totales (PST), esto debido a que el grupo revisor consideró que este contaminante no reflejaba adecuadamente los efectos provocados por las partículas en la salud humana y en el medio ambiente, asegurando que los indicadores para PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ serían suficientes para la protección de la salud pública. Por este motivo, a partir de 2015 ya no se requiere la medición de este contaminante con propósitos normativos. A pesar de que el contaminante fue derogado, la NOM-026-SSA-1993 (que establece los límites permisibles para plomo en el aire ambiente) aún requiere muestras de PST para la determinación de la concentración del metal, por lo tanto, la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) mantiene el programa de muestreo.

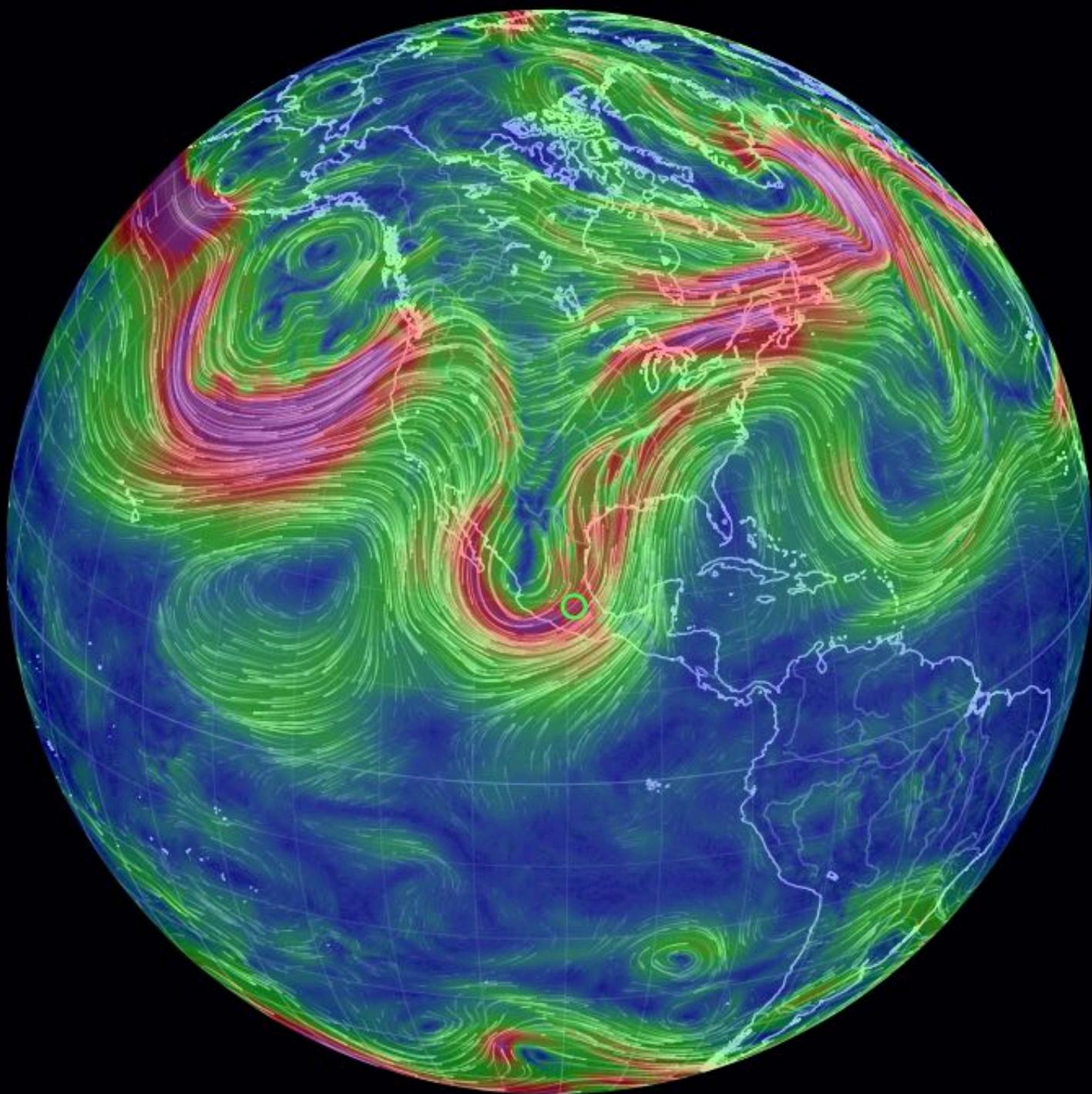
La REDMA obtuvo muestras de PST empleando Métodos de Referencia basados en

muestreadores de alto volumen. Las muestras se analizaron por gravimetría para determinar la concentración en el aire ambiente, posteriormente fueron procesadas para la cuantificación de plomo por el método de emisión atómica.

Haciendo uso de los datos disponibles y únicamente con propósitos comparativos con los datos históricos, se realizó la evaluación de las concentraciones obtenidas contra el valor límite de PST de la norma anterior que fijaba una concentración máxima para el promedio de 24 horas de 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, evaluada como el percentil 98. En 2016 el valor máximo de PST para el percentil 98 fue de 230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Xalostoc (XAL), ubicada en el municipio de Ecatepec de Morelos en la zona conurbada del Estado de México. En el resto de los sitios de monitoreo el valor del percentil 98 del promedio de 24 horas fue menor a 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Este contaminante tampoco se incluye dentro de los valores guía de la OMS, ni es considerado por la US EPA.

Esta página se dejó intencionalmente en blanco



Corriente de chorro a 500 hPa,
9 de marzo de 2016 18:00.
Fuente: earth.nullschool.net

2. El tiempo

Comportamiento de las variables meteorológicas

Temperatura

La temperatura promedio anual en la Ciudad de México y su área metropolitana estimada a partir de los datos de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) fue de 16.4 °C, este valor fue menor que el reportado para 2015. El promedio para las estaciones ubicadas en la Ciudad de México fue de 16.2 °C. La temperatura mínima se registró el 13 de febrero en la estación Ajusco (AJU), ubicada en la zona montañosa de la delegación Tlalpan, con un valor de -4°C. La temperatura máxima se registró el 25 de mayo en la estación FES Acatlán (FAC), ubicada en el municipio de Naucalpan, Estado de México, con un valor de 33.6 °C. El mes más cálido fue mayo con un promedio mensual de 19.5 °C, mientras que el más frío fue enero con una temperatura promedio de 13.2 °C. La Figura 2.1 muestra el comportamiento de la temperatura promedio diaria en la Ciudad de México y su área metropolitana.

Durante los primeros meses de 2016 el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) disminuyó su intensidad con respecto al último semestre de 2015. De acuerdo con la Organi-

zación Meteorológica Mundial (OMM) el intenso episodio de El Niño, que inició en 2015, dio paso a una condición neutral. A pesar de esto, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) reportó el año 2016 como el más cálido desde 1971, con una temperatura promedio para el país de 22.4°C (CONAGUA, 2017).

En la Figura 2.2 se presenta la anomalía de la temperatura en 2016 (en comparación con los datos de los últimos 25 años). En términos generales, el segundo semestre fue más cálido que el promedio histórico con anomalías en la temperatura de +0.4 a +0.8 °C entre julio y octubre. Es destacable el valor de +1.7 °C que se observó en diciembre.

En cuanto a los sistemas frontales que afectaron el país, que generalmente favorecen una disminución en la temperatura en gran parte del territorio nacional incluyendo la región central, el SMN contabilizó 42 sistemas frontales durante el período de noviembre de 2015 a marzo de 2016 (CONAGUA, 2017), ocho más que el periodo invernal anterior (noviembre 2015-marzo 2016).

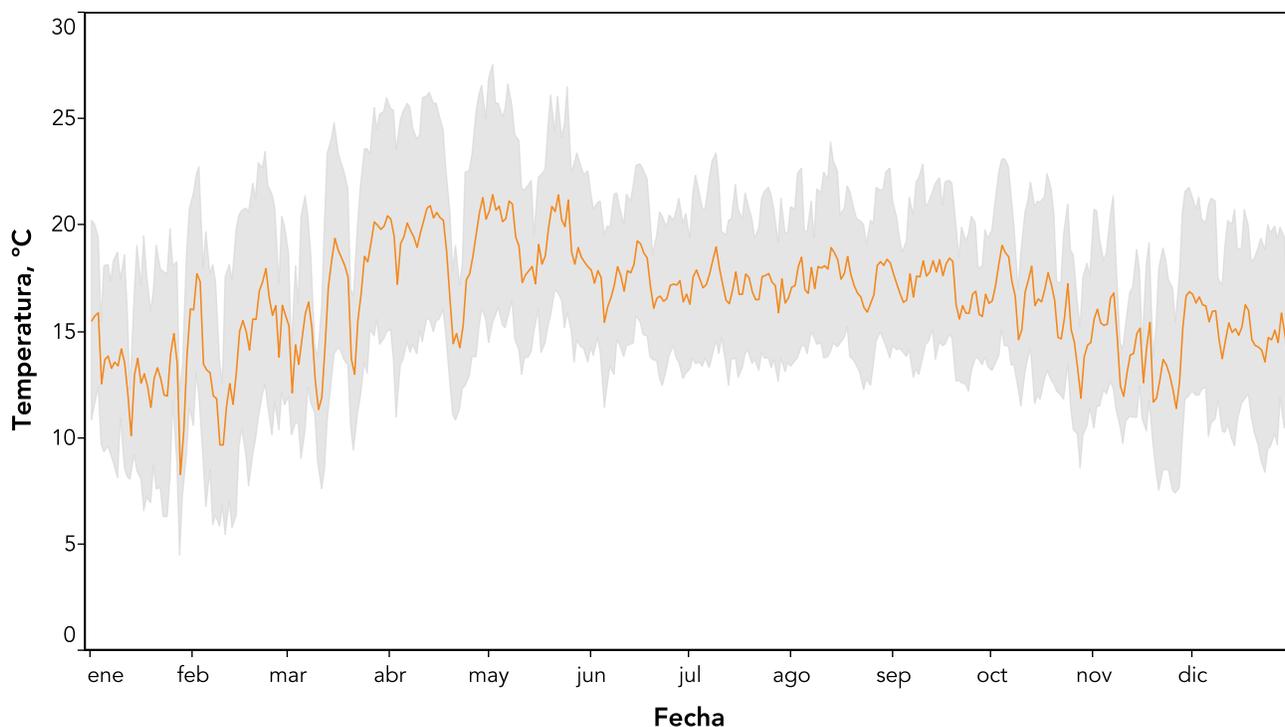


Figura 2.1. Serie de tiempo del promedio diario de la temperatura del aire utilizando los datos de la REDMET. La línea naranja corresponde al promedio diario calculado a partir de los registros de todos los sitios de monitoreo, el área sombreada en gris corresponde a una desviación estándar del promedio diario.

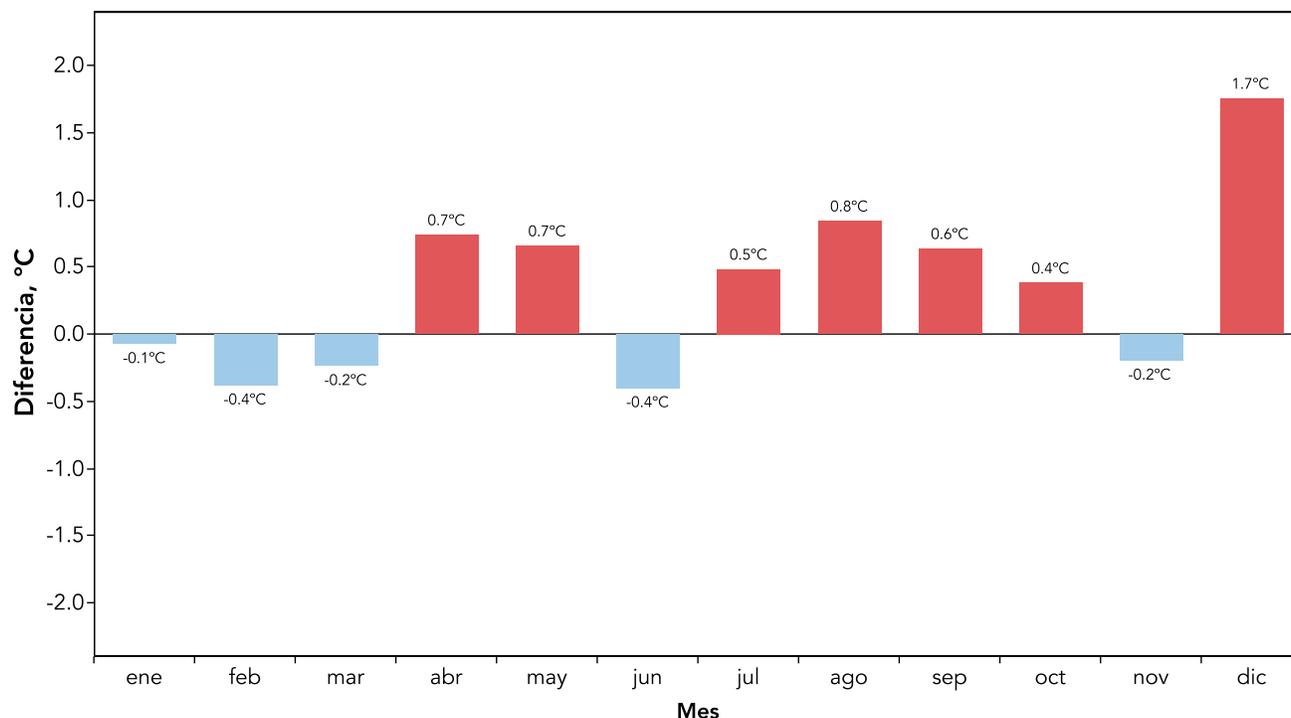


Figura 2.2. Anomalía de la temperatura del aire en la Ciudad de México durante 2016 con respecto al promedio histórico de 1990-2015.

En la Figura 2.3 se muestra la distribución espacial del promedio anual de la temperatura. La región comprendida por las demarcaciones Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Nezahualcóyotl y Ecatepec de Morelos, registró los mayores promedios de temperatura. El supersitio, ubicado en la delegación Gustavo A. Madero, registró el promedio máximo de 18.3 °C, mientras que en el sitio de San Agustín (SAG), en Ecatepec de Morelos, se registró un promedio de 18 °C. La estación Ajusco (AJU), ubicada en la zona montañosa, registró el promedio anual mínimo de 10.5 °C.

La urbanización provoca que las ciudades experimenten temperaturas mayores que las del campo circundante, este fenómeno se conoce como *isla de calor urbana* (Jáuregui, 1997). El contraste de la cobertura entre las zonas urbanas y circundantes modula la magnitud de la isla de calor urbana (Cui y de Foy, 2012). Además de los efectos que puede tener en el clima regional, el incremento en la temperatura favorece la formación de ozono y otros contaminantes secundarios, y afecta el transporte de los contaminantes del aire (Yoshikado y Tsuchida, 1996; Gray y Finster, 2000; Jazcilevich et al., 2002).

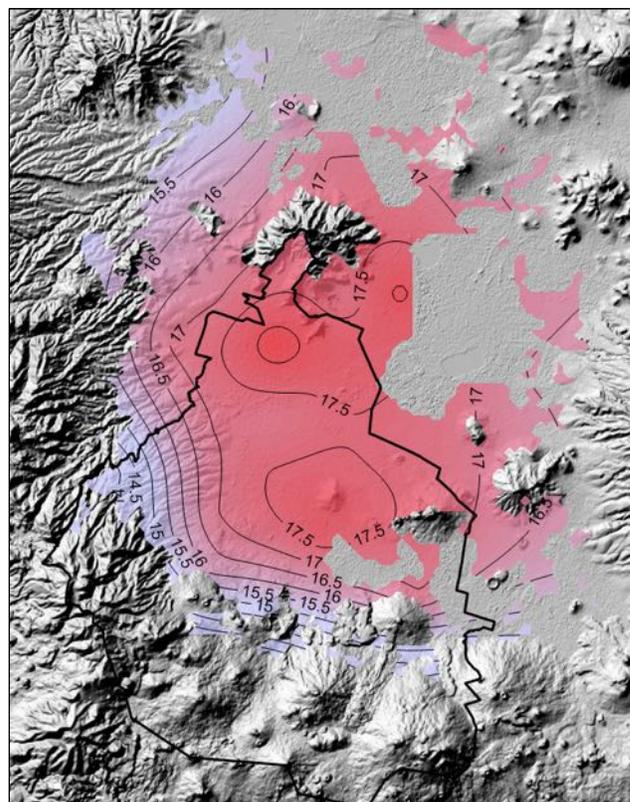


Figura 2.3. Distribución espacial del promedio anual de la temperatura ambiente en la región urbana.

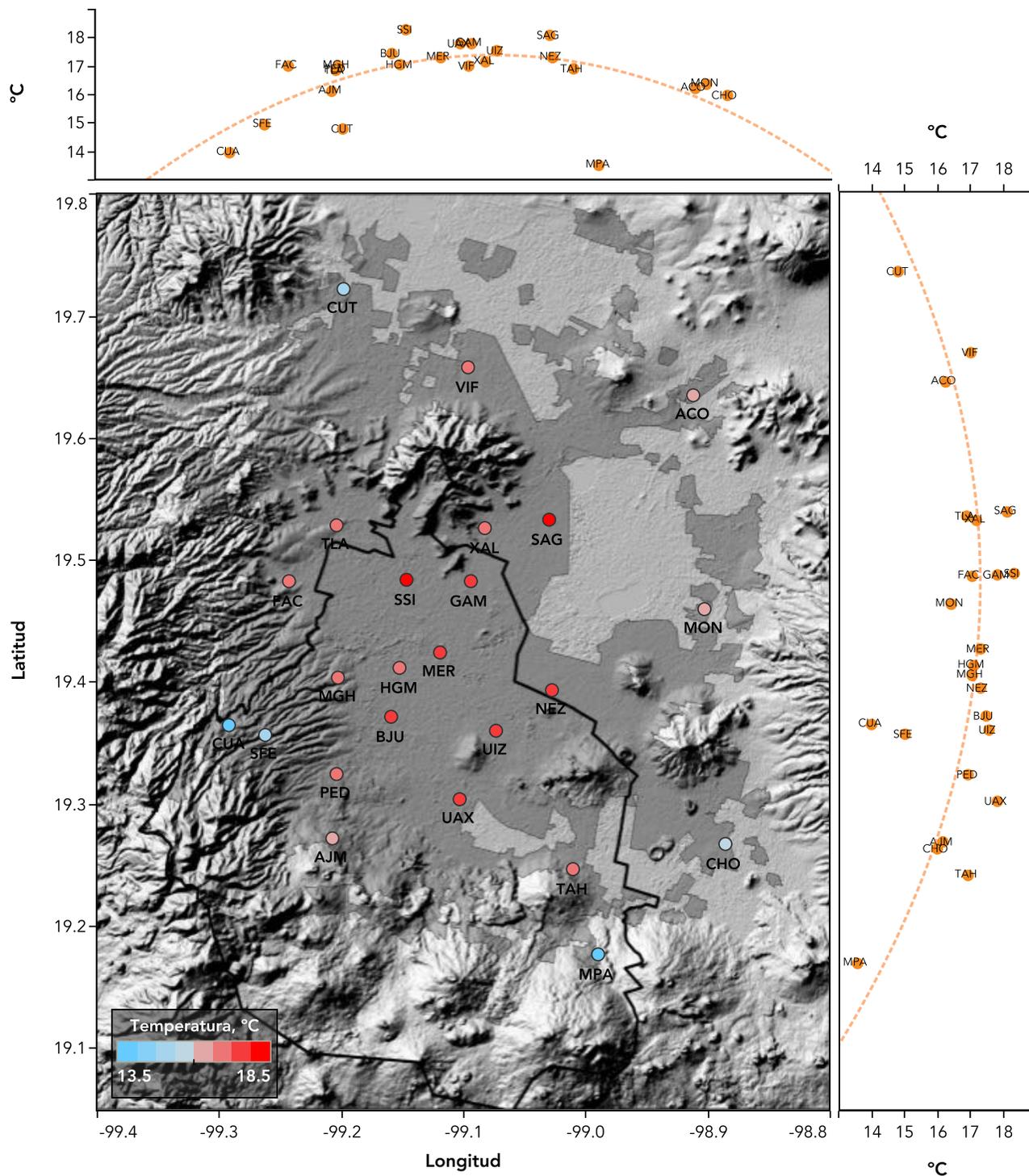


Figura 2.4. Promedio anual de la temperatura en función de su latitud y longitud. El mapa muestra la ubicación de los sitios de medición de temperatura de la REDMET, para cada sitio se indica la temperatura promedio durante 2016. La gráfica en la sección superior del mapa muestra el promedio de temperatura en cada una de los sitios en función de su longitud, mientras que la gráfica a la derecha del mapa muestra los promedios con respecto a su latitud. Las líneas de tendencia de cada gráfica se obtuvieron a partir de una función polinomial de segundo grado que representa el mejor ajuste. En el análisis se omitieron las estaciones de Ajusco (AJU) e Instituto de Investigaciones Nucleares (INN), ambas ubicadas en la zona montañosa a altitudes cercanas a los 3000 msnm.

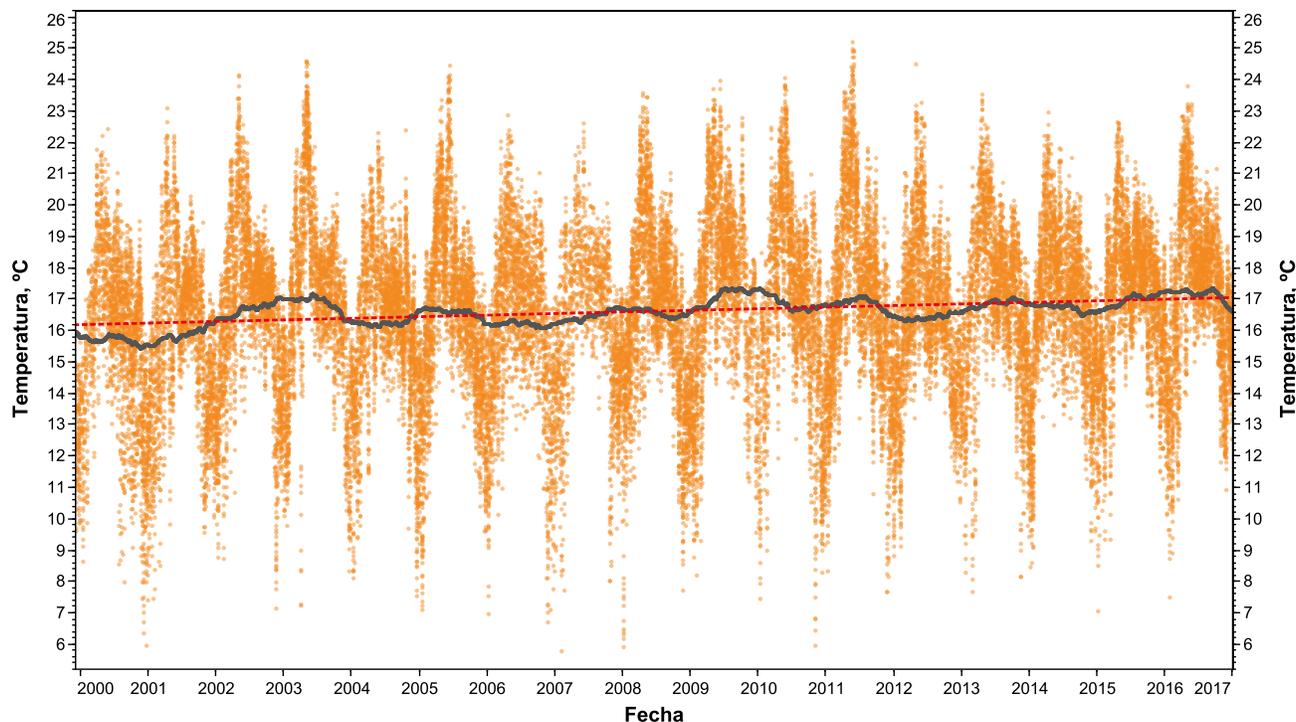


Figura 2.5. Tendencia de la temperatura ambiente entre 2000 y 2016. Los puntos corresponden al promedio diario de temperatura en cada uno de los sitios de monitoreo, la línea negra indica el promedio móvil de todos los sitios con una ventana de ± 90 días, la línea roja muestra la tendencia lineal. En la construcción del gráfico solo se emplearon los sitios que cuentan con la mayoría de datos durante el periodo observado.

Los efectos de la isla de calor urbana pueden observarse a través de los datos de temperatura del aire registrados por la REDMET. El promedio de temperatura en los sitios ubicados dentro de la región urbanizada fue de $17.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el promedio en los sitios ubicados en la periferia fue de $15.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. La intensidad de la diferencia fue mayor en la noche alcanzando hasta $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. La Figura 2.4 muestra los promedios anuales de temperatura del aire en los sitios de monitoreo con respecto a su latitud y longitud, en ella se observa que la temperatura en la parte central de la zona urbana es significativamente mayor que en los sitios de la periferia. Estos resultados son congruentes con lo observado por Jáuregui (1997), por lo tanto, de mantenerse la expansión del área urbana se esperaría un aumento en las dimensiones e intensidad de la isla de calor. En este contexto, es importante destacar que la construcción de un nuevo aeropuerto al oriente de la ciudad, en terrenos que actualmente tienen una cobertura dominada principalmente por vegetación o suelo descubierto, traerá consigo una rápida expansión de la mancha urbana y también de la isla de calor urbana. Lo

que podría provocar un incremento adicional en la temperatura de la ciudad. Además tendrá un impacto desfavorable en la calidad del aire de la Ciudad de México, no solo por el aumento en la emisión de contaminantes, también por el efecto del aumento de temperatura en la cinética de la formación de los contaminantes secundarios.

Por otra parte, el análisis de la tendencia de la temperatura muestra un incremento relativamente continuo en la temperatura promedio en los últimos años (ver Figura 2.5). Tan solo entre 2000 y 2016 se observó un aumento de $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura promedio (estimada a partir de las estaciones que cuentan con datos durante la mayor parte del periodo). En este mismo periodo los valores máximos aumentaron en $\sim 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que los mínimos en $\sim 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. De mantenerse esta tendencia, además del impacto que tendría en el ecosistema, en términos de calidad del aire podría afectar en el corto y mediano plazos el comportamiento de la capa límite atmosférica, los patrones de viento y de precipitación pluvial, así como la cinética de las reacciones involucradas en la formación de contaminantes secundarios.

Humedad relativa

La humedad del aire es importante en términos de la climatología regional, del ecosistema y el confort humano. En términos de la contaminación atmosférica la humedad desempeña un papel importante en los procesos de formación de los contaminantes secundarios, las interacciones gas-partícula, la visibilidad y las características termodinámicas de la atmósfera.

El promedio anual de la humedad relativa en la Ciudad de México y su área metropolitana fue de 57 %. La humedad fue mayor en la periferia de la zona metropolitana y menor en la región central, como se muestra en la Figura 2.6. Septiembre reportó el mayor promedio de humedad con un valor de 68 %, mientras que abril fue el más seco con un promedio de 40 %. En la serie de tiempo de la Figura 2.7 se muestra la variación temporal del promedio diario durante 2016, en ella se observa el contraste entre los periodos seco y húmedo. El promedio anual en las estaciones ubicadas en el territorio de la Ciudad de México fue también de 57 %.

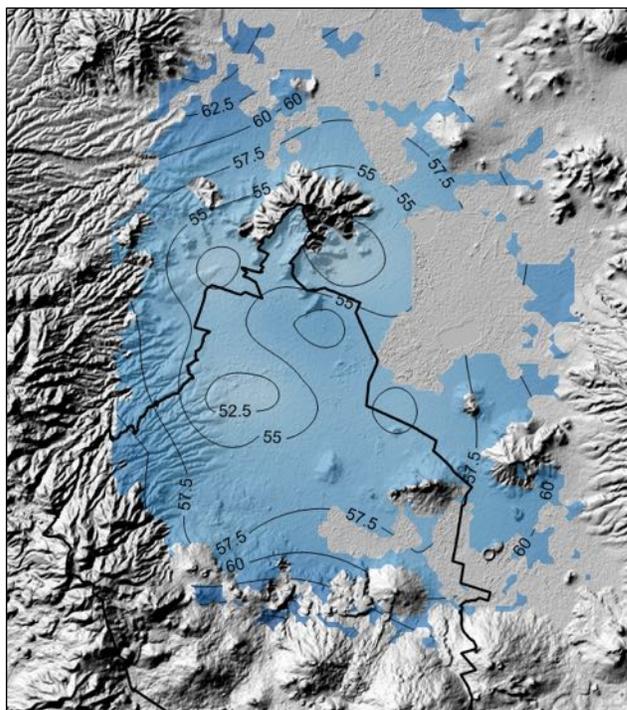


Figura 2.6. Distribución espacial del promedio anual de la humedad relativa en la región urbana.

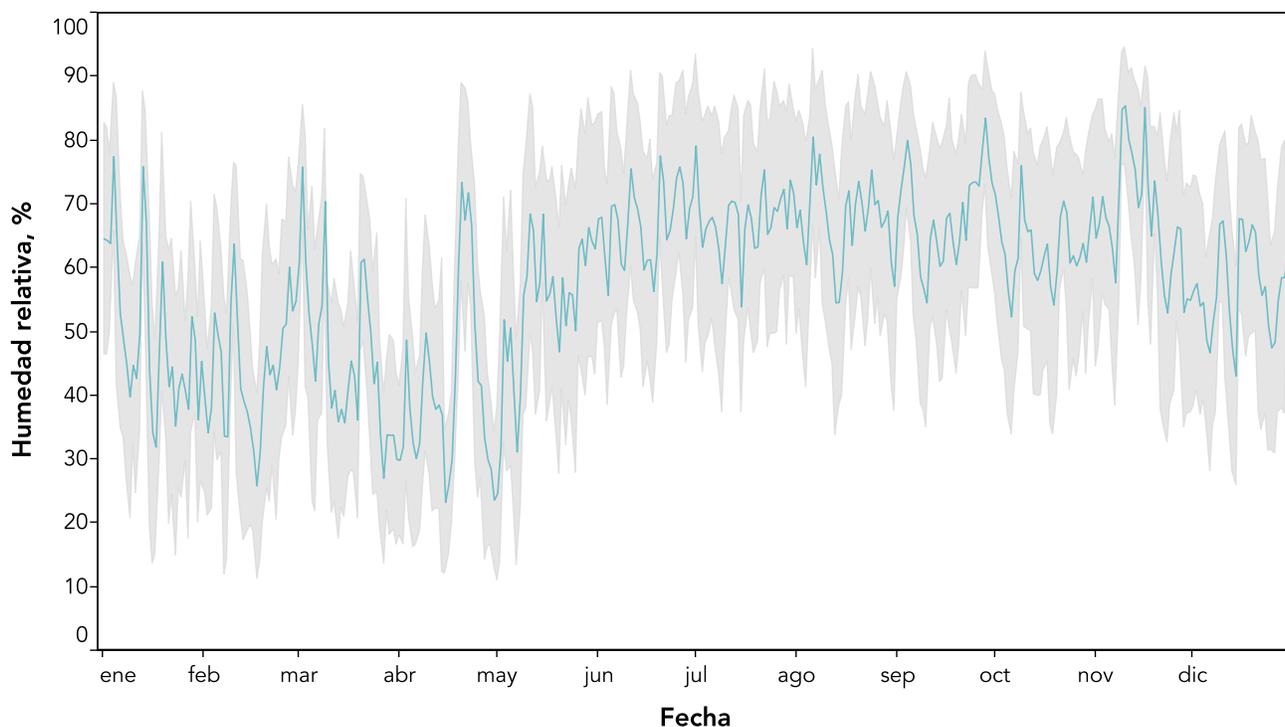


Figura 2.7. Serie de tiempo de la humedad relativa en la Ciudad de México y su área metropolitana durante 2016. La línea azul indica el promedio diario calculado a partir de los registros de todos los sitios de monitoreo, el área sombreada en gris corresponde a una desviación estándar del promedio diario.

Precipitación pluvial

Durante 2015 la REDMET fue equipada con sensores continuos de precipitación pluvial, lo que permitió realizar un seguimiento de la lluvia a lo largo del año. La precipitación pluvial se reporta en milímetros (mm) de lluvia que equivale a la altura de la lámina que alcanzaría el volumen acumulado en un área de 1 metro cuadrado (m²). Un mm de lluvia equivale a aproximadamente a un litro de agua por metro cuadrado (1 L/m²).

El promedio de la precipitación acumulada medida en los sitios de monitoreo de la REDMET fue de 946 mm, alrededor del 85 % del volumen se registró durante la temporada de lluvia (mayo-octubre). En los sitios ubicados en el territorio de la Ciudad de México, el promedio de la precipitación acumulada fue de 965 mm. Julio fue el más lluvioso con un promedio acumulado de 211 mm, mientras que el más seco fue febrero con un promedio acumulado de 1.6 mm (Figura 2.8). Más del 95% de los eventos registrados tuvieron una intensidad de precipitación de ligera (menor a 2 mm) a moderada (2 a 15 mm). Entre abril y diciem-

bre se registraron 123 eventos en los que la intensidad de la precipitación se puede clasificar como fuerte (15 a 30 mm), 23 eventos con intensidad muy fuerte (30 a 60 mm) y un evento de lluvia torrencial (>60 mm) el día 2 de agosto. Cada evento se refiere a la cantidad de lluvia acumulada durante una hora en uno o más sitios de medición. El 21 de julio se registró el valor máximo de precipitación acumulada para el periodo de 24 horas con 81.6 mm en la estación Tlalnepantla (TLA), ubicada en el municipio del mismo nombre. En la Figura 2.9 se muestra la distribución espacial de precipitación acumulada, en ella se observa como la precipitación se incrementa en la dirección noreste-suroeste. La estación en donde se observó la mayor cantidad de precipitación fue Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN), localizado en la Sierra de las Cruces, al suroeste de la Ciudad de México, con un valor acumulado de 1531 mm, mientras que el valor mínimo se observó en Acolman (ACO), ubicada al noreste de la ZMCM con un acumulado de 619 mm.

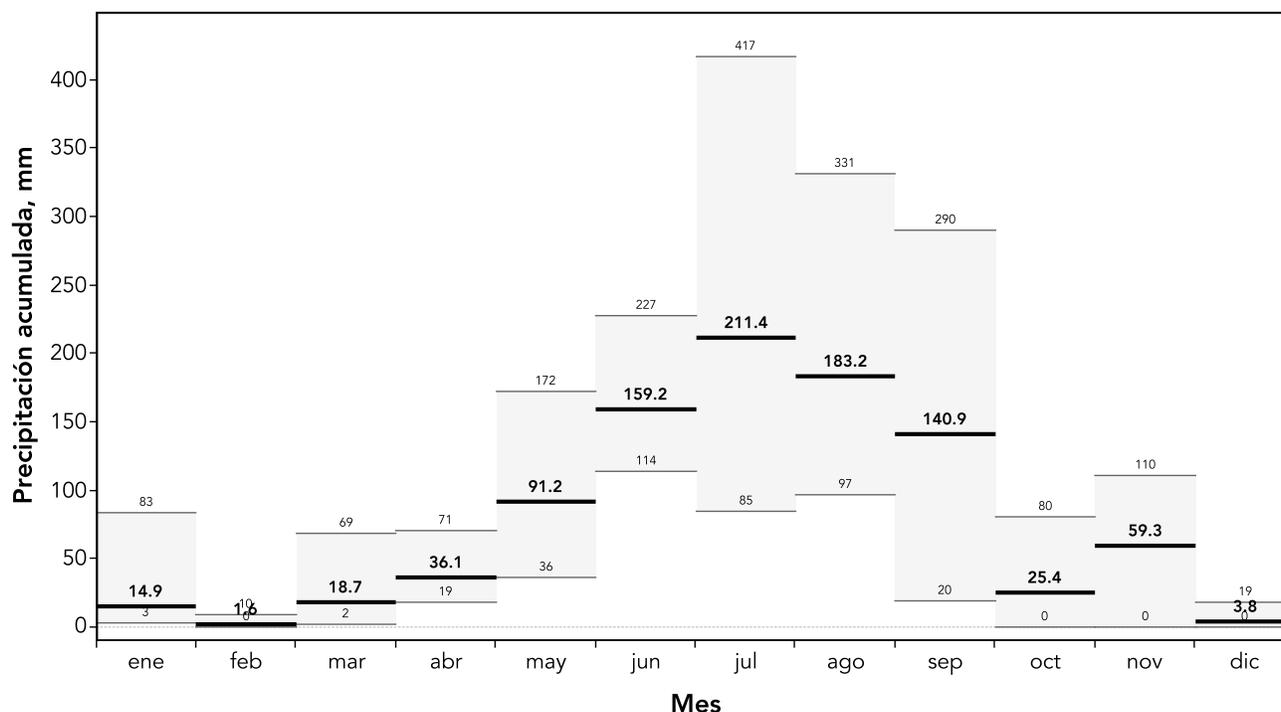


Figura 2.8. Distribución de la precipitación acumulada por mes, la línea negra indica el valor promedio de los acumulados mensuales de los diferentes sitios de monitoreo, las líneas que delimitan la región gris corresponden a los promedios acumulados máximo y mínimo, respectivamente.

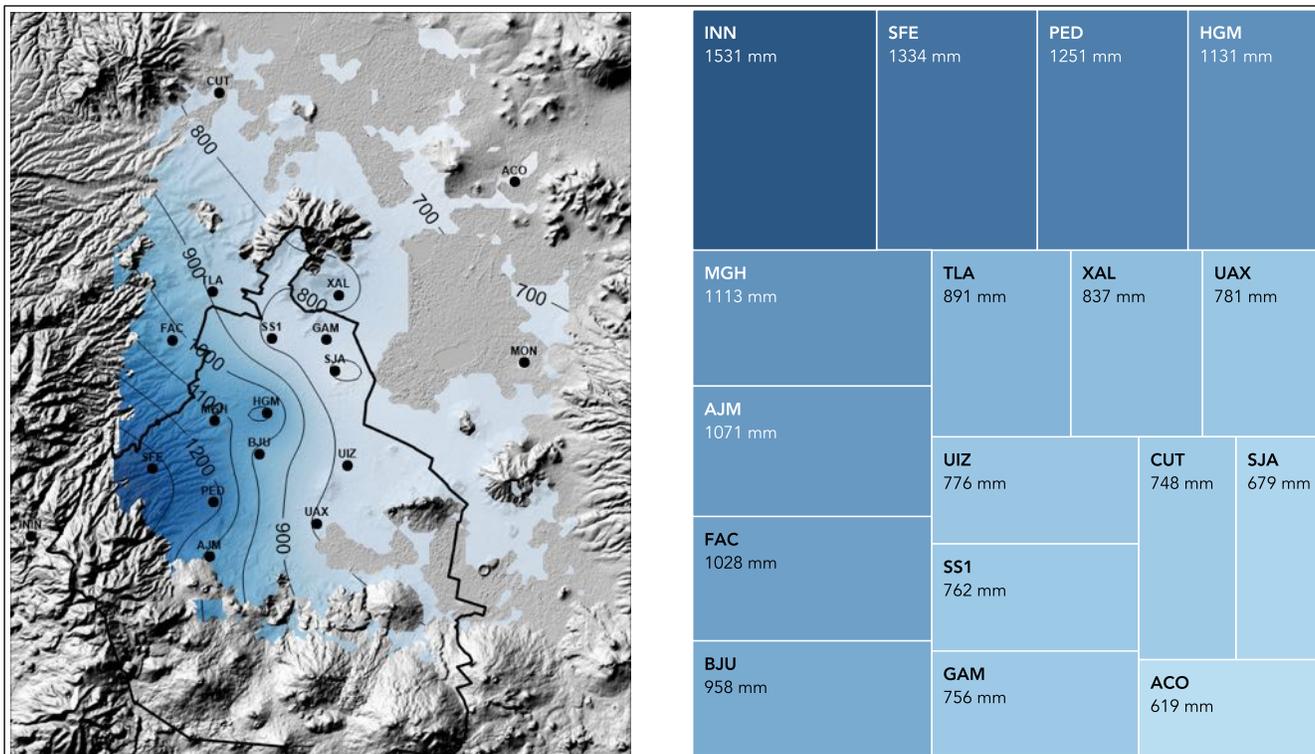


Figura 2.9. Distribución espacial de la precipitación pluvial. El mapa de la izquierda indica la distribución de la precipitación acumulada para el territorio urbanizado, los puntos corresponden a los sitios en donde se realizó la medición durante 2016. El gráfico de la derecha compara el valor de precipitación acumulada para cada sitio.

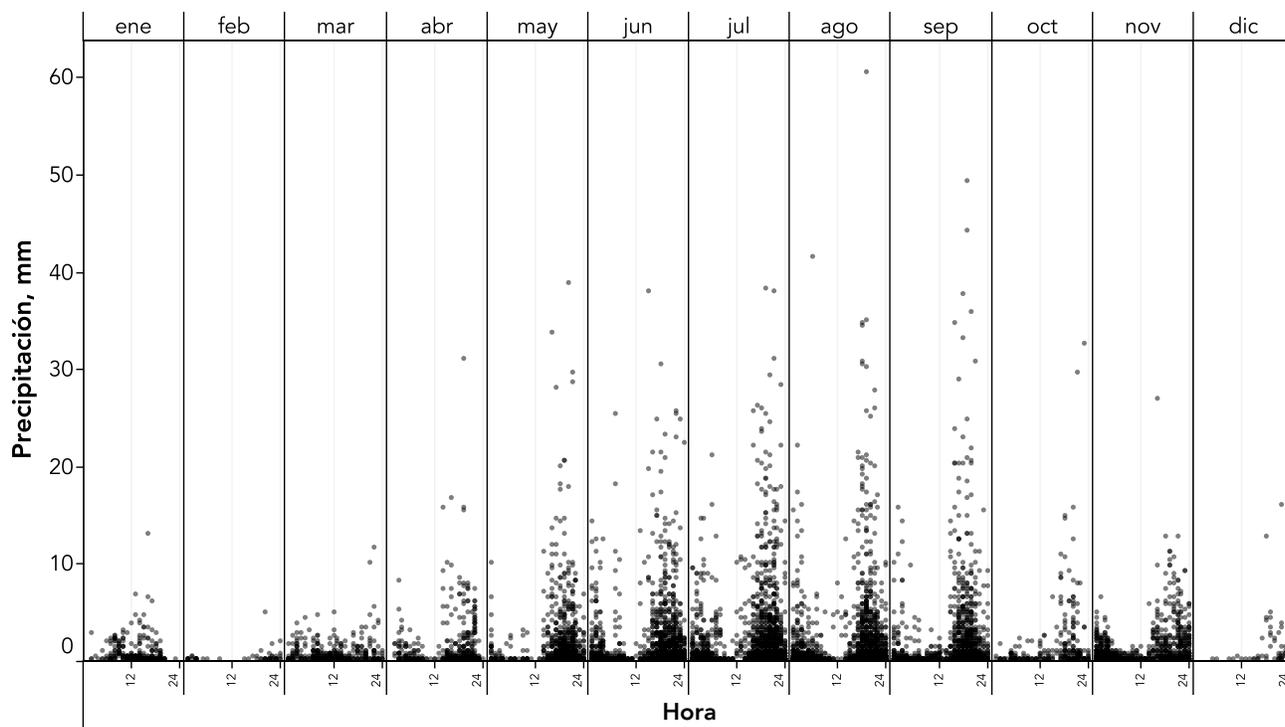


Figura 2.10. Frecuencia de eventos de lluvia durante 2016 por mes y hora. La mayor frecuencia de eventos se presentó durante las tardes.

Presión barométrica

La fuerza que ejerce la masa de la atmósfera sobre la superficie terrestre se conoce como presión atmosférica o presión barométrica. Esta fuerza es proporcional a la densidad de la atmósfera y disminuye con la altitud. Durante el día, los cambios en la presión dependen de las ligeras variaciones en la densidad y composición de la atmósfera. En un día despejado y seco la presión atmosférica es mayor en comparación con un día húmedo o lluvioso.

La presión atmosférica como indicador indirecto de los cambios en la densidad de la masa de la atmósfera, es de utilidad para el pronóstico de corto plazo en las condiciones del tiempo meteorológico. Durante los días en los que la presión es alta y la velocidad de viento es débil las condiciones son favorables para el estancamiento de la contaminación, debido a la escasa dispersión vertical y horizontal de la contaminación. La presencia de un sistema de alta presión directamente sobre la cuenca de México podría provocar un incremento en la presión barométrica proporcional a la intensidad del sistema. Las inversiones

de subsidencia, que pueden provocar episodios de contaminación durante varios días consecutivos, ocurren dentro de un sistema de alta presión cuando el aire desciende adiabáticamente creando una capa de aire estable. Sin embargo, la presencia de subsidencia no necesariamente implica cambios en la presión en la superficie.

El promedio de la presión atmosférica, calculado a partir de los datos de las estaciones ubicadas en la parte baja de la cuenca, fue de 585 mmHg, con un intervalo entre 575 y 591 mmHg. En las estaciones ubicadas en la región montañosa la presión generalmente es menor que en la parte baja de la cuenca. El promedio no presentó desviaciones con respecto a los valores históricos, sin embargo, entre el 7 y 11 marzo de 2016 se presentó un fenómeno meteorológico inusual caracterizado por la fuerte influencia de la corriente de chorro (*jet stream*) subtropical, que provocó un incremento importante en la velocidad del viento a nivel de superficie y una drástica caída en la presión atmosférica que alcanzó un mínimo el día 9 de marzo (ver Figura 2.11).

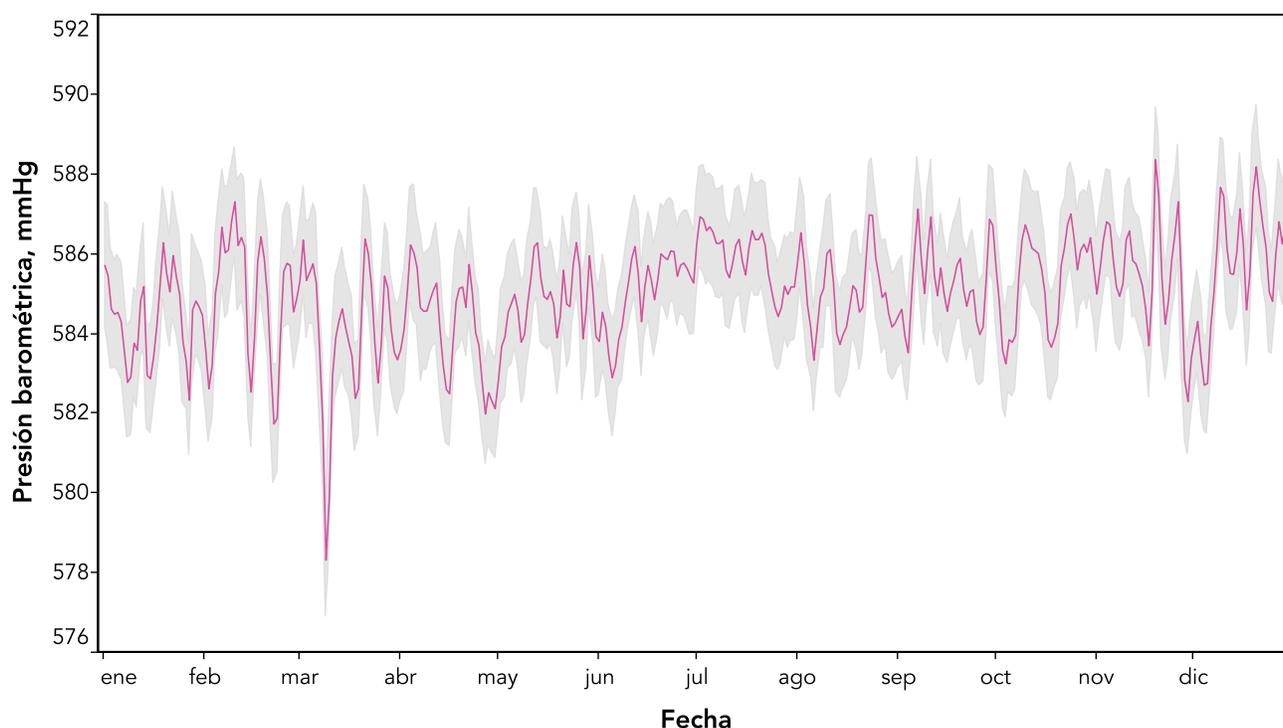


Figura 2.11. Serie de tiempo de los promedios diarios de la presión barométrica en las estaciones localizadas en la parte baja de la cuenca de México. La línea continua corresponde al promedio diario, mientras que la región marcada en gris corresponde a una desviación estándar.

Viento

El viento dentro la capa límite es determinante en el transporte de los contaminantes dentro y fuera de la cuenca, así como en la acumulación/transformación/dispersión de la contaminación. Las características del terreno complejo del centro de país, la fisiografía particular de la cuenca de México y su entorno montañoso influyen de manera importante en la meteorología local y particularmente en los patrones del viento. La interacción de los sistemas de escala regional y sinóptica con la el terreno complejo generan viento débil con patrones variables de circulación dentro de la cuenca (Jáuregui *et al.*, 1988; Jazcilevich *et al.*, 2003; de Foy *et al.*, 2005). La variabilidad del viento durante el día en la Ciudad de México y su área metropolitana es el resultado de las variaciones de corto plazo en el balance de calor (suelo/atmósfera), la humedad y de la interacción de las corrientes de viento de escalas local, regional y sinóptica.

La variabilidad diurna del viento está determinada fuertemente por la fisiografía de la región,

y se caracteriza por flujos descendentes en las pendientes montañosas (catabáticos) impulsados por la brisa de montaña en la noche y madrugada, los cuales convergen en la región central de la cuenca favoreciendo la acumulación gradual de la contaminación emitida durante el periodo nocturno. Con la salida del sol, el calentamiento de las pendientes de las montañas genera un gradiente de temperatura que impulsa la elevación del aire caliente, creando un movimiento de arrastre del viento desde la cuenca conocido como brisa de valle. Este patrón local puede ser modificado por la presencia de flujos térmicos provenientes de la meseta central (de Foy *et al.*, 2005) por la presencia del flujo canalizado (*gap flow*) proveniente del paso natural al suroeste de la cuenca, que es impulsado por los gradientes térmicos a lo largo del borde de la cuenca (Doran y Zhong, 2000), por la influencia de las masas de aire polar provenientes del norte del continente y por la interacción entre las brisas marinas originadas en el océano Pacífico y el Golfo de México (de Foy *et al.*, 2005).

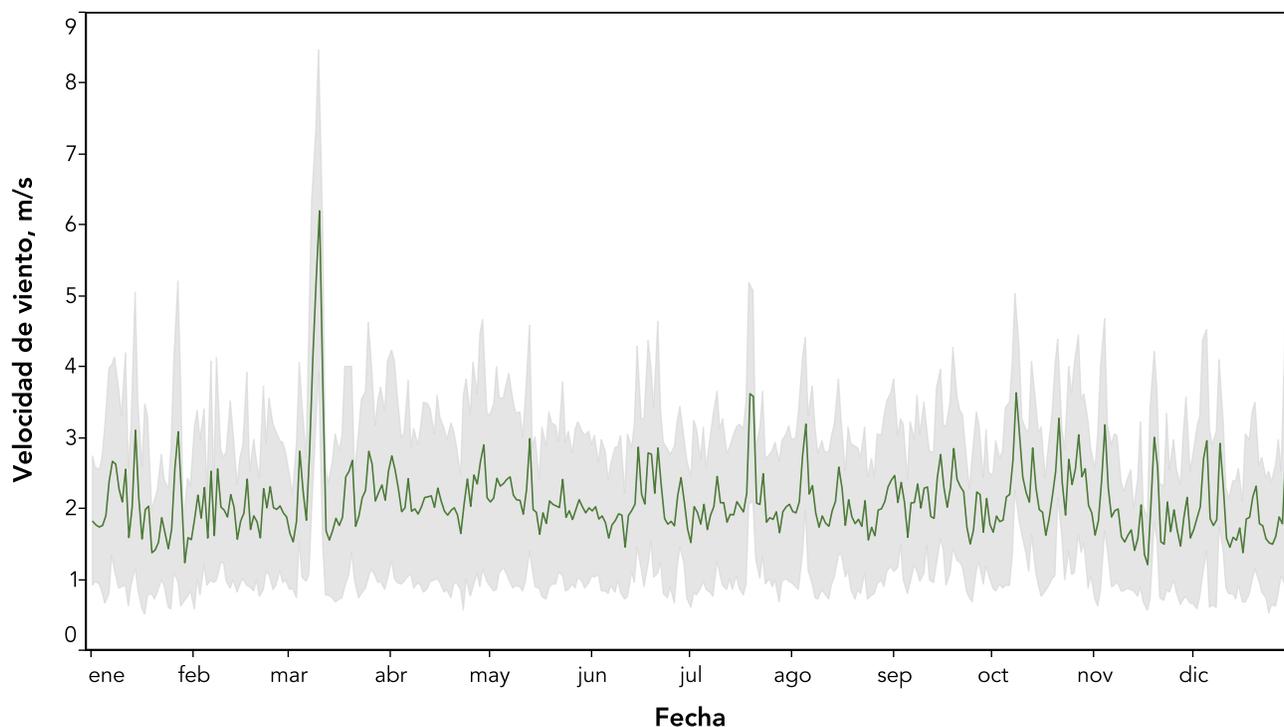


Figura 2.12. Serie de tiempo de la velocidad de viento en la Ciudad de México y área metropolitana durante 2016. En la gráfica la línea verde indica el promedio diario, la región sombreada en gris corresponde a la desviación estándar. El gráfico se construyó empleando todos los datos de los sitios que miden este parámetro.

Empleando los resultados de las mediciones obtenidas de las estaciones de la REDMET el promedio de la velocidad escalar fue de 2.1 m/s (7.7 km/h). La velocidad de viento en las estaciones que se encuentran a la altura promedio de la Ciudad de México tiene una variabilidad diurna característica, con velocidades bajas durante la madrugada que incrementan gradualmente a partir de las 8:00, hasta alcanzar un máximo alrededor de las 18:00, disminuyendo durante la noche (Figura 2.13a). Los sitios de monitoreo ubicados en la región montañosa presentan una variabilidad distinta, en donde la velocidad incrementa rápidamente entre las 9:00 y 11:00, debido al gradiente térmico provocado por el rápido calentamiento de las laderas montañosas (Figura 2.13b), después del mediodía continua aumentando a una menor tasa hasta alcanzar un máximo alrededor de las 18:00.

Los flujos de viento en la superficie presentan, además de la variación diurna, cambios importantes durante el año. La relativa estabilidad climática de los fenómenos regionales y los sistemas de mayor escala, genera patrones consis-

tentes de mediano plazo. La meteorología de la cuenca suele clasificarse en tres estaciones o temporadas: la temporada seca-fría, entre noviembre y febrero; la temporada seca-cálida, de marzo a abril; y la temporada de lluvia, de mayo a octubre. Estas se deben a dos patrones básicos de escala sinóptica: un flujo seco proveniente del oeste, entre noviembre y abril, asociado a condiciones anticiclónicas, y un flujo húmedo del este durante el resto del año provocado por los vientos alisios más débiles. En la temporada seca a nivel de la cuenca suelen presentarse flujos débiles del norte por la mañana, fortaleciéndose en la tarde con un mayor componente occidental y convirtiéndose en caudales de drenaje descendente durante la noche. El desarrollo de regiones de convergencia en el centro y sur de la ciudad durante la tarde es común en esta temporada, principalmente entre febrero y mayo, desempeñando un papel importante en el comportamiento y distribución del ozono y otros contaminantes secundarios. En la temporada de lluvia predominan los flujos de viento provenientes del norte y este con un importante contenido de humedad.

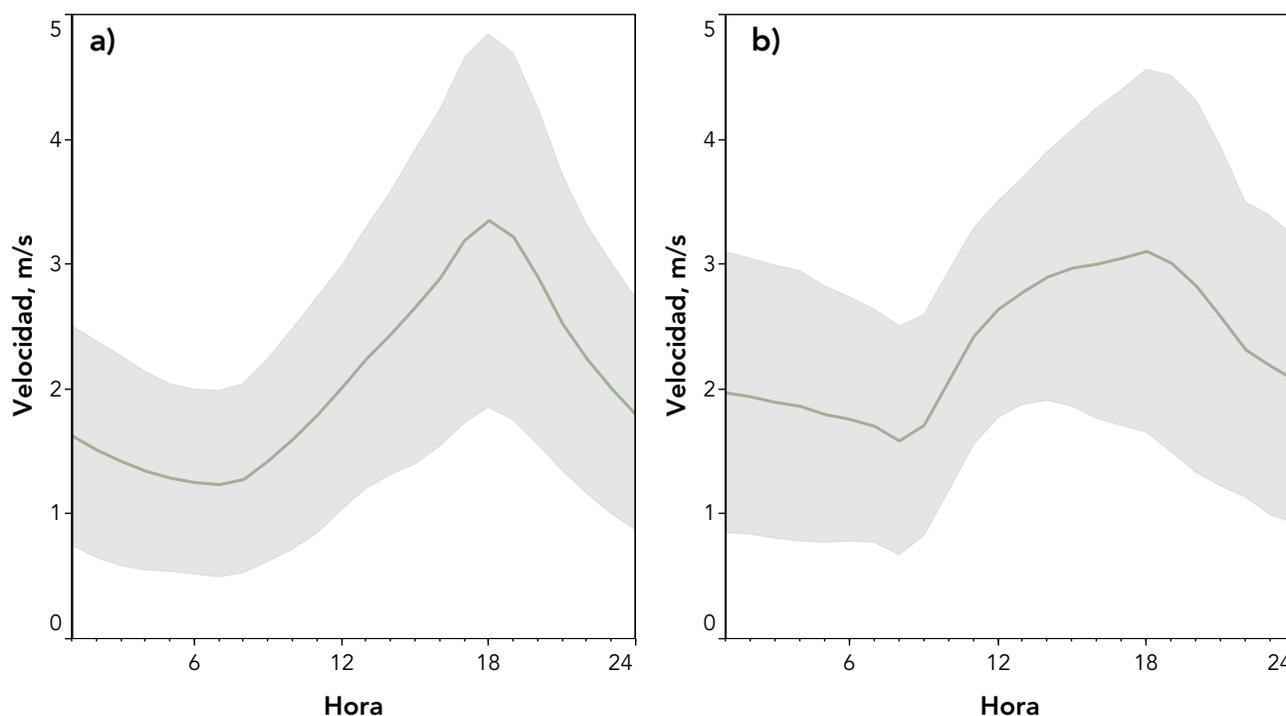


Figura 2.13. Serie de tiempo de la velocidad de viento en la Ciudad de México y área metropolitana durante 2016. En la gráfica la línea verde indica el promedio diario, la región sombreada en gris corresponde a la desviación estándar. El gráfico se construyó empleando todos los datos de los sitios que miden este parámetro.

En la Figura 2.14 se muestran los vectores del viento dominante por día del año calculado a partir del promedio vectorial de los registros de 24 horas de la REDMET. En la figura se destacan aquellos días en los que se activó algún episodio del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA). Algunos aspectos que pueden destacarse del comportamiento de los vientos dominantes incluyen los siguientes:

- alrededor del 60 % de los días del año la dirección dominante del viento fue del norte de la cuenca;
- los vientos dominantes en enero, marzo y abril tuvieron una marcada componente del sur;
- entre el 8 y el 11 de marzo se observó un aumento importante en la velocidad del viento con una fuerte componente del sur, asociada a una corriente de chorro;
- la mayoría de los eventos de contaminación por ozono se presentaron en días con baja velocidad de viento y dirección predominante del norte o este.

La presencia de flujos de viento de baja intensidad del norte de la ZMCM se asocia con mala calidad del aire en la Ciudad de México. Esto se debe a que las fuentes más importantes de contaminación se localizan al norte y centro de la zona metropolitana (incluyendo al corredor industrial Tula-Tepeji), las barreras geográficas al sur y oeste dificultan la dispersión del viento lo que en condiciones de estabilidad atmosférica y presencia de radiación solar puede provocar estancamiento y episodios severos de contaminación fotoquímica. Por otra parte, la presencia de vientos del sur se asocia con bajos niveles de contaminación y una mejor calidad del aire en la Ciudad de México, ya que la dispersión es más eficiente. Durante 2016 alrededor del 60% de los días del año el viento predominante tuvo su origen en el sector norte de la cuenca, mientras que alrededor del 30% de los días del años el flujo predominante se originó en el sector sur. En los meses de la temporada de ozono, en aquellos días en los que dominó viento del sur durante el mediodía y las primeras horas de la tarde, la concentración de ozono disminuyó significativamente al evitarse la acumulación de precursores en la región sur de la ciudad. En la segunda mitad de marzo y la mayor parte de abril predominó el viento del sur, reduciendo el número de

eventos con altas concentraciones de ozono para ese periodo.

Con el propósito de observar los patrones del viento en diferentes intervalos del día, en las Figuras 2.15 a 2.17 se presentan los campos de viento promedio diferenciados para los siguientes periodos del día: matutino (7:00-14:00), vespertino (15:00-20:00) y nocturno (21:00-6:00). Como era de esperarse, los flujos de montaña determinaron el comportamiento de los vientos durante el periodo nocturno la mayor parte del año, mientras que durante los periodos matutino y vespertino fue evidente la interacción entre el movimiento sinóptico y los flujos térmicos en superficie. En enero, la presencia constante de una corriente proveniente del suroeste en la atmósfera media y baja generó flujos de viento en superficie hacia el norte, contribuyendo a la dispersión favorable de la contaminación. En febrero predominó una corriente sinóptica del oeste, la presencia de sistemas de alta presión en la región central del país favoreció el avance de flujos térmicos provenientes del norte de la cuenca durante el periodo matutino y vespertino, principalmente en la segunda quincena del mes, ésta situación fue desfavorable para la dispersión de la contaminación. Los primeros días de marzo se caracterizaron por la presencia inusual de la corriente de chorro subtropical que provocó un fuerte flujo de viento desde el sur en todo el espesor de la troposfera y tuvo una influencia importante sobre el comportamiento del viento en la superficie. De manera contrastante, con el desplazamiento de la corriente de chorro hacia latitudes superiores, la presencia de un sistema de alta presión entre el 12 y 18 de marzo generó una fuerte estabilidad atmosférica, provocando un severo episodio de contaminación entre el 11 y 15. En la segunda quincena de marzo y abril dominó una corriente del suroeste con sistemas débiles de alta presión a escala sinóptica, por lo que a nivel de superficie se registraron vientos dominados por corrientes del sur favorables para la dispersión. En mayo, el aumento en la frecuencia e intensidad de los sistemas de alta presión en el centro del país y la presencia de flujos sinópticos del oeste, favorecieron los flujos térmicos de superficie, propicios para el transporte de contaminación hacia el sur, además de escasa dispersión, provocando numerosos eventos de contaminación por ozono.

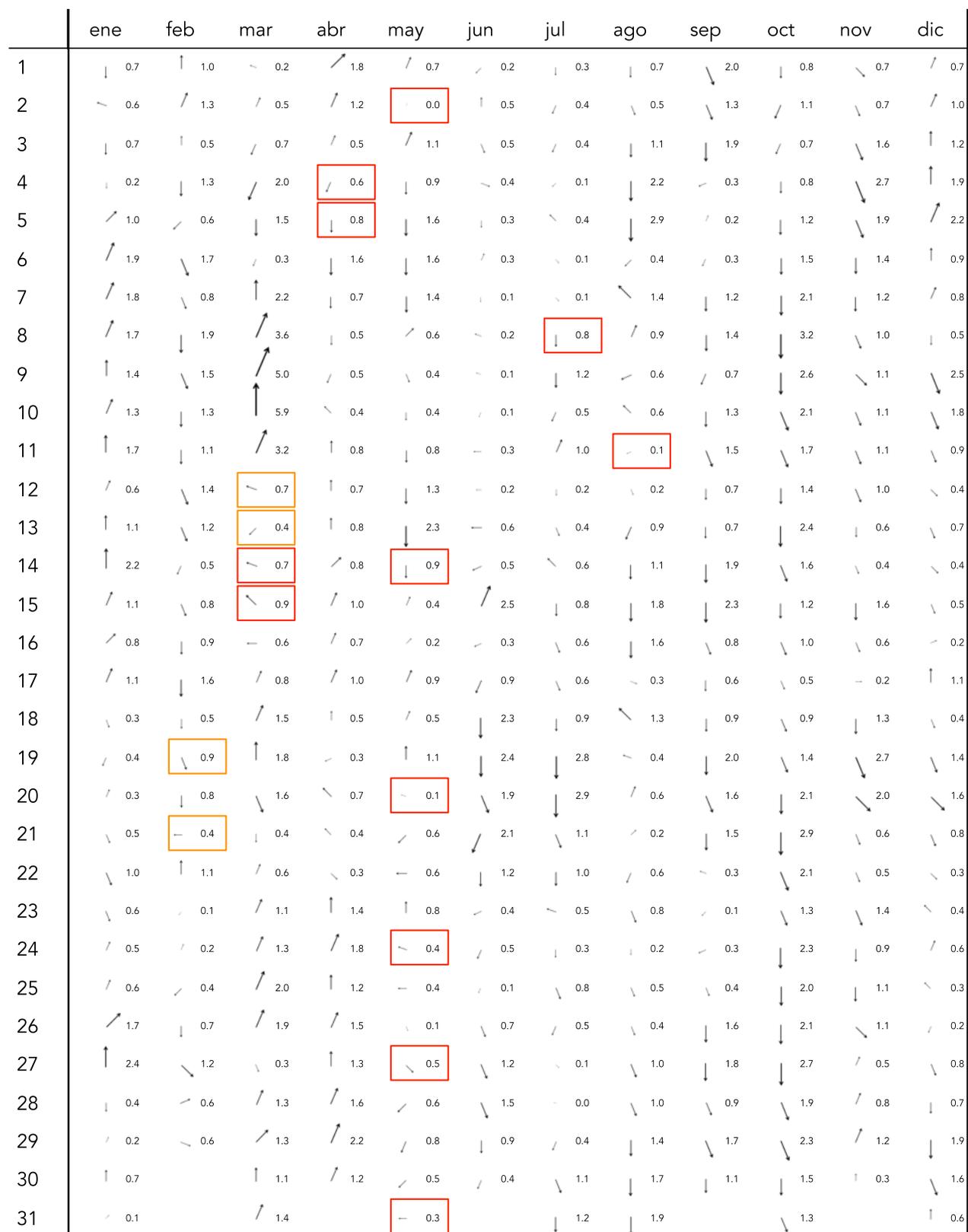


Figura 2.14. Dirección predominante del viento por día. Las flechas corresponden al vector predominante calculado como el promedio vectorial de 24 horas. La punta del vector indica la dirección del flujo del viento, el número a la derecha corresponde al promedio vectorial de la velocidad. En la figura se destacan en naranja aquellos días en los que se activó la Fase de Precontingencia, en rojo cuando se activó la Fase I de Contingencia.

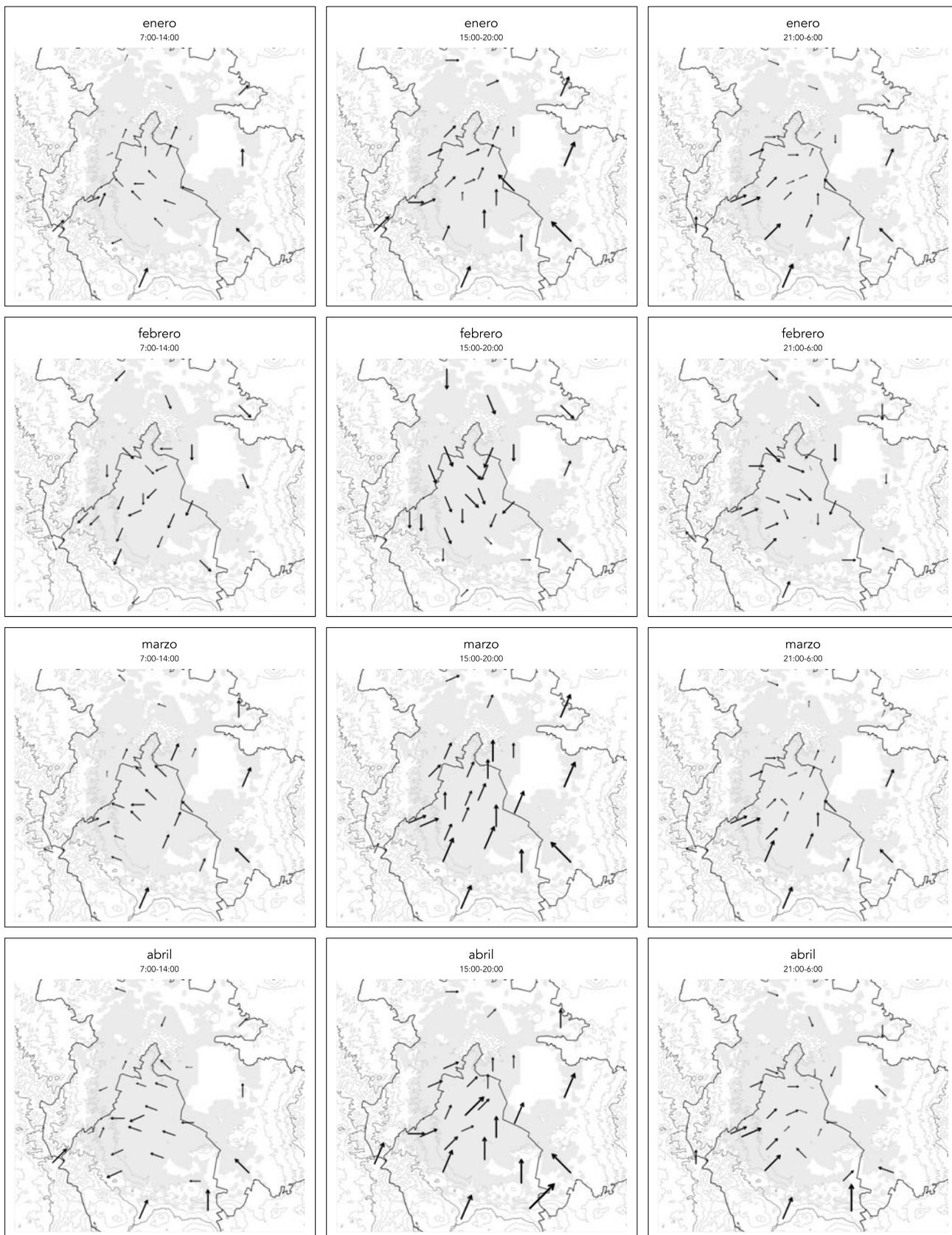


Figura 2.15. Campo de flujo de viento promedio para los periodos matutino (7:00-14:00), vespertino (15:00-20:00) y nocturno (21:00-6:00) para los meses de enero a abril. El tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

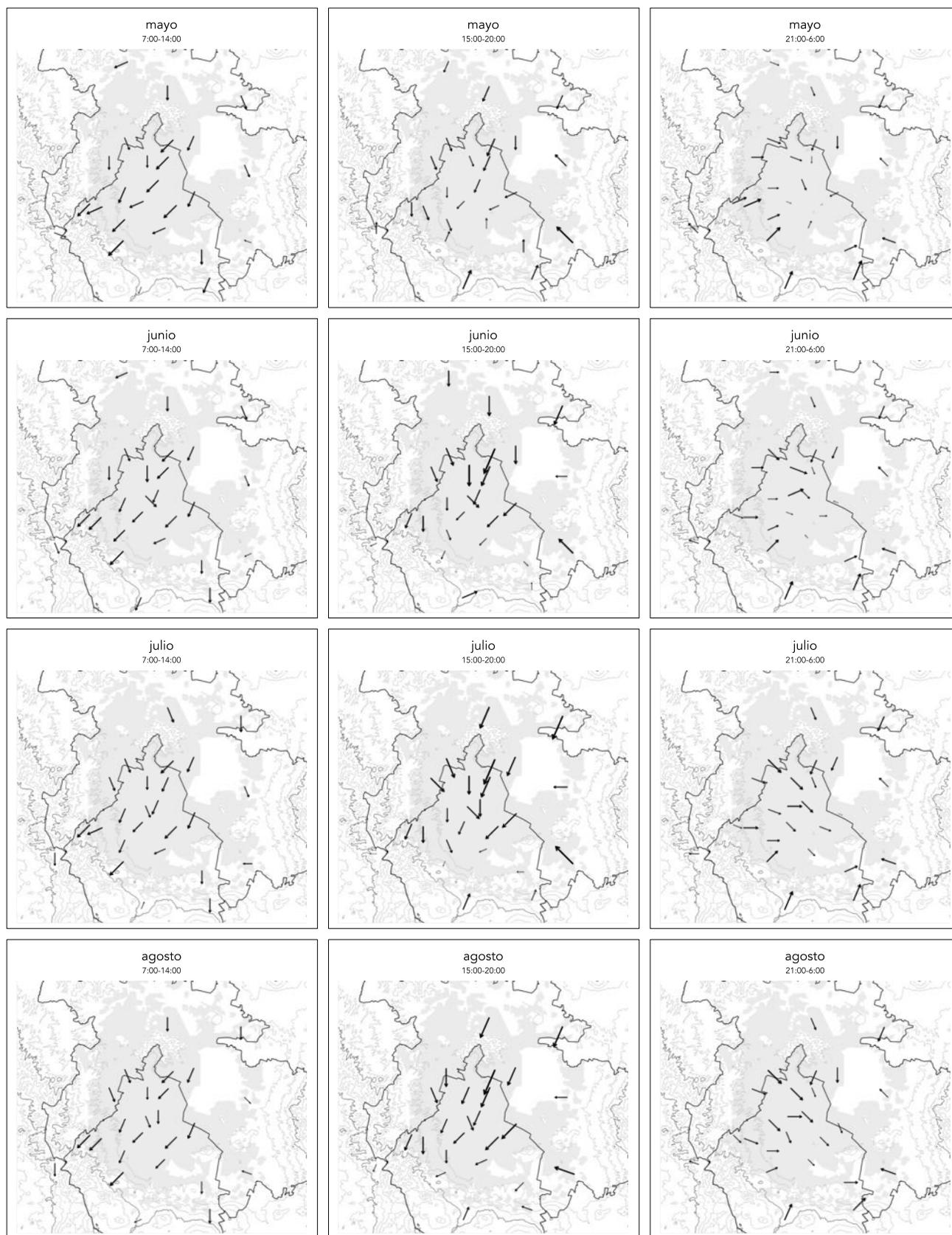


Figura 2.16. Campo de flujo de viento promedio para los periodos matutino (7:00-14:00), vespertino (15:00-20:00) y nocturno (21:00-6:00) para los meses de mayo a agosto. El tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

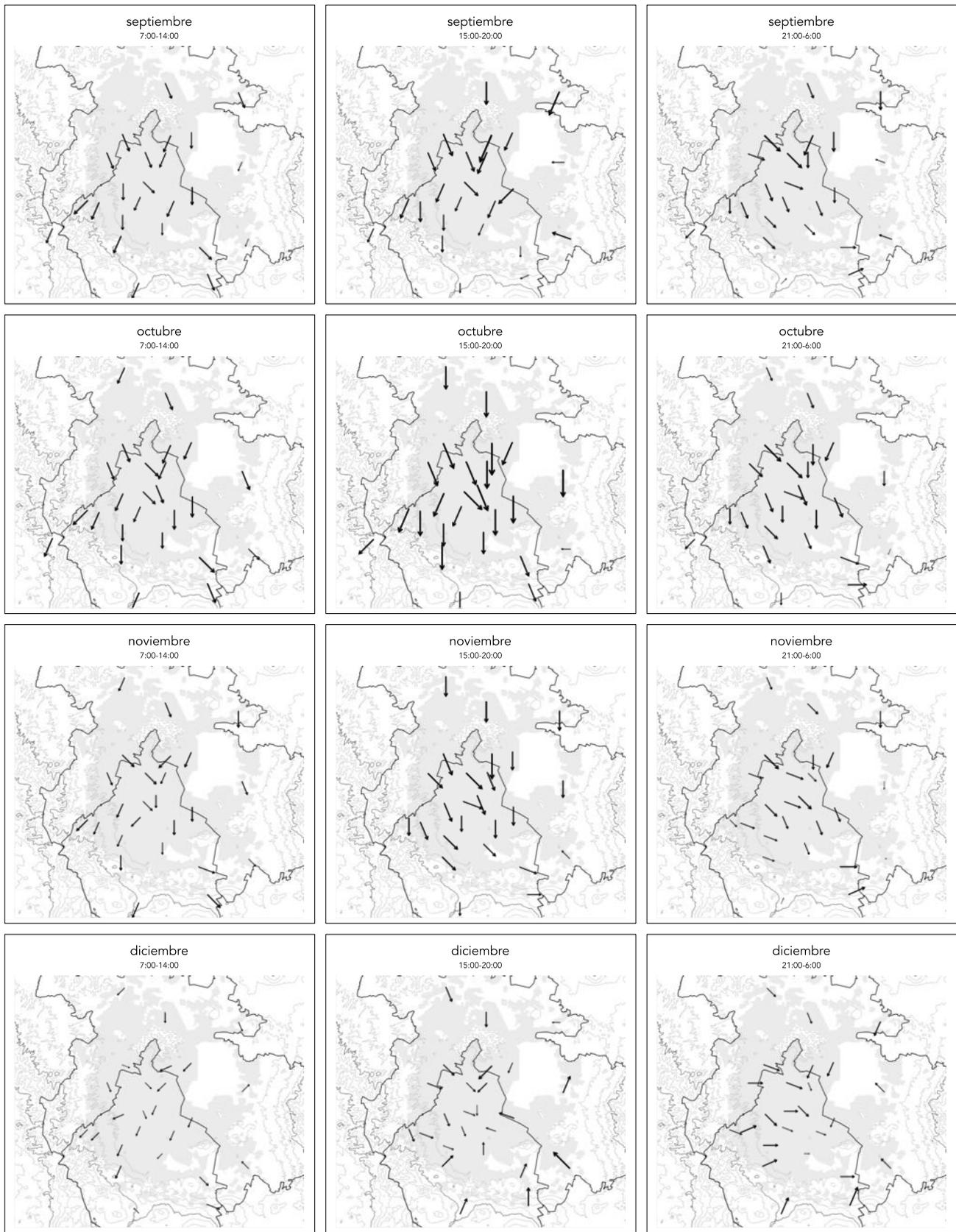


Figura 2.15. Campo de flujo de viento promedio para los periodos matutino (7:00-14:00), vespertino (15:00-20:00) y nocturno (21:00-6:00) para los meses de septiembre a diciembre.

A partir de la segunda mitad de junio y hasta septiembre predominaron los flujos del este en la escala sinóptica, que transportaban humedad desde el Golfo de México. A nivel de superficie se observaron flujos de viento desde el norte durante la mañana y tarde con episodios convectivos por la tarde acompañados de lluvia, principalmente al oeste y sur de la Ciudad de México, con condiciones favorables para la calidad del aire. Octubre y noviembre se caracterizaron por vientos de superficie dominados por flujos térmicos, con una dirección predominante del norte durante los periodos matutino y vespertino, y un incremento en la intensidad durante el periodo vespertino, favorable para la dispersión de la contaminación. En diciembre con el aumento en la frecuencia e intensidad de las inversiones térmicas se observó una notable disminución en la velocidad de viento así como la presencia de estabilidad atmosférica a lo largo del mes.

Entre el martes 7 y el viernes 11 de marzo se presentó un episodio inusual en el centro del país caracterizado por un flujo de viento de gran intensidad proveniente del sur y un descenso en la presión barométrica. En la mañana del 7 de marzo se registró un incremento gradual en la velocidad del viento en la mayoría de los sitios de monitoreo con velocidades promedio de 12 km/h y máximas de hasta 26 km/h. La intensidad del viento disminuyó durante la noche, sin embargo, incrementó nuevamente el día siguiente hasta alcanzar velocidades superiores a 22 km/h. Por la tarde y noche del martes 8 de marzo no se observó disminución en la intensidad, al contrario, se presentó un incremento progresivo hasta alcanzar velocidades promedio superiores a 30 km/h el jueves 10 de marzo, con rachas que superaron los 50 km/h. La noche del 10 de marzo, la intensidad del viento disminuyó gradualmente para incrementarse nuevamente el viernes, pero con una menor intensidad que la observada en los días previos. Este episodio concluyó la tarde del 11 de marzo, con excepción del ozono, la concentración de la mayoría de los contaminantes alcanzó niveles mínimos. En el caso del ozono, al disminuir la presencia de compuestos que contribuyen a su agotamiento y aumentar la posible contribución del ozono de capas atmosféricas superiores, los niveles de fondo se incrementaron significativamente. A pesar del beneficio que este episodio tuvo en la

calidad del aire, el aumento del viento provocó daños graves en la infraestructura urbana de la Ciudad de México y la ciudad de Toluca.

Este episodio de viento intenso fue provocado por un comportamiento atípico en la corriente de chorro subtropical que generalmente se encuentra en latitudes alrededor de los 30 °N y altitudes de 10 a 15 km (en el límite entre la troposfera y la estratosfera). La corriente de chorro subtropical marca la diferencia entre el aire frío de latitudes medias y el aire caliente ecuatorial, se caracteriza por una corriente estrecha con vientos de gran velocidad (hasta 150 km/h) que se mueven de oeste a este. El recorrido de la corriente de chorro suele tener una forma serpenteante formando meandros debido a una compleja interacción de los gradientes de temperatura entre el ecuador y los polos, las fuerzas de Coriolis y las características de la superficie terrestre. Es común que durante el invierno la corriente de chorro se posicione al norte del país, impulsada por el avance de las masas de aire polar. El 7 de marzo una masa de aire polar que se desplazaba desde el norte del continente, provocó la formación de un meandro en la corriente de chorro por debajo de los 30 °N de latitud, la cual alcanzó el centro del país (ver Figura 2.18), ubicándose directamente sobre la Ciudad de México entre el miércoles 9 y jueves 10 de marzo. De manera inusual la influencia de la corriente de chorro se observó en toda la estructura vertical desde la capa límite hasta la troposfera libre, modificando también la dirección y velocidad de viento en superficie. Sus efectos se percibieron en la cuenca de México, en el valle de Toluca y en toda la meseta central. En la Figura 2.19a se muestra el perfil vertical del viento en los primeros 3500 metros sobre el nivel del suelo (msns) para el 7 y 12 de marzo, es claro como la corriente de chorro influyó en la dirección y la velocidad del viento en la capa cercana al suelo. Entre el 9 y 10 de marzo la velocidad promedio a una altitud de 3000 msns estuvo entre 108 y 144 km/h, con dirección hacia el noreste. En altitudes menores se observaron vientos acoplados con una velocidad decreciente a medida que disminuyó la altitud. En las Figura 2.19b y 2.19c se indica la variación horaria de las velocidades promedio y máxima, así como los vectores de flujo promedio observados en las estaciones de superficie (medidos a 10 msns), respectivamente.

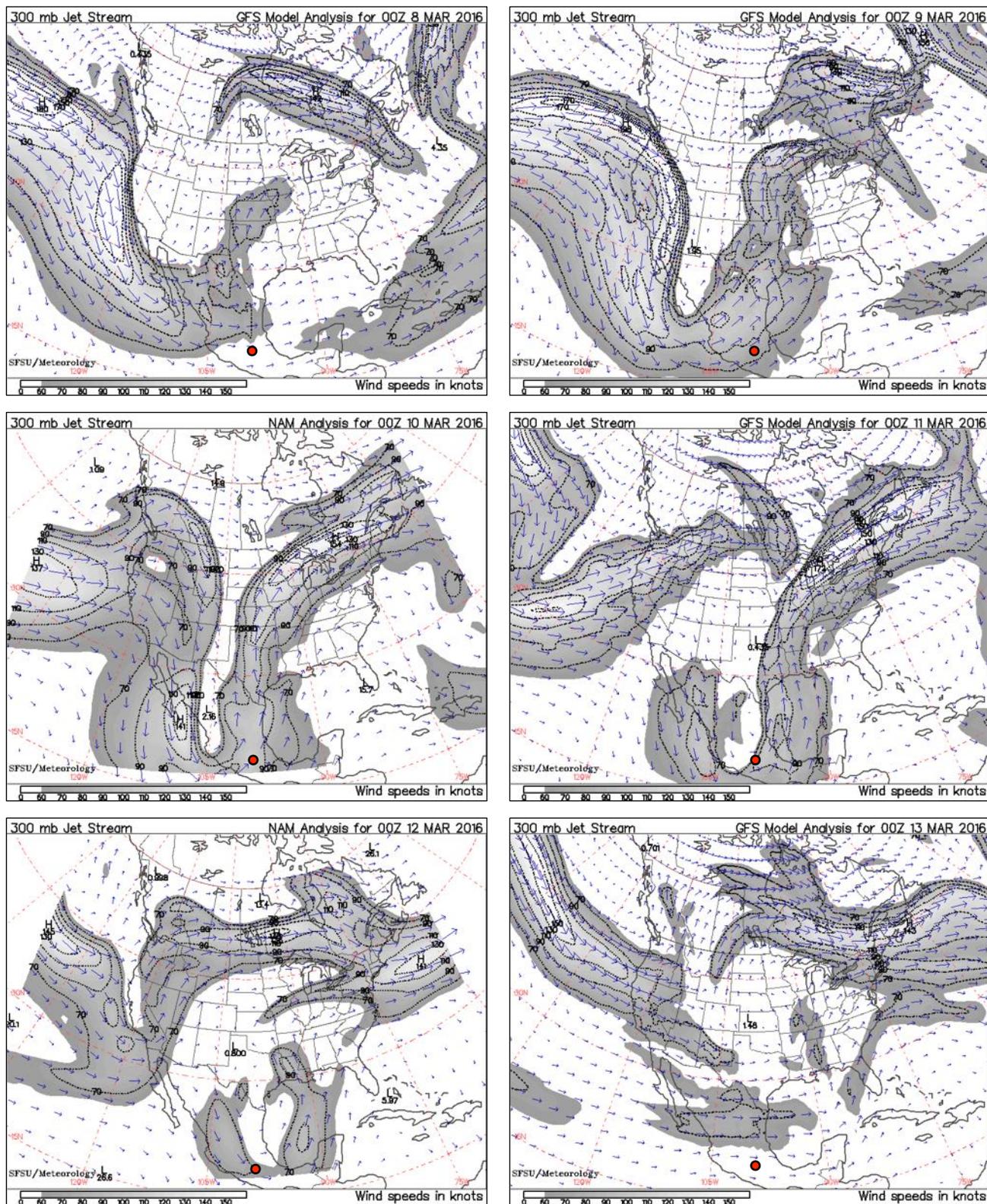


Figura 2.18. Movimiento de la corriente de chorro a 300 mb para los días 7 a 12 de marzo de 2016, los mapas corresponden a las 00Z (00:00 UTC). Los vectores en azul representan la dirección y velocidad del viento, la zona gris indica la región con velocidades mayores a 60 nudos (31 m/s), dentro de esta región se indican las isocatas a intervalos de 10 nudos (5.14 m/s). El círculo rojo muestra la ubicación de la Ciudad de México. Fuente: http://squall.sfsu.edu/crws/archive/jet_arch.html, consultada el 20 de mayo de 2017.

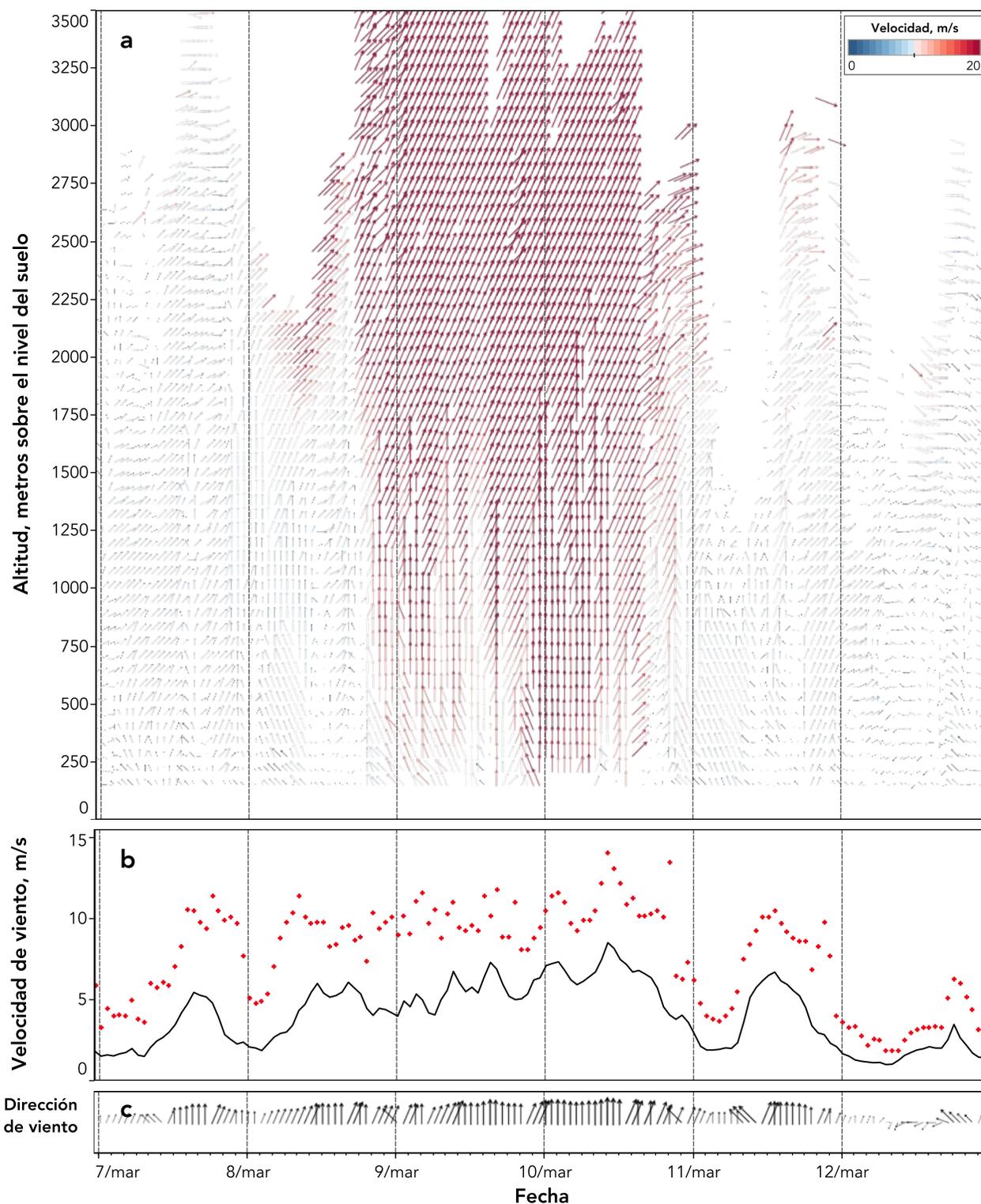


Figura 2.19. a) Perfil vertical horario del viento medido en el supersitio, los vectores indican la dirección e intensidad del viento a diferentes alturas entre 152 y 3550 msns, los espacios en blanco indican la ausencia de datos. b) Velocidad del viento en superficie, la línea continua indica el promedio escalar de todos los sitios de monitoreo, los signos en rojo indican el máximo de la hora. c) Viento predominante calculado a partir del promedio vectorial de cada hora empleando los registros de todas las estaciones de monitoreo, el tamaño del vector es proporcional a la intensidad.

Altura de mezclado

Una parcela de aire que se eleva desde la superficie de la Tierra ascenderá a un ritmo determinado por el gradiente seco adiabático. Mientras la masa de aire es más caliente que la temperatura ambiente, continuará ascendiendo, sin embargo, una vez que esté más fría que la temperatura ambiente disminuirá su velocidad de ascenso y finalmente se detendrá. Este punto en donde la temperatura de la parcela cruza la curva que indica el perfil de temperatura vertical determina la altura de mezclado de la capa límite atmosférica (CLA). Para los propósitos de esta sección la altura de mezclado o de mezcla, es la altura de la capa adyacente a la superficie sobre la cual, cualquier componente emitido o arrastrado dentro de ella se dispersará verticalmente por convección o turbulencia mecánica (Seibert *et al.*, 2000) y representa la altura máxima que pueden alcanzar los contaminantes liberados a nivel de la superficie.

Debido a que la altura de mezclado no puede ser observada directamente, su estimación se realiza indirectamente a partir de mediciones del per-

fil de la temperatura atmosférica, la distribución vertical de los aerosoles o con modelos de simulación. La altura de mezclado no es constante y sigue un ciclo diario que depende de los parámetros meteorológicos, los flujos turbulentos y las características fisiográficas de la superficie. Generalmente es mayor en áreas urbanas que en las zonas rurales. La altura de mezclado varía durante el período de 24 horas, es inexistente en la noche debido a la inversión térmica inducida por el enfriamiento del suelo y se desarrolla a partir de la salida del sol para aumentar gradualmente durante el periodo diurno hasta alcanzar un máximo entre las 15:00 y 16:00.

En la Figura 2.20 se muestra una representación de la CLA en donde se identifica la estructura de la capa de mezclado sobre la Ciudad de México utilizando los datos del perfil de aerosoles obtenido el 27 de febrero de 2014, la distribución de los aerosoles en la vertical permite observar de manera indirecta la estructura de las capas de la atmósfera baja.

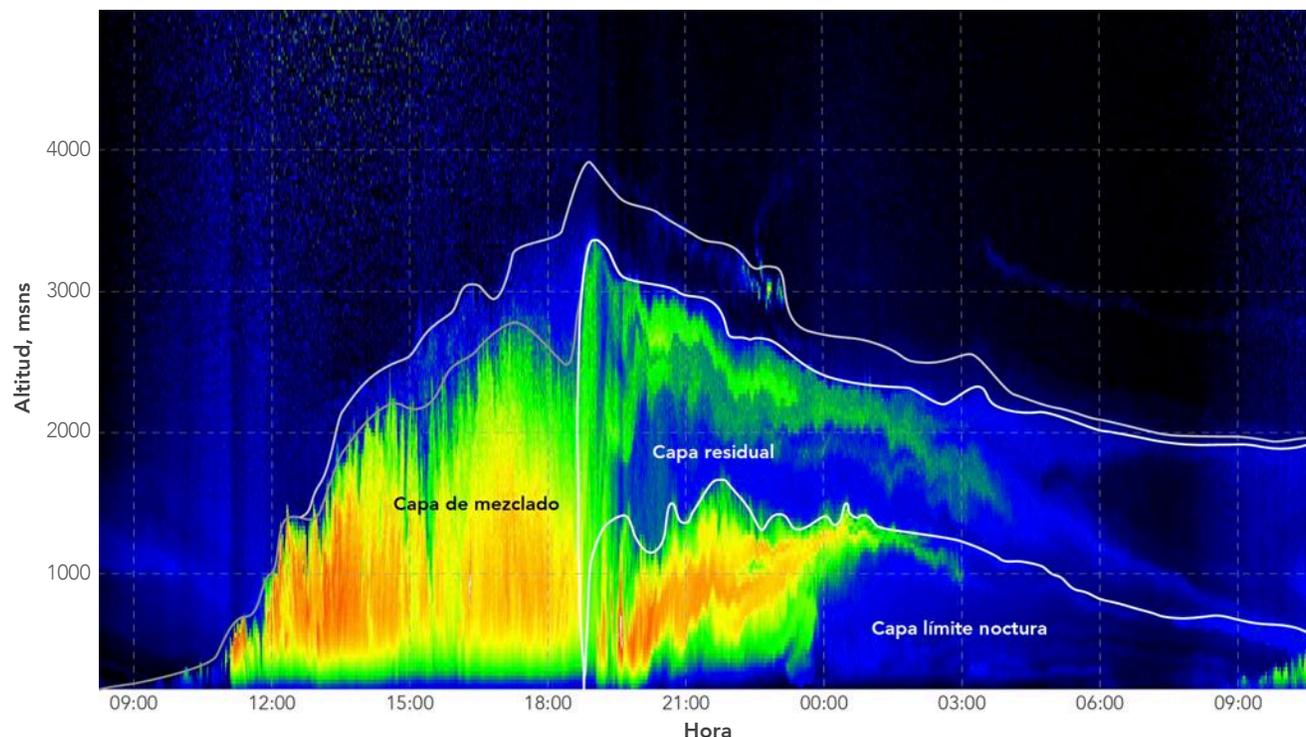


Figura 2.20. Representación de la estructura de la capa límite planetaria empleando la distribución vertical de los aerosoles el 27 de febrero de 2014 medida con un LIDAR en el supersitio de la Dirección de Monitoreo Atmosférico. En la imagen se destacan la capa de mezclado, la capa residual y la capa límite nocturna.

Con la salida del sol inicia el desarrollo de la capa de mezclado por la turbulencia convectiva provocada por el calentamiento del suelo y la turbulencia mecánica asociada a los cambios del *momentum*. El tope de esta capa está definido por una región de inversión en donde se mezclan la atmósfera libre y la capa de mezclado. Poco antes de la puesta del sol, la superficie del terreno se enfría produciendo una condición de estabilidad estática que genera una capa denominada capa límite nocturna en donde la turbulencia es principalmente mecánica. Por encima de esta capa se mantiene una capa residual cuyos patrones de estabilidad y distribución de los aerosoles son heredados de la capa de mezclado. Los contaminantes emitidos en la mañana, así como los compuestos secundarios se distribuyen dentro de la capa de mezcla, mientras que los contaminantes generados por las emisiones de la tarde y noche, permanecen dentro de la capa límite nocturna. Bajo ciertas condiciones, una fracción importante de los contaminantes atrapados dentro de las capas residual y nocturna pueden mezclarse con los contaminantes frescos emitidos el siguiente día,

agravando los episodios de contaminación. Es importante mencionar que a pesar de la importancia que tiene el comportamiento de estas capas y su influencia en los procesos asociados a la contaminación atmosférica, existen pocos estudios al respecto en la Ciudad de México

La altura de la capa de mezclado puede considerarse también como un indicador del volumen de dilución de los contaminantes. Una altura baja se asocia generalmente con altas concentraciones de contaminantes primarios, mientras que una altura elevada garantiza una mayor dilución. Por otra parte, las características de las capas de mezclado, residual y nocturna tienen un efecto importante en la producción de ozono.

En la Figura 2.21 se presenta la serie de tiempo con los valores de la altura máxima de la capa de mezclado estimada a partir de las mediciones obtenidas con el radiómetro ubicado en el supersitio de la Dirección de Monitoreo Atmosférico (DMA). El valor promedio fue de 2746 msns, con un intervalo de 224 y 4414 msns. Las mayores alturas se observaron entre marzo y mayo, mientras que noviembre registró las menores alturas.

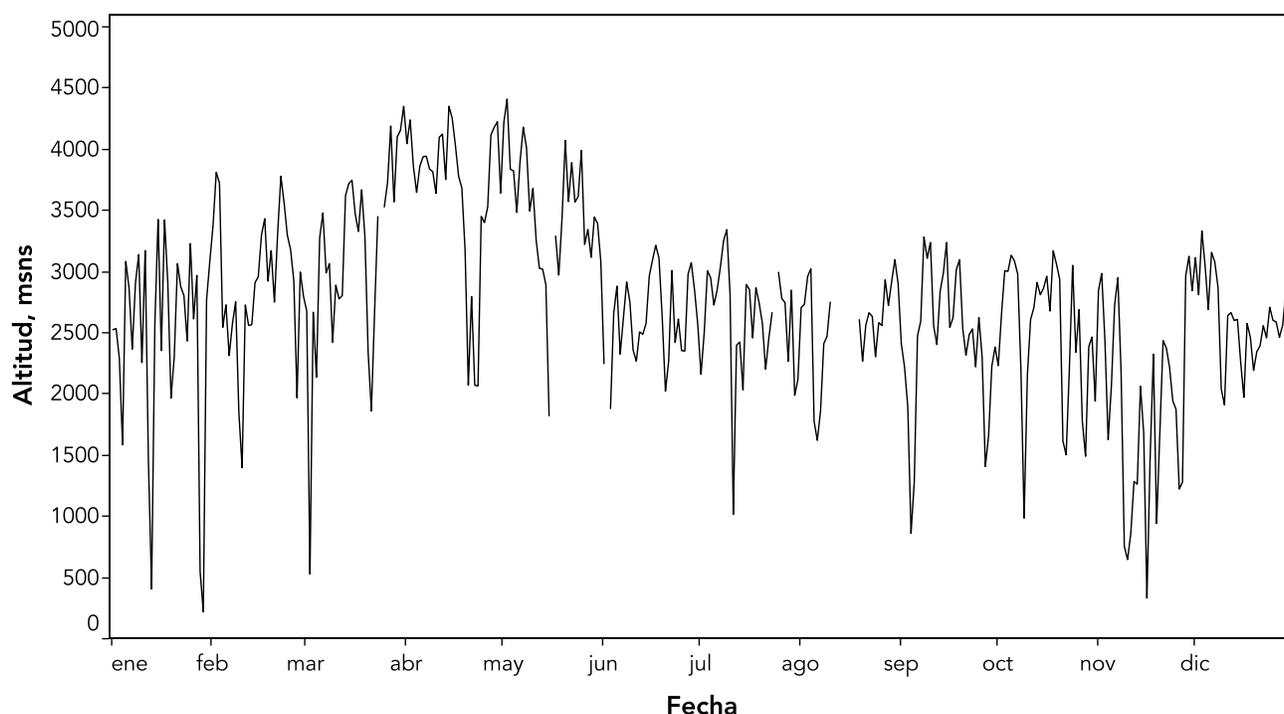


Figura 2.21. Altura máxima diaria de la capa de mezclado durante 2016 calculada a partir de los datos del perfil vertical de temperatura medida con el radiómetro en las instalaciones del supersitio de la Dirección de Monitoreo Atmosférico.

Radiación solar global

Como parte de un proyecto de colaboración con el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (IG-UNAM) se instalaron 10 piranómetros para evaluar la radiación solar global en 10 sitios de monitoreo que forman parte de la REDMET (Valdes-Barrón, 2014). La radiación solar global se refiere a la cantidad total de energía solar recibida por la superficie de la Tierra, expresada en W/m^2 . Los piranómetros cuantifican la radiación solar recibida sobre una superficie plana desde un ángulo de visión de 180° que se denomina radiación solar *hemisférica*. El espectro de radiación solar se extiende aproximadamente de 285 a 3000 nanómetros (nm). La radiación solar se expresa en términos de irradiancia, que se refiere al flujo radiante (potencia) recibido por unidad de área (W/m^2). En esta sección se presentan los resultados de las mediciones de radiación solar global durante 2015 y 2016.

La variabilidad diaria presenta una forma gaussiana con máximos durante el mediodía solar y una distribución casi simétrica durante el día (ver

Figura 2.22), sin embargo, la presencia de nubosidad o contaminación modifica este comportamiento diurno. El promedio de la intensidad máxima diaria de la radiación global en 2015 fue de $845 W/m^2$, mientras que en 2016 fue de $840 W/m^2$. Las intensidades máximas tuvieron un marcado comportamiento estacional (Figura 2.23), con valores máximos alrededor de los $1000 W/m^2$ entre marzo y septiembre, y valores mínimos entre 600 y $800 W/m^2$ en diciembre.

La irradiancia se puede expresar en términos de la energía recibida durante el día por unidad de área (en megajoules por metro cuadrado, MJ/m^2). Esta expresión se utiliza frecuentemente para evaluar el aprovechamiento de la energía solar. Los promedios anuales en 2015 y 2016 fueron de 18.8 y $18.5 MJ/m^2$, respectivamente. Estos resultados fueron congruentes con el valor promedio reportado por Matsumoto *et al.* (2014) de $18.01 MJ/m^2$ para el periodo comprendido entre 1999-2012 en dos sitios de medición en la Ciudad de México.

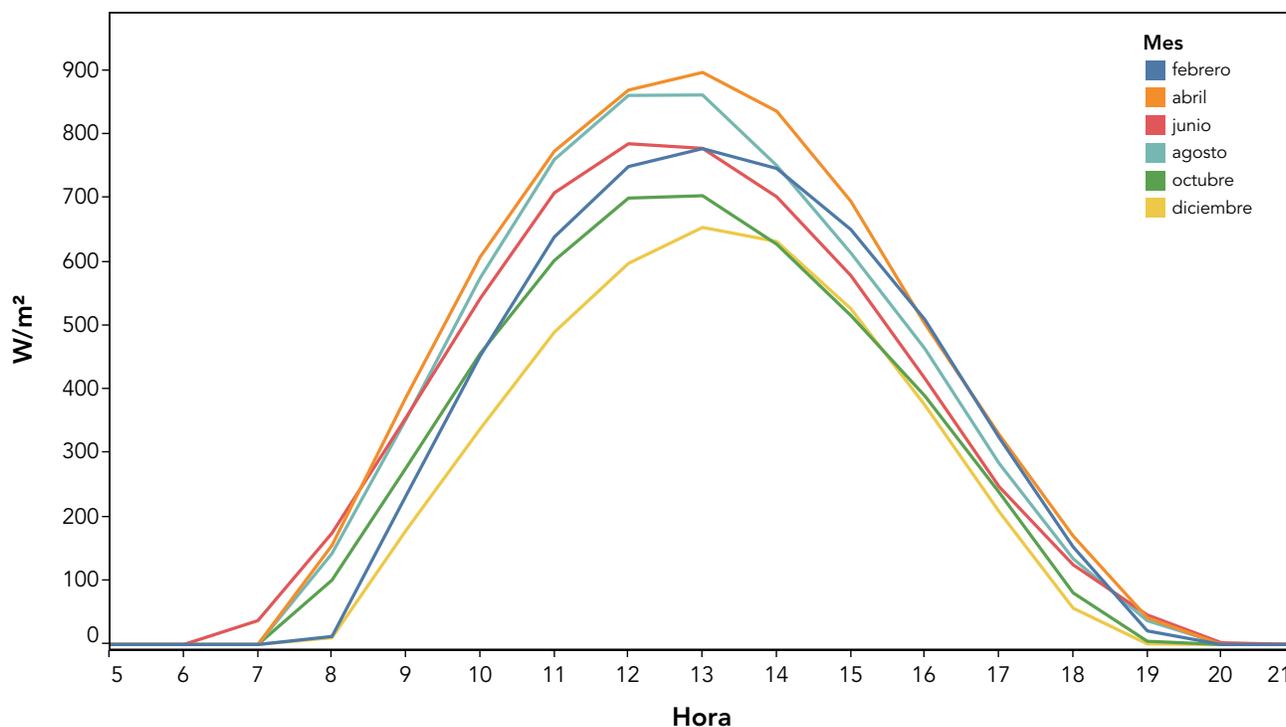


Figura 2.22. Variación horaria promedio de la radiación solar global para diferentes meses de 2015. Los promedios se calcularon a partir de los valores horarios de todas las estaciones con datos válidos, para comparar los valores se utiliza la hora sin corrección por horario de verano.

En la Figura 2.24 se muestran los promedios mensuales de la radiación. En 2015, abril reportó un promedio máximo de 22.6 MJ/m^2 y un mínimo de 14.9 MJ/m^2 en diciembre; en 2016 el máximo se observó en mayo con un valor de 22.2 MJ/m^2 , mientras que el mínimo ocurrió en noviembre con un valor de 14.7 MJ/m^2 . Estos resultados son consistentes con el estudio de Matsumoto *et al.* (2014) que observó la mayor irradiación entre marzo y mayo, con un máximo de 21.6 MJ/m^2 , mientras que la menor irradiación se presentó entre noviembre y enero con un mínimo de 14.9 MJ/m^2 .

La intensidad de la irradiancia es atenuada por la presencia de nubes y la contaminación del aire, esto explica por que durante los meses de la temporada de lluvia disminuye la irradiancia total, a pesar de que durante este periodo el sol alcanza una mayor posición en el cielo y los días son más largos. Por otra parte, en los meses de invierno la declinación solar es mayor y los días son más cortos, disminuyendo significativamente la irradiancia total. Adicionalmente en el invierno existe un aumento en la frecuencia e intensidad de las inversiones térmicas de superficie que favorecen la

acumulación de la contaminación durante la mañana y hasta las primeras horas de la tarde.

Jáuregui y Luyando (1999) observaron que la contaminación del aire tenía un efecto importante en la intensidad de la radiación solar. Este efecto puede inferirse a partir de la comparación de las mediciones entre los sitios ubicados dentro del área urbana y aquellos localizados en la periferia. Se esperaría que, en términos generales, las mediciones observadas dentro del área urbana fueran de menor magnitud que las obtenidas en los sitios ubicados viento arriba de las principales fuentes de emisión o en las zonas de máxima acumulación de la contaminación. De manera preliminar se identificó que las estaciones Montecillo (MON), Cuautitlán (CUT), Acolman (ACO) y Chalco (CHO), localizadas en la periferia de la zona urbana, registraron valores mayores que las estaciones ubicadas en zonas en donde se registran mayores niveles de contaminación (ver Figura 2.25). Con el propósito de validar lo anterior, en trabajos posteriores se realizará una evaluación detallada de los patrones de distribución espacial y temporal de la radiación global.

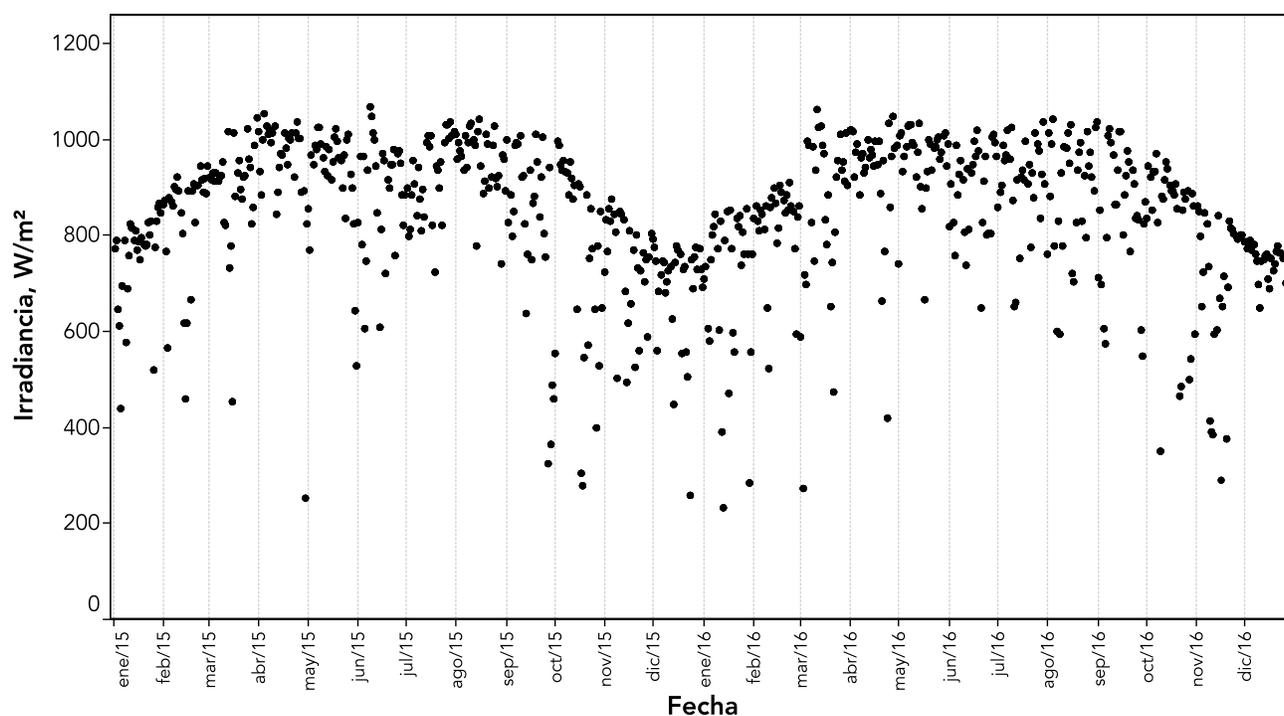


Figura 2.23. Serie de tiempo con los promedios de los valores máximos diarios de la radiación global para los años 2015 y 2016. El promedio se estimó a partir de los máximos de las diferentes estaciones con más del 75% de datos válidos.

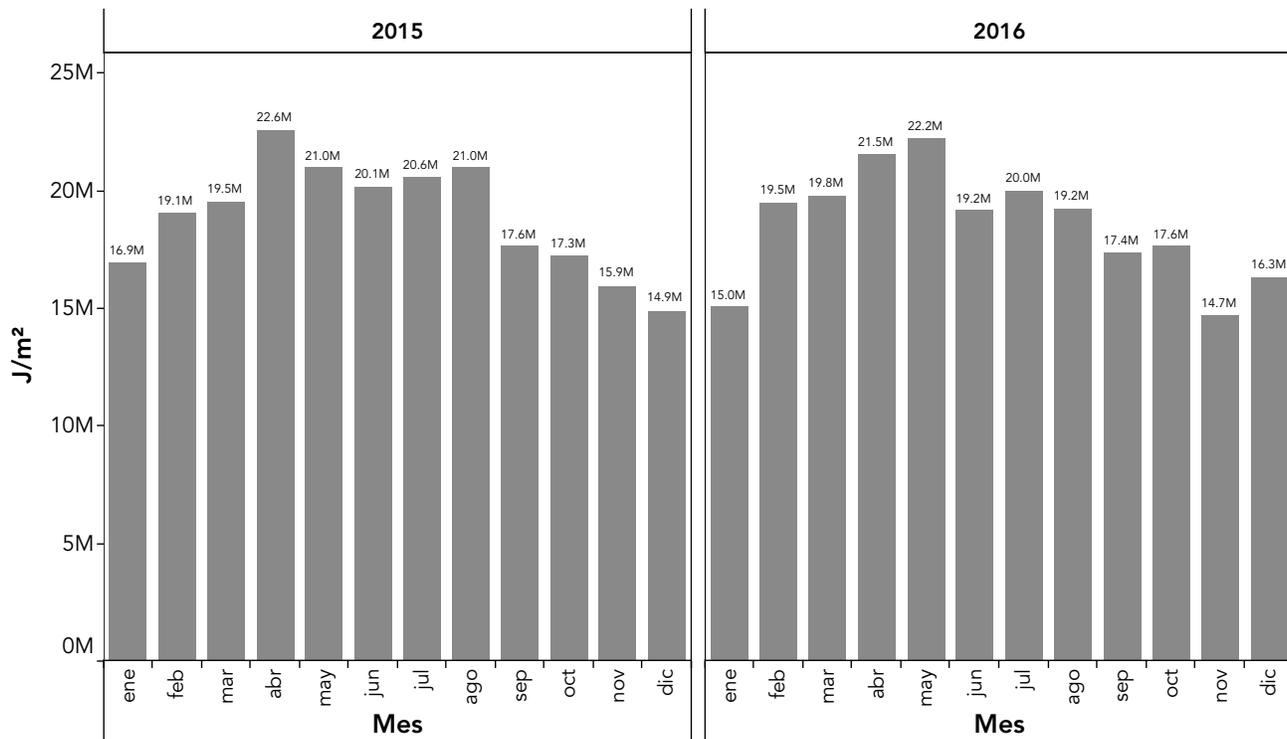


Figura 2.24. Promedio mensual de la irradiancia acumulada para todos los sitios de monitoreo. Los promedios se estimaron a partir de los datos diarios de las estaciones con más del 75% de datos válidos.

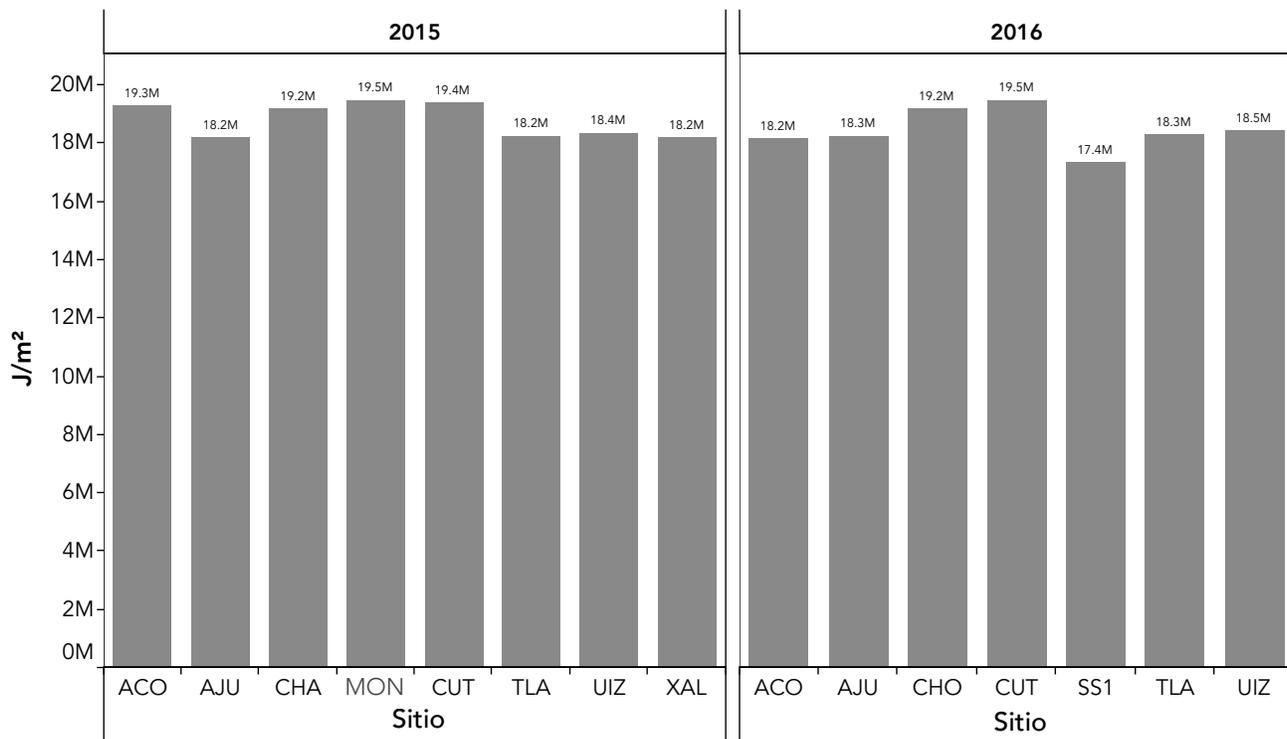


Figura 2.25. Promedio anual de la irradiancia acumulada por sitio.

Índice de radiación solar ultravioleta

El índice de radiación solar ultravioleta o índice UV es un indicador del riesgo asociado a la exposición excesiva a la radiación solar. El índice UV (IUV) describe el nivel de la radiación ultravioleta solar que incide en la superficie. La escala del índice parte de cero en adelante, donde el cero indica la ausencia de radiación. Entre más alto es el valor del índice, mayor será la intensidad de la radiación y mayor será el riesgo de daño en la piel y los ojos, y menor será el tiempo que transcurrirá para que el daño ocurra.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2003) la evidencia actual indica que los hábitos personales asociados con la exposición al sol, representan el factor de riesgo más importante de daño por radiación UV. El IUV es un medio importante para elevar la conciencia pública sobre los riesgos de la exposición excesiva a la radiación solar y para alertar a las personas sobre la necesidad de adoptar medidas de protección. Su propósito es alentar a las personas a reducir su exposición al sol, a través del cambio de

sus hábitos de exposición, de esta manera es posible atenuar los efectos nocivos para la salud y reducir significativamente los costos de salud.

En la Figura 2.26 se muestran los valores máximos diarios del índice registrados en 2016. En total se registraron 27 días con una intensidad máxima en la categoría de ALTA (IUV entre 5 y <7), 196 días con intensidad máxima MUY ALTA (IUV entre 7 y <11) y 131 días con una intensidad máxima EXTREMADAMENTE ALTA (IUV mayor a 11). El valor máximo se registró el 2 de abril con un valor de 14.5. Durante todo el año los niveles de radiación UV fueron de riesgo, con magnitudes mayores entre marzo y septiembre. El periodo del día en el que se presentó la mayor intensidad fue entre las 11:00 y las 15:00 horas.

Es importante mencionar que debido a los elevados niveles de radiación solar ultravioleta a lo largo del año, es necesario que los ciudadanos adopten medidas de protección para evitar daños por la exposición excesiva al sol, independientemente de su tipo de piel.

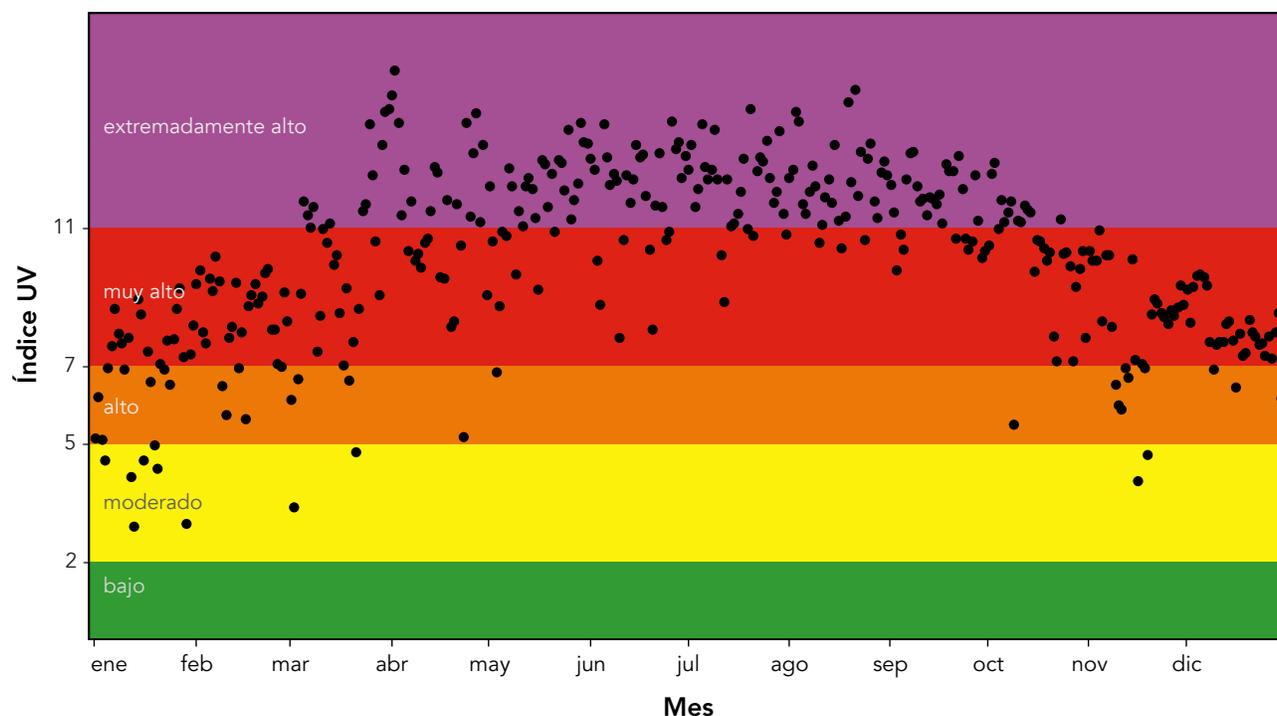


Figura 2.26. Valores máximos para el índice de radiación solar ultravioleta (IUV) durante 2016. Los valores máximos se observaron entre marzo a septiembre, mientras que los mínimos se observaron durante los meses de invierno (enero, diciembre).

NO
PIC



Analizador continuo de óxidos de nitrógeno (NO_x)

3. Calidad del aire

Distribución espacial, temporal y tendencias

El monitoreo de la calidad del aire implica un esfuerzo continuo y permanente para cuantificar y evaluar las concentraciones de los principales contaminantes (requeridos por la normatividad federal en materia de salud ambiental) y observar su distribución y comportamiento. La ubicación de las estaciones de monitoreo tiene el propósito de generar información representativa útil para caracterizar el problema en la zona urbana. El análisis de los datos del monitoreo en su contexto meteorológico, permite evaluar de manera objetiva el estado de la calidad del aire de la Ciudad de México. Adicionalmente, con la reciente instalación de estaciones de monitoreo en la periferia será posible estudiar las contribuciones regionales desde y hacia la Ciudad de México.

En la Tabla 3.1 se indican las claves y nombres

de las estaciones de monitoreo empleadas en esta sección. Vale la pena mencionar que en los últimos años la operación se vio afectada por el incremento de los costos de mantenimiento, debido principalmente al encarecimiento de los insumos requeridos que son de origen extranjero, a pesar de esto, en 2016 fue posible garantizar el funcionamiento de la mayoría de las estaciones.

En esta sección se ofrece una descripción del comportamiento temporal y espacial de los contaminantes reportados en la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), haciendo énfasis en aquellos que, por sus concentraciones, implican un mayor riesgo para la salud. A menos que se especifique lo contrario, el formato de tiempo empleado en esta sección es UTC-6:00, es decir, no se aplicó el cambio horario de verano.

Tabla 3.1. Estaciones de monitoreo empleadas en el análisis de los datos.

Clave	Nombre	Delegación o municipio	Entidad
ACO	Acolman	Acolman	Estado de México
AJM	Ajusco Medio	Tlalpan	Ciudad de México
AJU	Ajusco	Tlalpan	Ciudad de México
ATI	Atizapán	Atizapán de Zaragoza	Estado de México
BJU	Benito Juárez	Benito Juárez	Ciudad de México
CAM	Camarones	Azcapotzalco	Ciudad de México
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera	Coyoacán	Ciudad de México
CHO	Chalco	Chalco	Estado de México
COY	Coyoacán	Coyoacán	Ciudad de México
CUA	Cuajimalpa	Cuajimalpa	Ciudad de México
CUT	Cuautitlán	Tepotztlán	Estado de México
FAC	FES Acatlán	Naucalpan de Juárez	Estado de México
GAM	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	Ciudad de México
HGM	Hospital General de México	Cuauhtémoc	Ciudad de México
INN	Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares	Ocoyoacac	Estado de México
IZT	Iztacalco	Iztacalco	Ciudad de México
LLA	Los Laureles	Ecatepec de Morelos	Estado de México
LPR	La Presa	Tlalnepantla de Baz	Estado de México
MER	Merced	Venustiano Carranza	Ciudad de México
MGH	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	Ciudad de México
MON	Montecillo	Texcoco	Estado de México
MPA	Milpa Alta	Milpa Alta	Ciudad de México
NEZ	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	Estado de México
PED	Pedregal	Álvaro Obregón	Ciudad de México
SAG	San Agustín	Ecatepec de Morelos	Estado de México
SFE	Santa Fe	Cuajimalpa de Morelos	Ciudad de México
SJA	San Juan de Aragón	Gustavo A. Madero	Ciudad de México
TAH	Tláhuac	Tláhuac	Ciudad de México
TLA	Tlalnepantla	Tlalnepantla de Baz	Estado de México
TLI	Tultitlán	Tultitlán	Estado de México
UAX	UAM Xochimilco	Coyoacán	Ciudad de México
UIZ	UAM Iztapalapa	Iztapalapa	Ciudad de México
VIF	Villa de las Flores	Coacalco de Berriozábal	Estado de México
XAL	Xalostoc	Ecatepec de Morelos	Estado de México

Dióxido de azufre

El promedio anual de la concentración de dióxido de azufre estimado para todas las estaciones de monitoreo fue de 4.6 ppb. En los sitios ubicados en el territorio de la Ciudad de México el promedio fue de 4.4 ppb, mientras que para los ubicados en la conurbación del Estado de México fue de 4.9 ppb. El promedio anual máximo se observó en la estación Tlalnepantla (TLA), en el municipio del mismo nombre en el Estado de México, con una concentración promedio de 7.9 ppb. El valor máximo para el promedio de 24 horas fue de 58 ppb, registrado el 25 de febrero en la estación Los Laureles (LLA), en Ecatepec de Morelos, Estado de México. Mientras que el promedio horario máximo fue de 269 ppb, registrado el 19 de febrero en la estación Los Laureles.

En la Figura 3.1 se presenta la serie de tiempo de las concentraciones promedio de 24 horas. A lo largo del año se observaron picos en la concentración de dióxido de azufre con una mayor intensidad y frecuencia en los meses de febrero,

noviembre y diciembre. Estos incrementos se presentaron principalmente en las estaciones de monitoreo ubicadas al norte de la zona metropolitana. La presencia de altas concentraciones de azufre se ha relacionado con el transporte regional desde el corredor industrial Tula-Tepeji, ubicado a 60 km al noreste de la Ciudad de México (de Foy *et al.*, 2009; Rivera *et al.*, 2009). En este punto es importante mencionar que los combustibles consumidos en la zona metropolitana tienen un bajo contenido de azufre. El transporte regional de dióxido de azufre ocurre principalmente durante la noche dentro de la capa estable nocturna en presencia de viento débil proveniente del norte. Para ilustrar lo anterior, en la Figura 3.2 se presentan las concentraciones de dióxido de azufre en función de la dirección del viento (rosas de contaminación) durante febrero para algunas de las estaciones de monitoreo de la red, en la mayoría de ellas se observa la contribución de dióxido de azufre proveniente del norte.

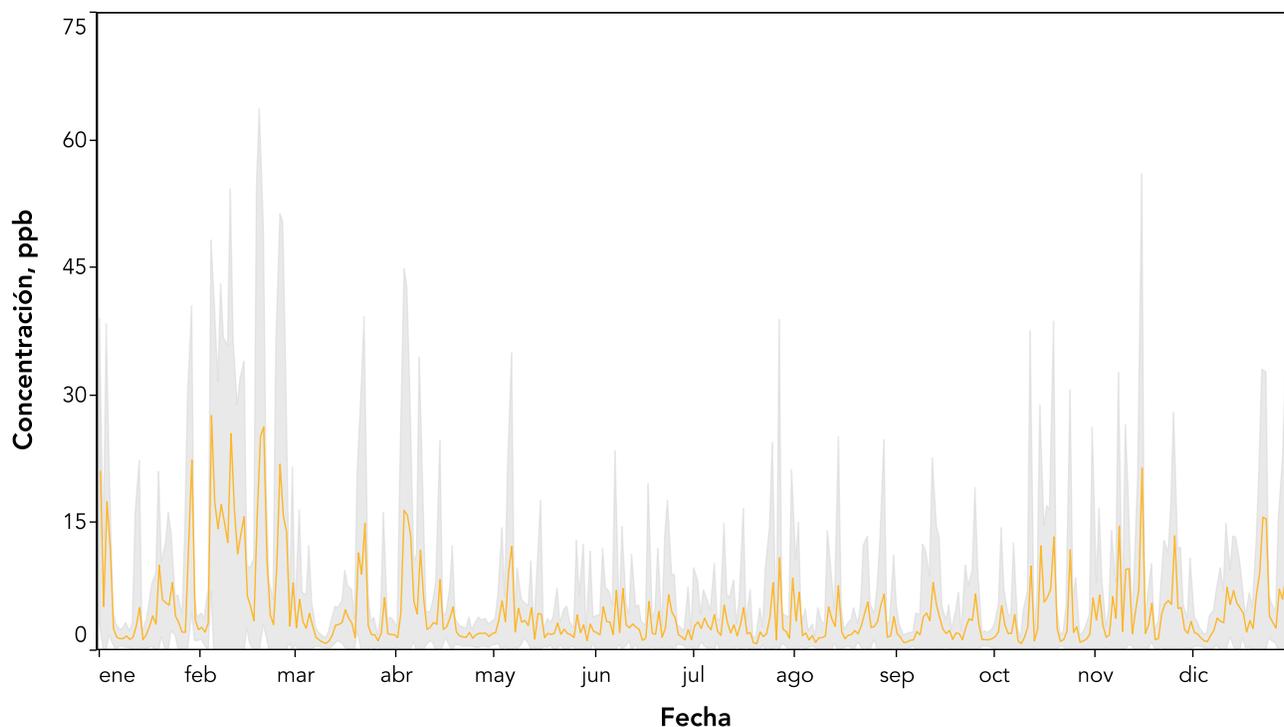


Figura 3.1. Serie de tiempo de la concentración promedio diaria de dióxido de azufre en las estaciones de monitoreo de la RAMA. La línea amarilla indica la media, mientras que la región en gris corresponde a una desviación estándar alrededor de la media.

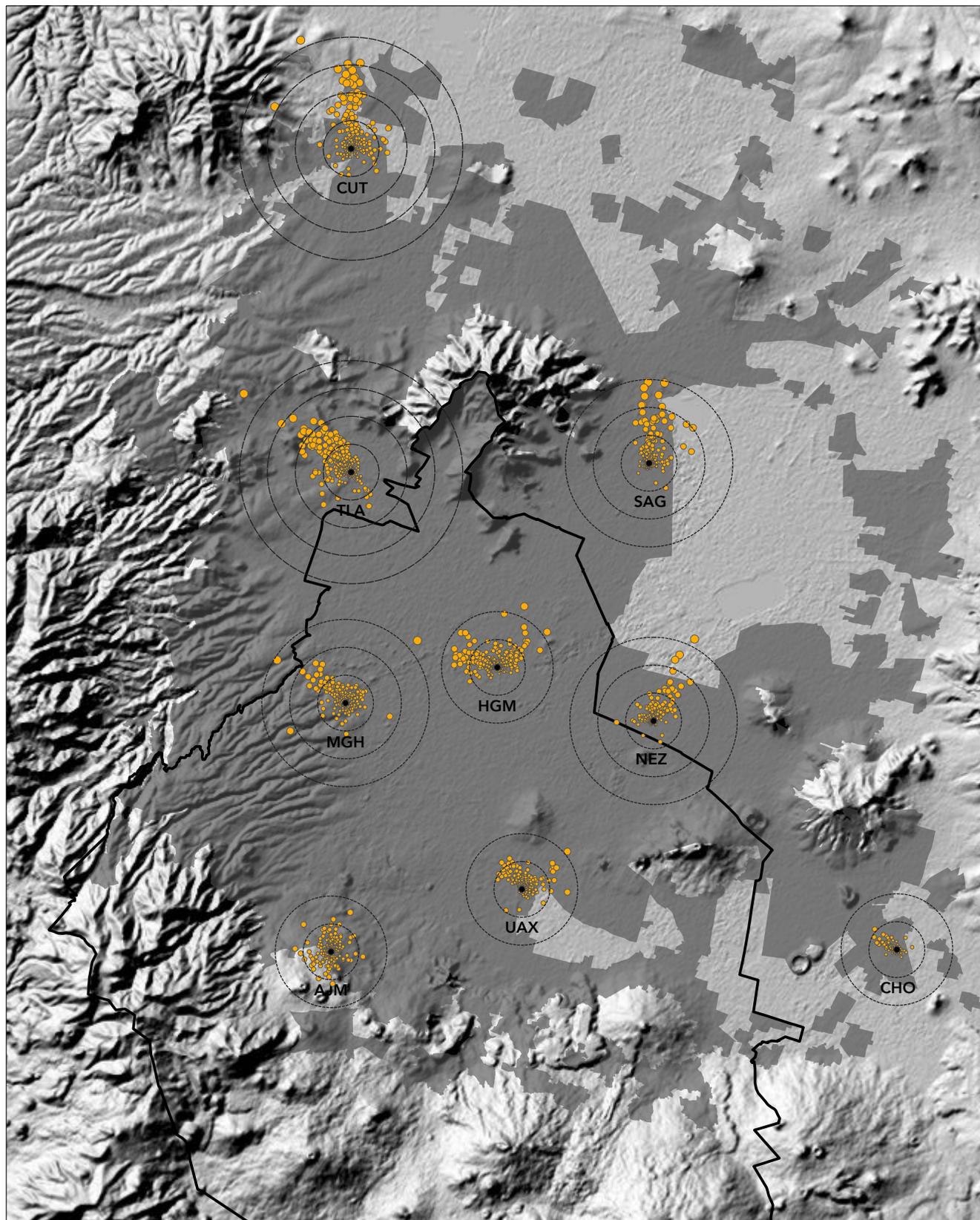


Figura 3.2. Concentración horaria de dióxido de azufre en función de la dirección del viento durante febrero de 2016 para algunas de las estaciones de la RAMA. La separación entre cada círculo de la rosa de contaminación es de 50 ppb, cada punto en la rosa corresponde al promedio de una hora.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	
Ciudad de México	CAM	7.3	17.4	4.8	6.2	4.8	4.9	4.1		3.4	5.2	7.1	6.0
	MER	7.8	16.2	5.0		4.1	3.6	4.4	4.3	2.8	4.1	8.0	7.8
	HGM	6.8	15.9	3.1	5.2	3.1	2.9	3.4	3.3	3.2	4.7	6.6	5.7
	MGH	5.7	13.8	3.5	4.2	3.4	3.3	3.0	3.3	3.1	4.1	5.0	5.0
	BJU		13.5	3.0	4.9	3.0	2.8	3.1	3.2	3.1	4.3	5.7	5.6
	IZT	6.7		4.1	5.6	2.9	2.7	3.7	3.8		3.5		6.4
	UIZ	4.9	11.5	2.2	3.1	2.6	2.6	2.8	2.8	2.3	2.9	4.2	5.2
	CCA	3.8	11.1	3.0	3.4	2.6	2.4	2.8	2.5	2.9			3.3
	PED	3.4	10.3	2.3	2.6	2.9		2.0	2.3	2.9	3.3	4.3	3.2
	AJM	3.5	10.1	2.5	3.3	2.5	2.1	2.1	2.0	2.0	2.3	3.8	3.9
	UAX	3.4	9.5	2.3	2.3	2.2	2.4	2.6	2.4	2.4	2.7		
	MPA		6.3	1.6	1.8	2.1	2.2	1.6	1.8	1.6	1.9	2.6	2.8
Estado de México	TLA	9.0	21.1	6.7	7.6	5.9	5.2	5.6		5.3	7.7	8.8	6.5
	CUT	5.9	16.4	6.6	5.1	3.9	5.2	4.5			6.2	6.6	5.4
	LLA	7.5	18.1			4.4	3.1	4.2	3.0	2.3	4.8	6.8	6.0
	FAC	6.0	15.5		4.2	3.6	4.5	3.9	4.2			6.1	5.8
	VIF				6.9	5.2	3.9	4.9	4.4	3.0	6.1	7.4	7.7
	SAG	7.1	14.5	4.4	4.3		3.1	3.6	3.5	2.9	4.3	6.6	4.8
	XAL	7.3	12.8	4.8	6.8		3.1	3.3	3.1	2.1	3.4	5.5	5.8
	NEZ	3.8	9.8	2.7	3.7		2.7	3.1	3.2	1.8	2.1	3.7	3.7
	CHO	2.8	4.5				1.7	1.3	2.1		1.8	2.2	2.8
	INN		4.5		2.1	1.8	1.6	1.5	1.1	1.0	2.1		2.1

Figura 3.3. Promedio mensual de la concentración de dióxido de azufre por estación de monitoreo. Los espacios en blanco indican periodos sin datos o con datos insuficientes.

La Sierra de Guadalupe es un obstáculo geográfico capaz de modificar la ruta de avance de la pluma de dióxido de azufre proveniente del norte, por lo tanto, el ingreso de la pluma a la Ciudad de México puede ocurrir a través del paso que se forma entre las sierras de Guadalupe y de las Cruces, al noroeste, o por el costado oriental de la Sierra de Guadalupe. La rosa de contaminantes de la estación Tlalnepantla (TLA) de la Figura 3.2 es un ejemplo del primer caso, mientras que la rosa para la estación San Agustín (SAG), ilustra el segundo caso. La rosa de la estación Hospital General de México (HGM) indica dos contribuciones, una del noroeste y otra del noreste confirmando las rutas de ingreso descritas previamente. A medida que avanza la masa de aire contaminado, esta experimenta procesos de transformación, deposición y dilución, que disminuyen gradualmente la concentración del dióxido de azufre, por lo que los niveles observados en los sitios al sur son menores que los reportados en los sitios ubicados al norte. En algunos episodios es posible identificar la salida de la masa de aire contaminado a través del paso natural que se forma entre las sierras Ajusco-Chichinautzin y Nevada, al sureste

de la cuenca por el valle de Chalco. Esto explica el gradiente espacial norte-sur que generalmente se observa en la distribución espacial del contaminante (ver Figura 3.5).

En cuanto al promedio mensual las mayores concentraciones del contaminante se registraron durante los meses de invierno en la mayoría de las estaciones de monitoreo, con promedios máximos en febrero (ver Figura 3.3) cuando la dirección del viento fue predominantemente de norte a sur. Durante los meses de la temporada de lluvia las concentraciones del contaminante disminuyeron significativamente.

El ciclo diurno del contaminante indicó concentraciones elevadas en la madrugada con máximos entre las 8:00 y 10:00. Las altas concentraciones durante el periodo nocturno se asociaron con el transporte regional, mientras que el pico matutino puede tener contribuciones tanto de origen regional como local (principalmente tránsito vehicular). En cuanto a la distribución por día de la semana no se observó un patrón consistente en el año, sin embargo, en promedio el viernes reportó mayores concentraciones, mientras que el domingo registró los menores valores.

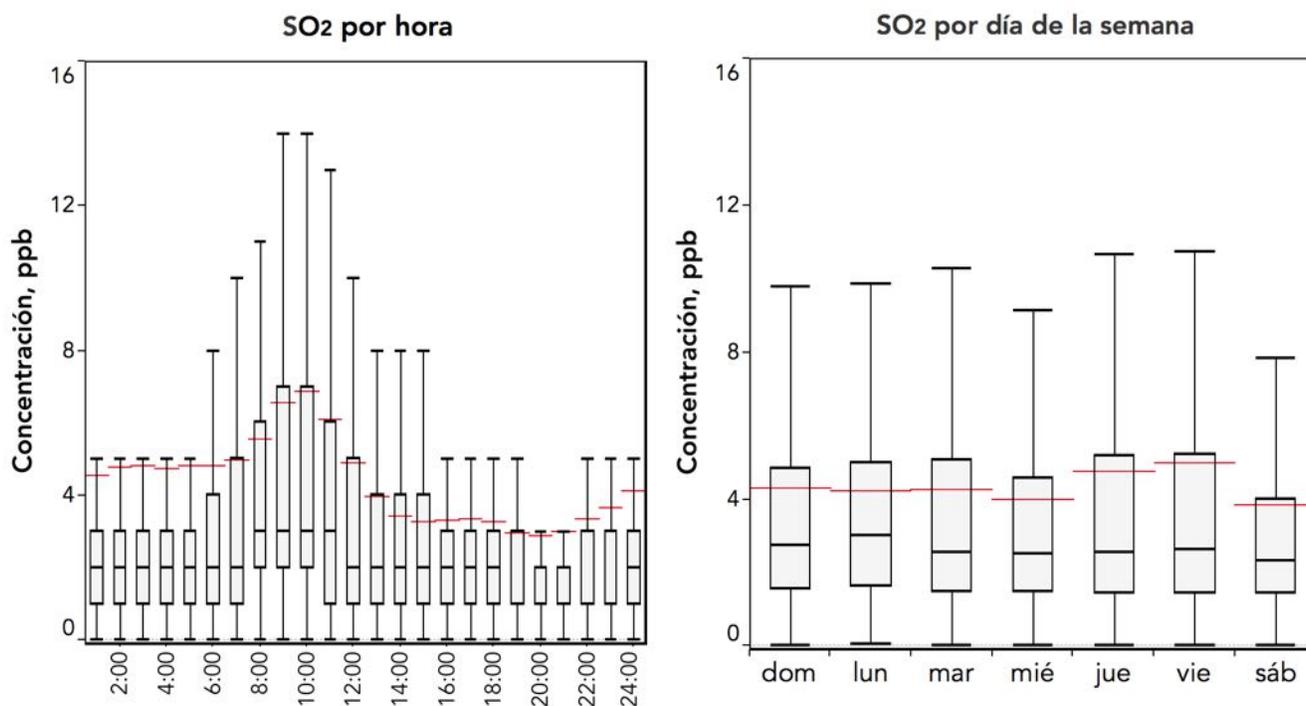


Figura 3.4. Distribución de los datos por hora (izquierda) y día de la semana (derecha). En las gráficas de caja y bigotes la caja representa el rango intercuartil (Q1 y Q3), la línea en el interior de la caja corresponde a la mediana (Q2), los extremos de los bigotes indican 1.5 veces el rango intercuartil (RIQ). La línea roja corresponde a la media.

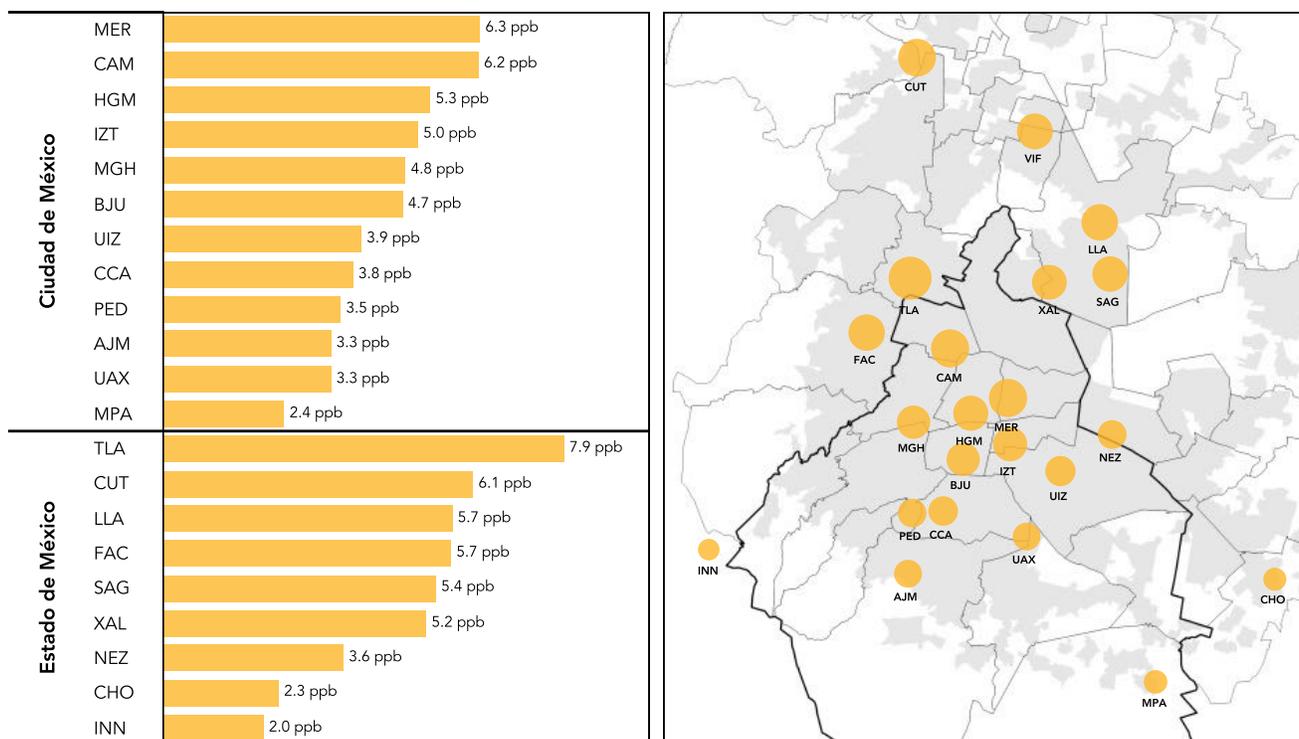


Figura 3.5. Promedio anual por estación de monitoreo. En la figura de la izquierda se indican los promedios por estación de monitoreo, separados por entidad, en el mapa de la derecha se muestra la ubicación de la estación, el tamaño del círculo es proporcional al promedio anual.

Óxidos de nitrógeno

Los promedios anuales de las concentraciones horarias de óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) para la zona metropolitana fueron 19, 36 y 45 ppb, respectivamente. De manera desagregada los promedios de las concentraciones de NO, NO₂ y NO_x en los sitios ubicados en el territorio de la Ciudad de México fueron 17, 28 y 44 ppb, respectivamente. Los niveles de estos contaminantes han disminuido gradualmente en los últimos años, sin embargo, la concentración horaria de NO_x aún puede rebasar las 500 ppb en aquellas estaciones bajo la influencia de las emisiones vehiculares. El valor máximo de NO_x se registró en la estación Xalostoc (XAL) el 22 de febrero con una concentración horaria de 755 ppb. En el caso de NO₂, que es el contaminante regulado por la NOM-023-SSA1-1994, el promedio horario máximo fue de 150 ppb en la estación FES Acatlán (FAC) el 29 de enero. Tanto XAL como FAC se encuentran en la zona conurbada del Estado de México.

En la Figura 3.6 se presentan la series de tiempo de los promedios diarios, en ellas se puede observar un comportamiento estacional con menores concentraciones en los meses de la temporada de lluvia (junio a octubre) y mayores en los meses de la temporada seca-fría. Las Figuras 3.7 y 3.8 muestran los promedios mensuales para NO₂ y NO_x por estación, respectivamente. En ambos casos los promedios máximos se observaron en enero, febrero, noviembre y diciembre, en las estaciones ubicadas al norte y centro del zona metropolitana, en las áreas en donde las emisiones vehiculares son la principal fuente de contaminación. Las estaciones que tuvieron las mayores concentraciones fueron Xalostoc (XAL) y Tlalnepantla (TLA), en la zona conurbada del Estado de México; Merced (MER), Camarones (CAM) y Hospital General de México (HGM), en la Ciudad de México. La Figura 3.10 muestra la distribución espacial del promedio anual de NO, NO₂ y NO_x.

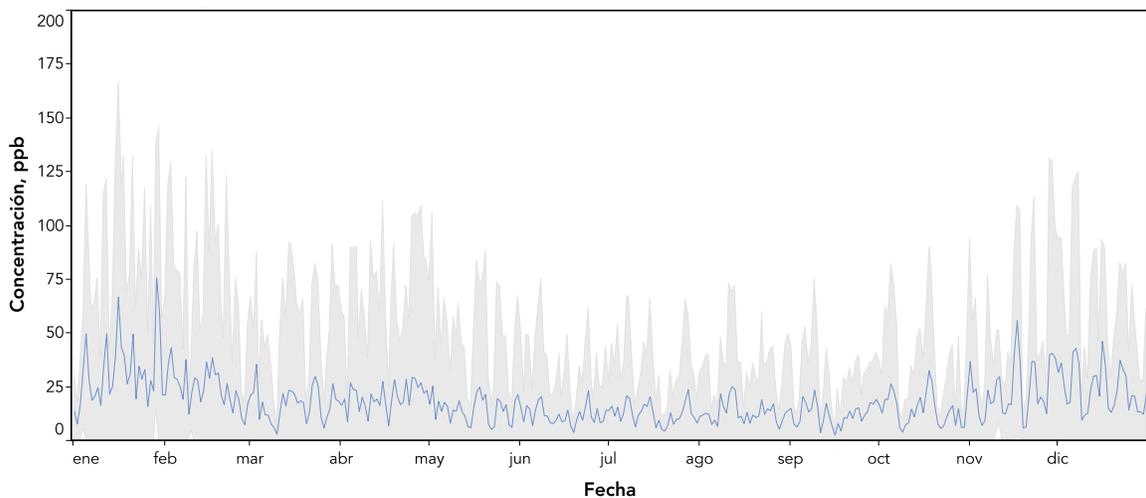
La variabilidad de la concentración durante el día muestra un pico de concentración para NO y NO_x entre las 8:00 y 9:00 de la mañana, el cual disminuye rápidamente hasta alcanzar un mínimo entre las 15:00 y las 17:00 horas, esto debido al crecimiento de la capa límite y el incremento en la

capacidad dispersiva de la atmósfera (ver Figura 3.9). Después de las 18:00 los niveles aumentaron gradualmente, en el caso de NO_x se observó un ligero incremento entre las 22:00 y las 1:00 horas, mientras que para NO se observó también un incremento en este periodo, pero con un menor intensidad. La variabilidad horaria del NO₂ mostró un patrón de comportamiento distinto al de NO y NO_x, con una clara distribución bimodal durante el día (Figura 3.9b). Por la mañana se observó un pico de concentración entre las 10:00 y las 11:00 horas de alrededor de 35 ppb, mientras que por la noche se observó un segundo máximo entre las 22:00 y las 23:00 horas con una concentración de alrededor de 30 ppb, los mínimos se observaron entre las 15:00 y las 17:00 horas.

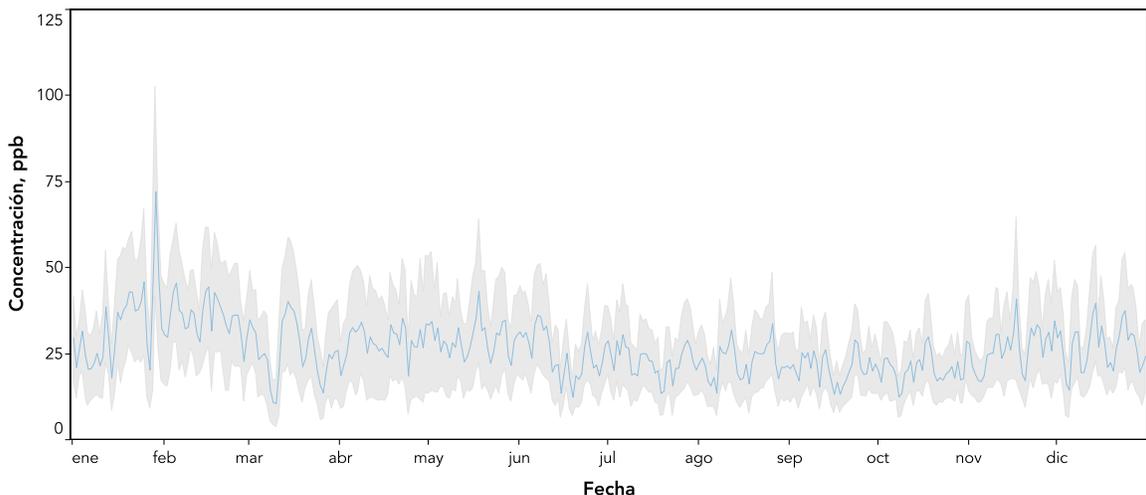
Se sabe que el dióxido de nitrógeno tiene contribuciones de origen primario y secundario, sin embargo, la fuente más importante de NO₂ es la oxidación en la atmósfera del NO emitido durante los procesos de combustión. El NO se oxida fácilmente en la atmósfera en presencia de ozono y otras especies oxidantes para formar el NO₂. Esto explica porque durante la mañana, los máximos de NO₂ se observan un par de horas después que los máximos de NO. Durante el día, la fotólisis del NO₂ es la principal fuente de ozono troposférico, es por eso que su concentración disminuye significativamente durante las horas de máxima concentración de ozono. Por la noche, la mayor parte de los NO_x se encuentra en forma de NO₂ como resultado de la oxidación del NO remanente o emitido durante la noche, sin embargo, la transformación del NO₂ para formar otras especies nitrogenadas a través de diversos mecanismos de reacción, provoca una disminución en la concentración en el transcurso de la noche.

La variabilidad diurna de los óxidos de nitrógeno fue similar a la observada en años anteriores. En cuanto a la distribución por día de la semana, los valores promedio fueron similares durante los días laborables con ligeros incrementos el miércoles y viernes (ver Figura 3.9). Los niveles en el aire ambiente dependen fuertemente del tránsito vehicular, es por ello que disminuyen durante el fin de semana cuando se reduce el tránsito, con las menores concentraciones en domingo.

a) Monóxido de nitrógeno (NO)



b) Dióxido de nitrógeno (NO₂)



c) Óxidos de nitrógeno (NO_x)

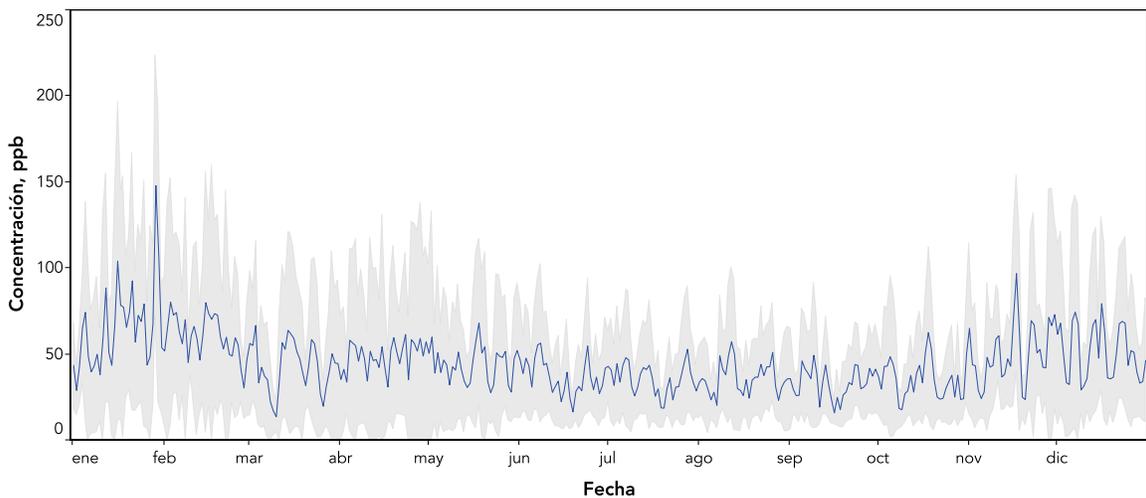


Figura 3.6. Series de tiempo con las concentraciones promedio diarias de óxido nítrico (a), dióxido de nitrógeno (b) y óxidos de nitrógeno (c). La línea de color indica el promedio diario, la zona gris corresponde a una desviación estándar alrededor de la media.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	
Ciudad de México	MER	39.8	43.3	33.8		39.6	33.0	31.4	31.3	27.8	27.2	35.7	36.5
	CAM	39.7	42.3	33.3	36.9	36.4	30.3	28.0		27.9	26.0	31.8	33.6
	HGM	40.5	41.2	29.5		36.0	30.7	28.6	26.8	24.4	23.2	31.7	31.1
	MGH	37.2	39.8	30.3	33.5	33.7	29.0	27.3	27.0	23.7	24.3		30.1
	IZT	37.4		28.4	33.1	34.6	30.5	27.9	27.4	25.5	25.5	32.2	31.3
	COY	35.0	39.0	27.0	29.7	30.0	25.3		24.4	23.8	24.0	30.8	29.7
	UIZ	33.5	37.2	26.1	29.3	32.7	27.1	24.6	25.2	23.4	23.9	32.0	29.5
	CCA	31.4			27.0	32.9	23.0	21.0	22.8	21.9			26.6
	UAX	28.2	32.8	21.5	23.6	25.7	22.2	19.9	19.8	20.5	21.3		25.6
	PED	29.2	31.4	22.9	21.6	22.8		19.5	19.5	19.9	20.6	25.5	24.5
	CUA	22.9	29.3	18.6	20.4	22.9	22.3	21.2	20.5	16.6	16.7	23.5	23.1
AJM	20.0	25.4	15.6	15.4	17.3	16.1	16.4	16.6	18.2	19.1	22.5	19.3	
Estado de México	TLA	40.5	42.5	33.7	36.2	35.3	31.2	28.8		25.1	25.2	31.7	32.8
	XAL	38.7	39.6	31.4	38.7	36.1	29.6	26.7	26.6	20.3	19.9	27.8	31.9
	FAC	34.3	34.2			30.6	26.0	22.8	23.5			22.8	26.3
	NEZ	29.8		26.4	29.7	29.8	26.2	25.2		19.0	19.0	25.6	27.5
	SAG	30.9	30.7	24.5				21.4	20.4	15.8	16.9		
	CUT	29.4	25.3	23.0	23.7	22.2	16.0	15.1				17.0	20.6
	VIF				26.7	24.2	18.9	16.4	16.0	13.1	12.8	18.7	23.3
	MON	18.1		15.3	17.4	17.4	14.4	13.2	12.8		11.3	14.5	17.8

Figura 3.7. Promedio mensual de la concentración de dióxido de nitrógeno por estación de monitoreo. Los espacios en blanco indican periodos sin datos o con datos insuficientes.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	
Ciudad de México	MER	89.5	77.9	60.8		61.5	51.8	51.8	52.5	49.1	50.2	73.7	74.1
	CAM	84.8	74.8	58.5	69.7	58.7	45.8	44.7		46.5	45.1	64.3	66.2
	MGH	75.0	72.2	52.6	60.7	56.2	46.3	48.3	45.0	39.5	43.5		68.1
	IZT	76.5		46.0	54.6	50.6	43.8	42.6	43.7	40.0	42.6	61.4	56.2
	HGM	74.1	64.0	43.2		49.8	42.7	42.3	40.7	39.1	39.7	58.4	55.5
	COY	67.1	59.5	40.8	46.3	41.8	34.8		37.2	37.3	38.4	55.2	48.9
	UIZ	62.6	60.1	40.0	43.8	44.3	38.6	35.9	37.8	37.0	38.7	58.7	52.1
	CCA	53.9			42.4	43.3	30.2	28.2	31.6	30.7			42.4
	UAX	51.1	48.3	30.1	34.4	34.0	29.9	27.1	28.7	29.3	33.0		40.3
	PED	44.7	42.3	29.0	29.6	29.3		26.5	26.4	26.8	28.6	38.5	35.1
	CUA	34.6	44.1	26.4	29.0	30.3	30.8	32.1	31.1	22.7	24.5	37.5	36.3
AJM	26.5	32.3	19.7	19.5	20.8	19.8	20.7	21.3	23.6	24.3	30.2	24.4	
Estado de México	XAL	96.1	86.3	64.0	81.8	65.3	52.9	50.6	52.0	41.0	46.0	69.0	78.8
	TLA	84.2	78.5	59.4	65.8	57.7	49.8	48.6		45.4	48.3	65.0	66.0
	FAC	70.3	62.2			53.7	43.5	41.0	42.8			45.2	55.5
	CUT	68.6	52.9	44.4	47.8	36.8	25.3	23.7				41.1	52.4
	SAG	64.5	56.4	42.7				33.0	33.1	25.9	31.6		
	NEZ	56.3		41.2	45.9	43.0	36.8	35.3		27.8	28.9	45.5	49.6
	VIF				44.0	36.0	26.5	24.0	23.2	19.2	20.3	36.3	47.5
	MON	36.1		28.9	35.1	29.4	22.5	22.1	23.8		25.4	31.1	44.0

Figura 3.8. Promedio mensual de la concentración de óxidos de nitrógeno por estación de monitoreo. Los espacios en blanco indican periodos sin datos o con datos insuficientes.

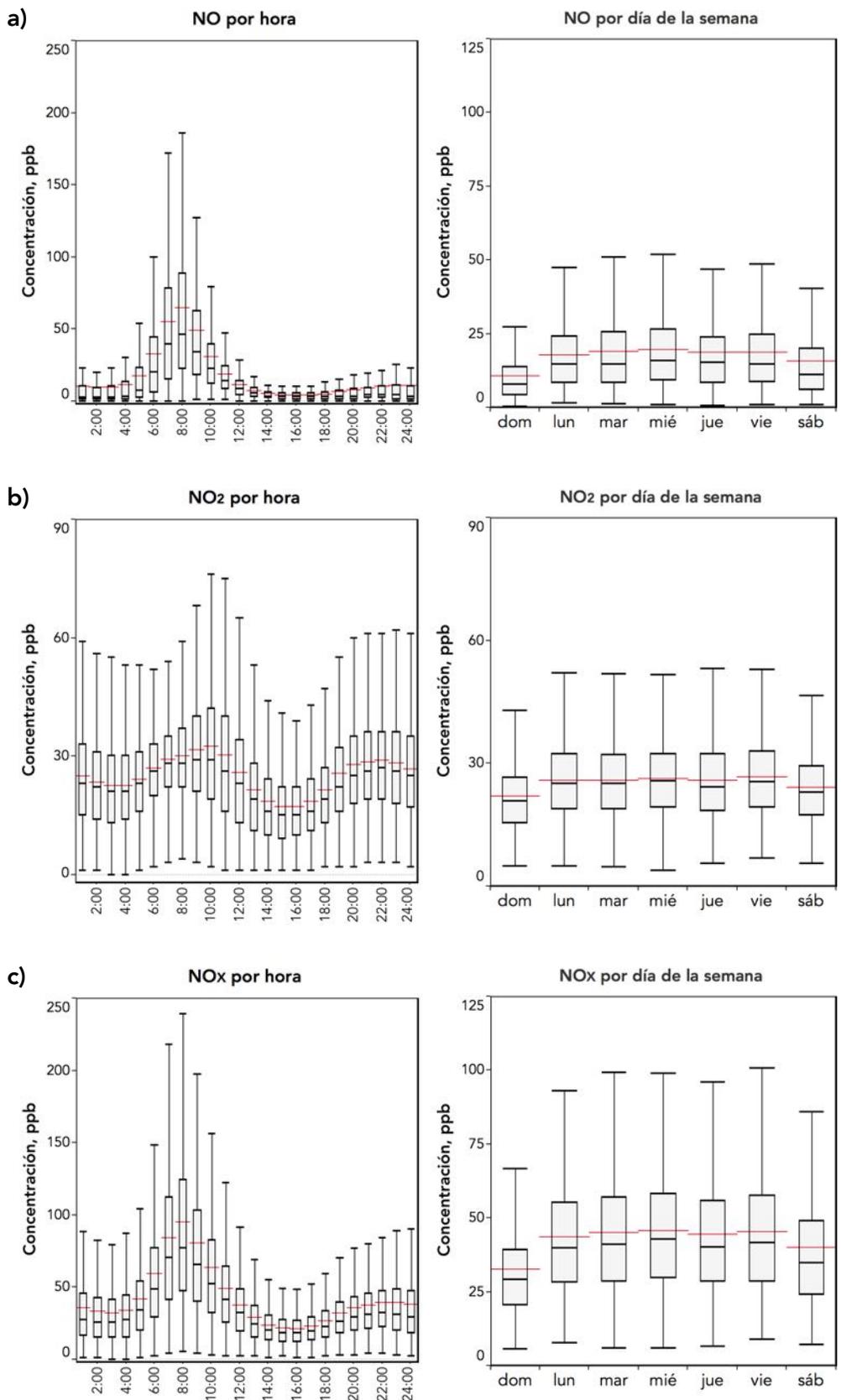
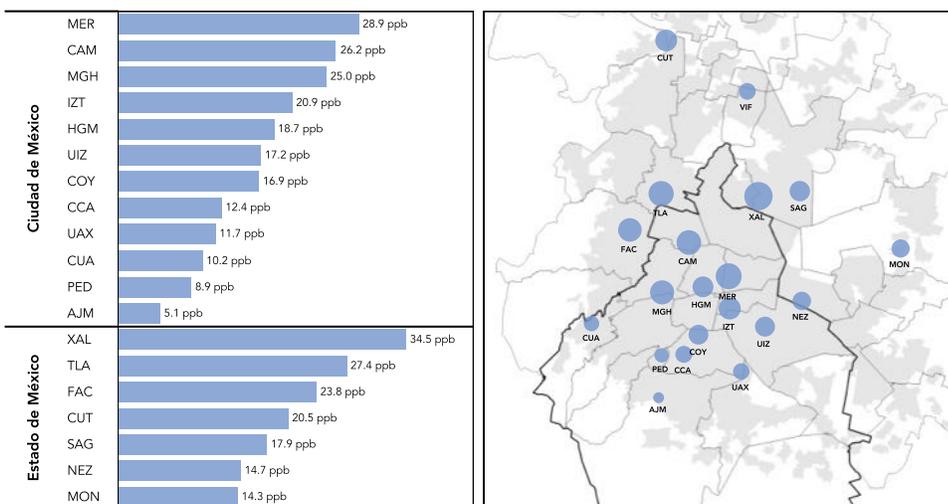
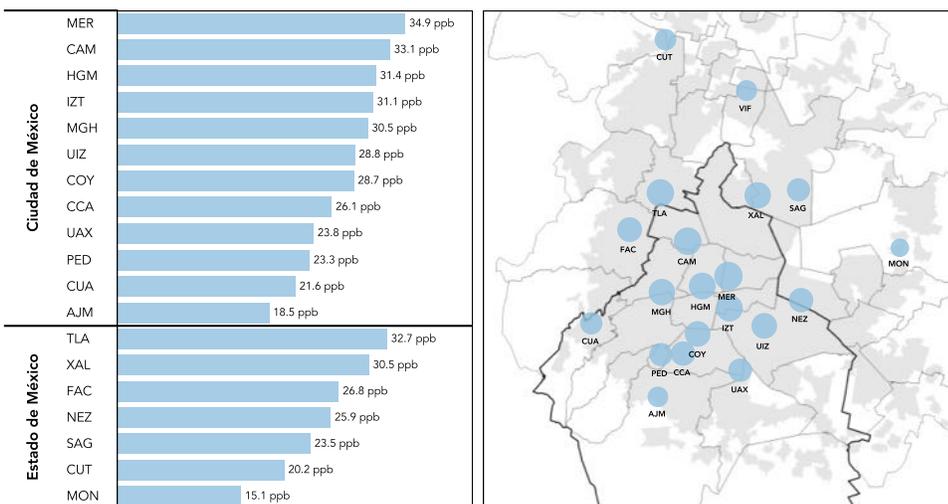


Figura 3.9. Distribución de los datos por hora (izquierda) y día de la semana (derecha) para NO (a), NO₂ (b) y NO_x (c). En las gráficas de caja y bigotes, la caja representa el rango intercuartil (Q1 y Q3), la línea en el interior de la caja corresponde a la mediana (Q2), los extremos de los bigotes indican 1.5 veces el rango intercuartil (RIQ). La línea roja corresponde a la media.

a) NO



b) NO₂



c) NO_x

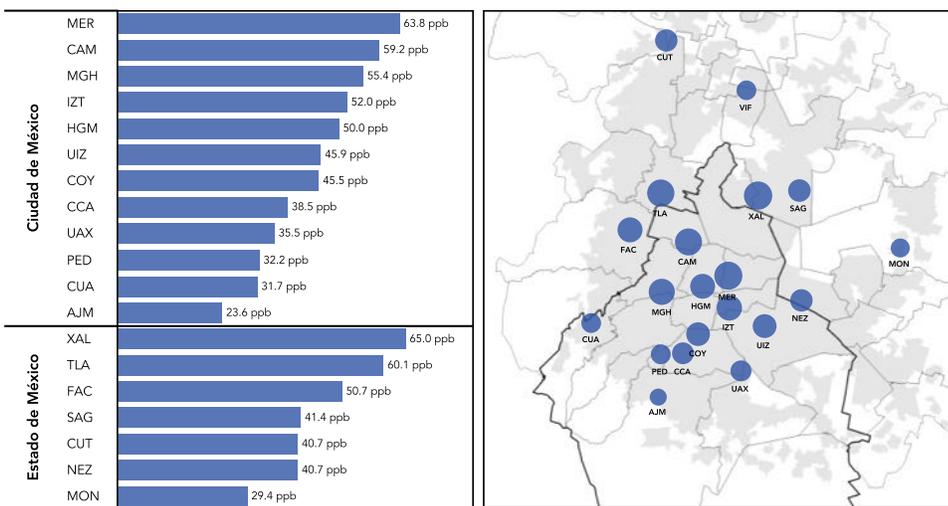


Figura 3.10. Promedio anual por estación de monitoreo para NO (a), NO₂ (b) y NO_x (c). En la figura de la izquierda se indican los promedios por estación de monitoreo, separados por entidad. En el mapa de la derecha se muestra la ubicación de la estación, el tamaño del círculo es proporcional al promedio anual.

Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es emitido a la atmósfera principalmente por las fuente móviles, los gases de escape contribuyen con más del 95% de las emisiones de este contaminante. A pesar de las bajas concentraciones en el aire ambiente, su presencia es indicador de emisiones vehiculares y, por lo tanto, de los compuestos asociados a humos de escape como hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, carbono negro, etc. El comportamiento temporal y espacial de las concentraciones del contaminante está relacionado directamente con la dinámica del tránsito vehicular en la ciudad y la meteorología. Las zonas con mayor tránsito vehicular o con congestiones vehiculares frecuentes, son las que generalmente reportan los mayores niveles del contaminante.

En 2016 el promedio anual del contaminante fue de 0.67 ppm. El promedio en aquellas estaciones ubicadas en el territorio de la Ciudad de México fue de 0.65 ppm, mientras que en las ubicadas en la zona conurbada fue de 0.70 ppm.

En la Figura 3.11 se muestra la serie de tiempo de los promedios diarios del contaminante, en ella se puede observar que las concentraciones fueron mayores en los meses de la temporada fría (enero, febrero y diciembre) debido principalmente a las condiciones de estabilidad atmosférica asociadas a las inversiones térmicas de superficie, la disminución de la altura de la capa de mezclado y vientos débiles. En la temporada de lluvia, entre junio y octubre, se observó una disminución importante por el cambio en las condiciones atmosféricas, este periodo coincide con las vacaciones de verano que reducen notablemente el tránsito vehicular en la ciudad. Las mejores condiciones de dilución y dispersión, el lavado atmosférico y la reducción en el tránsito vehicular, favorecen no solo bajas concentraciones de monóxido de carbono, también tienen un efecto positivo en la mayoría de los contaminantes. La Figura 3.12 muestra los promedios mensuales del contaminante por estación de monitoreo.

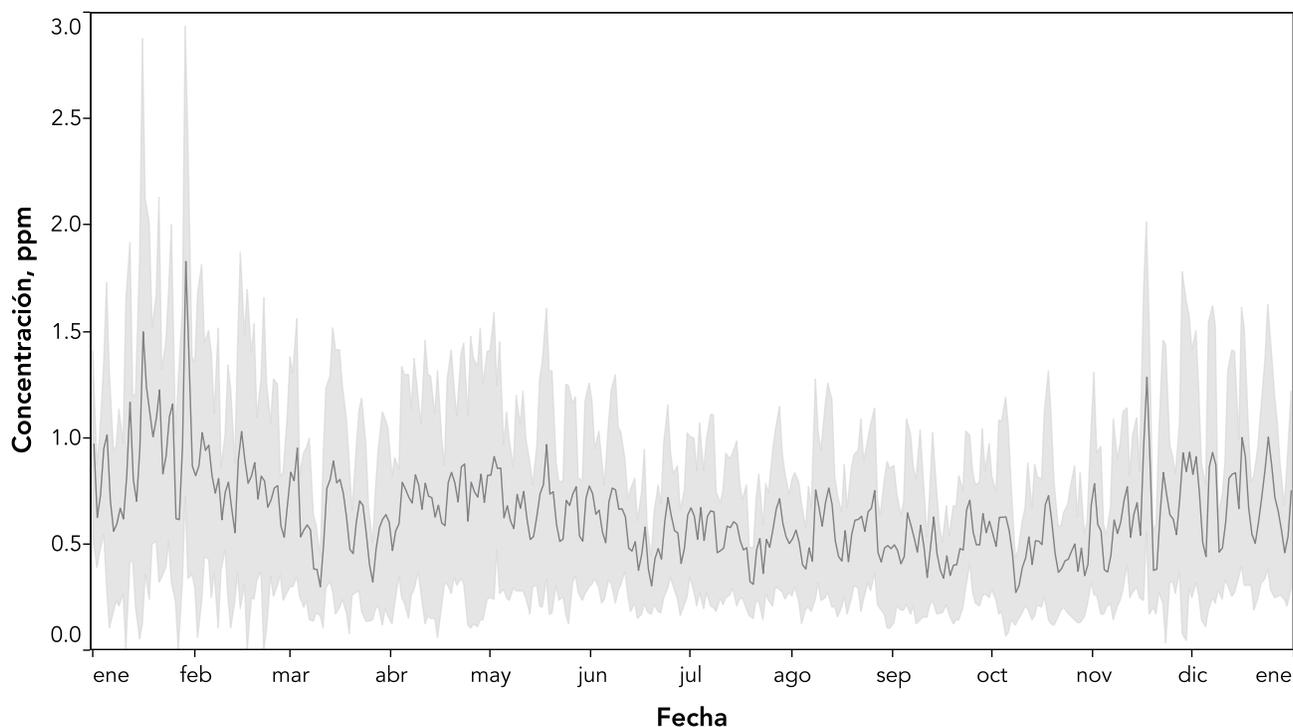


Figura 3.11. Serie de tiempo de la concentración promedio diaria de monóxido de carbono en las estaciones de monitoreo de la RAMA. La línea continua en gris oscuro indica la media, mientras que la región en gris corresponde a una desviación estándar alrededor de la media.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	
Ciudad de México	IZT	1.38		0.88	0.99	1.00	0.87	0.83	0.82	0.75	0.81	1.06	1.00
	MER	1.20	1.01	0.84		1.00	0.81	0.78	0.78	0.76	0.68	0.89	0.92
	CAM	1.17	0.99	0.80	1.00	0.94	0.70	0.78			0.63	0.85	0.88
	MGH	0.94	0.81	0.58	0.77	0.67	0.58	0.77	0.78	0.70	0.70	0.90	0.93
	BJU	1.04	0.86	0.64	0.81	0.89	0.71	0.60	0.58	0.53	0.55	0.74	0.76
	UIZ	0.94	0.89	0.69	0.76	0.79	0.68	0.60	0.65	0.58	0.50	0.75	0.77
	CCA	0.84	0.77	0.68	0.79	0.77	0.60	0.60	0.64	0.60			0.68
	HGM	1.03	0.70	0.67	0.82	0.63	0.49	0.52	0.42	0.32	0.36		0.81
	AJM	0.62	0.64		0.65	0.75	0.63	0.44	0.56	0.54	0.38	0.50	0.54
	CUA	0.61	0.55	0.45	0.66	0.55	0.40	0.49	0.52	0.52	0.50	0.67	0.68
	PED	0.61	0.58	0.38	0.49	0.54		0.46	0.50	0.45	0.37	0.57	0.52
	UAX	0.70			0.50	0.48	0.43	0.40	0.34	0.41			0.65
	TAH				0.41	0.58	0.41	0.35	0.30	0.32	0.37	0.48	0.47
	MPA		0.45	0.31	0.34	0.43	0.36	0.31	0.29	0.32	0.29	0.30	0.28
	Estado de México	XAL	1.43	1.31	0.83	1.25		0.83	0.86	0.86	0.71	0.74	1.02
TLA		1.07	0.88	0.81	0.98	0.90	0.77	0.71		0.71	0.70	0.79	0.91
FAC		0.99	0.91		0.86	0.98	0.69	0.60	0.65			0.68	0.81
SAG		1.06			0.93		0.58	0.60	0.63	0.52	0.61	0.79	0.75
CHO		0.76	0.83	0.62	0.91	0.76	0.61	0.53	0.61	0.63	0.61	0.77	0.76
NEZ		0.90			0.63	0.63	0.48	0.50	0.48	0.45	0.36	0.62	0.79
ATI					0.77	0.68	0.56	0.50	0.45	0.30	0.26	0.45	0.58
VIF					0.66	0.55	0.34	0.38	0.34	0.24	0.23	0.41	0.54

Figura 3.12. Promedio mensual de la concentración de monóxido de carbono por estación de monitoreo. Los espacios en blanco indican periodos sin datos o con datos insuficientes.

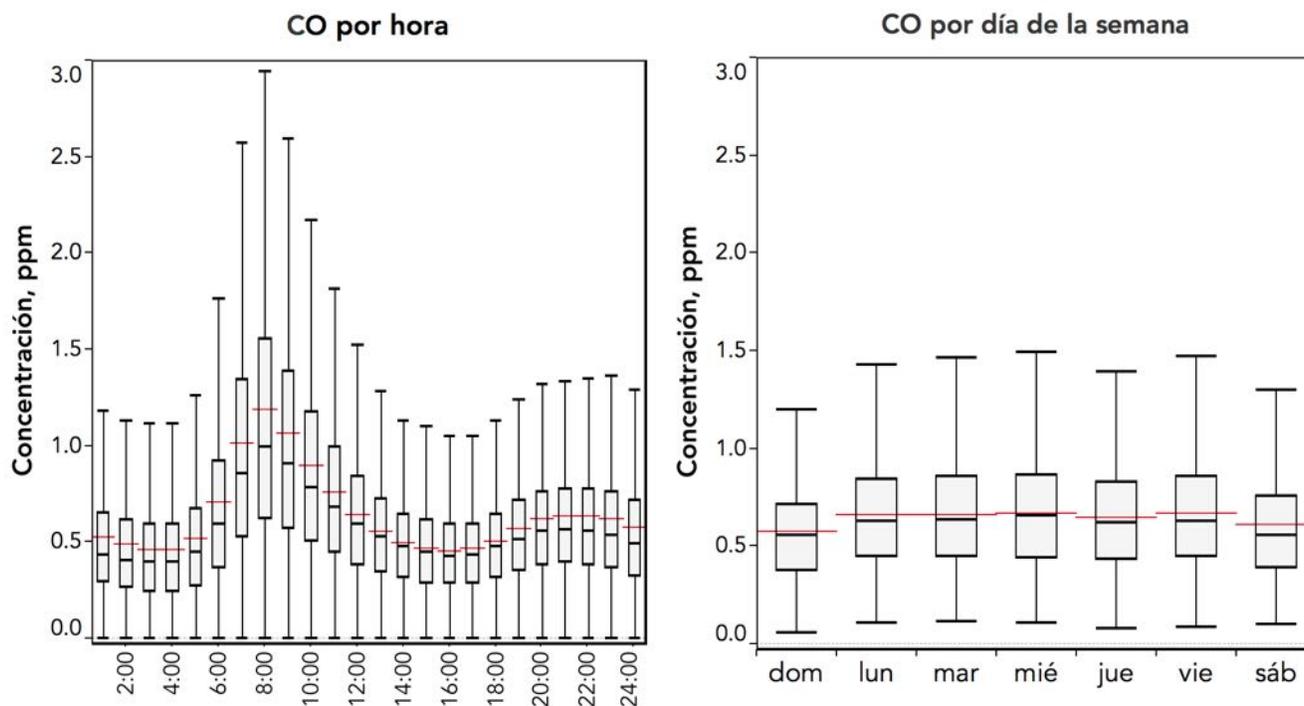


Figura 3.13. Distribución de los datos por hora (izquierda) y día de la semana (derecha). En las gráficas de caja y bigotes, la caja representa el rango intercuartil (Q1 y Q3), la línea en el interior de la caja corresponde a la mediana (Q2), los extremos de los bigotes indican 1.5 veces el rango intercuartil (RIQ). La línea roja corresponde a la media.

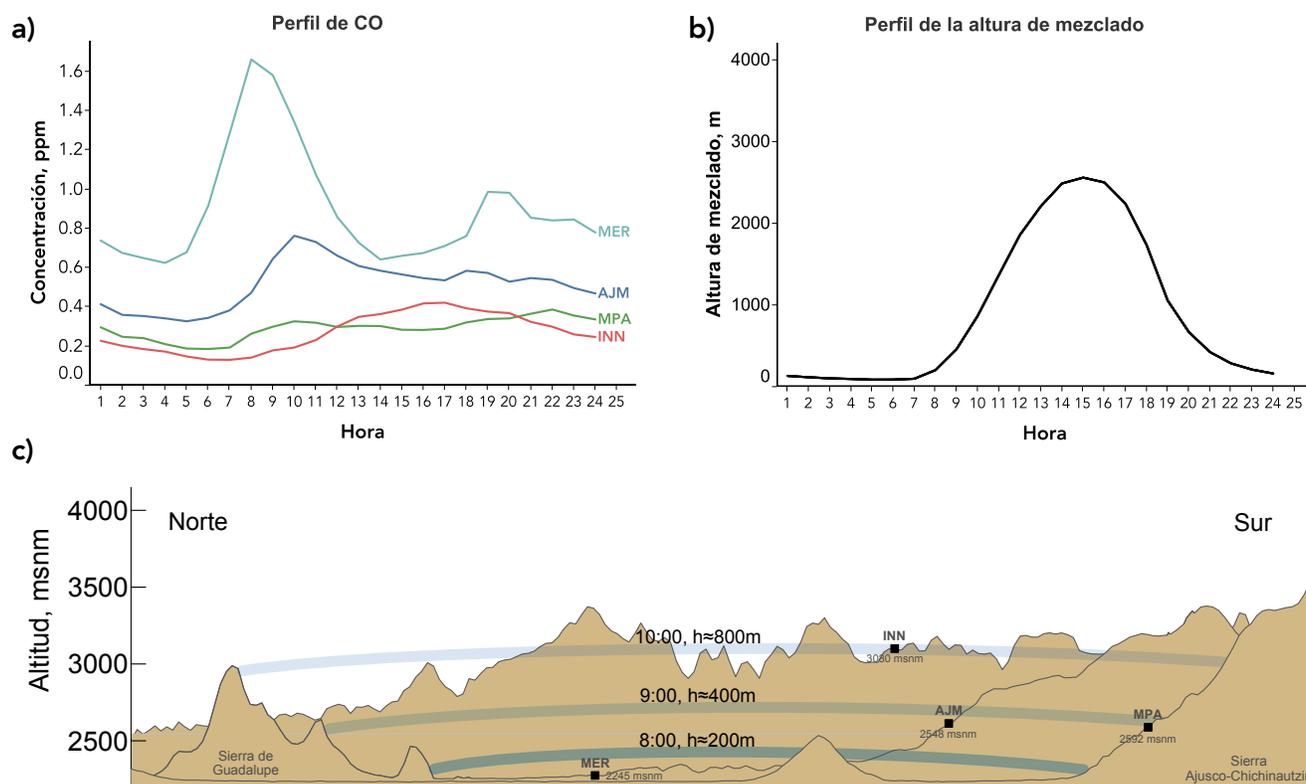


Figura 3.14. Influencia de la evolución de la capa límite en la concentración de monóxido de carbono.

En las estaciones ubicadas dentro del área urbana el monóxido de carbono tiene un comportamiento típico durante el día que se caracteriza por dos picos de concentración, uno matutino y otro vespertino. El primero de mayor intensidad, se observa entre las 7:00 y las 9:00 horas, el segundo, significativamente menor, entre las 20:00 y las 22:00 horas. Las menores concentraciones se presentaron entre las 14:00 y las 16:00 horas. La distribución diurna del monóxido de carbono, al igual que la de otros contaminantes, está modulada principalmente por la cantidad emitida del contaminante y la evolución de la capa límite. En los sitios ubicados en la región montañosa la variación diurna es distinta y se caracteriza por máximos que se presentan algunas horas después que en los sitios urbanos. Esto se debe a que en estos sitios existe un menor aporte de las fuentes locales y la mayor contribución proviene del transporte de contaminantes desde la zona urbana durante el crecimiento de la capa de mezclado. Lo anterior se ilustra en la Figura 3.14, la Figura 3.14a presenta los perfiles promedio de noviembre y diciembre para las estaciones Merced (MER),

Ajusco Medio (AJM), Milpa Alta (MPA) e Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN). La estación MER se ubica en el centro de la ciudad (altitud=2245 msnm) y es representativa de las condiciones urbanas. La estación MPA se localiza en una región rural al sureste de la Ciudad de México (altitud=2548 msnm), mientras que AJM se ubica en los límites del área urbana, al suroeste de la ciudad (altitud=2245 msnm), ambas en las laderas de la Sierra Ajusco-Chichinautzin. La estación INN se localiza al suroeste en los límites de la Ciudad de México en la parte alta de la Sierra de las Cruces (altitud=3080 msnm) en la región boscosa del Estado de México. Las estaciones MPA e INN tienen como objetivos de monitoreo la evaluación del transporte de la contaminación y la caracterización de las concentraciones de fondo. La Figura 3.14b muestra el perfil horario promedio de la altura de mezclado entre noviembre y diciembre, mientras que la Figura 3.14c muestra un esquema de la cuenca, con la ubicación de las estaciones y el comportamiento del promedio del tope de la capa de mezclado durante la mañana, entre las 8:00 y las 10:00 horas.

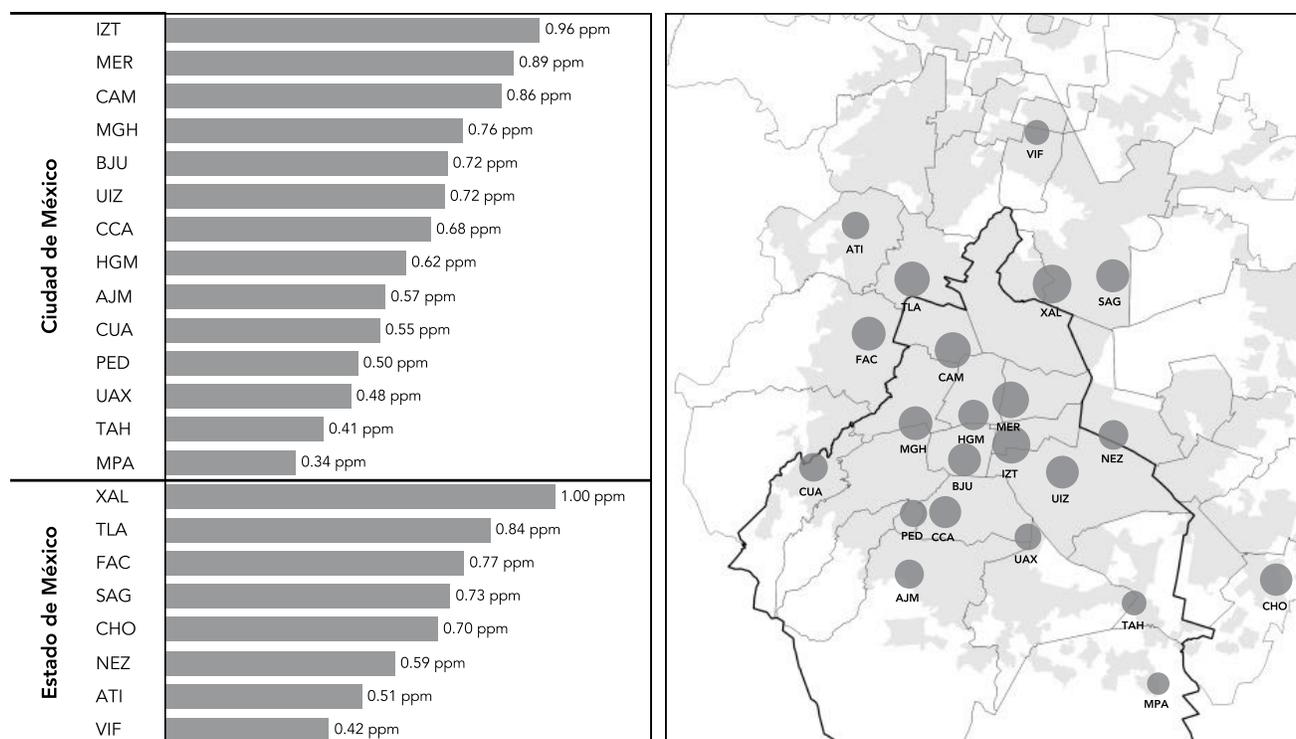


Figura 3.15. Promedio anual por estación de monitoreo. En la figura de la izquierda se indican los promedios de monóxido de carbono por estación de monitoreo, separados por entidad, en el mapa de la derecha se muestra la ubicación de la estación, el tamaño del círculo es proporcional al promedio anual.

La figura ejemplifica de una manera sencilla la correspondencia entre los perfiles de monóxido de carbono en los sitios ubicados a mayor altura y la evolución de la capa de mezclado. En las estaciones AJM y MPA, que tienen una menor contribución de emisiones vehiculares, el incremento en la concentración se observó después de las 8:00 con un máximo alrededor de las 10:00, dos horas después que en MER. Este incremento en la concentración coincide con el crecimiento de la capa de mezclado que alcanza ambas estaciones entre las 8:00 y las 9:00 horas. En MPA el pico vespertino fue mayor que el matutino por el posible desalojo de los contaminantes de la cuenca a través del paso de Chalco. En INN el incremento se observó después de las 10:00, cuando la altura de la capa de mezclado alcanzó la altitud de la estación. Es de esperarse que este sitio reciba las contribuciones de la Ciudad de México, pero también de la ciudad de Toluca. Las observaciones anteriores sugieren que, en los sitios de montaña, la presencia de los contaminantes urbanos es importante y depende del comportamiento de la capa límite atmosférica durante el día.

En cuanto a la distribución espacial del contaminante, como se comentó previamente, las concentraciones máximas se observaron en los sitios ubicados en las zonas con mayor densidad de tránsito. En la Ciudad de México los promedios anuales máximos se observaron en Iztacalco (IZT), Merced (MER) y Camarones (CAM), ubicadas en el centro y norte de la Ciudad de México (ver Figura 3.15). En la zona conurbada del Estado de México, los mayores promedios anuales se observaron en Xalostoc (XAL), en el municipio de Ecatepec de Morelos, y Tlalnepantla (TLA), en el municipio de Tlalnepantla de Baz, ambos al norte de la zona metropolitana. Los menores promedios se observaron en las estaciones de la periferia urbana. Destaca el hecho de que Chalco (CHO), ubicada al sureste en los límites de la ciudad, reportara un promedio similar al observado en algunas de las estaciones urbanas. Esto se puede explicar por la contribución importante de emisiones locales generadas por el intenso tránsito vehicular de la Autopista México-Puebla, así como la aportación por el arrastre de contaminantes asociado al flujo de viento desde el norte de la cuenca.

Ozono

Este año se caracterizó por un evento que activó por primera vez desde 2002 la Fase I del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA), el evento ocurrió durante un episodio de estabilidad atmosférica provocado por un sistema anticiclónico que afectó a la región central del país durante casi una semana (12 al 18 de marzo). A pesar de esto, los indicadores estadísticos anuales no mostraron cambios significativos con respecto a los observados en los últimos 10 años. La concentración promedio anual fue de 30 ppb, mientras que el promedio anual de las concentraciones máximas fue de 76 ppb. Comparativamente, en 2015 el promedio anual fue 28 ppb, mientras que el promedio anual de los máximos fue de 75 ppb.

La Figura 3.16 muestra la serie de tiempo de los promedios diarios, mientras que las Figuras 3.17 y 3.18 muestran los valores máximos para el promedio horario (1 h) y el de ocho horas (8 h), respectivamente. Las mayores concentraciones ocurrieron en la temporada de ozono, entre la

segunda quincena de febrero y la primera quincena de junio. Durante esta temporada se presentaron las mayores concentraciones del contaminante con valores que frecuentemente superaron las 154 ppb (que equivalen a 150 puntos en el índice de calidad del aire, por encima de este valor se activa el PCAA), sin embargo, durante todo el año se observaron concentraciones mayores a las recomendadas por la NOM. La concentración horaria máxima se registró el 14 de marzo en la estación Cuajimalpa (CUA) con un valor de 210 ppb que llevó a la activación de la Fase I del PCAA.

El valor límite para el promedio de una hora de la NOM-020-SSA1-2014 de 95 ppb (el cual no debe superarse durante el año) se rebasó en un total de 856 horas distribuidas en 212 días. En el caso del promedio móvil de 8 horas, la NOM-020-SSA1-2014 establece un valor máximo de 70 ppb que no debe ser superado durante el año, de acuerdo con los registros este valor se superó en 202 días con un máximo de 152 ppb el día 14 de marzo, también en la estación CUA.

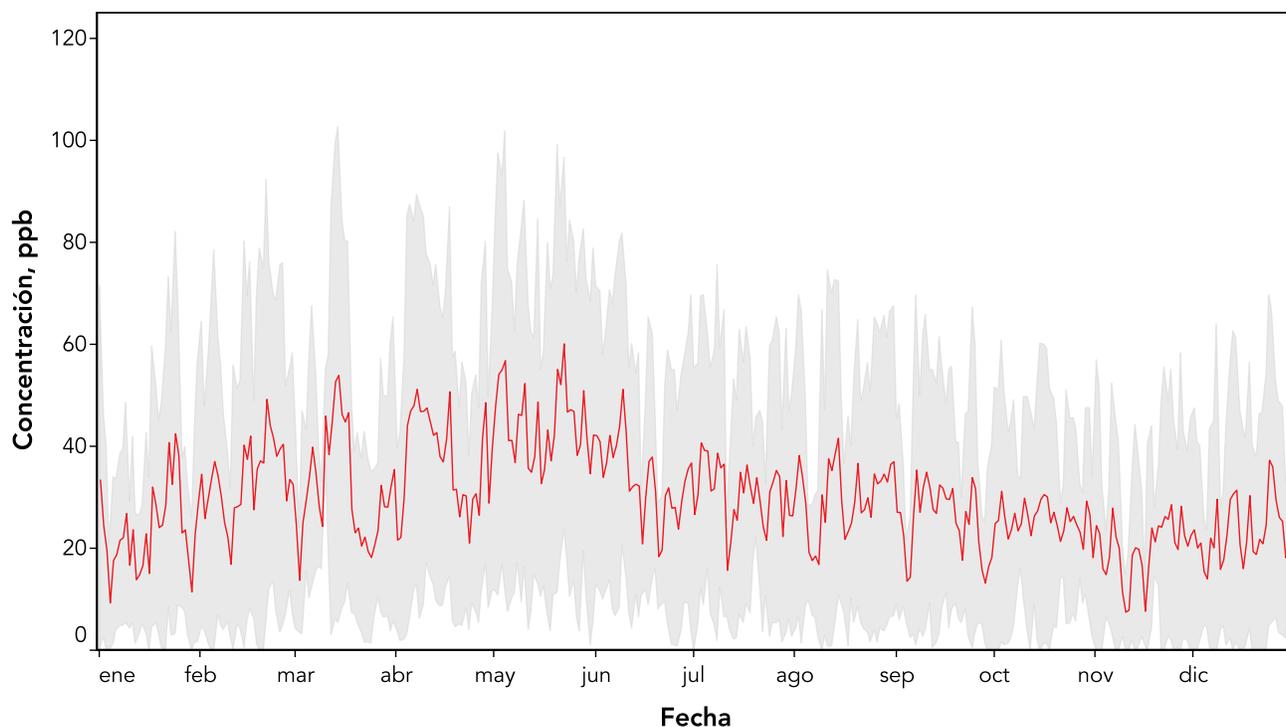


Figura 3.16. Serie de tiempo de la concentración promedio diaria de ozono en las estaciones de monitoreo de la RAMA. La línea roja indica la media, mientras que la región en gris corresponde a una desviación estándar alrededor de la media.

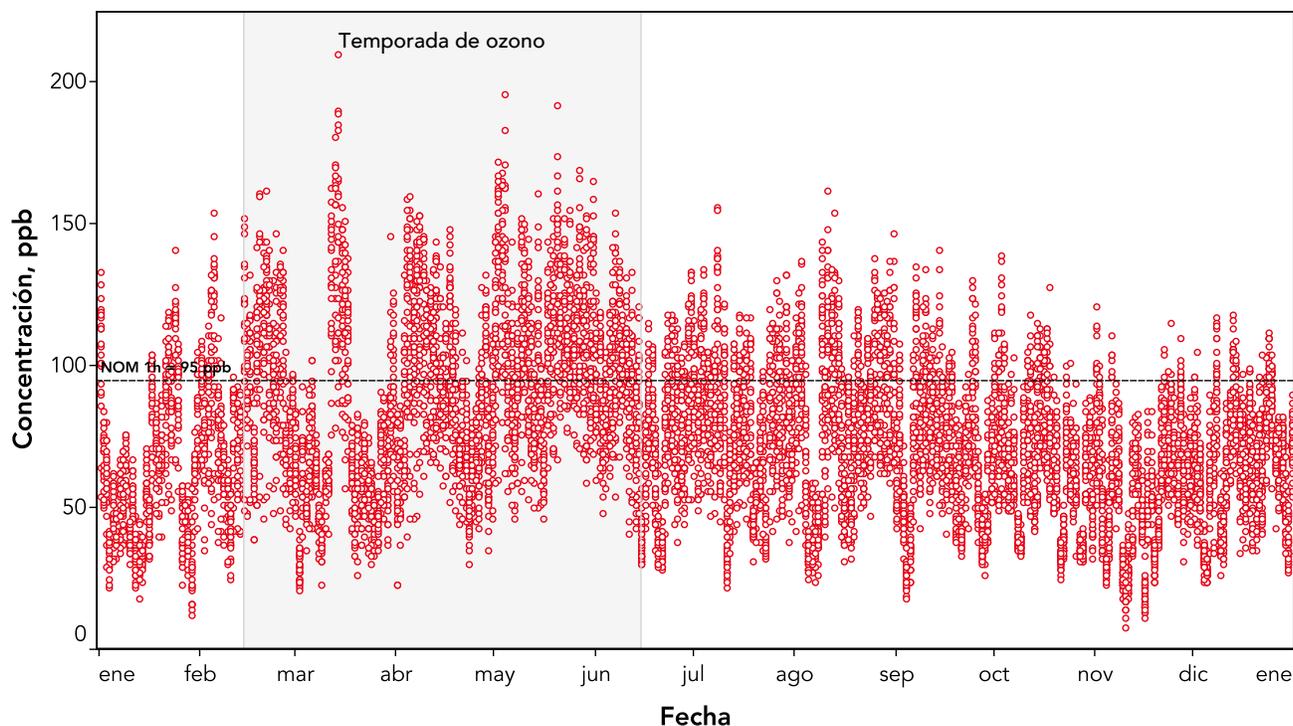


Figura 3.17. Serie de tiempo con las concentraciones horarias máximas de ozono registradas en las estaciones de monitoreo. En la figura se destacan el valor de la norma y el periodo correspondiente a la temporada de ozono.

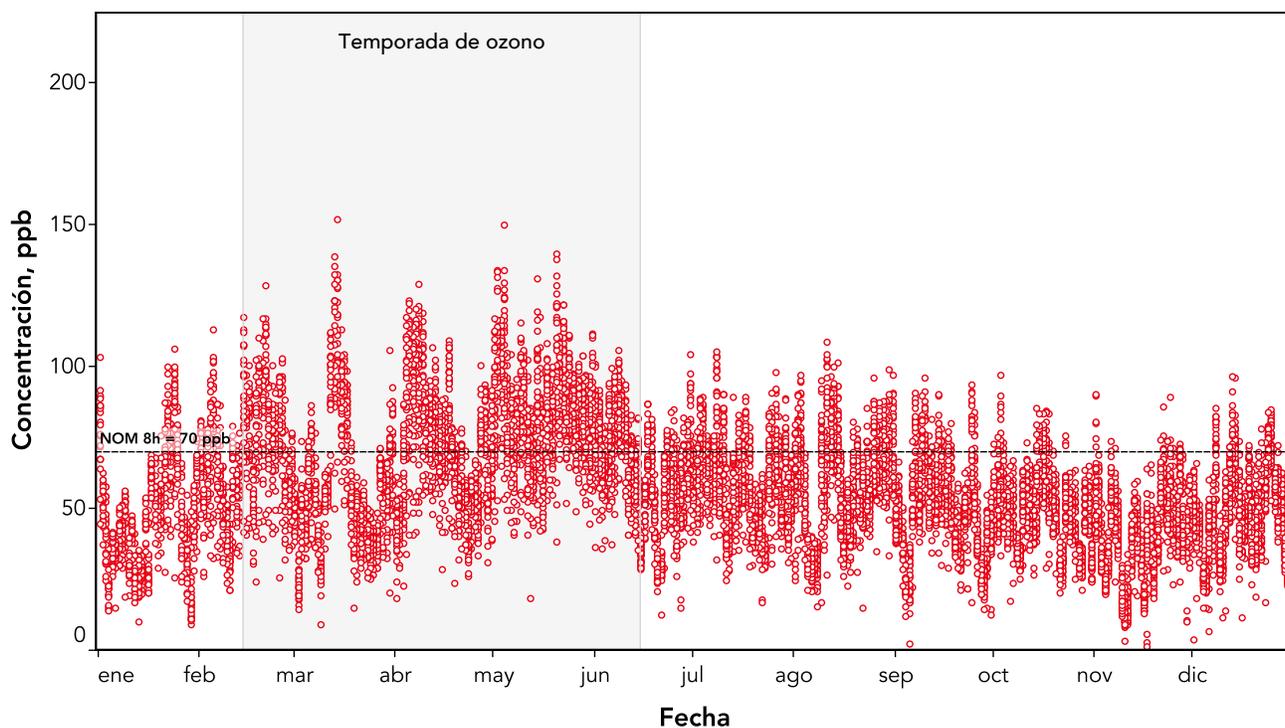


Figura 3.18. Serie de tiempo con las concentraciones máximas de ozono del promedio de ocho horas registradas en las estaciones de monitoreo. En la figura se destacan el valor de la norma y el periodo correspondiente a la temporada de ozono.

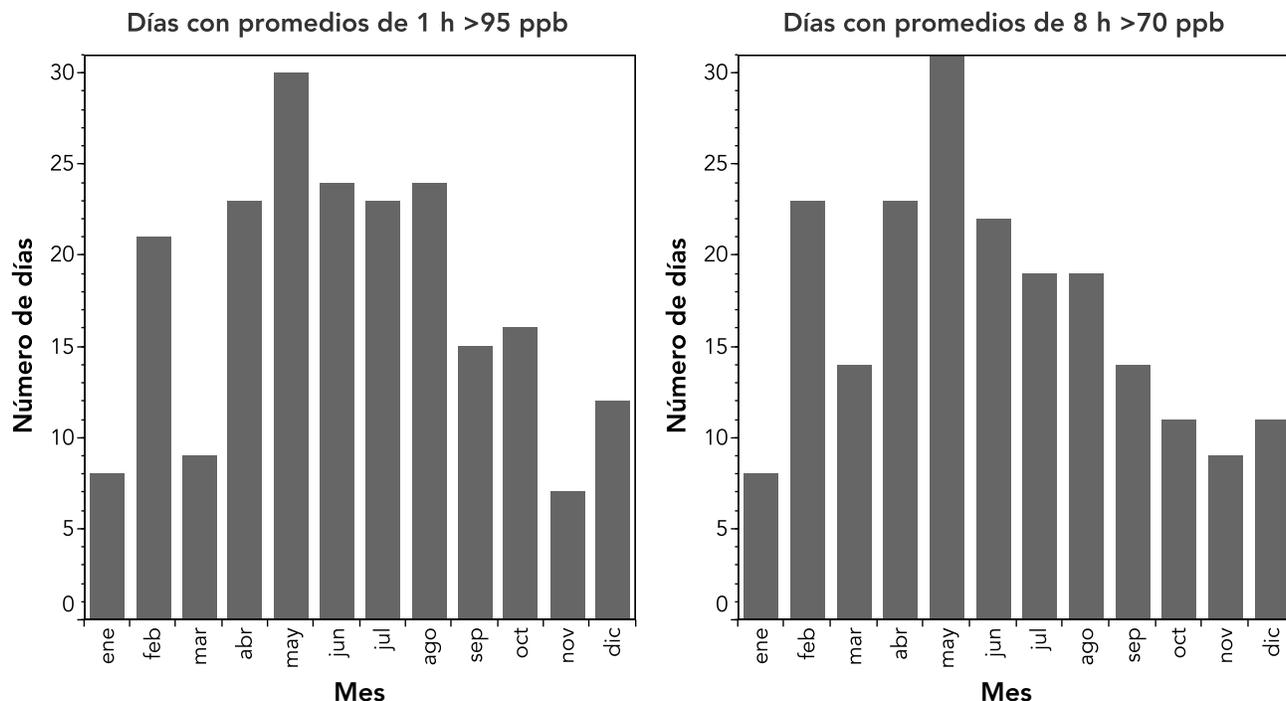


Figura 3.19. Número de días en los que la concentración de ozono superó el valor horario (izquierda) y de ocho horas (derecha) de la NOM-020-SSA1-2014.

Mayo registró el mayor número de días con concentraciones por encima del valor límite de la norma, tanto para el promedio de 1 h como para el de 8 h (ver Figura 3.19). Resulta interesante observar que marzo estuvo entre los meses con el menor conteo de días con valores mayores a la NOM, esto a pesar de que en ese mes se activó la Fase I del PCAA. Lo anterior se explica por la presencia de la corriente de chorro que favoreció días limpios durante casi una semana. El menor número de días con valores mayores a la NOM se observó en los meses de la temporada seca fría, cuando la actividad fotoquímica fue menor por la disminución en la duración del periodo diurno y en la intensidad de la radiación solar. Es de destacar que aún en la temporada de lluvia se superó la norma para los promedios de 1 y 8 horas.

En la Figura 3.20 se muestra la variabilidad por hora y por día de la semana. La variabilidad diurna tiene un comportamiento característico con un máximo entre las 14:00 y las 16:00, y un mínimo alrededor de las 7:00. El ozono es de origen fotoquímico, es por eso que las concentraciones máximas se observaron en las horas de mayor intensidad solar, mientras que durante la noche disminuye al cesar la producción foto-

química y por la deposición del contaminante. Con respecto a los días de la semana, el promedio de las concentraciones no presentó una variación significativa en los días laborales, mientras que el sábado registró una pequeña disminución en el promedio. El domingo registró las mayores concentraciones por el efecto de *fin de semana* (Stephen et al. 2013).

En cuanto a la distribución espacial, las estaciones ubicadas al sur de la Ciudad de México reportaron las mayores concentraciones debido principalmente al transporte de precursores (óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles) desde el norte, por los vientos predominantes y la posterior acumulación al sur en las primeras horas de la tarde, en presencia de radiación solar. En la Figura 3.21 se muestra el número de horas con concentraciones mayores a 95 ppb. Las estaciones ubicadas en las laderas montañosas o cerca de ellas registraron el mayor número de horas: Ajusco Medio (AJM) registró el máximo con 479 horas, mientras que Pedregal (PED), Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y Benito Juárez (BJU) registraron más de 400 horas. Cuautitlán (CUT), al norte de la zona metropolitana, registró el mínimo con 4 horas.

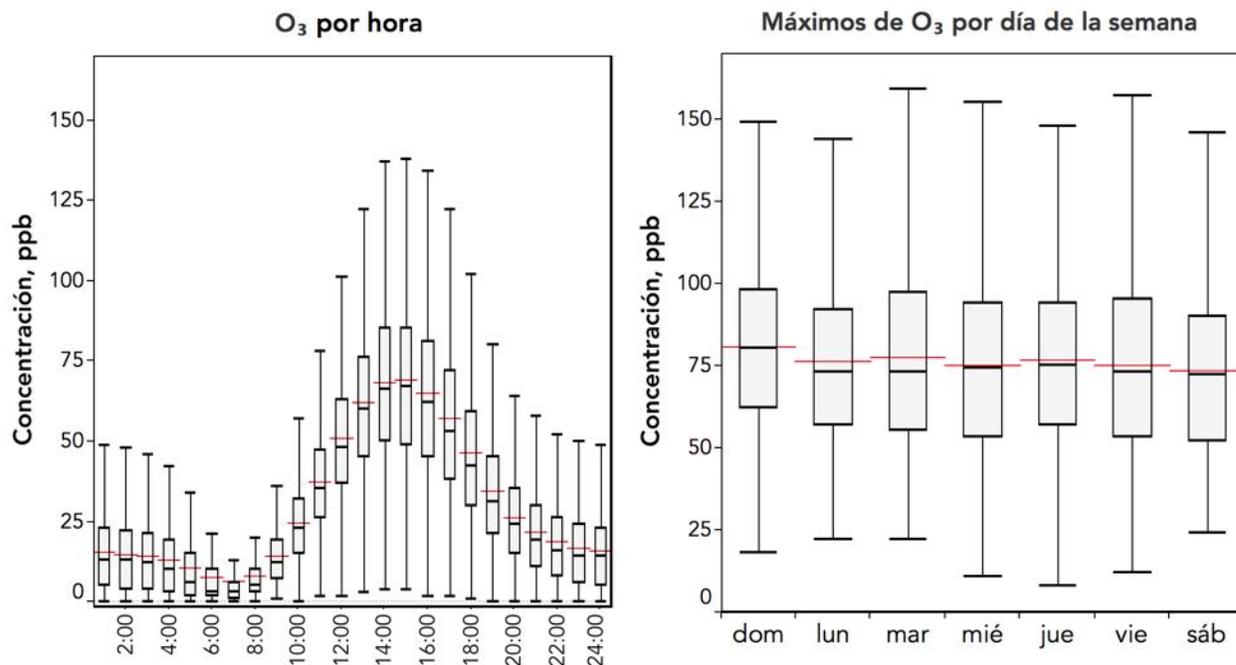


Figura 3.20. Distribución de los datos por hora (izquierda) y día de la semana (derecha). En las gráficas de caja y bigotes, la caja representa el rango intercuartil (Q1 y Q3), la línea en el interior de la caja muestra la mediana (Q2), los extremos de los bigotes indican 1.5 veces el rango intercuartil (RIQ). La línea roja corresponde a la media.

Número de horas >95 ppb

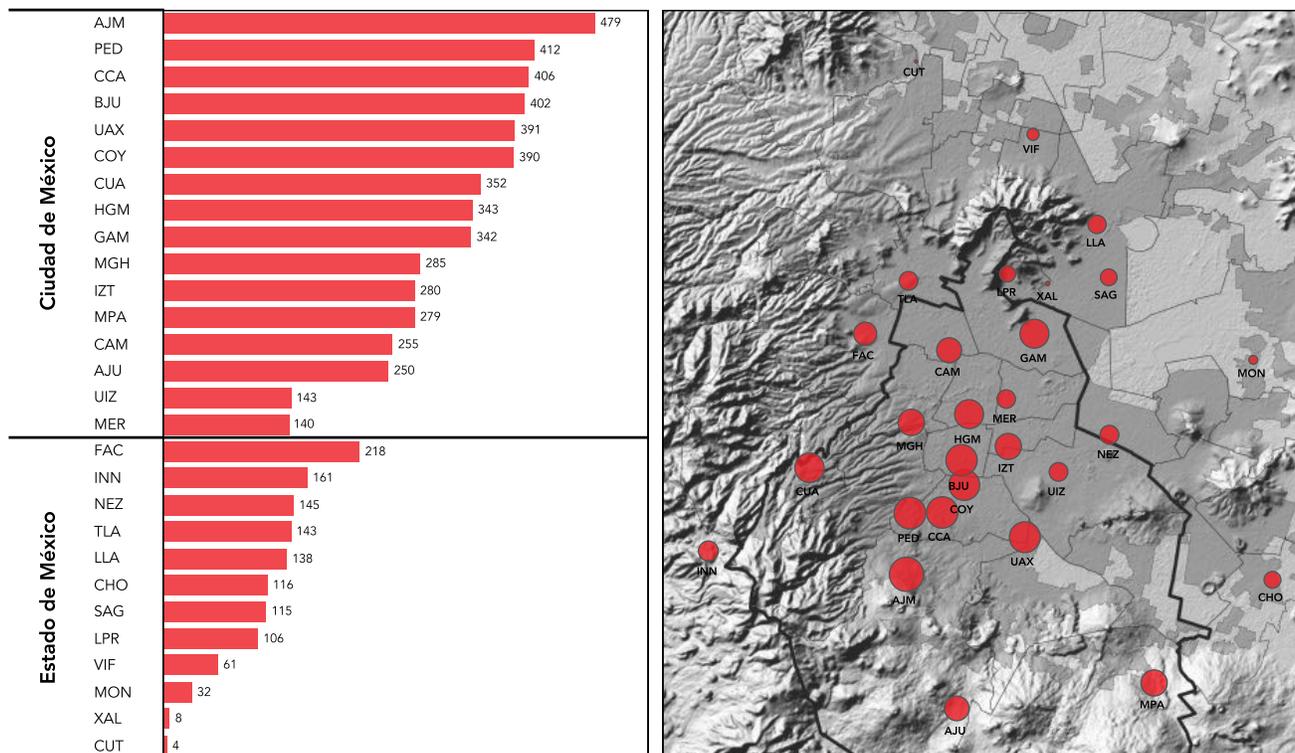


Figura 3.21. Número de horas mayores al valor de la NOM por estación de monitoreo. En la figura de la izquierda se indica el número de horas por estación separados por entidad, en el mapa de la derecha se muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo, el tamaño del círculo es proporcional al número de horas.

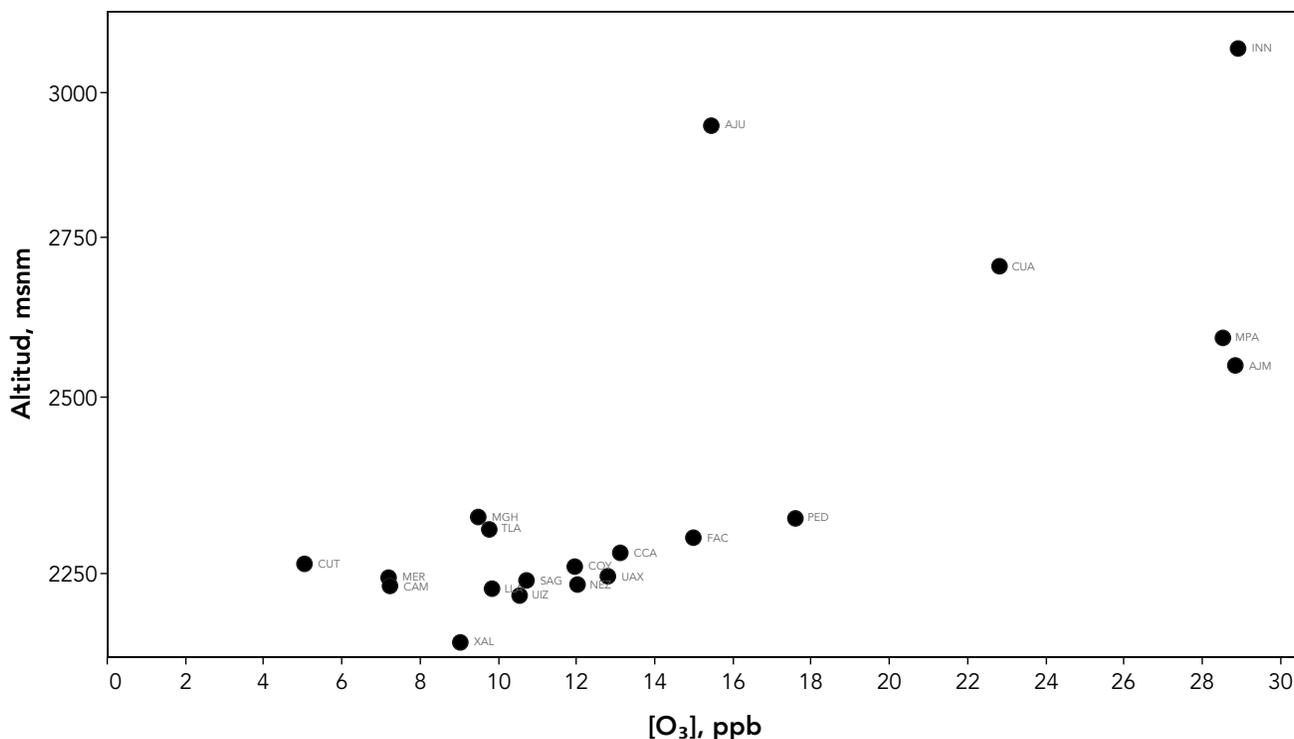


Figura 3.22. Promedio de la concentración de ozono entre las 1:00 y 5:00 en comparación con su altitud. La altitud se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).

Es común identificar al ozono troposférico como un contaminante antropogénico, sin embargo, es importante mencionar que se trata de un componente natural de la atmósfera que en regiones no urbanas se genera por la reacción entre los hidrocarburos emitidos por la vegetación y las concentraciones de fondo de óxido de nitrógeno. Se sabe que su concentración en la troposfera aumenta con la altitud hasta alcanzar un máximo en la capa de ozono. En ambientes limpios la concentración natural se encuentra entre 20 y 40 ppb a nivel del mar, y entre 30 y 70 ppb a altitudes mayores (Jacobson, 2012). En ambientes urbanos la producción de ozono se intensifica por una mayor disponibilidad y variedad de precursores. En la noche cesa la producción fotoquímica de ozono y el remanente puede ser eliminado por dispersión o la reacción con otras especies reactivas, sin embargo, los resultados del monitoreo muestran que en la Ciudad de México y su área metropolitana, durante la noche la concentración de ozono puede alcanzar valores relativamente elevados, principalmente en las estaciones localizadas a mayor altitud. La Figura 3.22 muestra el promedio de la concentración entre la

1:00 y las 5:00 horas con respecto a la altitud de la estación, en ella se observa una relación entre la magnitud de la concentración y la altitud. En los sitios ubicados a altitudes bajas el promedio fue menor a 15 ppb, mientras que en los ubicados en las laderas y en la parte alta de las montañas se observaron promedios entre 15 y 30 ppb, con valores horarios cercanos al límite de la norma. Estas concentraciones nocturnas podrían estar relacionadas con la contribución natural (que es mayor en altitudes superiores) y con el remanente en las capas nocturna y residual. Es posible que en la capa residual el ozono experimente un menor agotamiento químico que en la capa nocturna. Al ozono presente durante el periodo nocturno lo hemos identificado como *concentración de fondo*. El comportamiento de los niveles de fondo deberán analizarse para conocer su participación en la química nocturna y su contribución en los niveles del día siguiente. Por otra parte, es importante mencionar que a medida que se logren avances en el control del ozono, su concentración se acercará a los niveles naturales que podrían ser cercanos a los valores de la NOM o incluso superar las concentraciones recomendadas por la OMS.

Partículas suspendidas

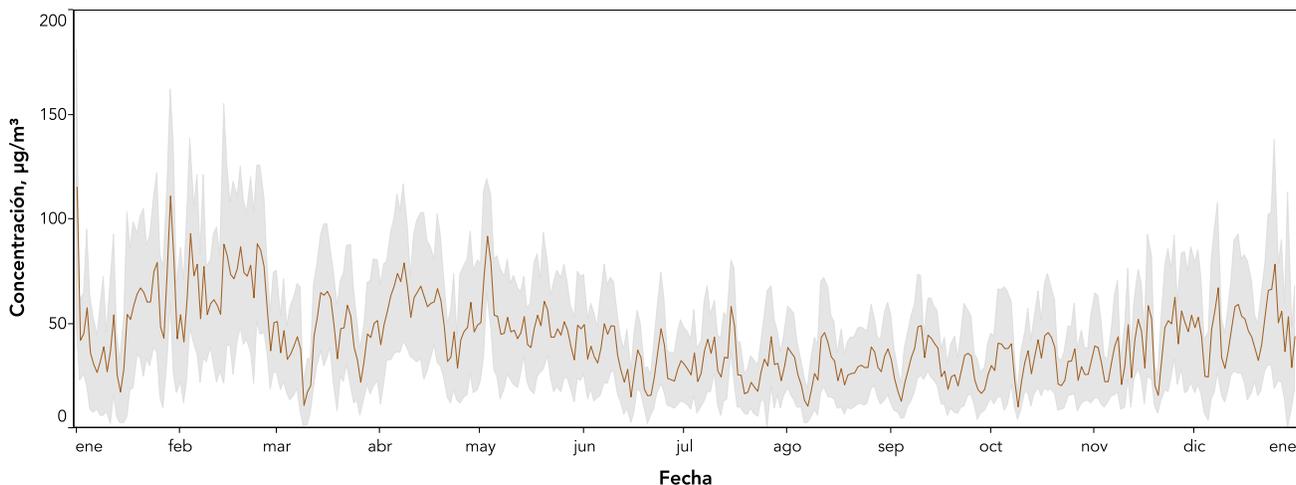
El monitoreo de las partículas suspendidas se realiza empleando dos metodologías: el método manual con instrumentos de tipo semiautomático y el método continuo con monitores automáticos. El método manual permite obtener muestras de las partículas suspendidas en filtros generalmente de teflón para $PM_{2.5}$ y de fibra de vidrio para PST y PM_{10} , los cuales son posteriormente analizados por gravimetría. Las muestras se colectan una vez cada seis días en periodos de 24 horas. Los resultados del análisis gravimétrico están disponibles después de una semana o más, posterior al muestreo. Los Métodos de Referencia de la US EPA son de tipo manual por su consistencia durante la medición en diferentes ambientes. Por otra parte, los métodos continuos automáticos proporcionan resultados casi en tiempo real, algunos de estos tienen la designación de Métodos Equivalentes para la medición de partículas por la US EPA. En principio se esperaría que los resultados obtenidos al usar los Métodos de Referencia fueran similares a los obtenidos con Métodos Equivalentes, sin embargo, se ha demostrado que en ambientes urbanos dominados por compuestos secundarios podrían existir diferencias significativas. De hecho, tanto los Métodos de Referencia como los Equivalentes están expuestos a interferencias asociadas a la naturaleza de las partículas. Es por esto que durante la selección de un equipo continuo adecuado para el monitoreo de partículas, se recomienda realizar una evaluación previa del método en función de las características fisicoquímicas de los aerosoles. En México no existe aún una normatividad técnica que establezca las características de diseño, desempeño y manejo de datos necesarias para el monitoreo con métodos de referencia o equivalentes (manuales o continuos). La única norma técnica disponible aplica a PST utilizando un método manual, sin embargo, la última revisión de la norma de salud eliminó a las PST como indicador de calidad del aire. El hecho de que no se cuenta con normatividad federal para el monitoreo de PM_{10} o $PM_{2.5}$ motivó a que en la Ciudad de México se decidiera por el uso de Métodos de Referencia (de la US EPA) para obtener los datos que son empleados para la evaluación de las nor-

mas de salud para PM_{10} y $PM_{2.5}$. Sin embargo, al tratarse de métodos manuales los resultados no pueden emplearse en el reporte en tiempo real, en este caso se utilizan instrumentos continuos con la designación de Método Equivalente de la US EPA. La comparación entre ambos métodos se realiza periódicamente, sin embargo, no se realiza cambio alguno en los datos continuos o manuales en espera de que la autoridad federal competente defina el método adecuado. Resumiendo, en la evaluación del cumplimiento de la NOM se utilizaron los datos reportados por el Método de Referencia, mientras que para el resto de los análisis descritos en este documento se emplearon los datos continuos obtenidos con Métodos Equivalentes. Ambas bases de datos se encuentran disponibles para consulta pública en el sitio web. Las comparaciones con la NOM se presentaron en el Capítulo I, en esta sección se hará referencia a los datos de los equipos continuos.

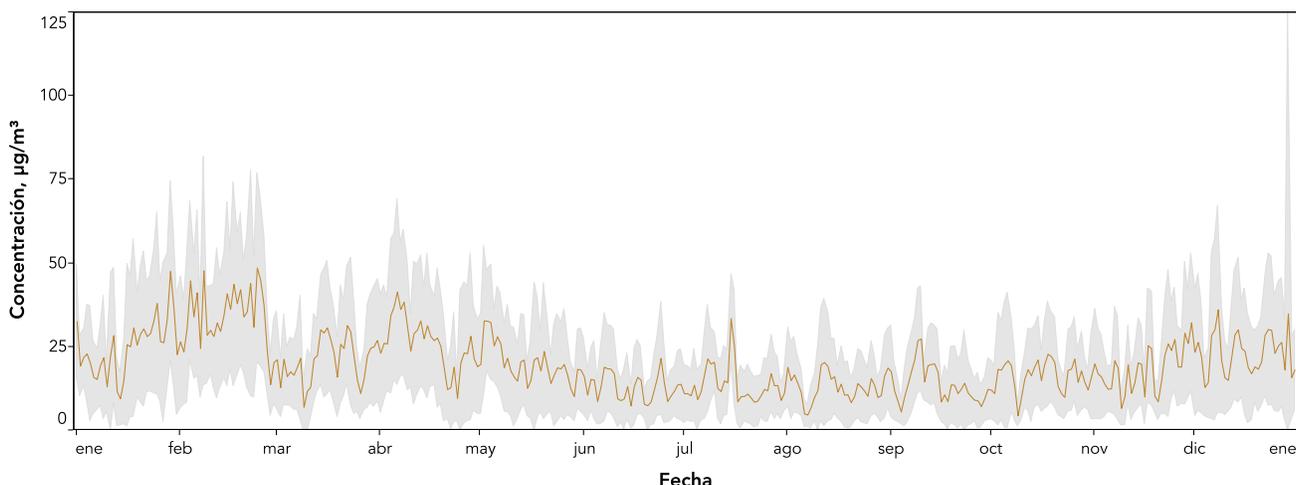
La RAMA realiza el monitoreo continuo de las fracciones PM_{10} , $PM_{10-2.5}$ y $PM_{2.5}$. Este año los promedios anuales en la zona metropolitana fueron 43, 20 y 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En la Ciudad de México los promedios anuales fueron 38, 17 y 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Las concentraciones máximas para el promedio de 24 horas de las tres fracciones se observaron en la zona conurbada del Estado de México, con un valor de 178 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} (el 25 de diciembre, en Villa de las Flores, VIF), 92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{10-2.5}$ (el 29 de diciembre en San Agustín, SAG) y 112 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ (el 1° de enero en Xalostoc, XAL).

En la Figura 3.23 se muestran las series de tiempo de los promedios diarios de cada una de las fracciones de partículas suspendidas. Las mayores concentraciones se observaron durante la temporada seca, con máximos en febrero y abril. En la temporada de lluvia (junio a octubre), los niveles de partículas disminuyeron considerablemente, principalmente por el efecto de *lavado atmosférico*. Durante la segunda semana de marzo los intensos vientos procedentes del sur, asociados a la corrientes de chorro, tuvieron un efecto favorable en la dispersión de todos los contaminantes, con disminuciones importante en las concentraciones de partículas.

a) Partículas menores a 10 µm (PM₁₀)



b) Partículas gruesas (PM_{10-2.5})



c) Partículas finas (PM_{2.5})

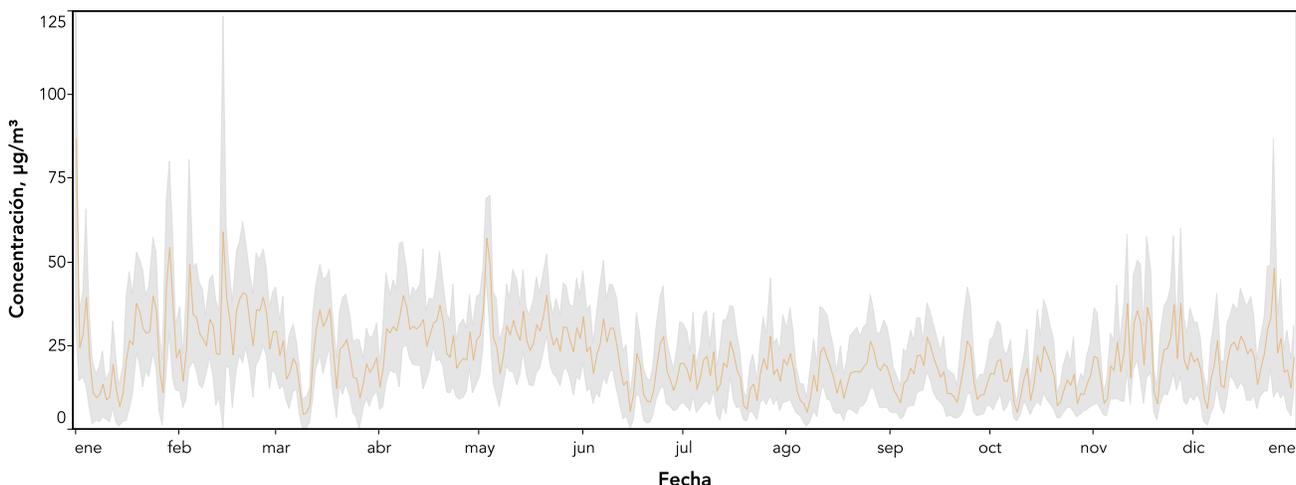


Figura 3.23. Series de tiempo con las concentraciones promedio diarias para las diferentes fracciones de partículas suspendidas: PM₁₀ (a), PM_{10-2.5} (b), y PM_{2.5} (c). La línea de color indica el promedio diario, la zona gris corresponde a una desviación estándar alrededor de la media.

Las PM_{10} y $PM_{10-2.5}$ presentaron una distribución bimodal durante el día, con un máximo en la mañana entre las 8:00 y las 9:00 horas, y otro por la tarde, entre las 18:00 y las 19:00 horas. En el caso de $PM_{2.5}$ solo se observó un máximo entre las 10:00 y las 12:00 horas (ver Figura 3.24). Estos comportamientos distintos se explican por las contribuciones de las principales fuentes de partículas en suspensión en la zona metropolitana. Mientras las partículas en la fracción $PM_{10-2.5}$ (conocida también como fracción gruesa) tienen una contribución importante de polvo resuspendido, las $PM_{2.5}$ (conocidas también como fracción fina) son generadas principalmente durante procesos secundarios (diurnos y nocturnos) en la atmósfera que involucran a los gases y aerosoles emitidos principalmente por las fuentes de combustión. La variabilidad de las PM_{10} (que son la suma de la fracción fina y la fracción gruesa) refleja las contribuciones de ambas fracciones durante el día. Es por esto que los máximos observados en la distribución de la fracción gruesa corresponden con las horas de mayor tránsito vehicular, mientras que el máximo de la fracción fina corresponde con las horas de mayor producción química en la atmósfera. En cuanto al comportamiento por día de la semana los gráficos de distribución de la Figura 3.24 muestran concentraciones similares de PM_{10} y $PM_{10-2.5}$ entre lunes y miércoles con un incremento gradual el jueves y viernes, donde el viernes reportó la mayor concentración. Los días del fin de semana tuvieron una disminución en el promedio de PM_{10} y $PM_{10-2.5}$, con el menor valor en domingo, esto se puede explicar por la reducción en el tránsito vehicular durante el fin de semana. En el caso de $PM_{2.5}$ se observó un comportamiento diferente, en donde el promedio de las concentraciones no muestra variaciones significativas entre el sábado y miércoles, mientras que los valores máximos se observaron el viernes.

En varias de las estaciones de monitoreo se realizó el monitoreo continuo de las tres fracciones de partículas lo que permitió la comparación entre ellas. La mayoría de estas se encuentra dentro del territorio de la Ciudad de México, sin embargo, se tiene planeado incrementar el número de estaciones equipadas con estos instrumentos para la zona conurbada del Estado de México. Por lo tanto, lo que se describe a continuación no puede considerarse como representa-

tivo para toda la zona metropolitana. En promedio la fracción fina representó alrededor del 54% de la masa total de las PM_{10} (ver Figura 3.24), la contribución de la fracción fina fue la que dominó durante la mayor parte del día. En la Figura 3.25 se presenta la contribución promedio por sitio de monitoreo y mes. En los sitios de monitoreo ubicados en la Ciudad de México la contribución de la fracción fina fue consistente a lo largo del año, con una mayor aportación a la masa total. Solo en las estaciones ubicadas al norte en la zona metropolitana, se observó una mayor contribución de la fracción gruesa, principalmente durante los meses de la temporada seca. Se sabe que un porcentaje importante de la fracción fina (60 a 80 %) es de origen secundario, por la importancia que tiene esta fracción para la salud humana la próxima generación de políticas ambientales deberán priorizar la reducción de los principales precursores de los aerosoles secundarios (óxidos de azufre y de nitrógeno, amoníaco y compuestos orgánicos volátiles).

En cuanto a la distribución espacial, las concentraciones máximas se observaron en las estaciones ubicadas en la zona conurbada del Estado de México (ver la Figura 3.27), esto debido a la contribución de partículas originadas por el intenso tránsito vehicular, las actividades agrícolas en los alrededores, así como el polvo levantado por el viento proveniente de las zonas erosionadas que rodean a la región urbana y las derivadas de la actividad fabril de los grandes parques industriales de la región. En términos generales, las estaciones ubicadas al norte de la zona metropolitana registraron las mayores concentraciones de PM_{10} , $PM_{10-2.5}$ y $PM_{2.5}$, mientras que las localizadas al sur reportaron concentraciones menores. Xalostoc (XAL) reportó los promedios anuales máximos de PM_{10} , $PM_{10-2.5}$ y $PM_{2.5}$ con concentraciones de 66, 38 y 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En la Ciudad de México, la estación Merced (MER) reportó el máximo de los promedios anuales con valores de 52, 25 y 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En el caso de $PM_{2.5}$ los promedios anuales fueron relativamente homogéneos en el territorio de la Ciudad de México. Es importante resaltar que el mayor número de sitios para la medición de $PM_{2.5}$ se encuentran en la Ciudad de México, sin embargo, será necesario ampliar la cobertura en la zona conurbada del Estado de México.

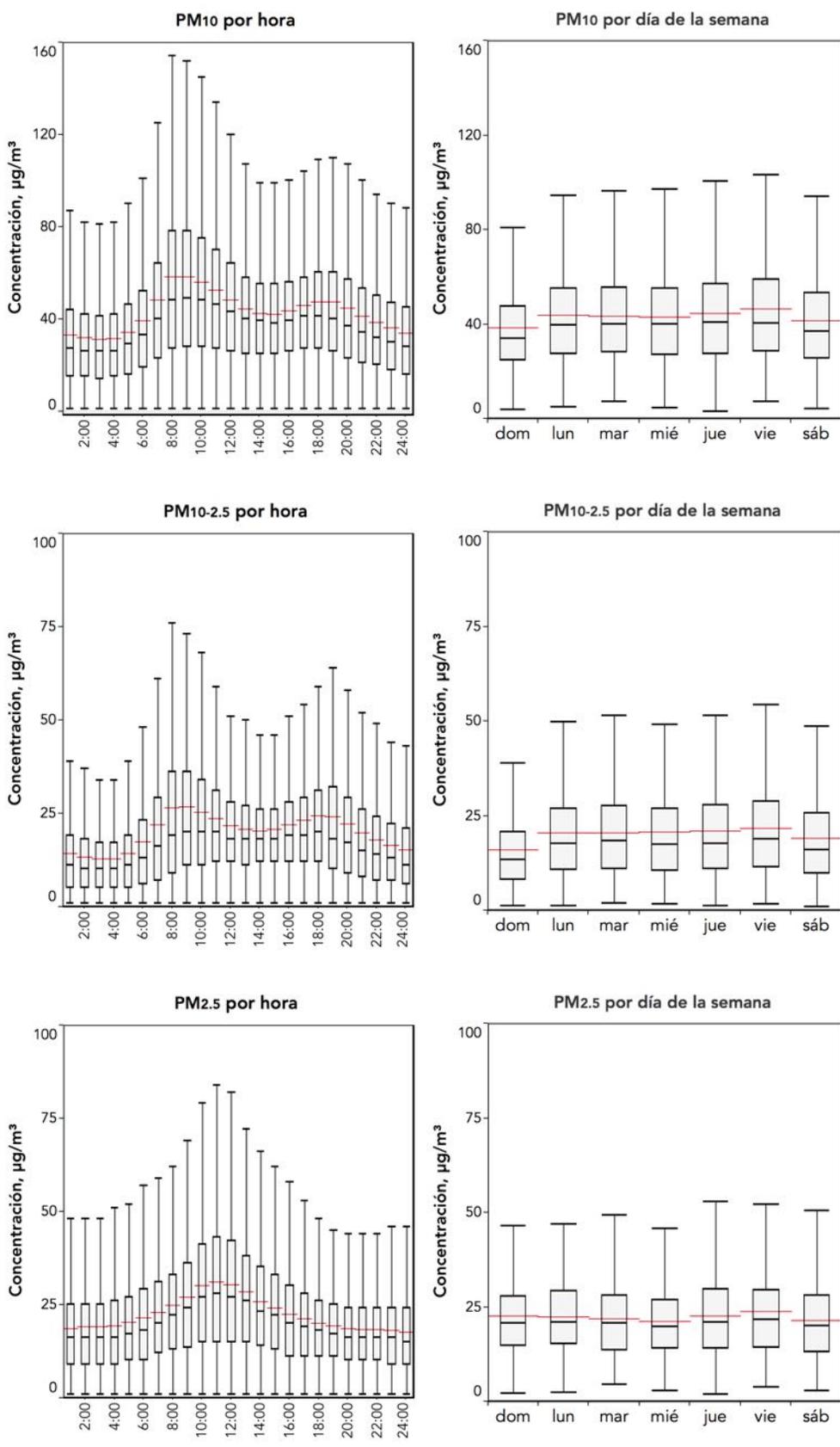
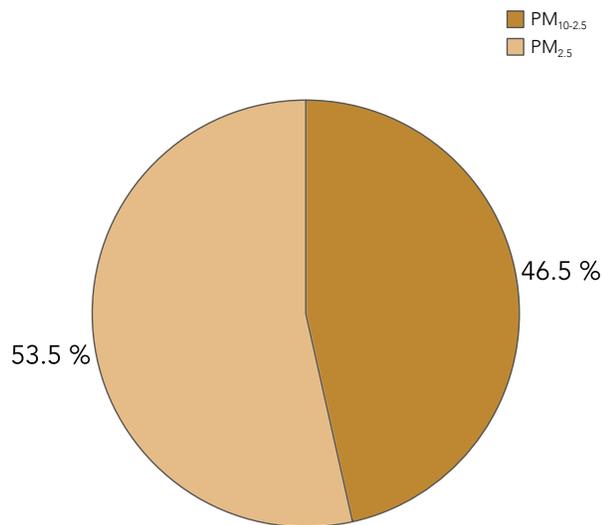


Figura 3.24. Distribución de los datos por hora (izquierda) y día de la semana (derecha) para PM₁₀ (a), PM_{10-2.5} (b), y PM_{2.5} (c). En las gráficas de caja y bigotes, la caja representa el rango intercuartil (Q1 y Q3), la línea en el interior de la caja corresponde a la mediana (Q2), los extremos de los bigotes indican 1.5 veces el rango intercuartil (RIQ). La línea roja corresponde a la media.

Porcentajes de las fracciones fina y gruesa en PM₁₀



Variación promedio de las fracciones fina y gruesa durante el día

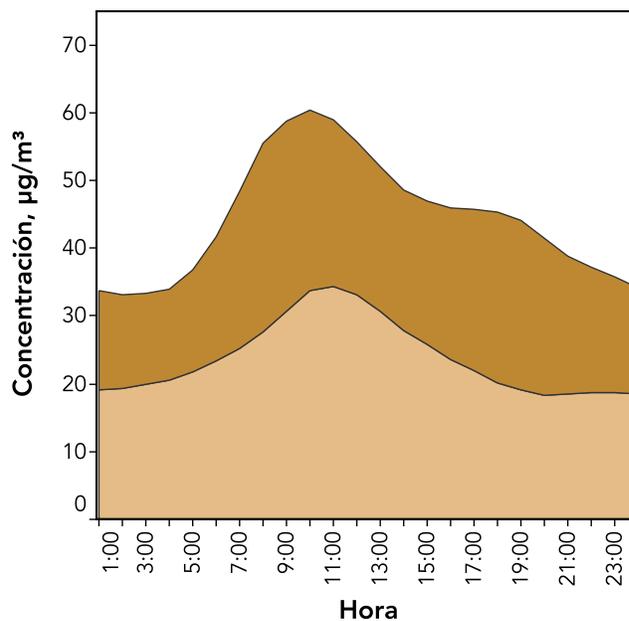


Figura 3.25. Contribuciones de las fracciones fina (PM_{2.5}) y gruesa (PM_{10-2.5}) a la concentración total de PM₁₀. A la izquierda se presentan las contribuciones promedio durante el año, a la derecha se muestra la variación horaria promedio. En la construcción de los gráficos solo se emplearon las estaciones con más del 75% de datos válidos durante el año.

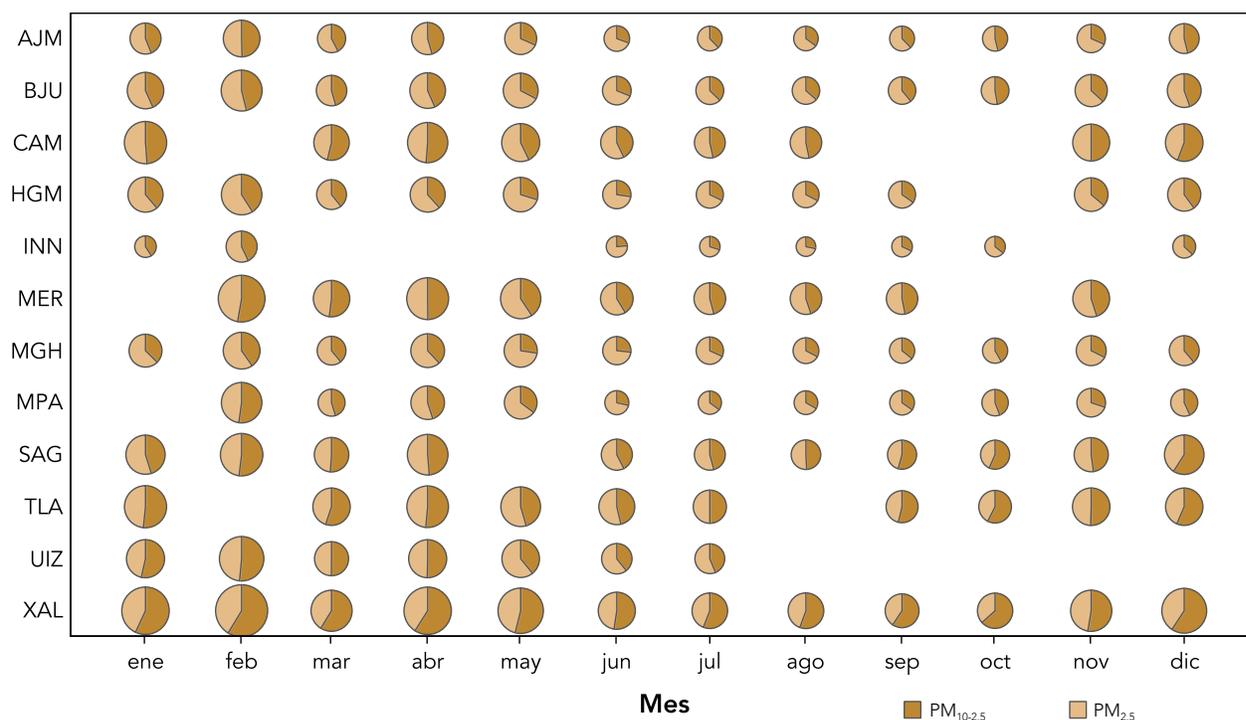
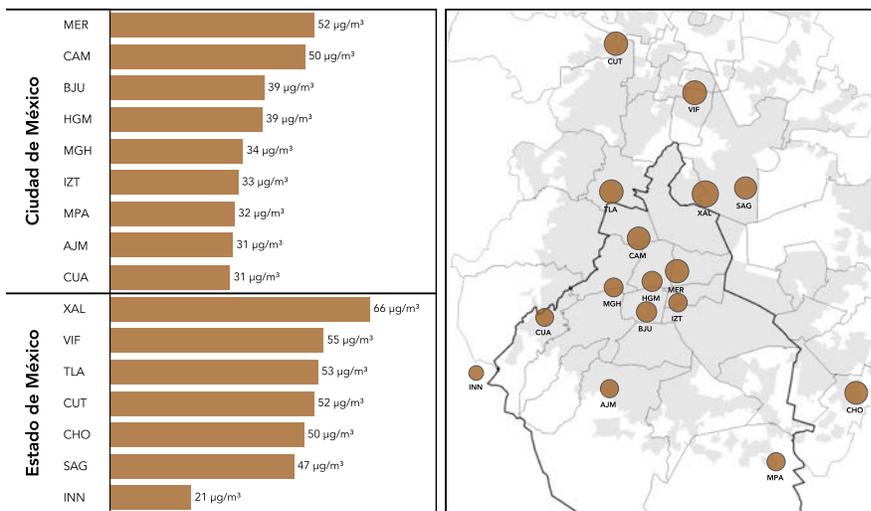
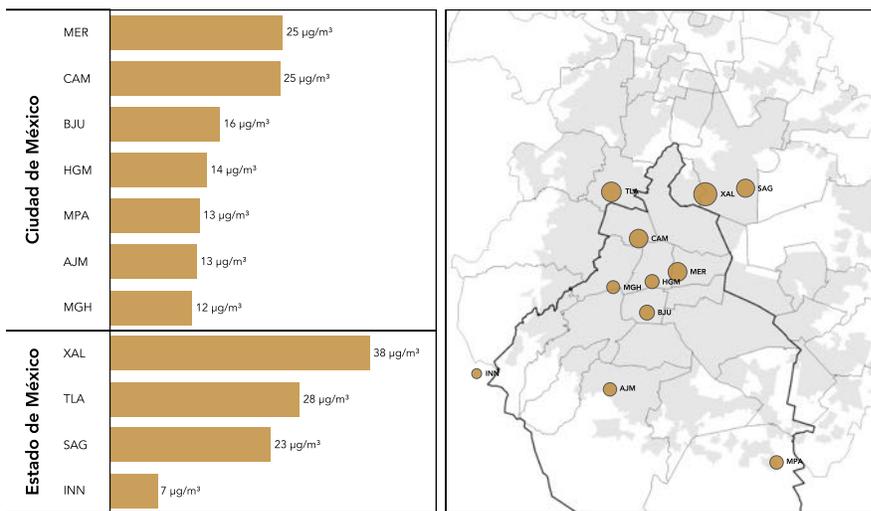


Figura 3.26. Contribución promedio mensual de las fracciones fina (PM_{2.5}) y gruesa (PM_{10-2.5}) a la concentración total de PM₁₀ por estación de monitoreo. Para la construcción de los gráficos se emplearon los datos de todas las estaciones con más del 75% de datos válidos durante el mes, los espacios en blanco indican ausencia de datos.

a) PM₁₀



b) PM_{10-2.5}



c) PM_{2.5}

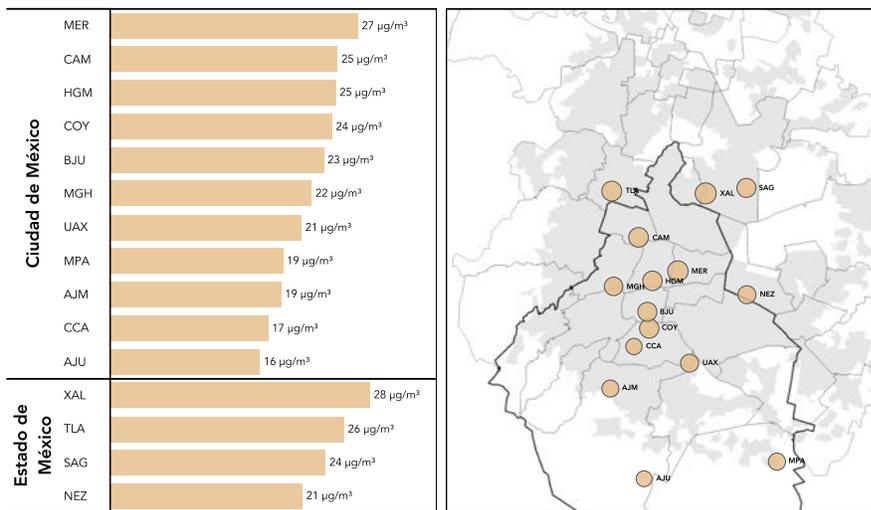


Figura 3.27. Promedio anual por estación de monitoreo para PM₁₀ (a), PM_{10-2.5} (b), y PM_{2.5} (c). En la figura de la izquierda se indican los promedios por estación de monitoreo, separados por entidad. En el mapa de la derecha se muestra la ubicación de la estación, el tamaño del círculo es proporcional al promedio anual.

Índice de calidad del aire

El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) se utiliza para comunicar a la población el estado de la calidad del aire cada hora, de una manera sencilla evitando las complicaciones asociadas a la interpretación de las diferentes unidades de medición y los distintos intervalos de tiempo requeridos por la norma. El índice evalúa el estado de la calidad del aire a partir de la información obtenida para los diferentes contaminantes medidos, empleando el contaminante que registra la concentración máxima para cada hora en función de las recomendaciones de las normas de calidad del aire. La concentración se normaliza a una escala que va de 0 para un aire libre de contaminación, a 500 que corresponde a una situación de emergencia ambiental. Generalmente las normas utilizan dos indicadores, uno para la exposición crónica y otro para la exposición aguda. Al indicador de exposición crónica se le asigna el valor de 50, mientras que al indicador de exposición aguda se le asigna el valor de 100. Por ejemplo, la norma para PM_{10} fija un valor de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio de 24 horas, que es el

indicador de exposición aguda, y una concentración de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio anual que corresponde al indicador de exposición crónica; entonces, el índice asigna un valor de 100 a la concentración de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de 50 a la concentración de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El índice es adimensional pero es común referirse a sus unidades como "puntos" o "puntos IMECA". La escala se organiza en categorías, a cada una de ellas se asigna un color para su identificación visual (Tabla 3.1). En el cálculo se utilizan los intervalos de tiempo requeridos por la NOM para el indicador de exposición aguda, es por eso que para ozono se emplean promedios horarios, mientras que para partículas suspendidas se emplean promedios móviles de 24 horas. Es importante mencionar que cuando una estación registra una condición MALA, esto no implica que ésta situación ocurre en toda la zona metropolitana o durante todo el día. El reportar los máximos tiene un valor precautorio, porque en caso de que se presente una situación de riesgo en alguna zona de la ciudad, toda la población es alertada.

Tabla 3.28. Categorías del Índice Metropolitano de Calidad del Aire.

Categoría	Intervalo	Mensaje	Significado	Recomendaciones
BUENA	0-50	Sin riesgo	La calidad del aire es satisfactoria y existe poco o ningún riesgo para la salud.	Se puede realizar cualquier actividad al aire libre.
REGULAR	51-100	Aceptable	La calidad del aire es aceptable, sin embargo, en el caso de algunos contaminantes, las personas que son inusualmente sensibles, pueden presentar síntomas moderados.	Las personas que son extremadamente sensibles a la contaminación deben considerar limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
MALA	101-150	Dañina a la salud de los grupos sensibles	Quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud. El público en general usualmente no es afectado.	Los niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
MUY MALA	151-200	Dañina a la salud	Todos pueden experimentar efectos en la salud; quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos graves en la salud.	Los niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben evitar el esfuerzo prolongado al aire libre. La población en general debe limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.
EXTREMADAMENTE MALA	>200	Muy dañina a la salud	Representa una condición de emergencia. Toda la población tiene probabilidades de ser afectada.	La población en general debe suspender los esfuerzos al aire libre.

La Figura 3.28 muestra un resumen de la situación de la calidad del aire en la Ciudad de México y su área metropolitana en términos del índice de calidad del aire. En 282 días (77 %) se registró al menos una hora en que la concentración de cualquier contaminante superó los 100 puntos en por lo menos una estación de monitoreo, de estos, 262 días reportaron una calidad del aire MALA, 19 días calidad MUY MALA y 1 día calidad del aire EXTREMADAMENTE MALA. Solo 4 días registraron una calidad del aire BUENA. El único día con calidad EXTREMADAMENTE MALA se presentó el 14 de marzo, cuando el ozono alcanzó una concentración de 210 ppb.

De los contaminantes criterio reportados en 2016 solo ozono, PM_{10} y $PM_{2.5}$ superaron los 100 puntos del índice. El ozono fue el contaminante responsable del mayor número de días con una calidad del aire desfavorable, con índices mayores a 100 puntos en 212 días (ver Figura 3.29). En el caso de PM_{10} y $PM_{2.5}$ las concentraciones superaron los 100 puntos en 189 y 78 días, respectivamente. En 147 días los niveles de más de un contaminante superaron los 100 puntos, de los cuales en 50 días los tres contaminantes superaron los 100 puntos (ozono, PM_{10} y $PM_{2.5}$). Vale la pena mencionar que en aquellos días en los que se observan concentraciones elevadas de más de un contaminante aumenta el riesgo para la salud.

En la Figura 3.30 se muestra la distribución de los máximos diarios por categoría para los índices de ozono, PM_{10} y $PM_{2.5}$. En ella se observa que la mayoría de los días con MALA calidad del aire por ozono se presentaron entre febrero y octubre, con los mayores niveles durante la temporada de ozono (Figura 3.30a). En el caso de PM_{10} el mayor número de días con MALA calidad del aire se presentó durante de la temporada seca, con una disminución significativa en los meses de lluvia. En el caso de $PM_{2.5}$ se mantuvo una calidad del aire REGULAR durante la mayor parte del año, la mayoría de los días con una MALA calidad se presentaron entre enero y mayo, esto por la naturaleza secundaria del contaminante.

Tanto para PM_{10} como $PM_{2.5}$ la lluvia tuvo un efecto favorable en la calidad del aire, la humedad del suelo evita la resuspensión del polvo, mientras que la humedad del aire contribuyó a la remoción de las partículas a través de procesos de deposición húmeda.

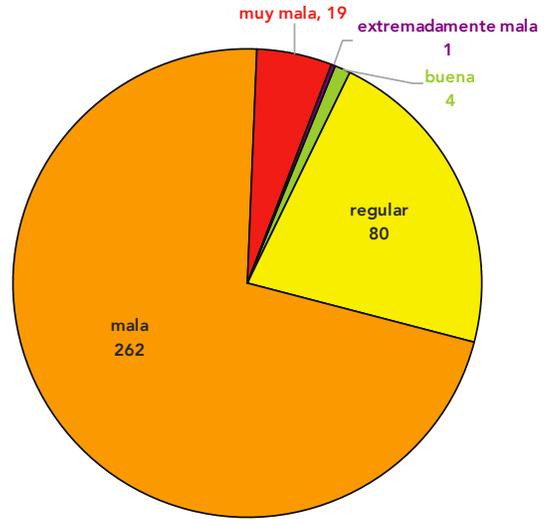


Figura 3.28. Número de días por categoría de calidad del aire. El gráfico incluye a todos los contaminantes del aire y todas las estaciones ubicadas en la zona metropolitana de la Ciudad de México

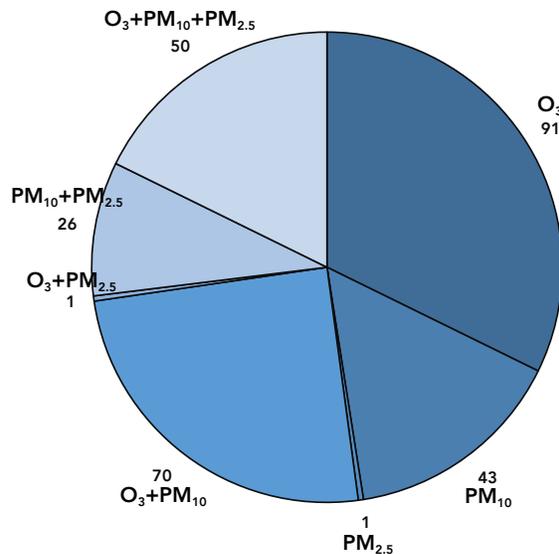
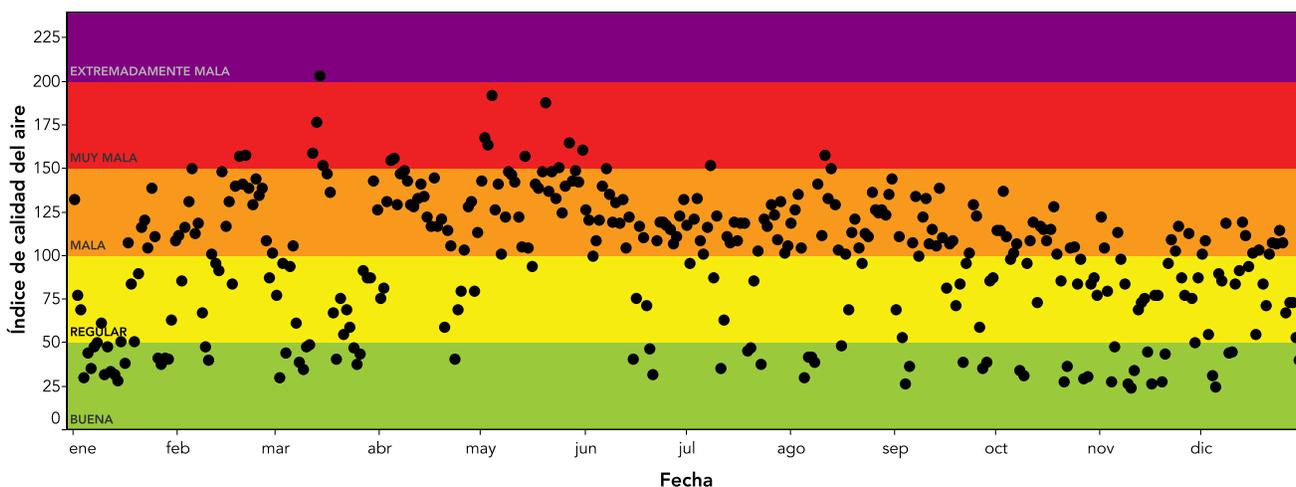
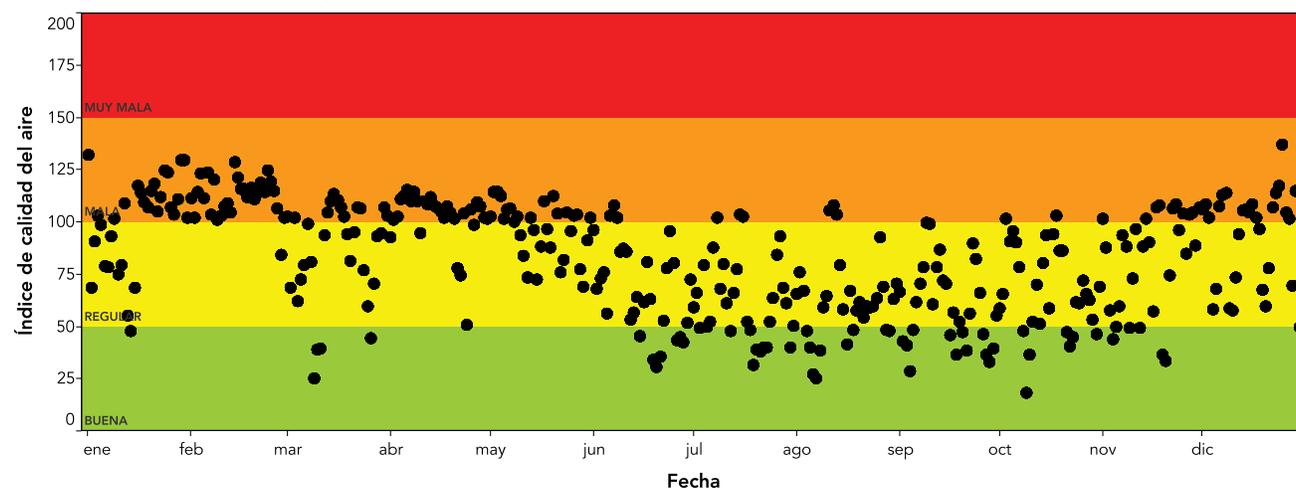


Figura 3.29. Número de días con MALA calidad del aire por contaminante. Durante un porcentaje importante de días del año se presentaron valores mayores a la NOM para más de un contaminante.

a) Índice de calidad del aire para ozono



b) Índice de calidad del aire para PM₁₀



c) Índice de calidad del aire para PM_{2.5}

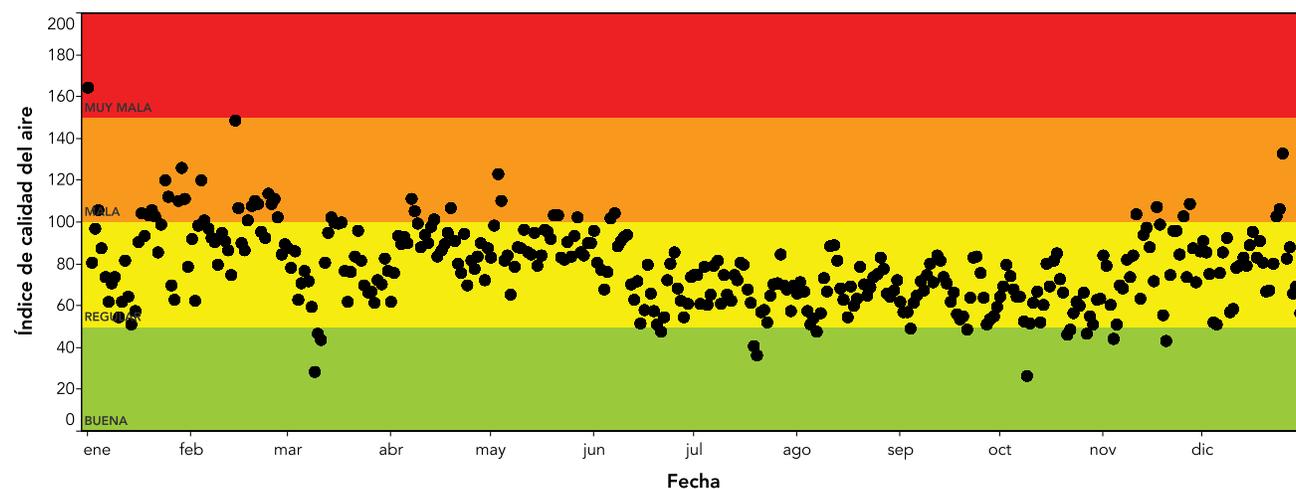


Figura 3.30. Índice de la calidad del aire en la Ciudad de México y su área metropolitana para ozono (a), PM₁₀ (b) y PM_{2.5} (c). Los gráficos muestran los valores máximos del índice para cada día, los colores del fondo corresponden a las diferentes categorías de calidad del aire del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

Tendencias

Con respecto al año previo se observaron reducciones moderadas en los promedios anuales de monóxido de carbono (-13%), óxidos de nitrógeno (-6%), $PM_{2.5}$ (-3.5%), dióxido de nitrógeno (-3%), dióxido de azufre (-1%) y partículas suspendidas totales (-1%). En ozono y PM_{10} se registraron incrementos de 7.5 y 3%, respectivamente; el promedio anual de las concentraciones diurnas se incrementó en 4.3% con respecto a 2015. La reducción en la concentración de los contaminantes primarios sugiere que las políticas vigentes mantienen aún un impacto favorable en el control de emisiones a pesar del crecimiento de la ciudad y su área conurbada. En la Figura 3.31 se comparan los porcentajes de reducción de los promedios anuales con respecto a 1990 (que fue el año a partir del cual inició la gestión de la calidad del aire en la zona metropolitana), valores negativos indican valores por debajo del promedio de 1990; entre menor sea el porcentaje, mayor será la reducción, una tendencia decreciente en el porcentaje indica una disminución continua en el promedio anual del contaminante. Con excepción del ozono, dióxido de azufre y PM_{10} el resto de los contaminantes continuaron descendiendo en 2016.

A pesar del aumento progresivo en el parque vehicular, la mejora en la tecnología de combustión en los motores y control de emisiones en los vehículos y el estricto control de emisiones mediante el Programa de Verificación Vehicular, han contribuido a mantener la tendencia descendente en monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. El uso de combustibles con bajo contenido de azufre ha sido el factor más importante para mantener la tendencia decreciente en las concentraciones de dióxido de azufre, sin embargo, la concentración de este contaminante está sujeta a la calidad de los combustibles empleados en la región industrial de Tula-Tepeji. Por otra parte, en el caso del ozono será necesario realizar un análisis detallado para determinar las posibles causas del aumento en la concentración, ya que después de varios años de relativa estabilidad, a partir de 2015 se observó un incremento incipiente. Aún cuando este cambio en el patrón de comportamiento podría no ser significativo y responder a

cambios en la meteorología regional o global (e. g. El Niño) o cambios en la química atmosférica, será importante evaluar su impacto en la gestión. Resulta interesante observar que los niveles de ozono aumentaron a pesar de que se mantiene una tendencia descendente en las concentraciones de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono (usualmente utilizado como indicador de orgánicos de las fuentes móviles). Se sabe que en el régimen de producción de ozono sensible a compuestos orgánicos volátiles (COV) de la Ciudad de México, una disminución moderada en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), podría provocar un aumento en la producción de ozono. Evaluaciones previas han demostrado que se requiere una reducción mayor al 50% en las emisiones de NO_x para lograr disminuciones significativas en ozono, mientras que cualquier reducción en COV tendría un efecto inmediato en la reducción de ozono. Diversos estudios han demostrado que las políticas para el control de ozono deben priorizar el control de COV más que de NO_x , de otra manera, a pesar de los esfuerzos para reducir las emisiones de los precursores el impacto en la formación de ozono podría ser insignificante o incluso inducir un incremento.

En el caso de las partículas, las políticas de gestión de las últimas décadas priorizaron el control de las emisiones primarias, ya que en el siglo pasado tenían una mayor contribución a la masa de las partículas en suspensión. Sin embargo, los hallazgos de las grandes campañas de 2003, 2006 y los resultados del monitoreo del SIMAT, indicaron que los aerosoles de origen secundario tienen el mayor aporte a la masa de las partículas, principalmente en las fracciones más pequeñas. En este sentido, las acciones del PROAIRE 2011-2020, que priorizan el control de las fuentes primarias, tendrán un impacto mínimo en los niveles actuales de las partículas suspendidas (como lo demuestran las tendencias de los últimos años). Sin descuidar el control de las emisiones primarias, el reto para la siguiente generación de políticas ambientales será el estudio de los procesos responsables de la formación de aerosoles secundarios, así como la identificación y control de sus principales precursores.

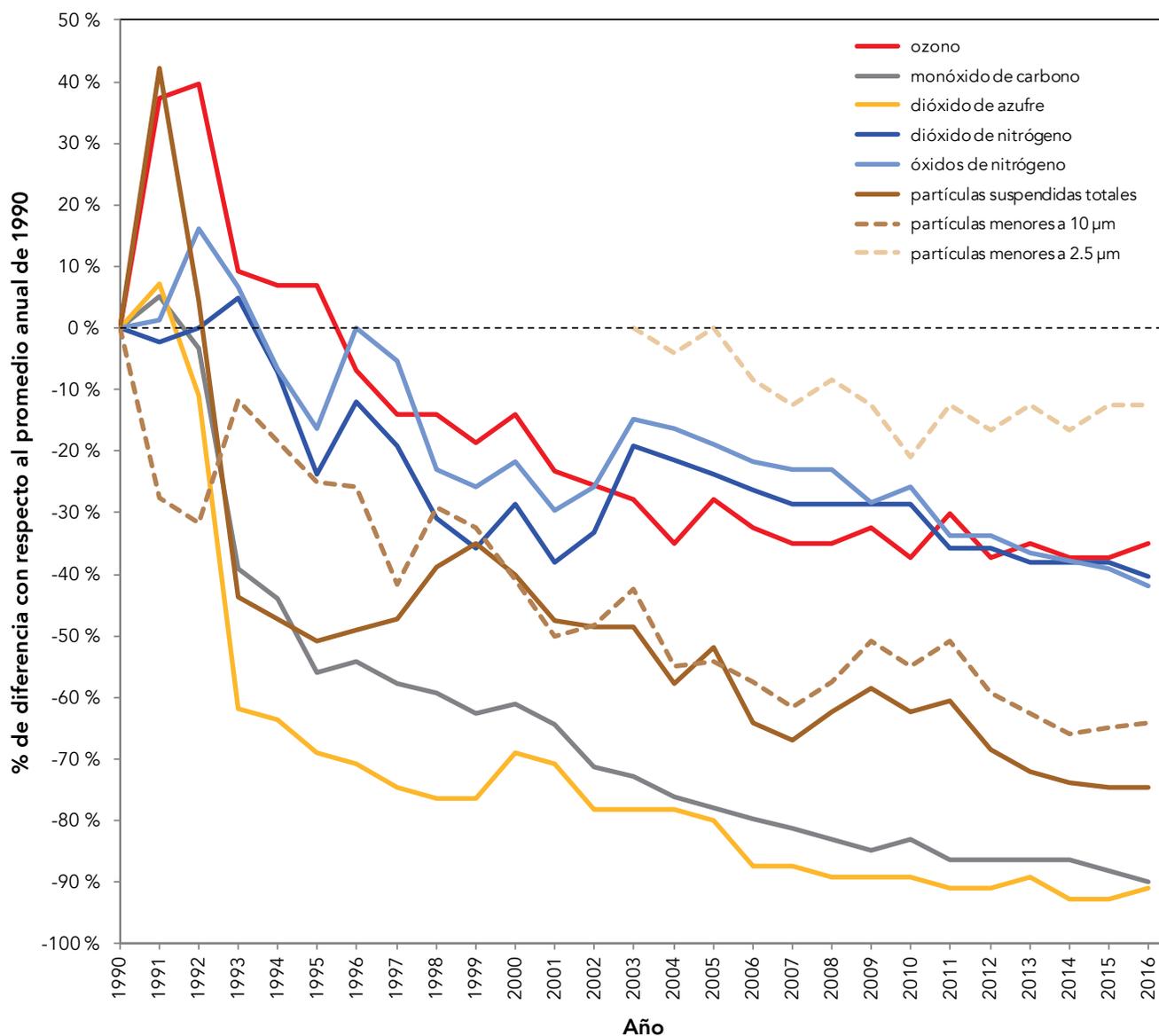


Figura 3.31. Porcentaje de diferencia del promedio anual con respecto al promedio anual del año 1990 para cada uno de los principales contaminantes del aire. En el caso de $\text{PM}_{2.5}$ se utiliza como referencia el promedio anual de 2004. Para los últimos años se excluyeron las estaciones que se integraron entre 2015 y 2016.

En las Figuras 3.32 a 3.40 se presentan las series de tiempo históricas con los promedios mensuales de cada uno de los contaminantes para el periodo comprendido entre enero de 1990 y diciembre de 2016. En cada gráfico se indica la concentración promedio mensual y su desviación estándar, así como la línea de tendencia (obtenida por el método de LOESS), esta última es útil para identificar cambios en las concentraciones de los contaminantes atribuidos a variaciones distintas a la estacional. El promedio mensual y la desviación estándar se estimaron a partir de las concentra-

ciones horarias de todas las estaciones de monitoreo con datos válidos. En el caso de ozono se presentan dos gráficos: la Figura 3.36 muestra el promedio mensual del contaminante, mientras que la Figura 3.37 presenta únicamente las concentraciones máximas diarias. En ambos casos la distribución y la tendencia son parecidos. Como se comentó previamente, en el caso de ozono se observó un cambio en la tendencia el cual es evidente a partir de 2015, esto sucede a pesar de que no se observaron incrementos significativos en las tendencias de otros contaminantes.

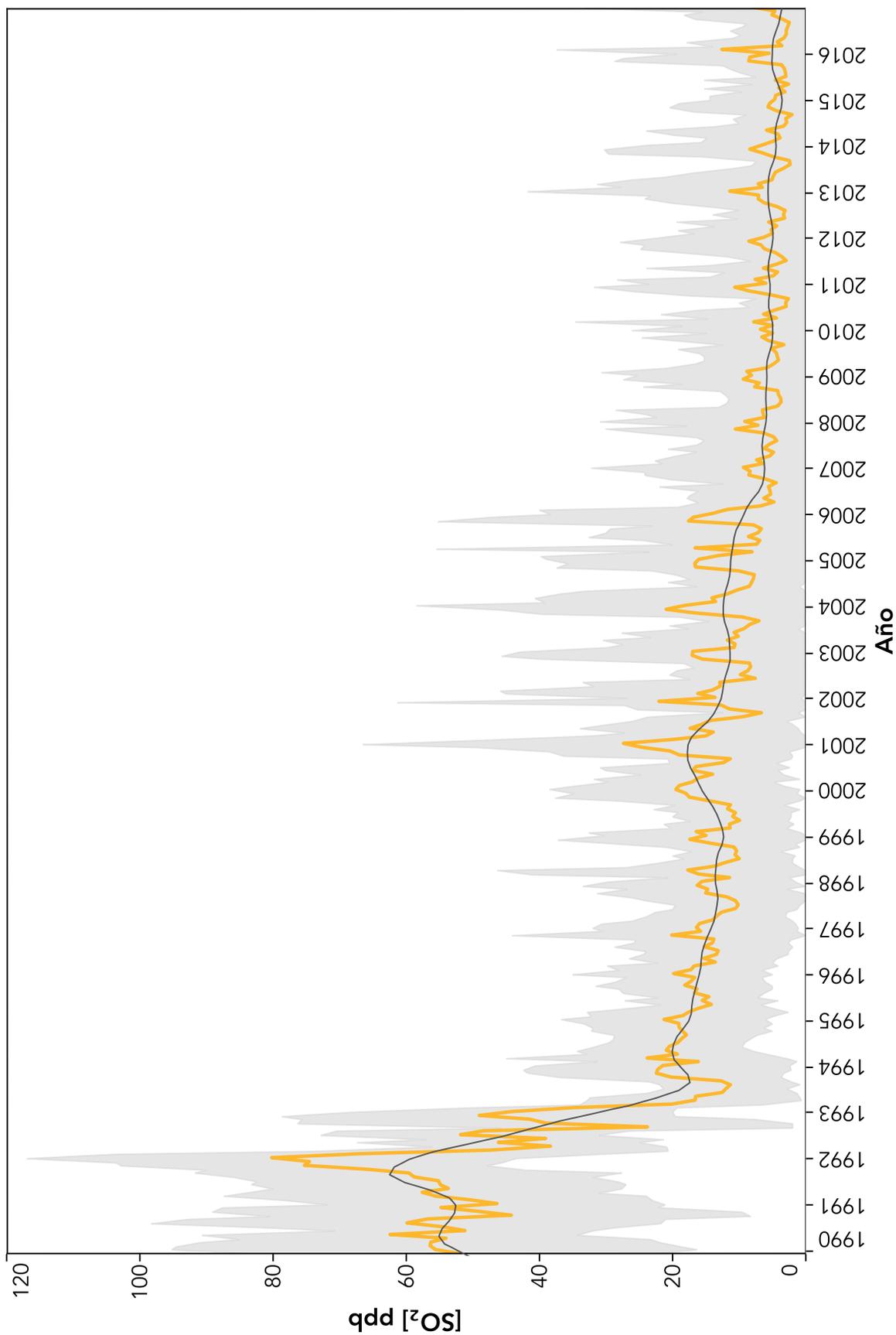


Figura 3.32. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de dióxido de azufre para el periodo de enero de 1986 a diciembre de 2016. La línea amarilla corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

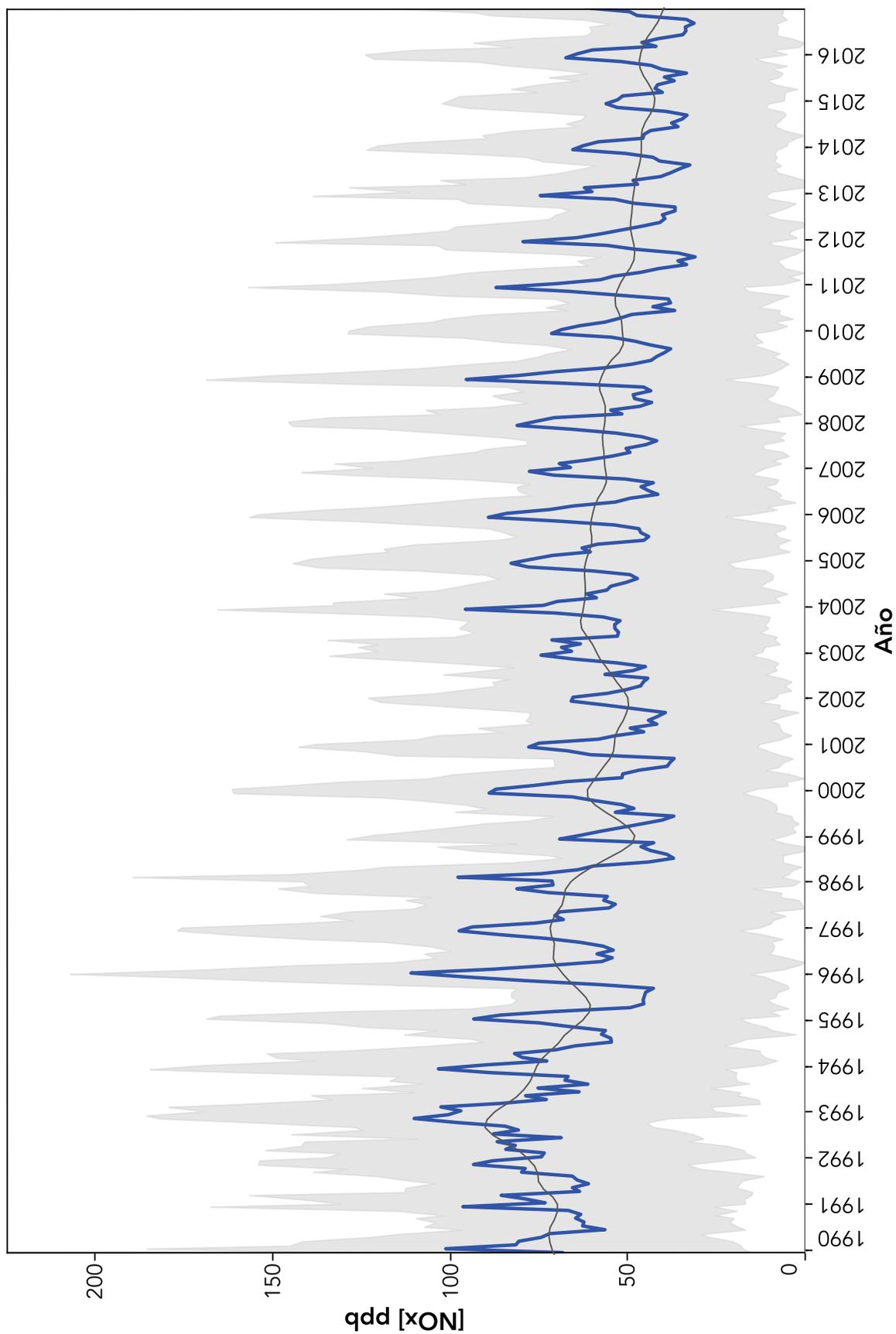


Figura 3.33. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de óxidos de nitrógeno para el periodo de enero de 1986 a diciembre de 2016. La línea azul corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

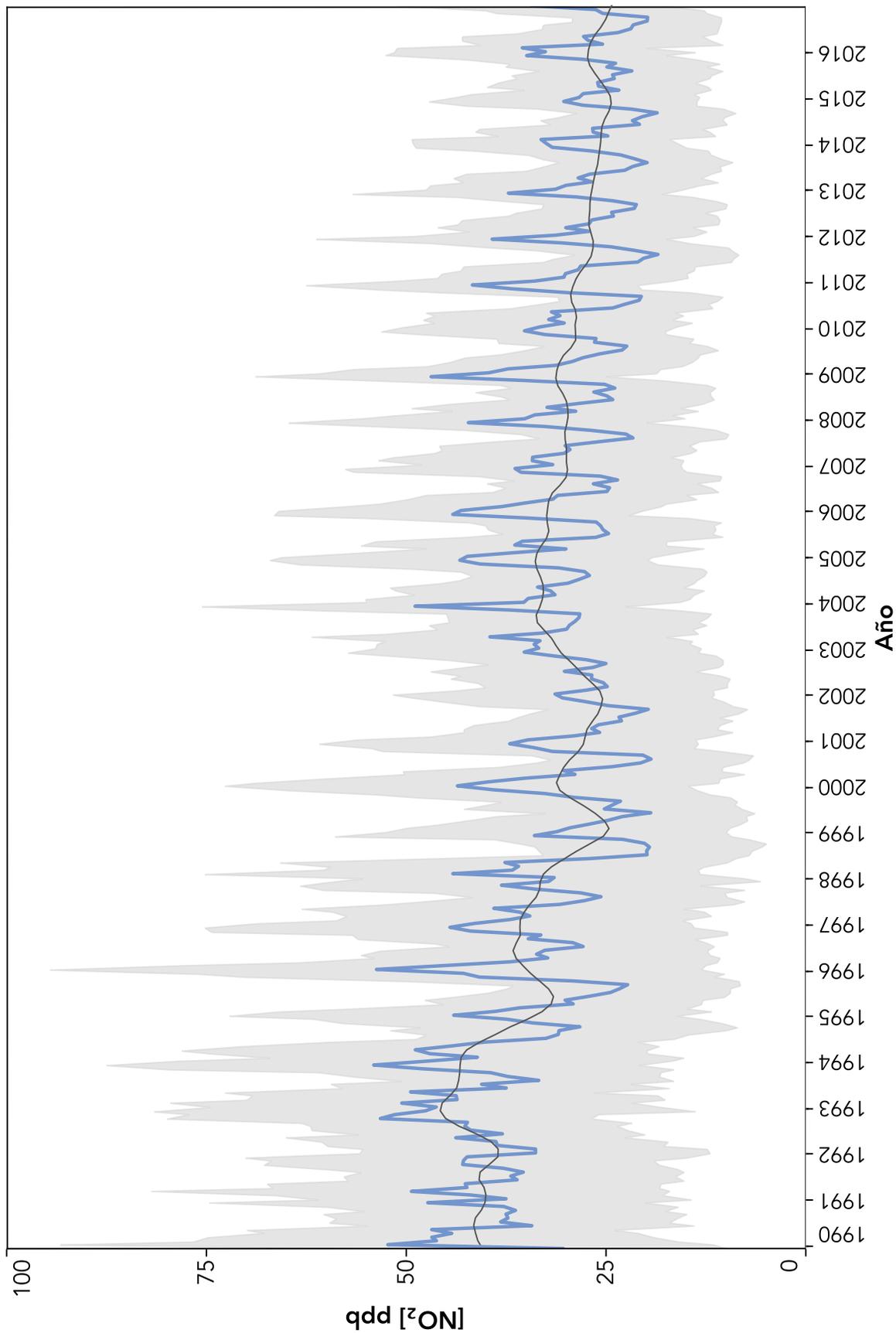


Figura 3.34. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de dióxido de nitrógeno para el periodo de enero de 1987 a diciembre de 2016. La línea azul corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

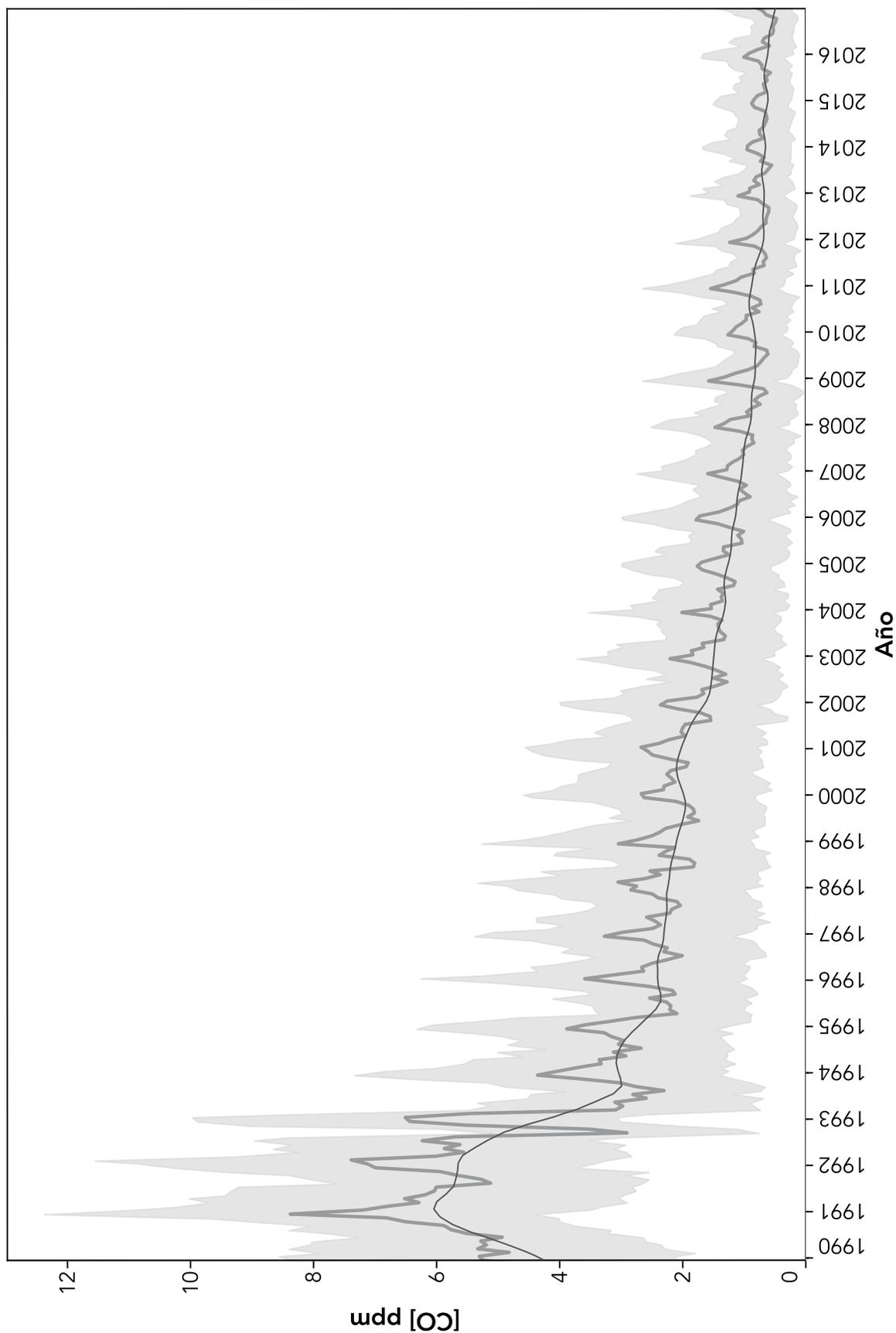


Figura 3.35. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de monóxido de carbono para el periodo de enero de 1986 a diciembre de 2016. La línea de color oscuro corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris claro indica la desviación estándar.

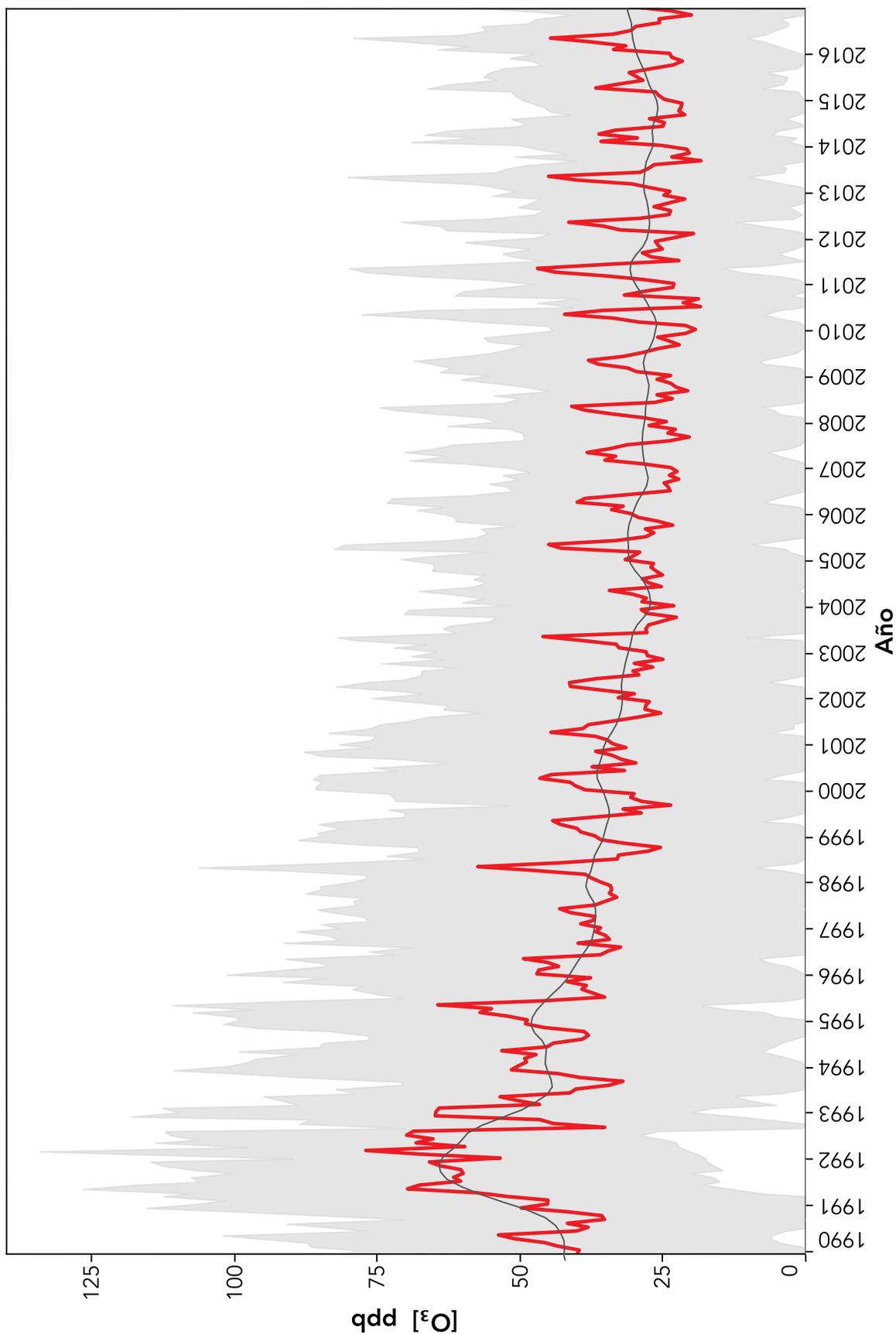


Figura 3.36. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de ozono para el periodo de enero de 1986 a diciembre de 2016. La línea roja corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar

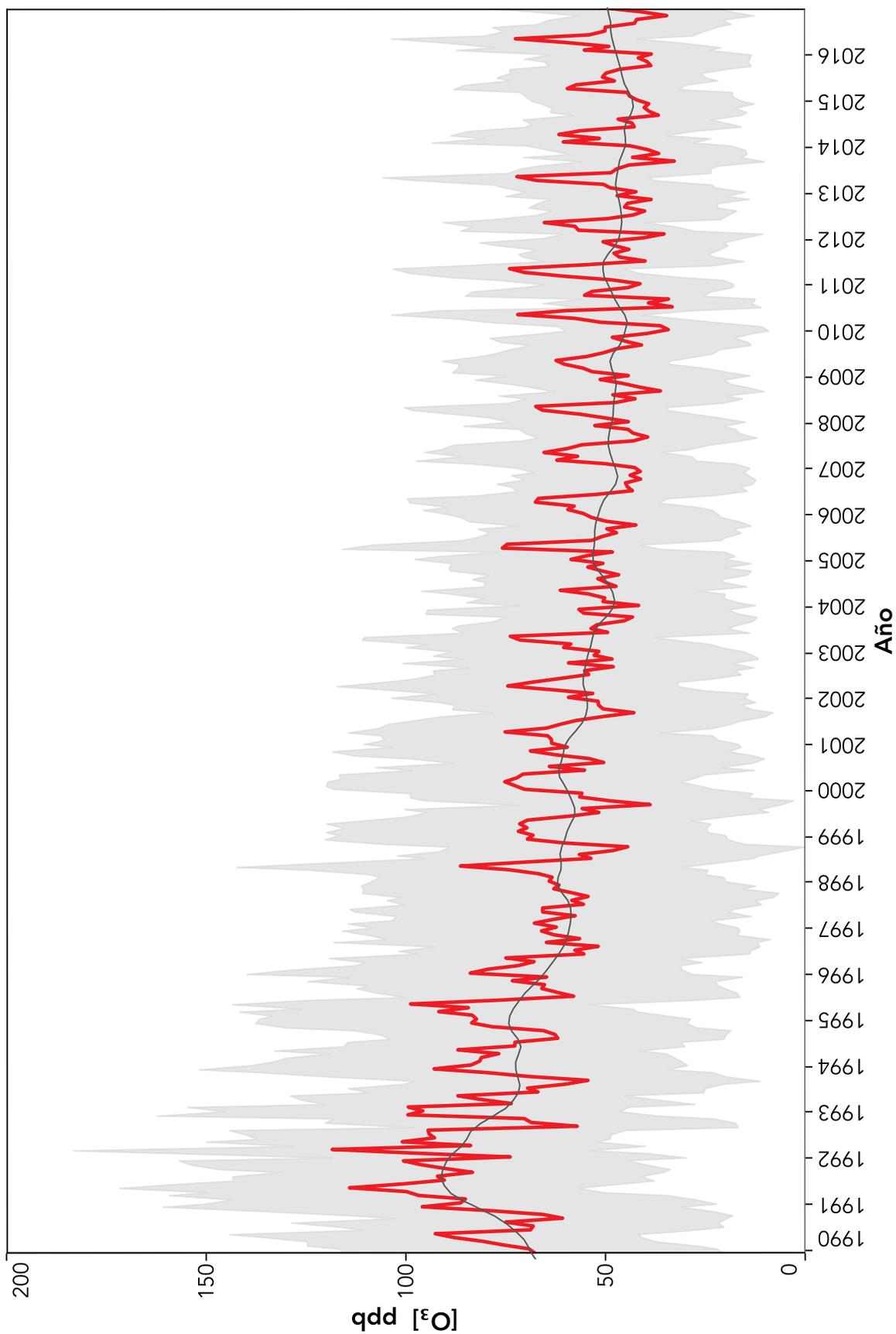


Figura 3.37. Serie de tiempo de las concentraciones máximas diarias de ozono para el periodo de enero de 1989 a diciembre de 2016. La línea roja corresponde al promedio mensual de los valores máximo, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

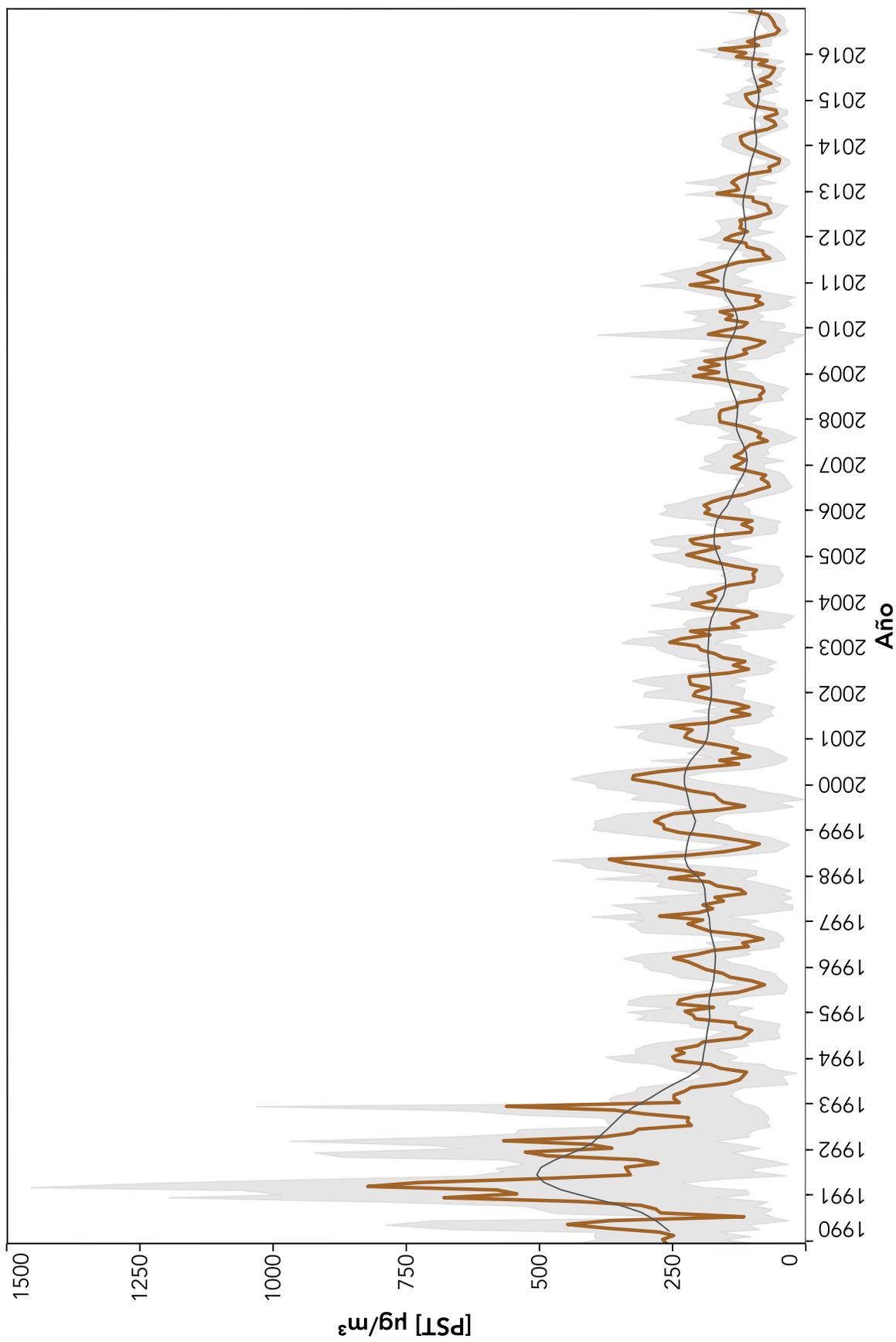


Figura 3.38. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de partículas suspendidas totales para el periodo de enero de 1989 a diciembre de 2016. La línea café corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

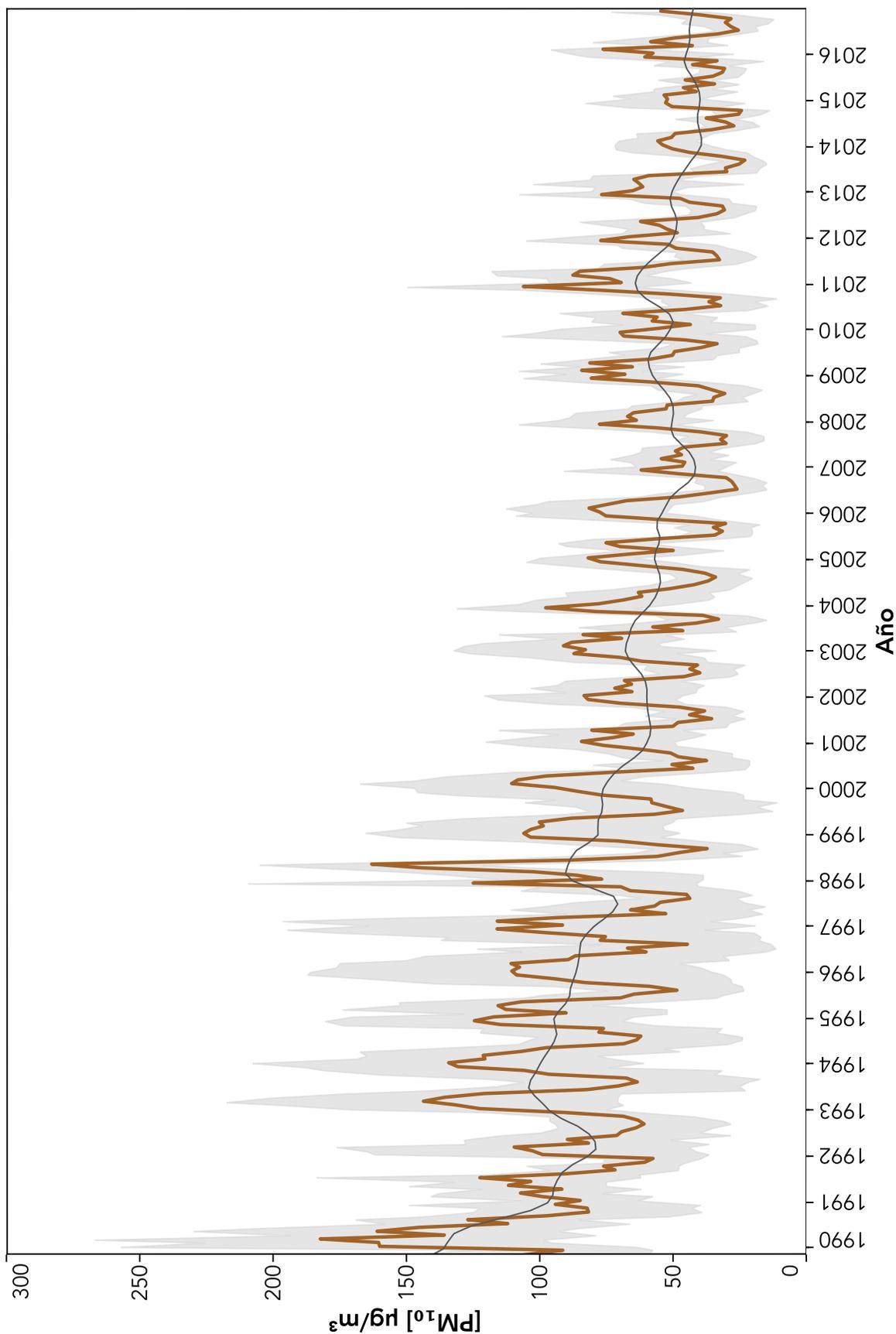


Figura 3.39. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de partículas suspendidas menores a 10 µm para el periodo de enero de 1989 a diciembre de 2016. La línea café corresponde al promedio mensual la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

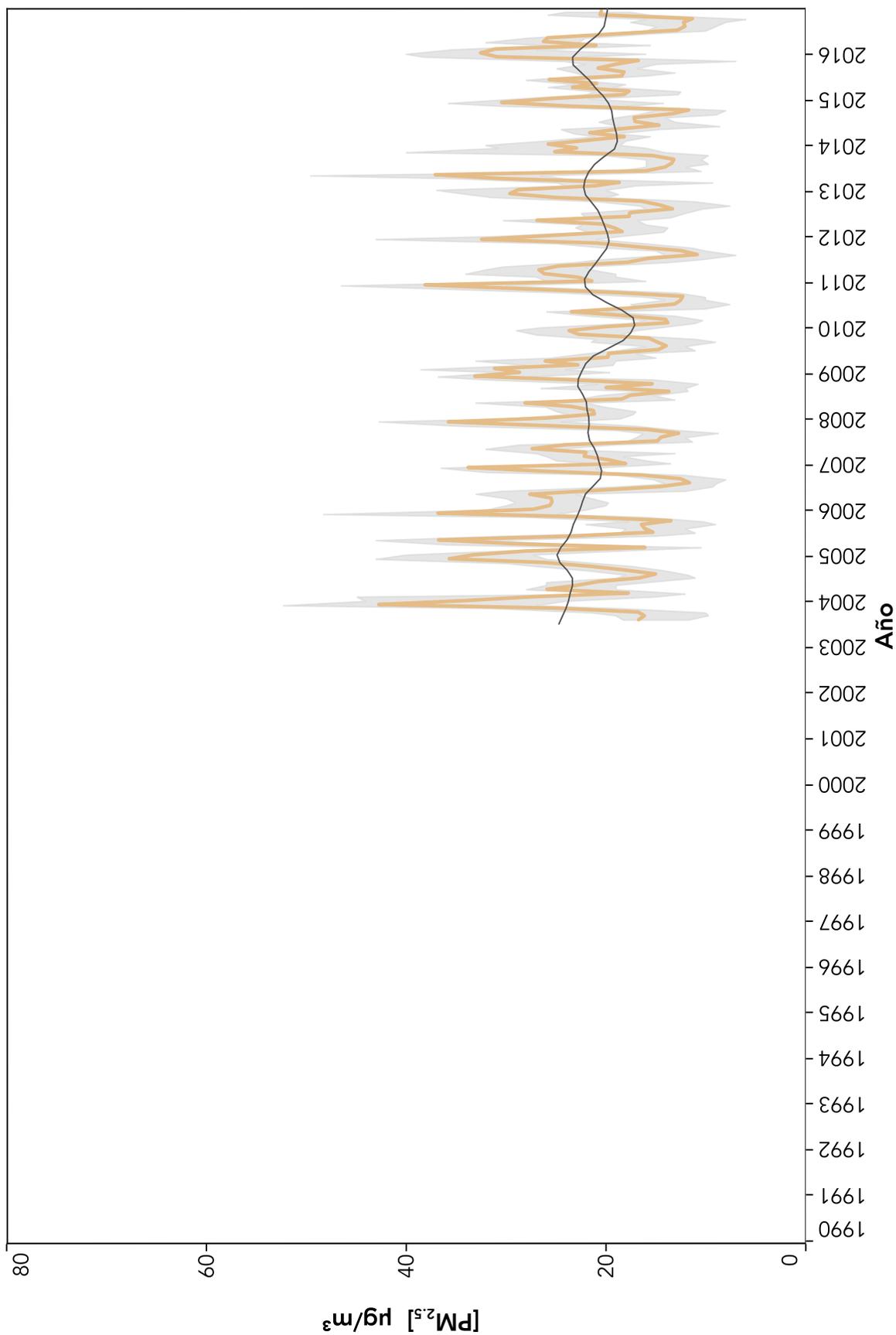


Figura 3.40. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de partículas suspendidas menores a $2.5 \mu m$ para el periodo de agosto de 2004 a diciembre de 2015. La línea café corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

Esta página se dejó intencionalmente en blanco



Vista en un día contaminado desde la Unidad Habitacional de Tlatelolco, Ciudad de México

4. Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas

El año 2016 se caracterizó por un aumento en el número de días en los que se activó el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA). En total la CAME activó en 14 ocasiones el programa por el incremento en la concentración de ozono: cuatro para la Fase de Precontingencia y diez para la Fase I de Contingencia. De manera comparativa, en 2015 el PCAA se activó en siete ocasiones en la Fase de Precontingencia, una por PM_{10} y el resto por ozono. En abril de 2016 la CAME modificó el PCAA eliminando la Fase de Precontingencia y reduciendo el umbral de activación de 180 (184 ppb) a 150 puntos (154 ppb). Desde entonces la Fase I de Contingencia se activa cuando la concentración del promedio horario de ozono supera los 150 puntos (>154 ppb), es decir, los episodios que hasta antes del 6 de abril eran considerados como una Precontingencia, a partir del 6 de abril se consideraron como eventos de Fase I de Contingencia. Las razones que motivaron este cambio se comentarán con detalle posteriormente.

Como se anticipó en el informe anual 2015, en 2016 se experimentó una temporada de ozono inusual. Fenómenos meteorológicos como El Niño, la presencia de la corriente de chorro subtropical y la ocurrencia de episodios extremos de estabilidad atmosférica, tuvieron un impacto importante en el comportamiento del ozono. La presencia de El Niño durante el primer semestre de 2016 modificó los patrones regulares del clima en el país. Sin bien, no se conoce aún con certeza su posible impacto en la calidad del aire, la evidencia científica ha demostrado que el aumento en la temperatura, los cambios en el régimen pluvial y un aumento en la frecuencia de incendios, pudieron tener efectos importantes en los niveles de ozono y los aerosoles (WMO/IAGC, 2012). Además, durante el primer semestre de 2016 estuvo vigente la versión del Programa Hoy No Circula que eliminaba la restricción por edad vehicular. La suma de las contribuciones de estos efectos pudieron tener un impacto en las concentraciones de ozono, lo que se manifestó como un incremento en 2016 con respecto a los años más recientes, pero en términos estadísticos los niveles del contaminante aún se mantienen por debajo a los registrados antes de 2010. Sin embargo, el hecho de que se observe un incipiente incremento en la concentración de ozono ha alertado a la SEDEMA

para revisar el programa de gestión de calidad del aire en el contexto de los cambios en la meteorología regional y la expansión urbana.

En 2016, la concentración horaria de ozono superó el valor de 154 ppb (que equivale a 150 puntos en el índice) en 18 días. En la gráfica 4.1 se indica el número de días en los que la concentración máxima de ozono superó los 150 puntos desde 1990. Comparativamente en los últimos diez años el mayor número de días se registró en 2007 con 34 días. La activación de la Fase I de Contingencia por ozono el 14 de marzo, provocó alerta entre la población, los medios de comunicación y algunas autoridades ambientales, ya que si bien la concentración registrada ese día era similar a las registradas en el 2010, desde el 18 de septiembre de 2002 (cuando el ozono alcanzó un valor máximo de 284 ppb) no se había activado esta fase. Este incremento de ozono ocurrió como consecuencia de una condición severa de estabilidad atmosférica provocada por la presencia de sistemas anticiclónicos en las capas media y baja de la troposfera entre el 12 y el 18 de marzo.

La tarde del 14 de marzo la concentración horaria de ozono alcanzó un valor máximo de 210 ppb superando así el umbral de activación de la Fase I de 184 ppb (180 puntos). Si bien, esta no fue la mayor concentración registrada desde 2006 (el 6 de mayo de 2006 fue de 211 ppb) la activación de la Fase I requirió de las autoridades ambientales la aplicación inmediata de las acciones descritas dentro del PCAA. Sin embargo, debido al estancamiento de las masas de aire mantenía una fracción importante de los contaminantes generados en los días previos, estos esfuerzos no tuvieron el impacto esperado. Por otra parte, el gobierno federal, a través de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en su calidad de miembro de la CAME, propuso instrumentar *acciones de emergencia*. Un ejemplo de estas acciones fue el Programa Temporal "Hoy No Circula" (PTHNC), que estuvo vigente a partir del 5 de abril y hasta el 30 de junio, el cual aplicó la restricción de la circulación vehicular un día a la semana y un sábado al mes para todos los vehículos, sin importar el holograma de verificación (CAME, 2016). Debido a que la meteorología fue determinante en este y en episodios posteriores, estas acciones tuvieron un impacto menor para mejorar la calidad del aire.

Otra de las medidas de emergencia fue la actualización del PCAA, publicada el 6 de abril de 2016 en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México y en el Periódico Oficial del Gobierno del Estado de México. Esta revisión eliminó la Fase de Precontingencia y redujo los umbrales de activación de las Fases de Contingencia pasando de 180 a 150, para la Fase I, y de 250 a 200 puntos para la Fase II. La apuesta de la Coordinación Ejecutiva de la CAME era que al establecer límites más estrictos en el PCAA se incrementaría la protección de la salud y reducirían los niveles de contaminación. Sin embargo, la carencia de un plan estratégico en de corto plazo para la reducción de las emisiones de las principales fuentes limitaría su alcance.

Es importante mencionar que la formación del ozono es un proceso complejo que depende de múltiples factores como: la concentración y composición de los precursores, la capacidad oxidativa de la atmósfera, la hora del día y las condiciones meteorológicas, entre otros. Esta complejidad dificulta el diseño de medidas de control efectivas en ciudades con problemas de contaminación fotoquímica. Si bien, el PTHNC y los cambios al PCAA tenían el propósito de reducir las

emisiones de los automóviles (que son una de las principales fuentes de precursores), esto no garantizaba la reducción inmediata de los niveles de ozono. Lo anterior fue evidente en los días posteriores a la aplicación de las acciones de emergencia cuando la Fase I se activó en ocho ocasiones con máximos de hasta 196 ppb; antes la entrada en vigor del PTHNC la Fase I solo se había activado en una ocasión. Adicionalmente, los indicadores para ozono no mostraron cambios a partir de abril con respecto a los observados en los mismos meses de los años recientes. Esto sugiere que las acciones de emergencia tuvieron un impacto menor en la solución del problema.

Los eventos de 2016 pusieron en evidencia el reto que aún enfrenta la gestión de la calidad del aire para atender el problema de la contaminación atmosférica por compuestos secundarios en la Ciudad de México y su área metropolitana (Velasco y Retama, 2016), exponiendo además, la necesidad de una coordinación efectiva con alcance metropolitano capaz de fomentar relaciones constructivas entre los diferentes ordenes de gobierno y los sectores de la sociedad para la solución de este y otros problemas ambientales.

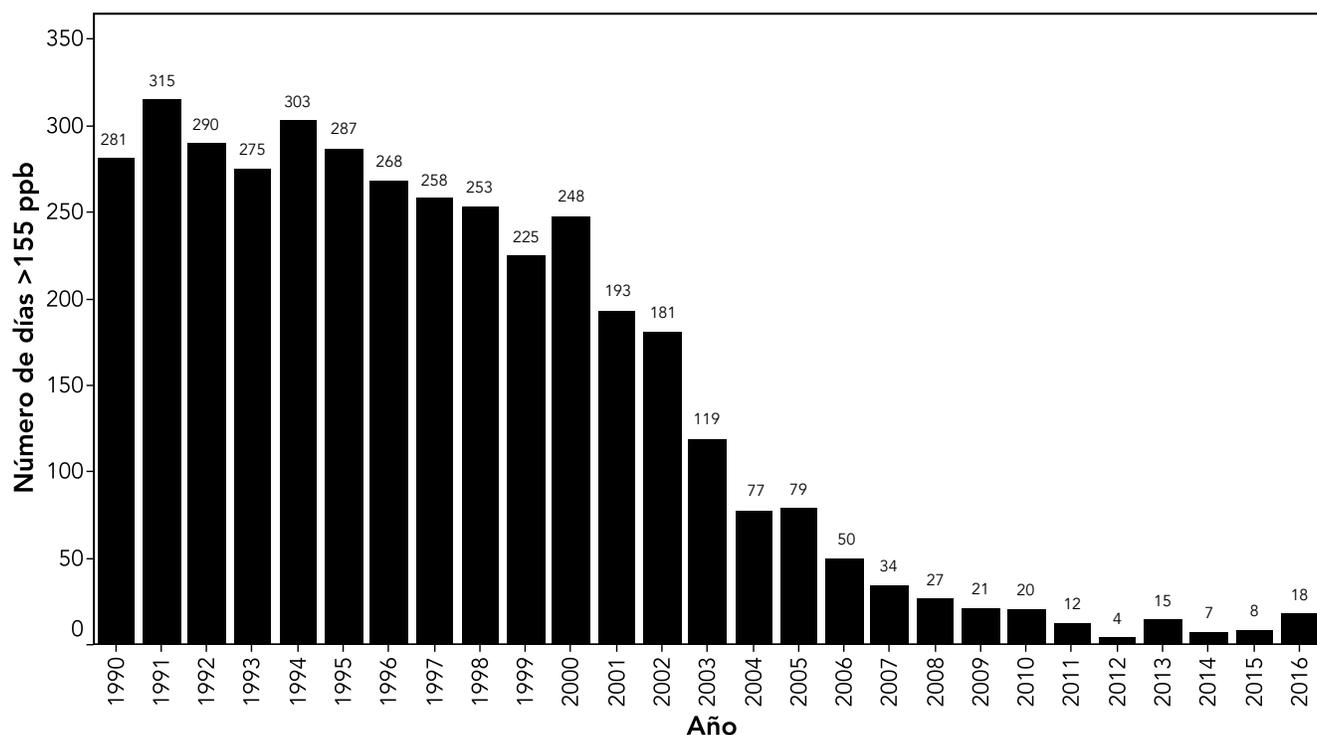


Figura 4.1. Número de días con concentraciones máximas mayores a 150 puntos en el índice de calidad del aire (>154 ppb) entre 1990 y 2016.

Modificación de los valores de activación del PCAA

Desde su creación en 1990, el PCAA ha experimentado cambios en los valores de activación de sus distintas fases (ver Figura 4.2). En un principio los valores fueron definidos a partir de la distribución de las concentraciones máximas de ozono y partículas. En los últimos años, la selección de las concentraciones se había realizado considerando las metas de gestión, con la aplicación de reducciones sistemáticas en plazos de tiempo específicos. Una de las desventajas del PCAA es que no está definido en unidades de concentración en su lugar emplea los valores del IMECA dificultando la comparación objetiva de la información histórica por los cambios que han ocurrido en el índice y las normas, es por ello que en esta sección se hace mención de los niveles de ozono en términos de la concentración e índice.

Inicialmente el PCAA solo contaba con las Fases I y II de Contingencia cuyos valores de activación eran de 294 y 416 ppb, respectivamente. Hasta antes de 2005 el PCAA se activaba por horas y no por días, esto implicaba que en un solo día el PCAA podía activarse en más de una ocasión en función de las variaciones del ozono. En 1998, en el contexto del primer PROAIRE (Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de México 1995-2000), se realizó el primer cambio en los valores de activación por ozono, la Fase II se redujo de 416 a 356 ppb, mientras que la Fase I se ajustó de 294 a 283 ppb. En ese año se agregó una Fase de Precontingencia en 234 ppb, que tenía el propósito de fomentar una participación voluntaria de los sectores responsables de la emisión de contaminación para mitigar los niveles de contaminación y evitar la activación de la Fase de Contingencia. En 2006 se revisó el PCAA ajustando nuevamente los valores de activación para ozono: el valor de la Fase II disminuyó de 356 a 276 ppb, la Fase I pasó de 283 a 221 ppb y la Fase de Precontingencia se redujo de 234 a 188 ppb. En 2008, en el contexto del PROAIRE 2002-2010, se realizó una propuesta interesante para ajustar gradualmente los niveles de activación del PCAA en función del progreso en el control de ozono, disminuyendo de manera progresiva los niveles de activación en 5 puntos (~5 ppb) por año a partir de 2008 y hasta 2011. Esta estrategia permitió ajustar

gradualmente el PCAA asegurando que los valores de activación correspondieran con los avances en la gestión de la calidad del aire, disminuyendo el riesgo de un retroceso al mantener límites laxos. En 2014, la revisión de la norma para ozono redujo el valor del límite permisible para el promedio de 1 hora de 110 a 95 ppb, derivando en la actualización del algoritmo de cálculo del IMECA modificando también las concentraciones de los valores de activación del PCAA. Con la aprobación del Órgano de Gobierno a las modificaciones del índice, así como el ajuste correspondiente en los valores de activación, el programa quedó como sigue: la concentración de la Fase de Precontingencia pasó de 166 a 155 ppb, la Fase I disminuyó de 199 a 185 ppb, mientras que la Fase II pasó de 254 a 264 ppb. Es importante mencionar que en la modificación del algoritmo del índice se aplicaron las recomendaciones de la US EPA para definir límites superiores del índice. A consecuencia de la activación de la Fase I de Contingencia del 14 de marzo de 2016 y con el propósito de aplicar acciones para resolver de manera inmediata el problema de calidad del aire, la SEMARNAT y la Coordinación Ejecutiva de la CAME previa consulta con COFEPRIS, decidieron modificar el PCAA eliminando la Fase de Precontingencia y reduciendo el valor de activación de la Fase I de 180 ppb a 155 ppb. Los nuevos cambios se describieron en la publicación de la revisión emergente del PCAA del 6 abril de 2016. El valor de activación de la Fase II disminuyó en 58 ppb pasando de 264 a 206 ppb. El resultado de la modificación no tuvo ningún efecto en la reducción de la contaminación, pero provocó un aumento en el número de episodios de Contingencia al transformar lo que antes era una Fase de Precontingencia en una Fase I. La percepción del agravamiento de la situación ambiental creó un escenario favorable para la aplicación de nuevas restricciones. Sin embargo, los límites más estrictos en el PCAA por sí mismos no garantizaron una disminución niveles de contaminación, ya que no estuvieron acompañados de acciones para la reducción cuantitativa del ozono en términos de la sensibilidad del régimen de formación del ozono en la atmósfera.

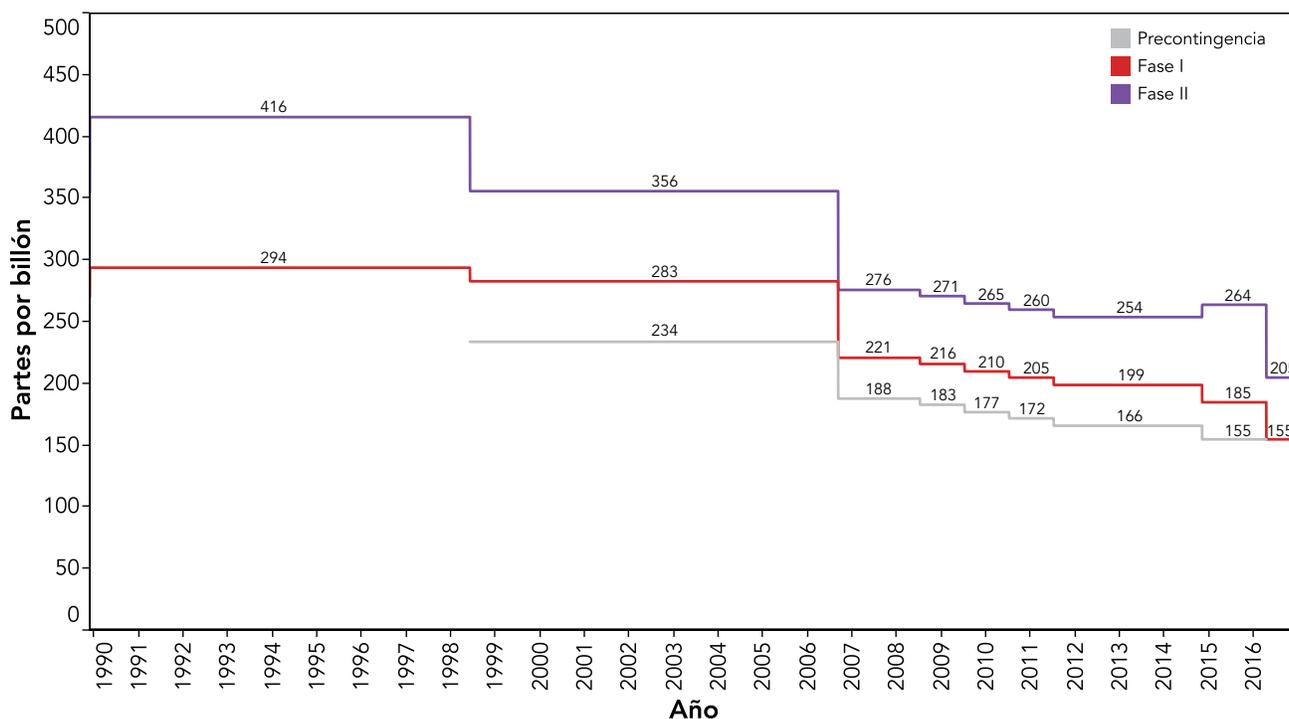


Figura 4.2. Histórico de las modificaciones a los valores de activación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas. Los valores que aparecen sobre cada línea indican la concentración en ppb.

Eventos de activación del PCAA

Como se mencionó anteriormente el PCAA se activó en 14 ocasiones de las cuales dos ocurrieron en febrero, dos en marzo, dos en abril, seis en mayo, una en junio y una en agosto. Con excepción de los eventos de junio y agosto, el resto ocurrieron en la temporada de ozono. La mayoría de los eventos estuvieron asociados con episodios de estabilidad atmosférica por la presencia de sistemas de alta presión (anticiclónicos). Por lo tanto, las características de estos sistemas influyeron en la duración y severidad de los eventos de contaminación por ozono. Los efectos de un sistema de alta presión pueden extenderse por varios días consecutivos, cuando esto ocurre las consecuencias en la calidad del aire pueden ser de preocupación. La escasa dispersión de la contaminación y la disminución en la nubosidad asociada a estos sistemas contribuye a una intensa actividad fotoquímica entre los contaminantes dentro de la capa límite. Con el cambio en la declinación

solar y el incremento en la duración del periodo diurno en la primavera y verano, aumenta la cantidad de energía incidente y el tiempo de reacción, agravando los eventos de contaminación fotoquímica en la temporada de ozono. Este año dos episodios fueron de particular interés por la permanencia de los sistemas de alta presión, el primero ocurrió entre el 12 y 18 de marzo, y el segundo entre el 2 y 5 de mayo. En ambos casos, después de un incremento progresivo en las concentraciones de ozono durante tres días consecutivos, los niveles del contaminante superaron los 180 puntos en el índice de calidad del aire (>184 ppb), que antes de la modificación del PCAA correspondían a la Fase I de Contingencia.

A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de los eventos de activación del PCAA ocurridos en 2016, así como de las principales características meteorológicas que se presentaron durante cada uno de ellos.

Precontingencia: 19 de febrero de 2016 16:00

El viernes 19 de febrero fue un día cálido y despejado con temperaturas promedio y máxima de 16 °C y 27 °C, respectivamente. Ese día se observó una circulación anticiclónica en la porción centro del territorio nacional en niveles bajos y medios de la troposfera, mientras que en capas altas, predominó una curvatura anticiclónica en el centro y sur del país. El campo de viento en capas superiores generado por estos sistemas meteorológicos propició escaso transporte de humedad hacia la cuenca. La estructura general provocó estabilidad atmosférica y viento débil en superficie durante la mayor parte del día. El sistema anticiclónico propició vientos de superficie con una componente predominante del norte. Adicionalmente, a una altura de 240 m se observó una inversión térmica con una intensidad de 0.2 °C, espesor de 620 m y temperatura de ruptura de 19 °C. Hasta antes del mediodía se observó estabilidad atmosférica hasta una altitud de aproximadamente 3000 m, misma que fue perdiendo intensidad por la tarde a medida que aumentó la temperatura.

A nivel de superficie se observó viento débil durante la mañana con intensidades de alrededor de 1 m/s, con dirección predominante hacia el sur. Después del mediodía y en las primeras horas de la tarde, la intensidad del viento se mantuvo por debajo de los 2 m/s con vientos dominantes del norte. A partir de las 10:00 se observó un incremento gradual en la intensidad del viento, hasta alcanzar una velocidad promedio de 2.4 m/s a las 14:00, manteniéndose relativamente estable hasta las 16:00. Después de las 17:00 se registró nuevamente un aumento en la velocidad hasta alcanzar un promedio máximo de 4 m/s a las 19:00. Durante el periodo diurno la dirección predominante del viento fue hacia el sur.

La fuerte estabilidad atmosférica durante la mañana contribuyó a la acumulación gradual de los contaminantes en la región baja de la atmósfera, con una escasa dispersión hasta pasado el mediodía. La baja velocidad del viento favoreció un mezclado relativamente homogéneo mientras la masa de aire contaminado avanzaba hacia el sur de la ciudad. El cielo despejado y la escasa dispersión fueron factores favorables para el incremento de ozono en el centro y sur de la Ciudad de México en las primeras horas de la tarde, con los máximos

en las estaciones ubicadas al sureste de la ciudad. A las 15:00 la mayoría de las estaciones registraban una calidad del aire MALA, con concentraciones superiores a 95 ppb (100 puntos en el índice). La escasa dispersión de la contaminación y una velocidad de viento constante de baja intensidad entre las 14:00 y las 16:00 horas, fueron condiciones favorables para que a las 16:00 las estaciones Milpa Alta (MPA) y Chalco (CHO), ambas ubicadas al sureste de la cuenca, registraran concentraciones máximas de 157 y 160 ppb equivalentes a 153 y 157 puntos en el índice de calidad del aire. A esa misma hora la concentración máxima en el suroeste fue de 147 ppb (144 puntos) en Cuajimalpa (CUA). Al superar el valor de 150 puntos la CAME activó la Fase de Precontingencia por ozono a las 16:00. Para la siguiente hora la concentración de ozono alcanzó un máximo de 161 ppb (157 puntos) en la estación Milpa Alta. Después de las 17:00, con el incremento en la velocidad de viento, la rápida dispersión de la contaminación provocó una drástica disminución en la concentración de ozono. En la Figura 4.3 se muestra la evolución horaria de la concentración de ozono en las diferentes estaciones de monitoreo a lo largo del 19 de febrero, en ella se destacan los valores máximos observados. En la Figura 4.4 se presentan en un mapa tanto la distribución espacial de la concentración de ozono a la hora de la activación de la Fase de Precontingencia (los colores indican la categoría correspondiente en el índice de calidad del aire), como del campo de viento promedio en la superficie, para el periodo comprendido entre las 9:00 y las 16:00 horas.

El sábado 20 de febrero prevalecieron condiciones meteorológicas similares a las del día previo provocadas por los efectos de la circulación anticiclónica, pero con un leve cambio en la condición de estabilidad atmosférica por la mañana, acompañadas de un ligero incremento en la velocidad de viento en la capa límite. Durante la mayor parte del día se observó viento débil a nivel de superficie proveniente del norte de la cuenca. Por la tarde prevaleció una condición de calidad del aire MALA en la mayoría de las estaciones en el territorio de la Ciudad de México, sin embargo, la concentración máxima registrada fue de 144 ppb (142 puntos). Al no superar la concentración de 154 ppb (150 puntos), la CAME desactivó la Fase de Precontingencia.

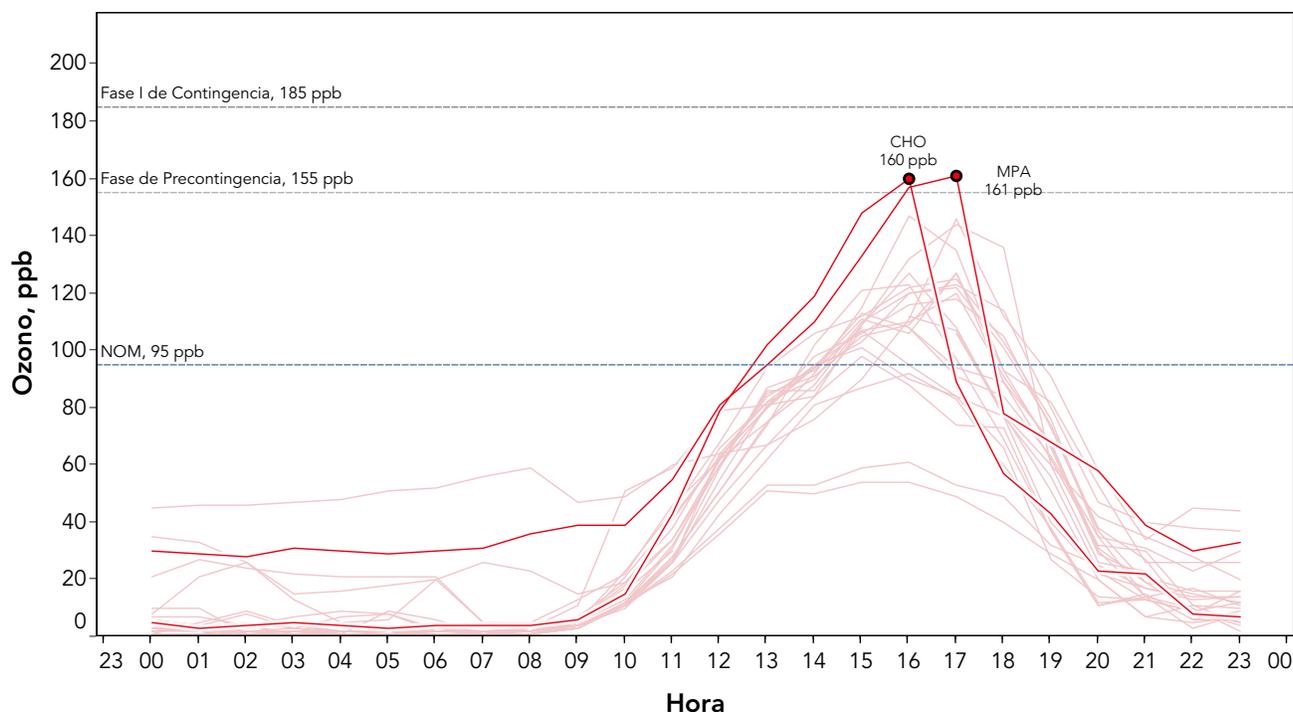


Figura 4.3. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 19 de febrero. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

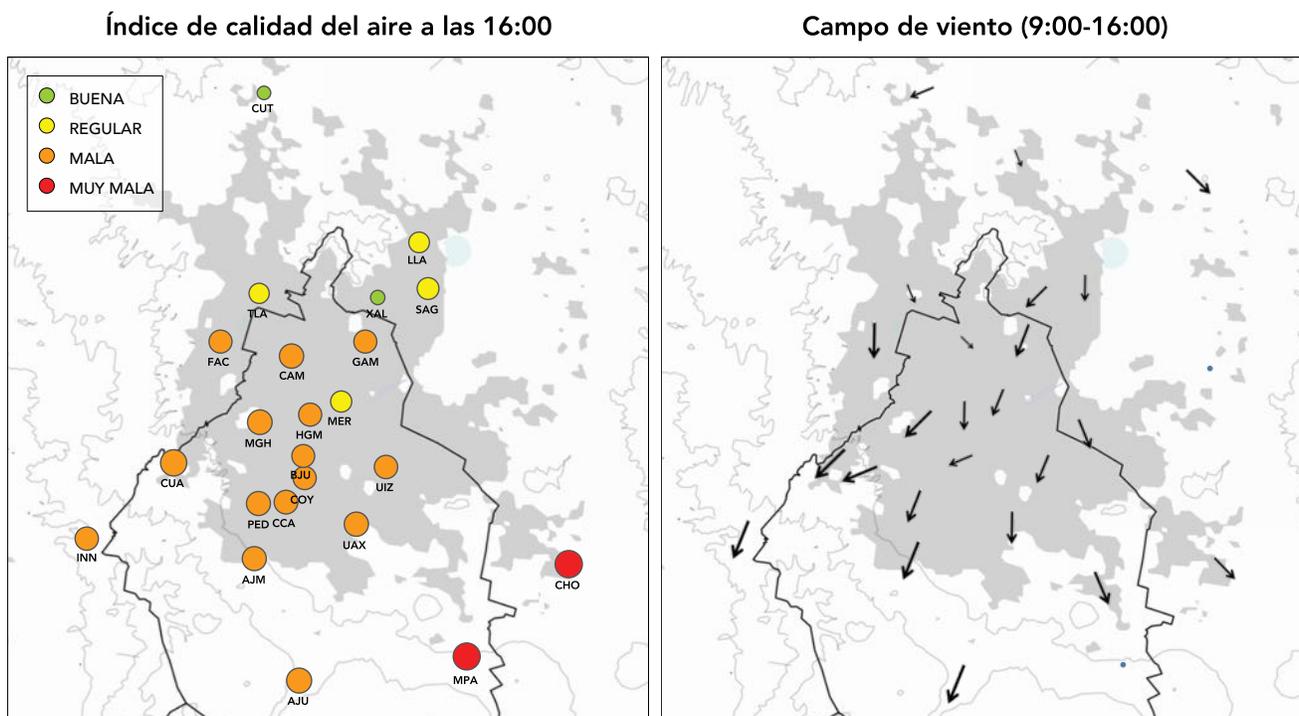


Figura 4.4. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 19 de febrero. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Precontingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

Precontingencia: 21 de febrero de 2016 15:00

En niveles bajos de la atmósfera se observó la interacción de una circulación anticiclónica que afectaba los estados del centro-oeste y norte del país, con un sistema de alta presión localizado sobre el Golfo de México. En niveles medios se observó un sistema anticiclónico en la región central del país, así como una elongación de baja presión sobre los estados del noroeste. El efecto combinado de estos sistemas provocó estabilidad en la región baja de la atmósfera sobre la Ciudad de México y su área metropolitana, además de cielo despejado, viento de superficie débil y temperaturas calurosas en las primeras horas de la tarde. De acuerdo con la información del perfil vertical, la condición de estabilidad atmosférica se extendía hasta una altura superior a 2 km con viento débil en esa región.

A nivel de superficie se presentó viento débil por la mañana dominado por las corrientes de flujo descendente de las montañas. Entre las 10:00 y 13:00 horas se observó un ligero incremento en la velocidad de viento alcanzando una intensidad promedio de ~2 m/s, que se mantuvo estable hasta las 15:00 con una dirección predominante hacia el suroeste. En la región noreste de la ciudad se observó una corriente de viento débil proveniente del sureste a partir de las 9:00. La interacción de esta corriente con vientos provenientes del norte y este de la cuenca generó una zona de convergencia sobre la delegación Gustavo A. Madero que se mantuvo hasta las primeras horas de la tarde. Después de las 15:00, los vientos provenientes del este alinearon el flujo de viento hacia el suroeste, incrementando también su intensidad con un promedio máximo de ~3 m/s a las 17:00.

En términos de calidad del aire la condición de estabilidad atmosférica durante el periodo matutino permitió el estancamiento gradual de los contaminantes en el centro y norte de la ciudad. Pasado el mediodía el impulso de los vientos del este permitió un lento avance de las masas de aire hacia el suroeste, lo que en presencia de la radiación solar provocó que la mayoría de las estaciones ubicadas en la Ciudad de México alcanzarán una condición de MALA calidad del aire, con concentraciones máximas en los sitios ubicados al suroeste de la ciudad. Es importante mencionar que a pesar de que el domingo generalmente se

observa una reducción en las emisiones de precursores, la formación de ozono se caracteriza por iniciar antes que los días laborales y con una mayor tasa de incremento, esto explica porque los eventos que ocurren en domingo suelen reportar incrementos en las concentraciones de ozono hasta dos horas antes que en el resto de los días de la semana. Además del efecto de *fin de semana* que contribuye a una mayor producción de ozono por la disminución en las emisiones de NO_x .

La presencia de una zona de convergencia, al noreste de la Ciudad de México influyó para que a las 15:00 la concentración de ozono alcanzará 159 ppb (155 puntos) en la estación Gustavo A. Madero (GAM). Al superar el umbral de activación de la Fase de Precontingencia, la CAME activó el PCAA a las 15:00. Durante la siguiente hora las condiciones meteorológicas no permitieron la adecuada dispersión de la contaminación por lo que el ozono continuó incrementando hasta alcanzar un máximo de 162 ppb (158 puntos) en la misma estación. Después de las 16:00, con el fortalecimiento de los vientos del este, se mantuvo un lento arrastre de los contaminantes hacia el suroeste a donde se trasladaron las concentraciones máximas de ozono, pero con valores menores a los 150 puntos. La condición de MALA calidad del aire se mantuvo hasta las 20:00 en las estaciones de monitoreo ubicadas al suroeste. En la Figura 4.5 se muestra la evolución horaria de la concentración de ozono en las diferentes estaciones de monitoreo, en ella se destaca el perfil diurno de la estación Gustavo A. Madero (GAM) que fue la que activó la Fase de Precontingencia. Si bien, dicha estación registró concentraciones que superaron los 150 puntos, se observó una condición de MALA calidad del aire en la mayor parte de la Ciudad de México durante la tarde. La Figura 4.6 muestra la condición de calidad del aire reportada en las diferentes estaciones de monitoreo al momento de la activación de la Fase de Precontingencia, así como el campo de viento promedio entre las 9:00 y las 15:00 horas.

El lunes 22 de febrero la presencia de viento del sur en superficie, asociado a un flujo de circulación anticiclónica sobre la región centro-sur del país, permitió condiciones favorables para la dispersión de los contaminantes y en consecuencia una mejoría en la calidad del aire, lo que permitió la suspensión de la Fase de Precontingencia.

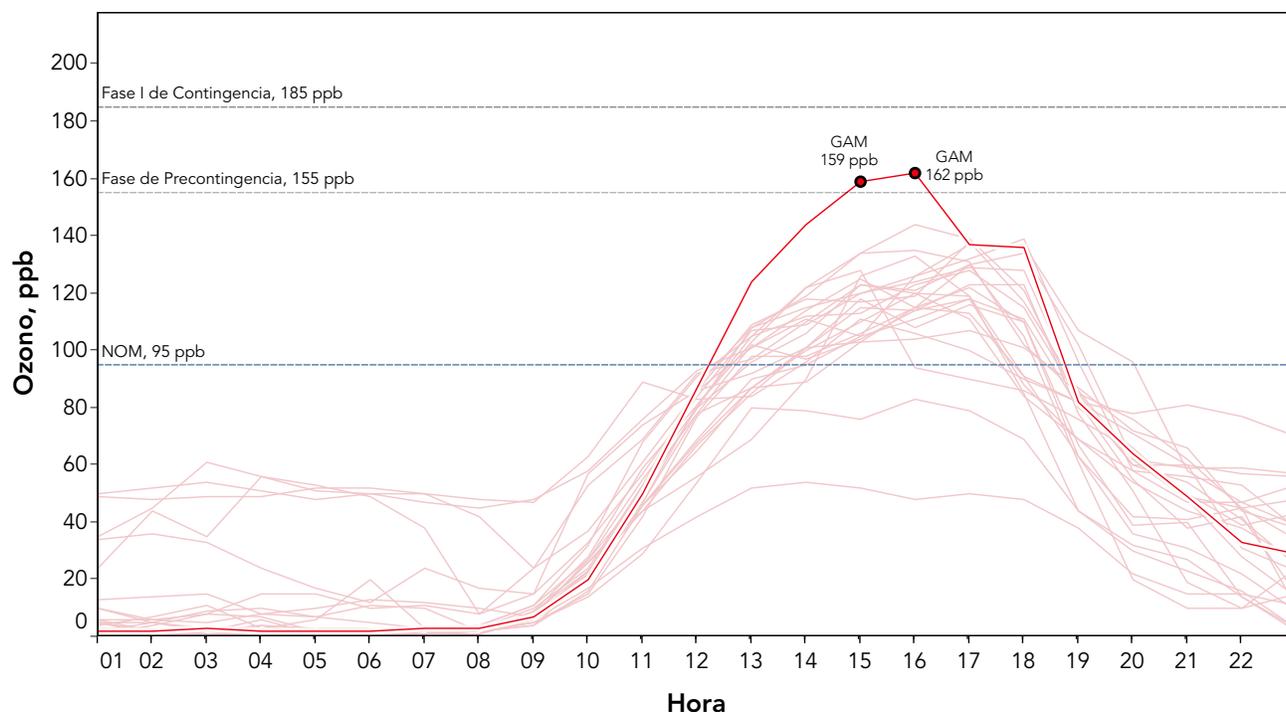


Figura 4.5. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 21 de febrero. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

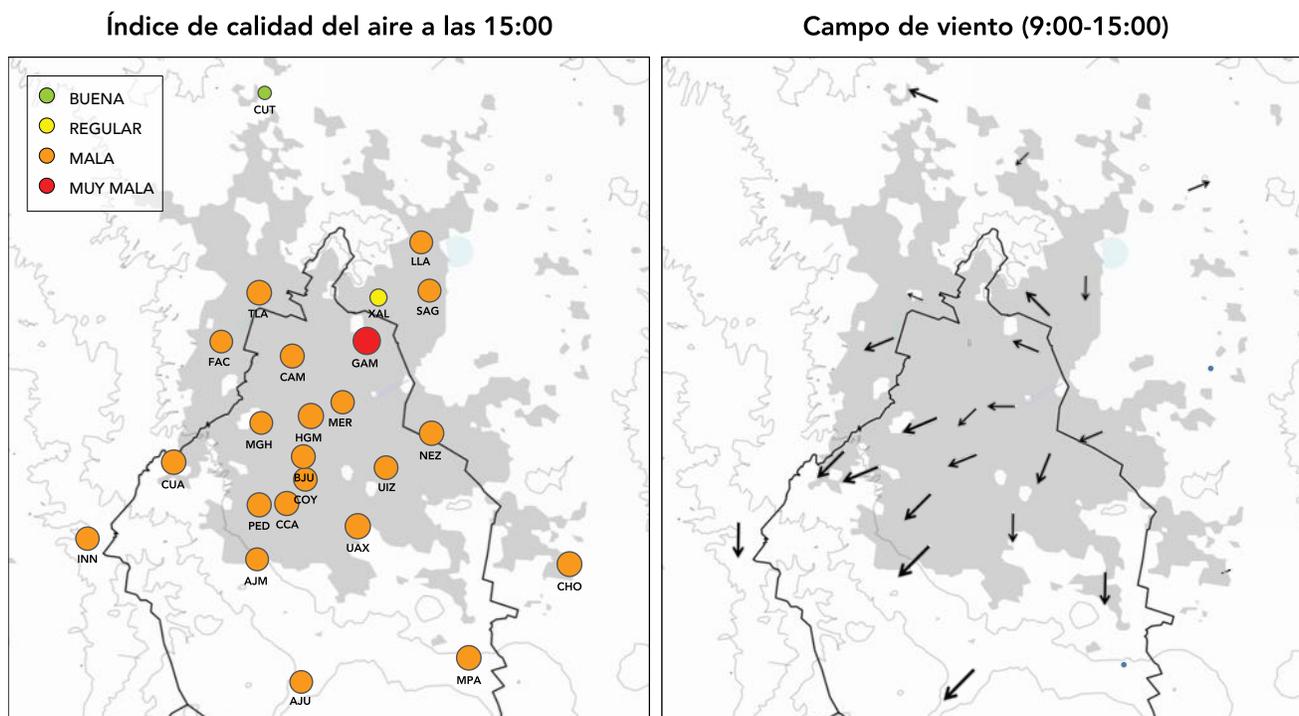


Figura 4.6. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 21 de febrero. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Precontingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

Precontingencia: 12 de marzo de 2016 17:00

Como consecuencia del viento moderado a fuerte asociado a la corriente de chorro subtropical entre el 8 y 11 de marzo, la Ciudad de México experimentó una condición de calidad del aire inmejorable. El desplazamiento de la corriente de chorro hacia latitudes superiores fue seguido por el desarrollo de un sistema anticiclónico que afectó durante casi seis días consecutivos la región central del país, provocando un severo episodio de contaminación por ozono que inició el sábado 12 de marzo con la activación de la Fase de Precontingencia. Ese día por la mañana en niveles medios y altos de la atmósfera se observó la formación de una franja de interacción entre una circulación anticiclónica proveniente del sur del país, con un sistema que se desarrollaba sobre los estados del norte. En niveles medios y bajos predominó la influencia de un sistema anticiclónico que se encontraba sobre el occidente y centro del país. La combinación de estos sistemas favoreció, además de estabilidad atmosférica, cielo despejado y escaso transporte de humedad. En niveles cercanos a la superficie se observó sobre la Ciudad de México una franja de convergencia en el campo de vientos. En la madrugada, el perfil termodinámico mostraba una temperatura inusualmente baja a nivel del suelo y en la capa de la atmósfera adyacente. Esto provocó un lento crecimiento de la capa límite planetaria y una menor altura en la capa de mezclado. El perfil de viento indicó viento débil por debajo de los 1500 msns durante la mayor parte del día. Por la tarde se observó una atmósfera fuertemente estratificada, con viento débil en la capa más cercana al suelo.

En superficie, el viento estuvo dominado por los flujos descendentes originados en la zona montañosa, durante la mañana con una velocidad promedio menor a 1 m/s. A partir de las 10:00, se observó un leve incremento en la velocidad hasta alcanzar un promedio máximo de ~2 m/s a las 15:00, sin embargo, no se observó una dirección definida que permitiera el movimiento o la dispersión de la contaminación. A partir de las 15:00 se identificó la presencia de una corriente moderada de viento proveniente del paso que se forma al sureste entre las sierras Ajusco-Chichinautzin y Nevada (paso de Chalco). Entre las 15:00 y las 18:00 horas el campo de viento se organizó con

una dirección predominante hacia el suroeste como resultado de la interacción entre los flujos del norte y del paso de Chalco. Esto favoreció también el desarrollo de una zona con confluencia local del viento, al noroeste de la ciudad. Durante este periodo la intensidad del viento se mantuvo relativamente estable con velocidades promedio de ~2 m/s. A partir de las 18:00 se presentó un aumento en la velocidad del viento impulsado por la corriente proveniente del paso de Chalco.

Estas condiciones meteorológicas fueron favorables para la acumulación de la contaminación dentro de la capa límite. El cielo despejado permitió el paso libre de la radiación solar contribuyendo a la actividad fotoquímica. La capa de mezclado tuvo un lento desarrollo durante la mañana, con un altura menor a 2000 msns antes del mediodía, la altura máxima de la capa límite fue de ~2800 msns a las 17:00. Durante el día, la turbulencia convectiva fue favorable para un mezclado intenso dentro de la capa límite. A partir de las 8:00 se observó un incremento continuo en la concentración de ozono. Debido a las condiciones de estabilidad atmosférica y escasa dispersión, el incremento en la concentración fue casi lineal en la mayoría de las estaciones de monitoreo con una tasa de incremento de ~15 ppb/h entre las 9:00 y 16:00. La falta de dispersión permitió la acumulación progresiva del ozono, por lo que a las 17:00 su concentración alcanzó valores máximos de 163 ppb (159 puntos) y 158 ppb (154 puntos) en las estaciones Gustavo A. Madero (GAM) y FES Acatlán (FAC), respectivamente. La CAME activó la Fase de Precontingencia a partir de las 17:00. La Figura 4.7 muestra los perfiles diurnos de la concentración de ozono, destacando los perfiles de las estaciones que activaron la Fase. En la Figura 4.8 se presentan los mapas con la distribución espacial de la concentración de ozono al momento de la activación de la Fase de Precontingencia, así como el campo promedio de viento durante las horas previas. Después de las 18:00 con la puesta del sol y con el incremento en la velocidad de viento favorecido por la corriente procedente del paso de Chalco, se observó una rápida disminución en la concentración de ozono. En los días siguientes la falta de dispersión, la subsidencia y la intensa radiación solar asociados al sistema anticiclónico, agravarían el episodio de contaminación que inició el 12 de marzo.

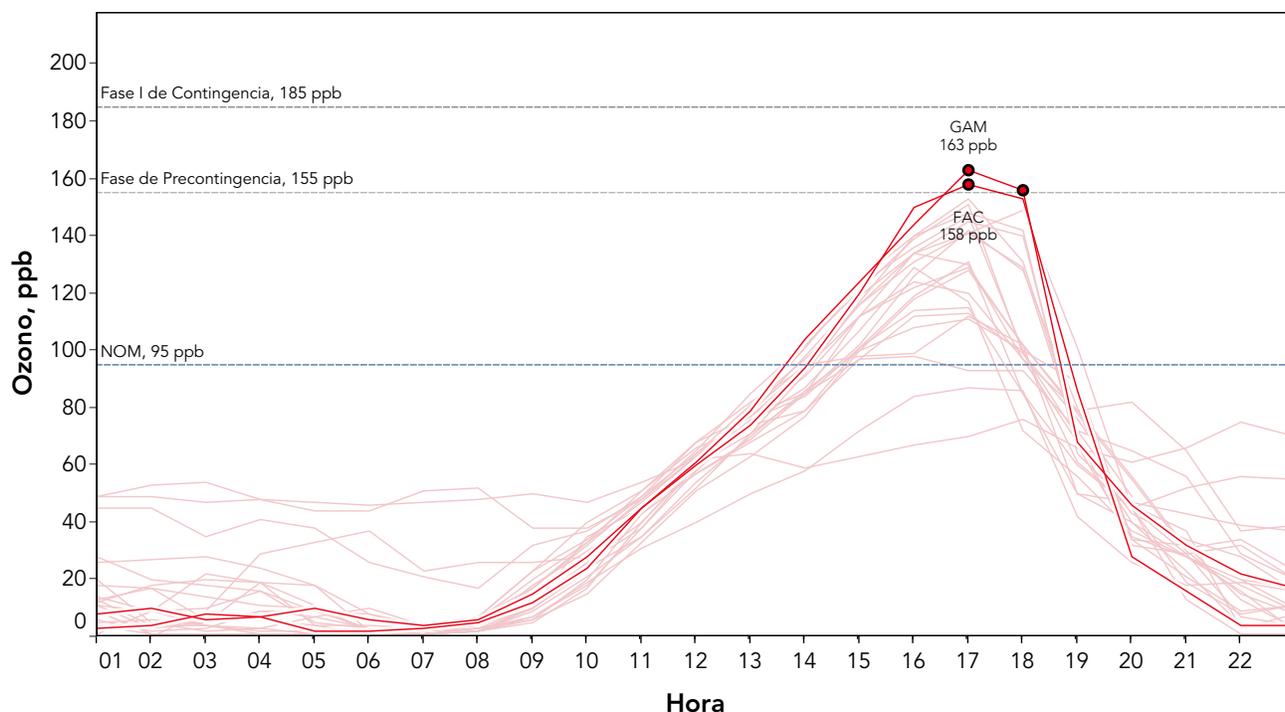


Figura 4.7. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 12 de marzo. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

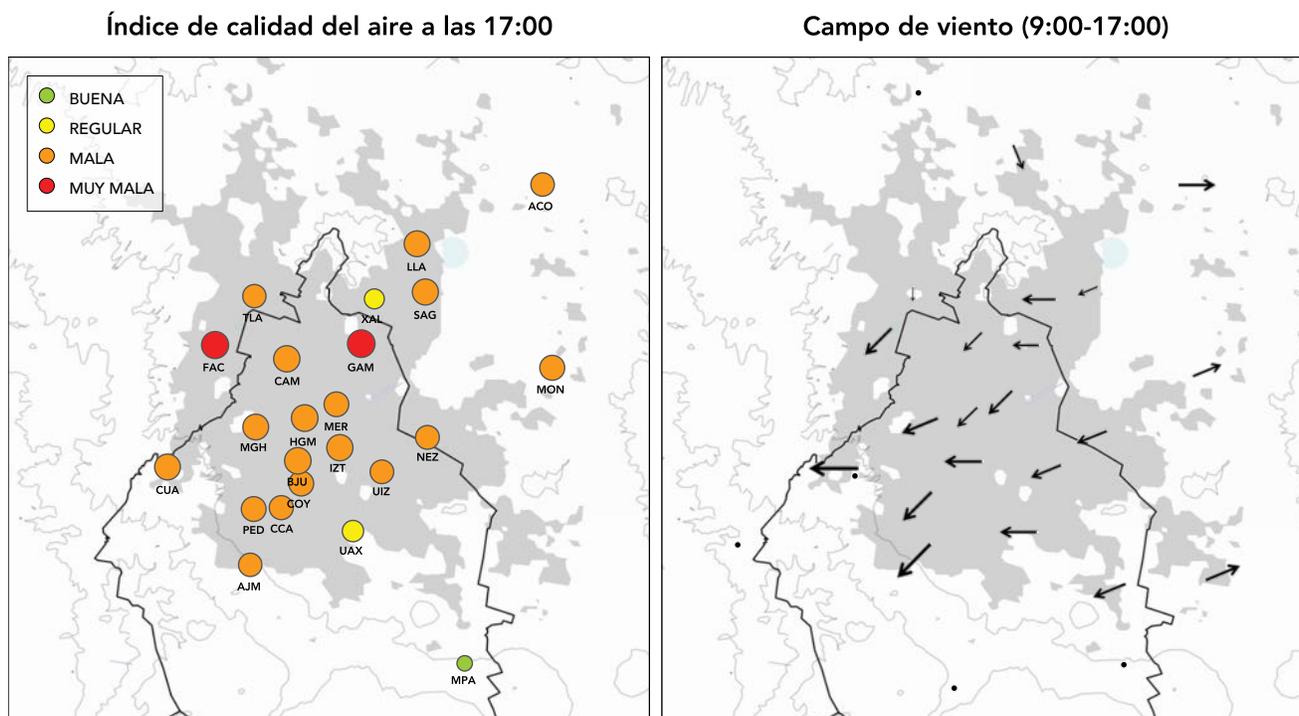


Figura 4.8. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 12 de marzo. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Precontingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

Fase I: 14 de marzo de 2016 16:00

El evento ocurrido el lunes 14 de marzo forma parte del episodio que inició el sábado 12 de marzo provocado por las condiciones meteorológicas asociadas con los sistemas de alta presión que afectaron el centro del país. El domingo 13 de marzo la situación meteorológica que provocó estabilidad atmosférica el día previo, se agravó con la presencia de un sistema de alta presión en niveles bajos de la atmósfera localizado sobre los estados de Puebla y Veracruz. Este día se observó en niveles medios la interacción entre una elongación de baja presión ubicada al noroeste del país, con un sistema de alta presión en el sureste de la república, que contribuyó a un escaso transporte de humedad y a la estabilidad atmosférica en la región central. La información del perfil vertical indicaba una estructura estratificada en la región baja de la atmósfera dentro de la capa límite. A nivel de superficie se observó viento débil durante la mañana y las primeras horas de la tarde, con una dirección predominante hacia el suroeste. La combinación de estabilidad atmosférica, intensa radiación solar y el incremento en la tasa de producción de ozono inducido por el efecto de *fin de semana*, tuvo como resultado un severo evento de contaminación fotoquímica con concentraciones que superaron los 154 ppb (150 puntos) entre las 15:00 y las 18:00 horas, en este periodo un total de diez estaciones reportaron concentraciones mayores al umbral de la Fase de Precontingencia. Con excepción de Gustavo A. Madero (GAM) el resto de estas estaciones con más de 150 puntos correspondieron a la porción suroeste de la Ciudad de México. La concentración máxima ocurrió en la estación Cuajimalpa (CUA) con un valor de 181 ppb (177 puntos), este valor fue mayor que el registrado el día previo, cuando se activó la Fase de Precontingencia.

Durante la noche del domingo la circulación anticiclónica se extendía a toda la región central del país, desde Oaxaca hasta San Luis Potosí. La región de mayor intensidad del sistema se observó directamente sobre la zona metropolitana, creando una fuerte estabilidad atmosférica que se extendió más allá de los 3000 msns. Al igual que en los días previos, en la madrugada se observó el desarrollo de una capa estable con una altura de ~350 msns caracterizada por una fuerte inversión

de temperatura. Mientras que a una altura de ~1500 msns se identificó una región de discontinuidad que separaba dos masas de aire con características diferentes, en donde la capa superior actuaba como tope para la inferior. En las primeras horas de la mañana la temperatura de superficie fue mayor que el sábado, sin embargo, menor que el promedio del mes. Esto provocó que una disminución en el crecimiento de la capa límite durante la mañana. En cuanto al perfil de viento se observó una capa con una altura de ~1500 msns, con viento débil y dirección al oeste. A nivel de superficie se presentó viento de baja intensidad durante la mañana y las primeras horas de la tarde, con una dirección predominante hacia el suroeste. El estancamiento de los contaminantes y la falta de nubosidad contribuyeron a una intensa actividad fotoquímica y un rápido incremento en la concentración de ozono, con una tasa mayor a ~20 ppb/h en las estaciones donde se registraron las mayores concentraciones (Figura 4.9). Una capa de aire denso proveniente del oeste ubicada por encima de los 1500 msns actuaba como tope limitando la dispersión vertical, mientras que el viento débil en la capa superficial dificultó la dispersión horizontal. Entre las 14:00 y las 17:00 horas se observó una condición de calma en la velocidad del viento de la capa más cercana al suelo. Durante la mayor parte de la tarde la visibilidad estuvo severamente afectada por la presencia de aerosoles de origen secundario.

En este contexto meteorológico a las 15:00 la concentración de ozono había superado el umbral de la Fase de Precontingencia en cinco estaciones del centro y suroeste con un valor máximo de 179 ppb (175 puntos) en la estación Cuajimalpa (CUA). En las siguientes horas, continuó la acumulación de ozono por la falta de dispersión. A las 16:00 aumentó a nueve el número de sitios con concentraciones mayores al umbral de la Fase de Precontingencia, de estos en Miguel Hidalgo, (MGH), Hospital General de México, (HGM) y Cuajimalpa (CUA) se superó el valor del umbral de la Fase I de Contingencia de 184 ppb (180 puntos), con un máximo en CUA de 198 ppb (194 puntos). En la Figura 4.10 se indica la distribución espacial del índice de ozono a las 16:00, así como el campo de viento promedio desde las 9:00. Por lo anterior a las 16:00 la CAME decretó la Fase I de Contingencia por ozono.

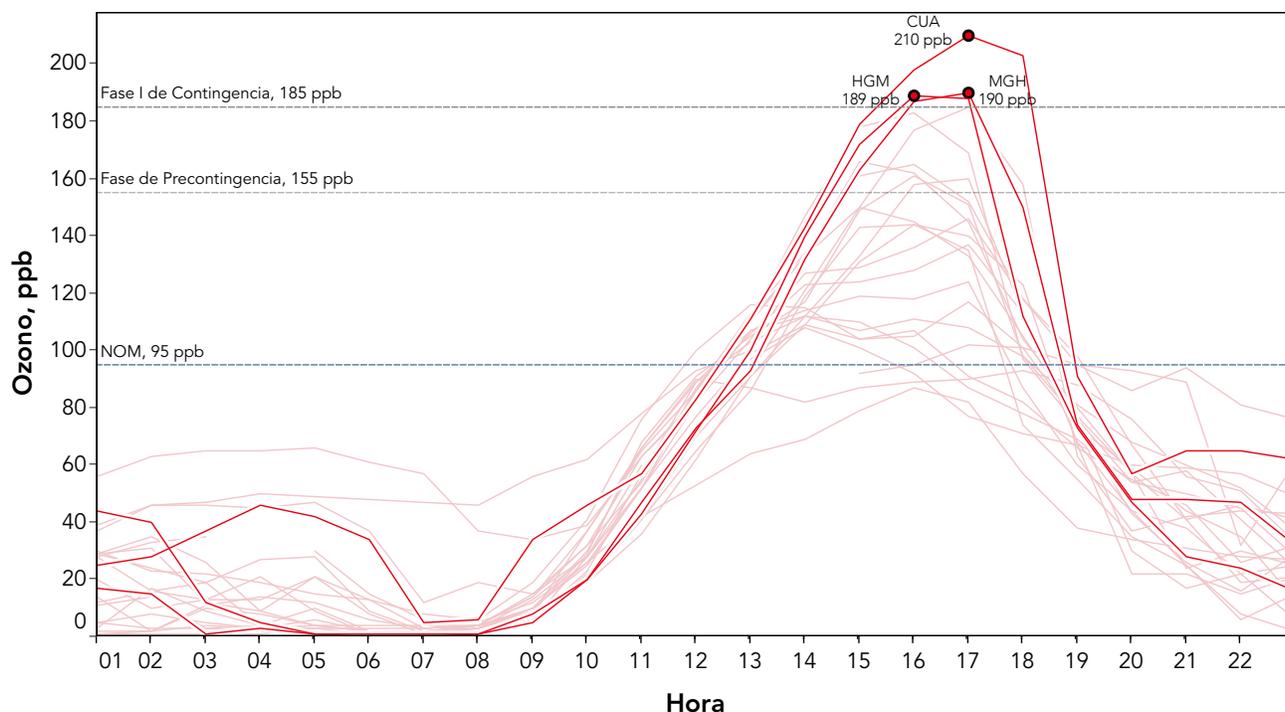


Figura 4.9. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 14 de marzo. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

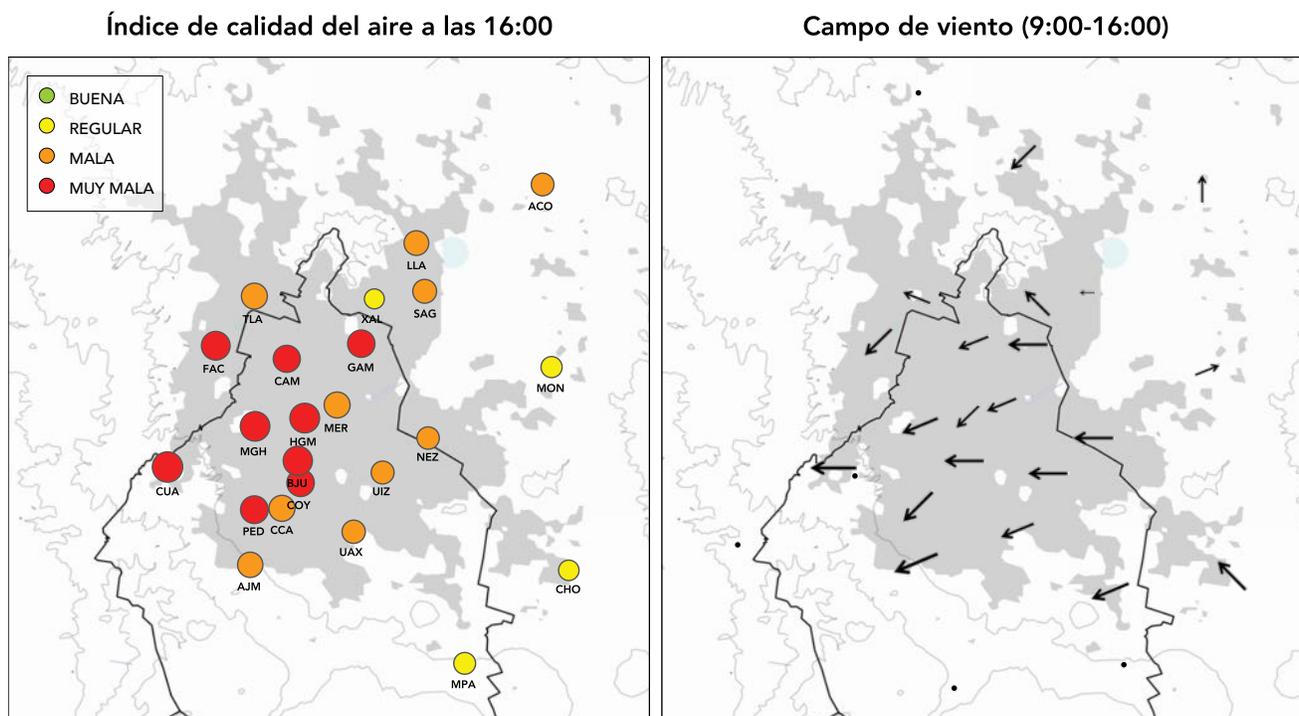


Figura 4.10. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 14 de marzo. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Contingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

Durante la tarde, el perfil atmosférico indicaba una atmósfera estable hasta una altura superior a los 3000 msns, con escaso movimiento vertical y horizontal. Para las 17:00 la concentración de ozono continuó aumentando hasta alcanzar un máximo de 210 ppb (203 puntos) en Cuajimalpa, y otras tres estaciones reportaron concentraciones mayores a 180 puntos: Miguel Hidalgo con 190 ppb (186 puntos), Hospital General de México con 188 ppb (184 puntos) y FES Acatlán (FAC) con 185 ppb (181 puntos). A esa hora en las estaciones Camarones (CAM) y Benito Juárez (BJU) registraron concentraciones superiores al umbral de la Fase de Precontingencia. A las 18:00 la estación Cuajimalpa mantenía una concentración de 203 ppb (199 puntos). En la Figura 4.9 se presenta la evolución de los perfiles diarios de ozono destacando las estaciones con las concentraciones máximas.

El martes 15 de marzo el sistema de alta presión permaneció sobre la región central del país, pero con menor intensidad que el día previo. En niveles medios se observó una curvatura anticiclónica que se propagaba desde el sur, generando un flujo de viento desde el oeste. A nivel de superficie, durante la mañana se registraron vientos de baja intensidad. A partir de las 10:00 se observó un incremento lento pero continuo en la velocidad de viento, con máximos superiores a 4 m/s a las 18:00. Este cambio en la velocidad se observó también en el perfil vertical del viento. La dirección predominante del viento durante la mañana fue de norte a sur, sin embargo, después del mediodía un flujo de viento impulsado desde el paso de Chalco, provocó un aumento gradual en la velocidad favoreciendo un cambio en la dirección con componente hacia el este entre las 13:00 y las 15:00 horas, predominando el flujo hacia el norte después de las 16:00. Esta dinámica en los vientos favoreció menores valores de ozono que el día previo, con una concentración máxima de ozono en la estación FES Acatlán de 156 ppb (152 puntos) a las 16:00. Con el aumento en la velocidad del viento por la tarde, la concentración de ozono disminuyó rápidamente. Este día se mantuvo la Fase I. En un intento para controlar la situación la CAME y la SEMARNAT decidieron aplicar acciones adicionales para disminuir los niveles de contaminación, a las 21:30 emitieron un comunicado en donde anunciaban restricciones

adicionales a la circulación vehicular, así como recomendaciones adicionales para la protección a la salud. Desafortunadamente, la publicación tardía del comunicado y la falta de difusión adecuada dificultó la aplicación plena de la medida.

El miércoles 16 de marzo el sistema de alta presión permaneció estacionado sobre el centro del país, sin embargo, hacia el norte se observó una curvatura anticiclónica en la atmósfera media, además de un aumento en la intensidad del viento y el arrastre de humedad desde el océano Pacífico. El perfil vertical indicaba una mejoría en las condiciones de dispersión. En superficie se observó un ligero incremento en la velocidad del viento proveniente de la meseta por la mañana, mientras que en la tarde la corriente del paso de Chalco modificó la dirección del viento hacia el suroeste. Esta mejoría en las condiciones meteorológicas tuvo un impacto favorable en la dispersión, la concentración máxima fue de 151 ppb (147 puntos) en la estación Cuajimalpa. A pesar de esto la CAME decidió mantener activa la Fase I de Contingencia y mantuvo la restricción vehicular.

El jueves 17 de marzo el sistema de alta presión se desplazó hacia el noreste, disminuyendo su efecto sobre el centro del país. En la atmósfera media las condiciones meteorológicas asociadas a la curvatura anticiclónica atenuaron la estabilidad atmosférica, arrastrando humedad desde el océano Pacífico. A nivel de superficie y en la capa adyacente al suelo se observó un incremento en la velocidad del viento con una influencia importante de la corriente del paso de Chalco después del mediodía, mejorando significativamente la capacidad dispersiva de la atmósfera con respecto a los días anteriores. La concentración máxima se presentó en la estación Gustavo A. Madero con 138 ppb (136 puntos) a las 16:00. A las 21:00 la CAME suspendió el episodio de Contingencia.

En las primeras horas del viernes 18 de marzo el sistema de alta presión perdió intensidad dando paso a un flujo de viento acoplado a una corriente sinóptica proveniente del oeste, con una intensidad moderada a fuerte. El perfil atmosférico mostraba una condición de inestabilidad en la parte baja de la atmósfera, favorable para la calidad del aire. Por lo tanto, después de seis días con condiciones meteorológicas poco propicias para la dispersión de la contaminación, la situación mejoró notablemente.

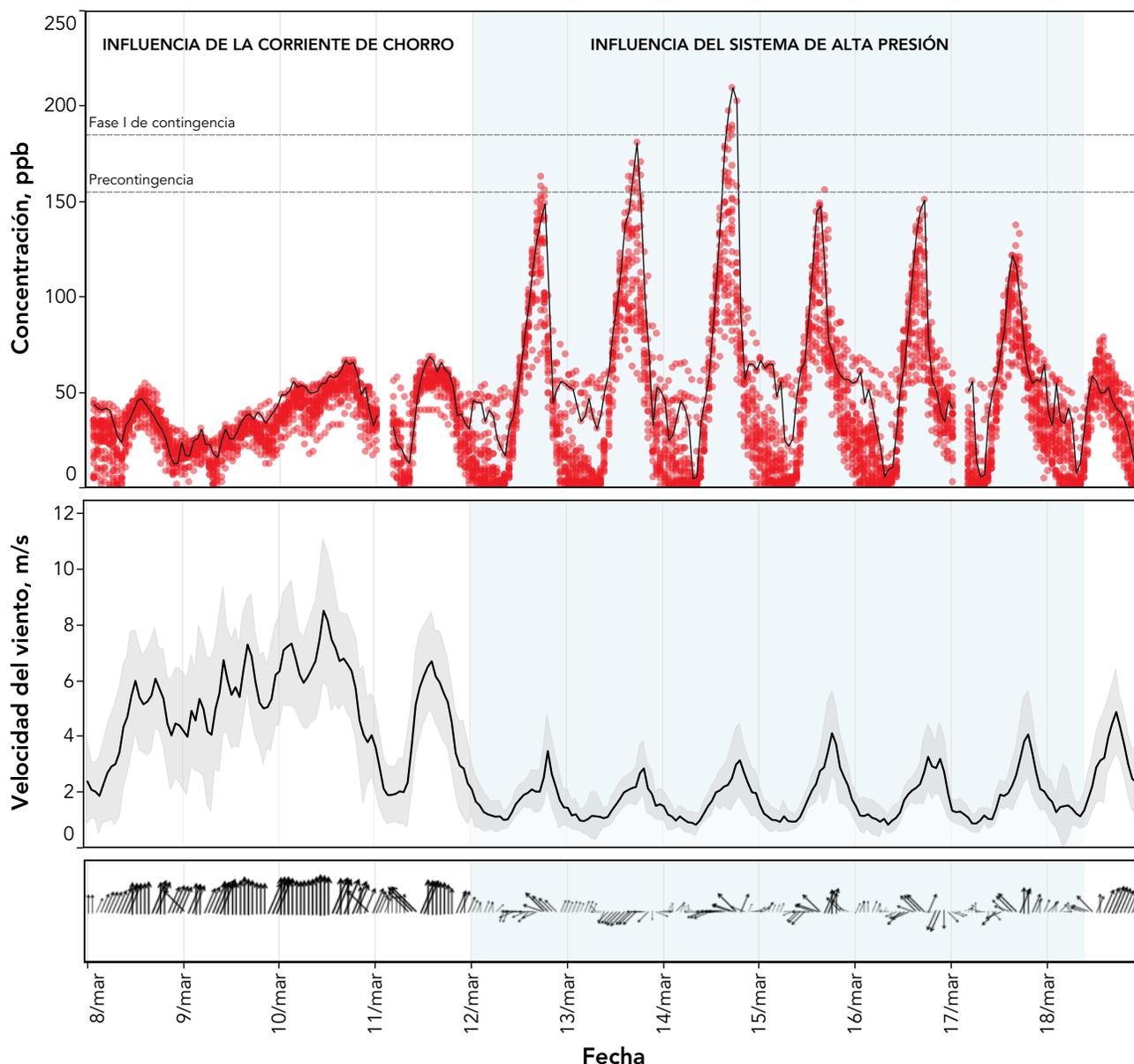


Figura 4.11. Efecto de la corriente de chorro y el sistema de alta presión en la concentración de ozono y el viento superficial entre el 8 y 18 de marzo. En el gráfico superior los puntos rojos indican los valores horarios de todas las estaciones, la línea continua indica el promedio. El gráfico central muestra el promedio del viento (línea negra) y la desviación estándar (sombreado gris). El gráfico inferior presenta los vectores promedio del flujo de viento.

El episodio meteorológico que ocurrió entre el 12 y 17 de marzo fue importante por dos razones: la primera, sucedió inmediatamente después de un episodio de viento intenso asociado a un inusual comportamiento de la corriente de chorro entre el 8 y 11 de marzo, que alteró el comportamiento de la meteorología en la capa límite, que es donde ocurren los procesos relacionados con la contaminación atmosférica. La segunda, la presencia de un sistema de alta presión durante seis días consecutivos que limitó la dispersión de

los contaminantes y que provocó un proceso de acumulación en la capa superficial, con un impacto importante en las concentraciones de ozono (ver Figura 4.11).

Cada año en la temporada de ozono suelen presentarse episodios en los que la presencia de sistemas de alta presión se prolonga durante varios días consecutivos, con consecuencias graves en la calidad del aire. Por lo tanto, es de gran importancia su identificación oportuna para anticipar los posibles efectos en la calidad del aire.

Precontingencia: 4 de abril de 2016 18:00

El lunes 4 de abril una circulación anticiclónica en las capas más bajas de la troposfera afectó el centro del país. En capas medias, se observó una curvatura anticiclónica que incursionó al país por la costa sur extendiéndose hasta la meseta central. Esta condición meteorológica provocó cielo despejado la mayor parte del día y estabilidad atmosférica. En el perfil vertical se observó una atmósfera estratificada con viento débil por debajo de los 1500 msns. A nivel de superficie durante la mañana el campo de viento estuvo dominado por corrientes débiles (~1 m/s) impulsadas por el aire descendente de las montañas. Entre las 11:00 y las 15:00 horas se presentó un ligero incremento en la velocidad impulsado por una corriente proveniente del este. Después de las 15:00 y hasta las 19:00, la velocidad se mantuvo relativamente estable con un promedio de ~2.5 km/h y dirección predominante hacia el suroeste. A partir de las 20:00 se observó un rápido incremento en la velocidad del viento. En la capa atmosférica cercana a la superficie se desarrolló de una línea de confluencia de los vientos directamente sobre la Ciudad de México, que permaneció estacionaria desde el mediodía y hasta las 19:00, lo que contribuyó a agravar la condición de estabilidad atmosférica observada sobre la ciudad. El día fue cálido, con cielo despejado y temperatura promedio de 19 °C con máxima de 30 °C.

La estabilidad atmosférica y el viento débil contribuyeron al estancamiento de los contaminantes, incluyendo los precursores del ozono, durante la mañana. La falta de nubosidad y la intensa radiación solar propiciaron una actividad fotoquímica importante, así como la acumulación continua de ozono, lo cual se observó como un incremento progresivo en su concentración en la mayoría de las estaciones de monitoreo. Debido a que por la tarde la dirección del viento estuvo dominada por un flujo hacia el suroeste, las concentraciones máximas del contaminante se presentaron en esa región. Hasta las 14:00 la calidad del aire fue BUENA a REGULAR en la mayoría de las estaciones de monitoreo. A partir de las 15:00 la concentración de ozono superó el valor de 95 ppb (100 puntos). Para las 17:00 la calidad del aire reportaba una condición MALA en la mayoría de las estaciones en la Ciudad de México. A las 18:00

se registró una concentración máxima de 159 ppb (155 puntos) en la estación Benito Juárez (BJU), mientras que en la estación Santa Fe (SFE), en la delegación Cuajimalpa, se registró un valor de 155 ppb (151 puntos). Ambas concentraciones superaron el umbral de la Fase de Precontingencia del PCAA, por lo que la CAME decidió la activación de dicha fase a partir de las 18:00, sin embargo, el comunicado de activación con la restricciones a la circulación fue publicado hasta las 20:00. En la Figura 4.12 se presenta la evolución de las concentraciones de ozono en las estaciones de monitoreo, en ella se destacan los perfiles horarios de las estaciones que superaron el umbral de la Fase de Precontingencia. En la Figura 4.13 se muestra la calidad del aire en términos del índice de calidad del aire en todas las estaciones de monitoreo al momento de la activación de la Fase de Precontingencia, así como el campo de viento promedio en las horas previas.

Durante la noche del lunes se observó un rápido descenso en la velocidad de viento, manteniendo la baja intensidad durante la madrugada del martes. Por otra parte, por la tarde y noche no ocurrieron cambios significativos en el sistema de circulación anticiclónica. En consecuencia el pronóstico de la calidad del aire del martes 5 de abril fue desfavorable para la dispersión, por la persistencia de la estabilidad atmosférica.

El 4 de abril sería la última vez en la que se activaría la Fase de Precontingencia, ya que derivado de la revisión de emergencia que realizó la CAME al PCAA (que entró en vigor a partir del 6 de abril de acuerdo con la Gaceta Oficial del Distrito Federal) se eliminó la Fase de Precontingencia para ozono y para PM₁₀. Como se mencionó anteriormente, en esta revisión también se ajustó el valor de la Fase I de Contingencia para ozono bajando de 180 puntos (>184 ppb) a 150 puntos (>154 ppb), es decir, la Fase de Precontingencia fue reemplazada por la Fase I. La Fase II de Contingencia para ozono disminuyó de 230 puntos (>263 ppb) a 200 puntos (>204 ppb). Esta decisión, que de acuerdo con la Coordinación Ejecutiva de la CAME, tenía la intención de aumentar la protección de la salud y contribuir a reducir los niveles de ozono, agravó la percepción social del problema, ya que lo antes era considerado como una Fase de Precontingencia, a partir del 5 de abril sería a una Fase I de Contingencia.

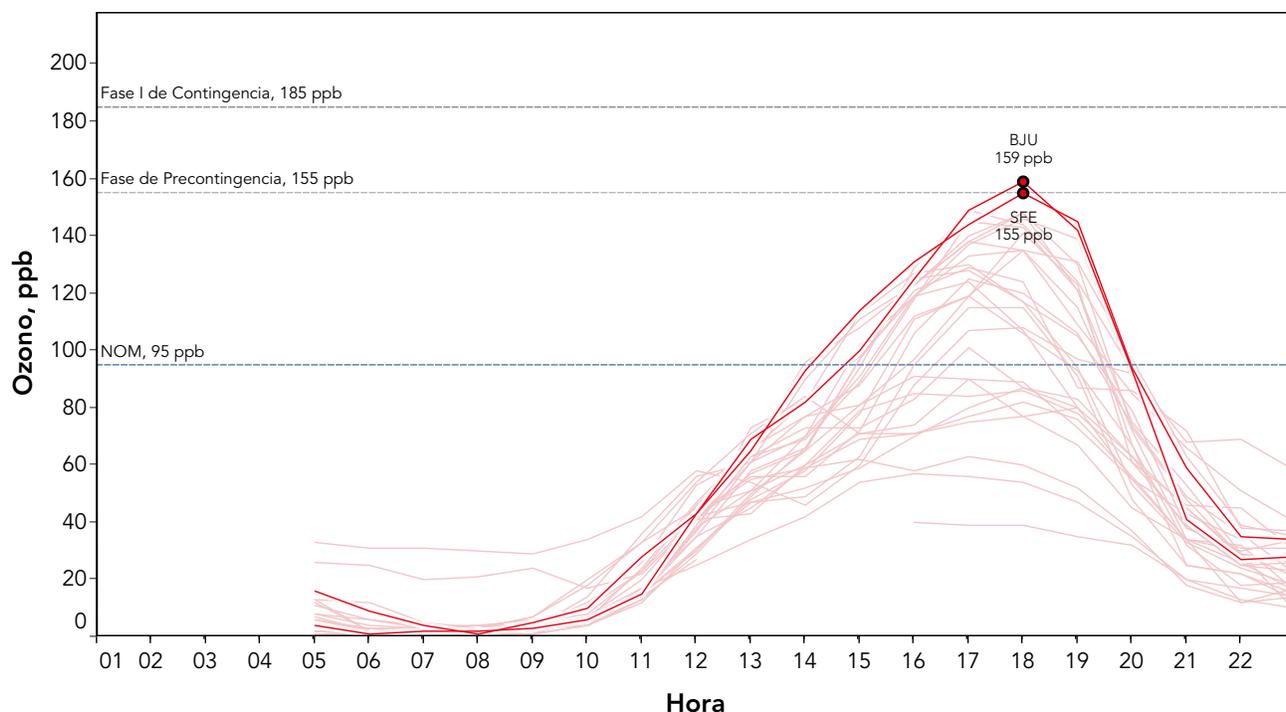


Figura 4.12. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 4 de abril. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

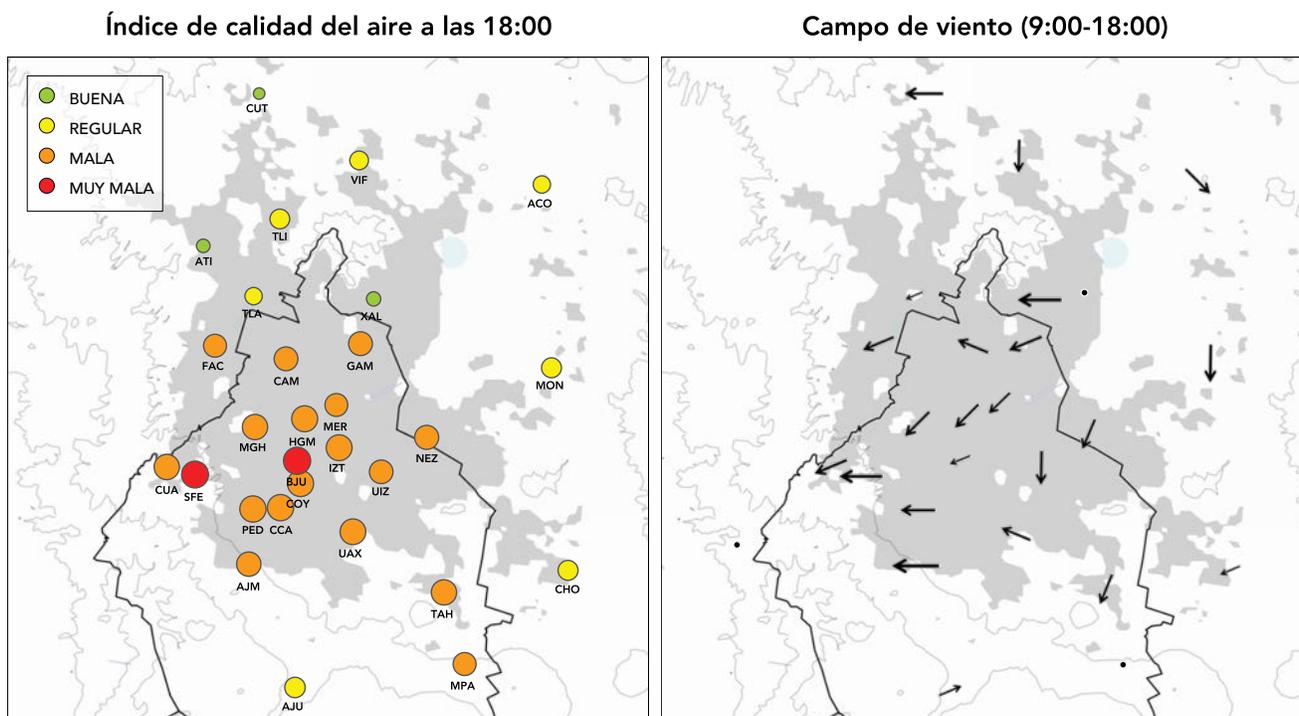


Figura 4.13. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 4 de abril. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Precontingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

Fase I: 5 de abril de 2016 17:00

Desde el lunes 4 de abril y a lo largo del martes 5 de abril, se mantuvo una circulación anticiclónica en niveles medios y bajos sobre la porción central del territorio nacional. En capas superiores (500 mb) ingresó otro sistema similar por la costa sur, propagándose durante el día hacia la meseta central. Alrededor de las 16:00 los núcleos de ambos sistemas coincidieron sobre el centro del país generando un limitado transporte de humedad, viento débil a nivel de superficie y estabilidad atmosférica. Se observó viento ligero en un espesor menor a 1 km, mientras que por encima de esta altitud predominó el viento del este. Durante la mañana se identificó una inversión térmica a 400 metros de altura con una intensidad de 0.6 °C, espesor de 340 metros y temperatura de ruptura de 21 °C. Esta inversión se disipó alrededor de las 12:30. En capas medias y bajas de la troposfera se presentó escaso contenido de humedad, así como ligero a moderado contenido de humedad en capas altas.

A nivel de superficie la presencia del flujo anticiclónico en la región media y baja de la troposfera favoreció viento débil hasta el mediodía, con un ligero incremento entre las 13:00 y las 15:00 horas, seguido de un periodo con velocidad relativamente estable hasta las 18:00 e incremento a partir de las 19:00. Durante la mañana la dirección predominante estuvo dominada por los flujos descendentes de las montañas, hasta alrededor de las 9:00, posteriormente la dirección predominante estuvo dominada por las corrientes térmicas del norte provenientes de la meseta. La presencia de un flujo débil en el paso de Chalco por la tarde, permitió un flujo continuo hacia el suroeste. El día fue cálido con cielo despejado, la temperatura promedio fue de 19.5 °C con máxima de 30 °C. En términos generales las características de dispersión de la atmósfera fueron similares a las observadas el día previo.

Debido al escaso viento durante la mañana y la estabilidad en las capas de la atmósfera cercana al suelo, la producción de ozono inició inmediatamente después de la salida del sol, con un incremento evidente a partir de las 8:00. La tasa de producción fue menor a la observada durante los eventos de marzo, sin embargo, se mantuvo de manera continua hasta las primeras horas de la

tarde en prácticamente todas las estaciones de monitoreo con concentraciones máximas en las estaciones ubicadas al suroeste. A las 14:00 la concentración de ozono superó el valor de 95 ppb (100 puntos) con un máximo de 107 ppb (110 puntos) en la estación Chalco (CHO) al suroeste. A las 15:00 la mayoría de los sitios de monitoreo ubicados en la Ciudad de México registraron una calidad del aire MALA, la estación Chalco continuaba reportando la concentración máxima con un valor de 125 ppb (126 puntos). Para las 16:00 se observó estabilidad hasta una altura de ~1500 msnj junto con una disminución en la velocidad de viento en la capa cercana al suelo, esto favoreció un rápido incremento en la concentración de ozono en las estaciones ubicadas al suroeste agravado por el transporte continuo hacia esa región desde las horas previas. A las 16:00 la concentración máxima fue de 142 ppb (140 puntos) en la estación Ajusco Medio (AJM). A las 17:00, la concentración máxima superó los 154 ppb (150 puntos) con un valor de 160 ppb (156 puntos) en Ajusco Medio (ver Figuras 4.14 y 4.15). Al superar los 150 puntos la CAME decidió activar la Fase I de Contingencia por ozono, esto a pesar de que la modificación del PCAA con los cambios en los valores de activación entraría en vigor hasta el día 6 de abril (cuando se publicaría la modificación en la Gaceta Oficial del Distrito Federal). Por lo tanto, se activó la Fase I de Contingencia Ambiental por ozono en vez de la Fase de Precontingencia. El comunicado de activación fue publicado hasta las 19:40 en ese documento se incluyeron nuevas restricciones para la circulación de "todos los vehículos con engomado color rojo y/o terminación de placa 3 y 4, así como vehículos con engomado color AZUL y/o terminación de placa 9 y 0 incluyendo permisos y matrículas sin números, además de las motocicletas con terminaciones 3, 4, 9 y 0".

La activación de la Fase I ocurrió a pesar de que el pronóstico meteorológico y de calidad del aire para el siguiente día mostraba un cambio en las condiciones meteorológicas, que sería favorables para la calidad del aire. El sistema de alta presión que afectaba el centro del país se desplazaría hacia el oeste aumentando la inestabilidad atmosférica y las condiciones de dispersión en la región. La Fase I se suspendió el miércoles 6 de abril cuando la concentración máxima de ozono fue de 130 ppb (130 puntos).

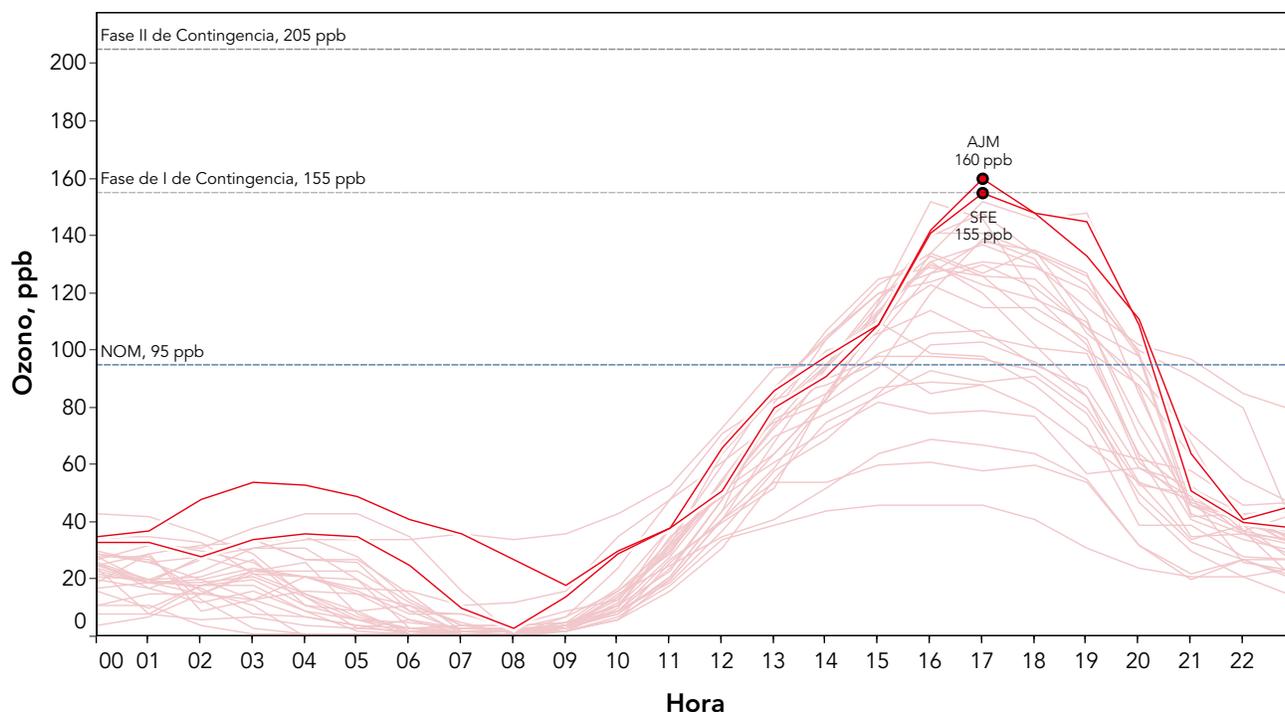


Figura 4.14. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 5 de abril. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

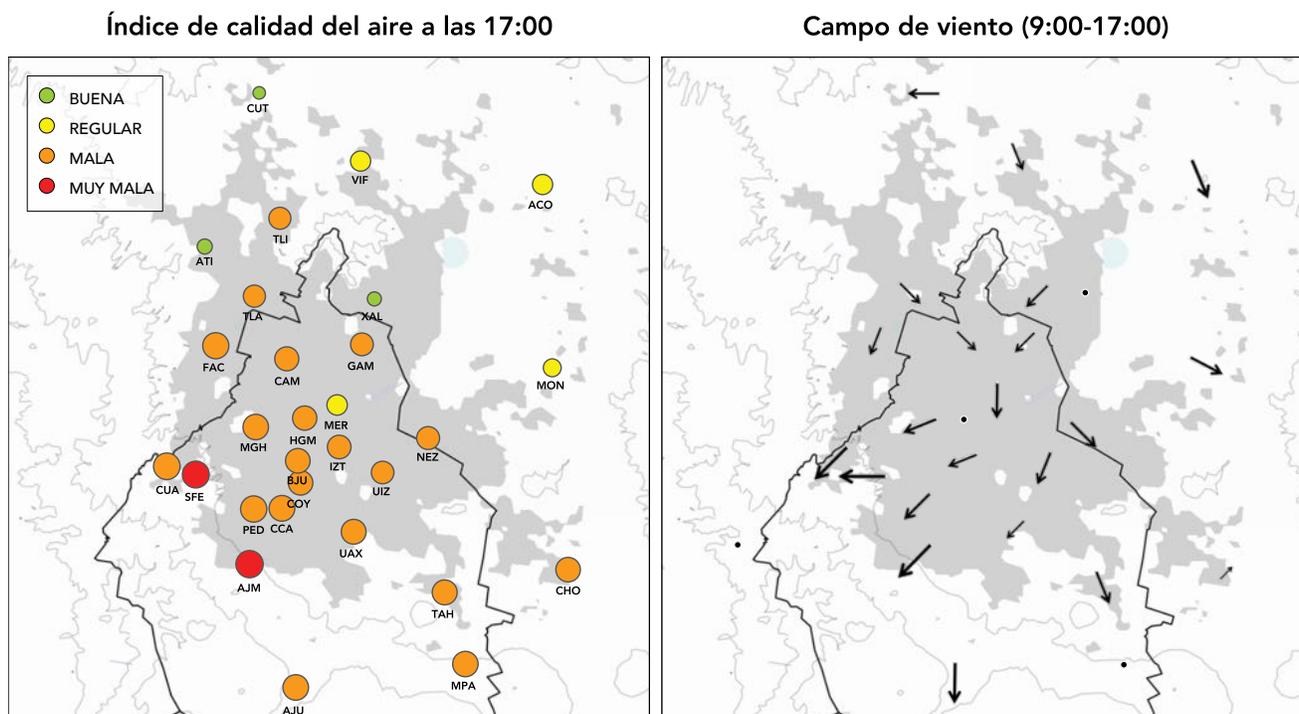


Figura 4.15. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 5 de abril. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Contingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

Fase I: 2 de mayo de 2016 15:00

Un sistema de alta presión localizado en la atmósfera media afectó la región central del país entre la noche del domingo 1 de mayo y la mañana del jueves 5 de mayo. El lunes 2 de mayo el centro del sistema se encontraba en la zona del istmo de Tehuantepec. El martes 3 de mayo este sistema se combinó con la curvatura de otro sistema anticiclónico que ingresaba al país por la parte sur, propagándose hacia la meseta central. El miércoles 4 de mayo el centro del sistema se ubicaba sobre los estados de Guerrero y Oaxaca y su efecto se extendía hasta la cuenca de México. Durante la mañana del 5 de mayo el sistema se desplazó hacia el noroeste debilitando su influencia sobre el centro del país. Durante su desarrollo el sistema mantuvo condiciones de estabilidad atmosférica, viento débil y nubosidad escasa sobre la cuenca de México.

En capas bajas de la atmósfera se observó una circulación anticiclónica. El sondeo atmosférico mostraba un escaso contenido de humedad en niveles bajos y altos de la troposfera. En el perfil de viento se observó el desarrollo de una región con viento débil con un espesor inicial de 1200 metros a las 7:00 con dirección predominante del norte, que se extendió hasta una altura de ~2000 metros por la tarde. La presencia del sistema de alta presión favoreció el predominio de los flujos térmicos a nivel de la superficie en la cuenca. Durante la mañana predominaron los flujos descendentes de las montañas, mientras que por la tarde la corriente térmica del norte proveniente de la meseta. Alrededor de las 14:00 se observó la presencia de la corriente proveniente del paso de Chalco. Adicionalmente desde el 28 de abril se observó el transporte continuo de emisiones derivadas de incendios forestales en Guerrero, Morelos, Michoacán, Jalisco y Estado de México.

La combinación de estabilidad atmosférica y radiación solar intensa favorecieron la actividad fotoquímica durante la mañana y las primeras horas de la tarde. A partir de las 9:00 se observó un incremento continuo y consistente en la concentración de ozono en la mayoría de las estaciones de monitoreo. A las 13:00 la calidad del aire era MALA en la mayoría de las estaciones de monitoreo. La estabilidad atmosférica, el lento transporte de las masas de aire hacia el suroeste y la dispersión limitada por las montañas provocaron

que a las 15:00 se registraran concentraciones mayores a 154 ppb (150 puntos) en tres estaciones de monitoreo: Cuajimalpa (CUA), Santa Fe (SFE) y Benito Juárez (BJU). La concentración máxima se observó en la estación Benito Juárez con un valor de 165 ppb (161 puntos). El reforzamiento de la corriente de viento proveniente del paso de Chalco generó una inversión de la dirección de viento, impulsando las masas de aire hacia el noroeste y luego al norte. Esto influyó para que a las 16:00 se registraran concentraciones mayores al umbral de la Fase I en las estaciones Gustavo A. Madero (GAM), Tlalnepantla (TLA), Atizapán (ATI) y Tultitlán (TLI), con un valor máximo de 167 ppb (163 puntos) en GAM. A las 17:00 la masa de aire se desplazó al norte en donde se registraron concentraciones mayores a 150 puntos en La Presa (LPR), San Agustín (SAG), Los Laureles (LLA), GAM, TLA, TLI, con un máximo de 172 ppb (168 puntos) en GAM. El evento se extendió hasta las 18:00 cuando la estación TLA se mantenía por encima de los 150 puntos. La CAME activó la Fase I de Contingencia por ozono a las 15:00. En la Figura 4.16 se muestra la variación horaria de la concentración de ozono en las diferentes estaciones de monitoreo destacando los perfiles de las estaciones BJU y GAM. En la Figura 4.18 se muestra la distribución espacial del índice de ozono y el campo de vientos entre las 15:00 y las 18:00.

La persistencia del sistema de alta presión durante tres días consecutivos provocó que el episodio de contaminación se extendiera hasta el 5 de mayo. La subsidencia afectó el desarrollo de la capa límite atmosférica, disminuyendo la altura de la capa de mezclado. El 4 de mayo, mientras el centro del sistema se desplazaba al noroeste sobre los estados de Guerrero y Michoacán. En niveles bajos de la troposfera se desarrolló una zona de convergencia sobre la cuenca, generando fuerte estabilidad en las primeras horas de la tarde. Este día la altura de mezclado fue menor que los dos días previos. En consecuencia, las concentraciones fueron mayores, la estación de Ajusco Medio (AJM) registró un valor máximo de 196 ppb (192 puntos). En la Figura 4.17 se indican las concentraciones horarias de ozono entre el 30 de abril y el 5 de mayo.

A medida que el sistema se desplazaba hacia el noroeste disminuyó su influencia sobre el centro del país, lo que permitió que la CAME suspendiera la Fase I el jueves 5 de mayo.

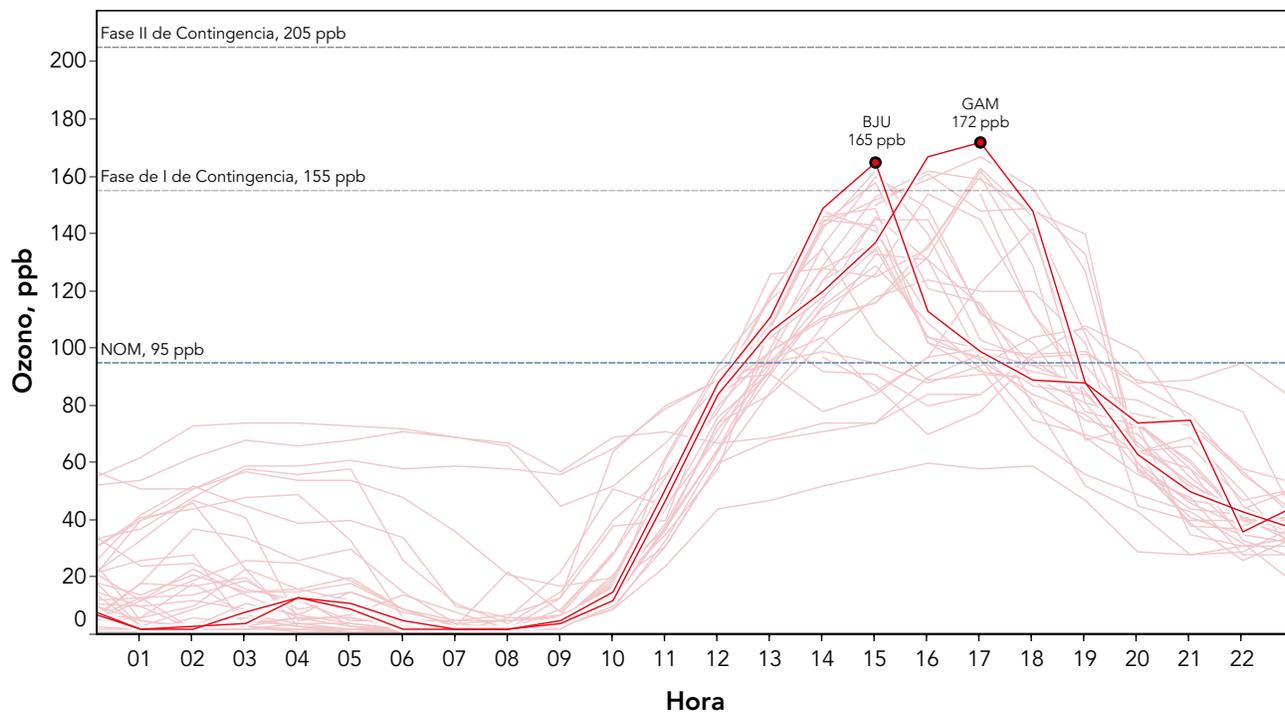


Figura 4.16. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 2 de mayo. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

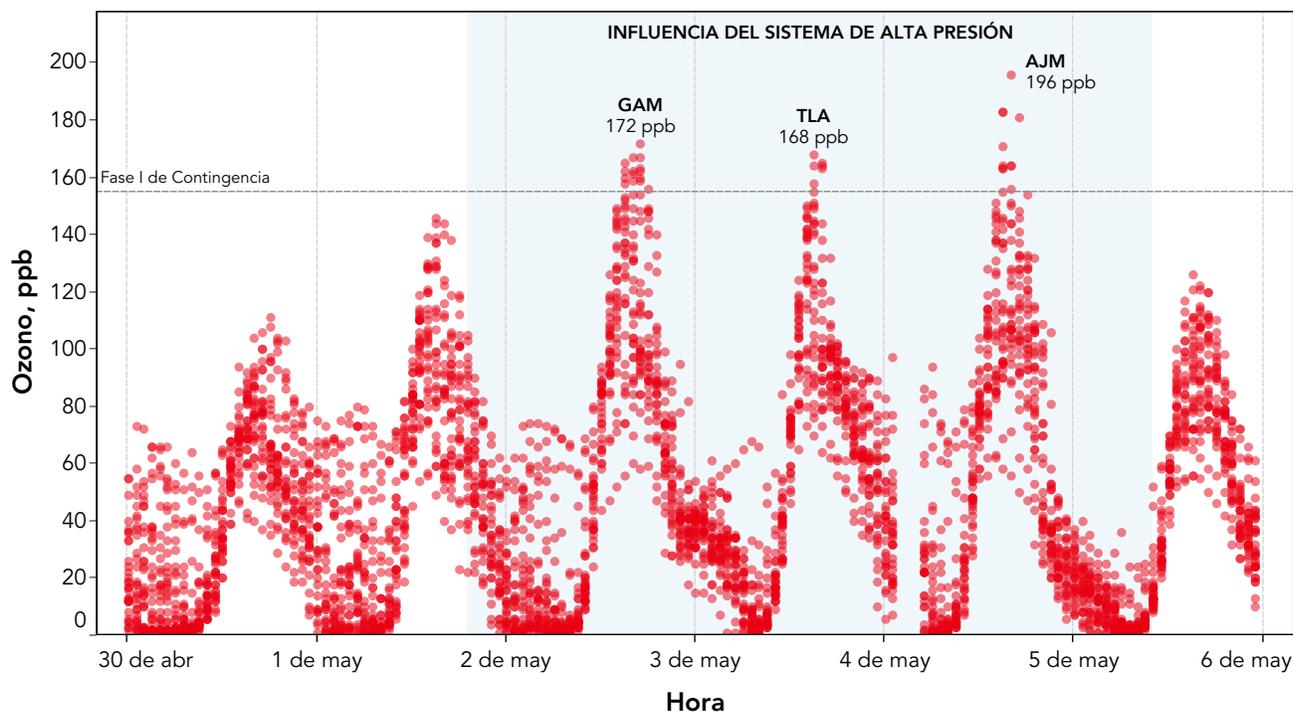


Figura 4.17. Comportamiento de las concentraciones de ozono entre el 30 de abril y el 6 de mayo de 2016. Los puntos rojos corresponden a los promedios horarios en las diferentes estaciones de monitoreo, en la figura se destacan las concentraciones máximas de cada día y el periodo bajo la influencia del sistema de alta presión.

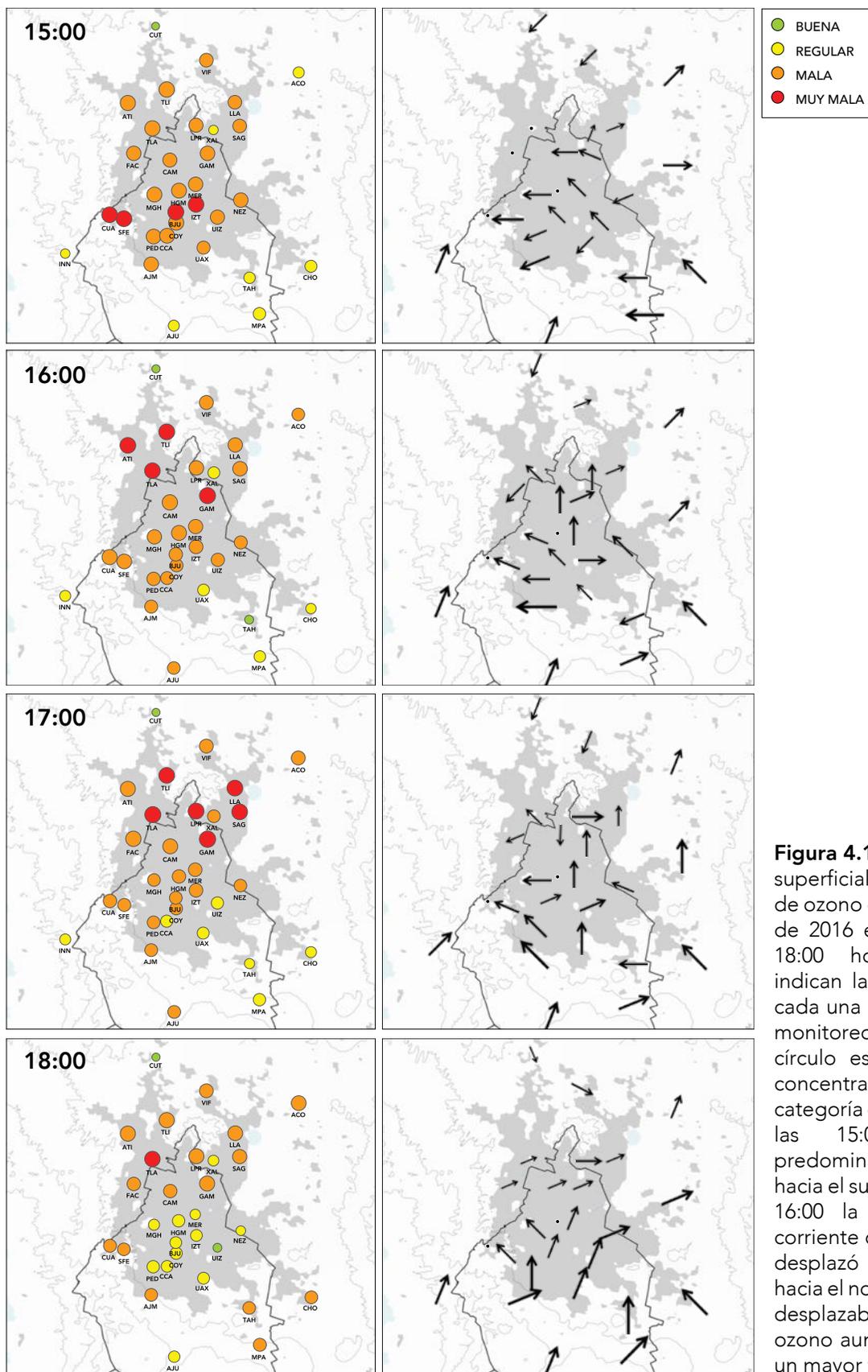


Figura 4.18. Efecto del viento superficial en la concentración de ozono durante el 2 de mayo de 2016 entre las 15:00 y las 18:00 horas. Los círculos indican la calidad del aire en cada una de las estaciones de monitoreo, el tamaño del círculo es proporcional a su concentración, el color indica la categoría de calidad del aire. A las 15:00 la dirección predominante del viento fue hacia el suroeste, a partir de las 16:00 la presencia de una corriente de viento del sureste desplazó las masas de aire hacia el norte. A medida que se desplazaba los niveles de ozono aumentaban al permitir un mayor tiempo de reacción.

Fase I: 14 de mayo de 2016 17:00

La mañana del sábado 14 de mayo en niveles bajos de la troposfera se observó un sistema de alta presión frente a las costas de Nayarit y Sinaloa, la interacción de este sistema con otro ubicado sobre el estado de Tamaulipas, generó una circulación anticiclónica que afectaba las regiones del centro y norte del territorio nacional. En niveles medios, otro sistema anticiclónico sobre Jalisco y Nayarit afectaba a los estados del centro y sur. La combinación de estos sistemas provocó una condición de estabilidad en la atmósfera baja, así como escaso transporte de humedad y cielo parcialmente nublado. En la cuenca de México se registró una inversión térmica a 4282 metros de altura, con una intensidad de 2 °C y espesor de 135 m. En niveles bajos de la troposfera predominó viento débil del noroeste y norte, en niveles superiores predominó una corriente moderada a fuerte del oeste. El perfil vertical del viento mostraba una capa con viento débil por debajo de los 1250 msns durante la mañana, por la tarde entre las 17:00 y las 20:00 horas se observó una importante disminución en la velocidad del viento en la capa cercana a la superficie, que alcanzó una altura cercana a los ~3000 msns.

A nivel de superficie el campo de viento estuvo dominado por los flujos descendentes débiles provenientes de la zona montañosa, por la mañana. A partir de las 10:00 predominó un flujo del norte proveniente de la meseta con velocidades promedio de ~2 m/s. No se presentó viento del paso de Chalco, pero a partir de las 19:00 un flujo proveniente del sur invirtió la dirección del viento hacia el norte, provocando un aumento en la intensidad de viento. La temperatura promedio en la ciudad fue de 18 °C con un valor máximo de 26 °C a las 14:00. Se observó la presencia de nubosidad por la tarde.

Debido a que las actividades en día sábado inician más tarde en comparación con los patrones habituales de lunes a viernes. Las concentraciones de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono durante la mañana fueron significativamente menores a las observadas durante la semana, con un pequeño incremento alrededor de las 15:00. Lo anterior pudo tener una influencia directa en la producción de ozono por el efecto de *fin de semana*. A partir de las 9:00 se observó un

incremento continuo en la concentración de ozono en todas las estaciones de monitoreo (ver Figura 4.19). Debido al continuo desplazamiento del viento hacia el sur, a partir de las 14:00 las estaciones ubicadas al centro y sur de la Ciudad de México registraron un mayor incremento en la concentración de ozono, en comparación con las estaciones ubicadas al norte en la zona conurbada del Estado de México. A las 15:00 la mayoría de las estaciones de monitoreo ubicadas al sureste de la zona metropolitana registraban concentraciones mayores a 95 ppb (100 puntos). A partir de las 16:00 y hasta las 19:00 horas casi todas las estaciones ubicadas en la Ciudad de México reportaron una MALA calidad del aire. Después de las 19:00 disminuyó el número de estaciones que reportaban una condición MALA, sin embargo, el evento se extendió hasta las 23:00 cuando la estación Milpa Alta (MPA) registró una concentración máxima de 99 ppb (103 puntos). A las 17:00 se presentó la concentración máxima del día con un valor de 161 ppb (157 puntos), en la estación Tláhuac (TAH), ubicada en la delegación del mismo nombre, al sureste de la Ciudad de México (ver Figura 4.20). A las 18:00 la concentración máxima aún superaba el umbral de activación de la Fase I con un máximo de 160 ppb (156 puntos). A las 18:50 la CAME emitió el comunicado de activación de la Fase I de Contingencia Ambiental por ozono a partir de la concentración máxima registrada a las 17:00, en este comunicado se informó sobre restricciones a la circulación para el domingo 15 de mayo que aplicó a todos los vehículos con engomado rojo o terminación de placa 3 y 4, incluyendo motocicletas y transporte de carga con placa federal y local.

En las primeras horas del domingo 15 de mayo el sistema de alta presión que afectó la región central perdió intensidad. En capas bajas de la atmósfera se observó una corriente de aire del oeste impulsada por una circulación anticiclónica sobre el centro y norte del país. El perfil de viento de la tarde indicaba viento moderado del sur en la capa adyacente a la superficie. A nivel del suelo se observó una corriente de viento proveniente del sur, con una intensidad creciente entre las 8:00 y las 18:00 horas. Esta condición meteorológica contribuyó a mantener niveles moderados de contaminación y permitió la suspensión de la Fase I de Contingencia.

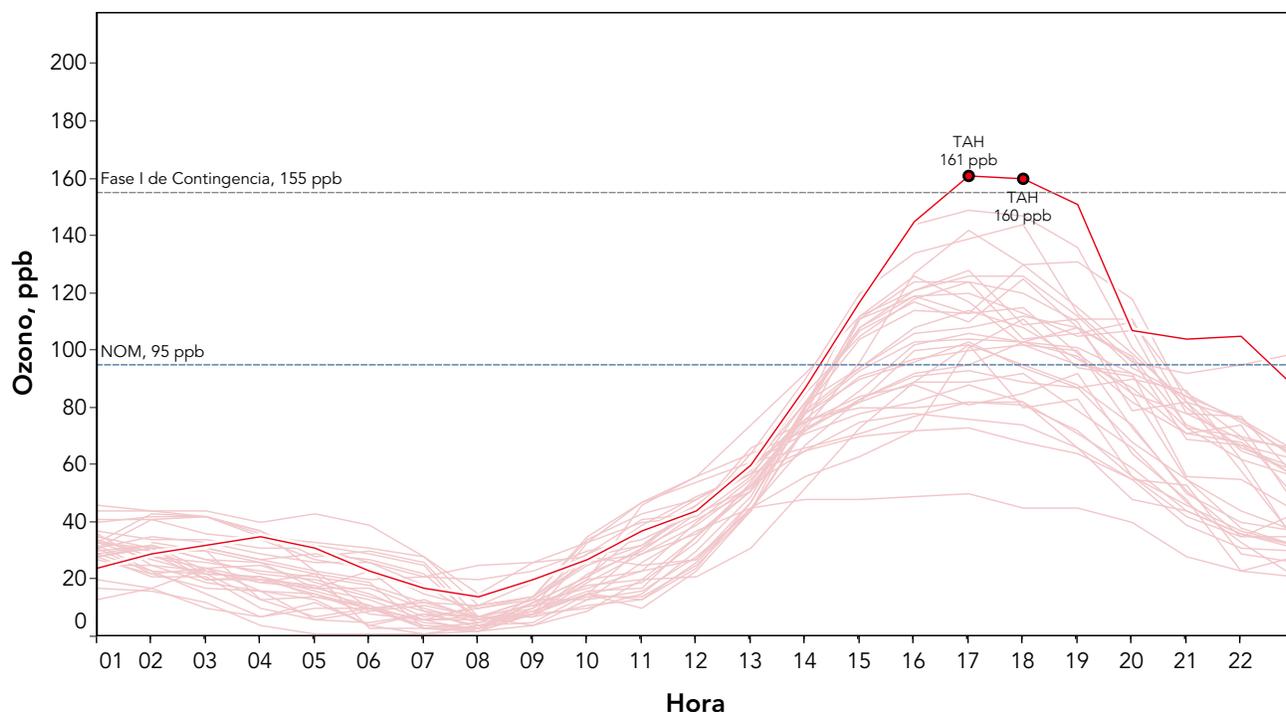


Figura 4.19. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 14 de mayo. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

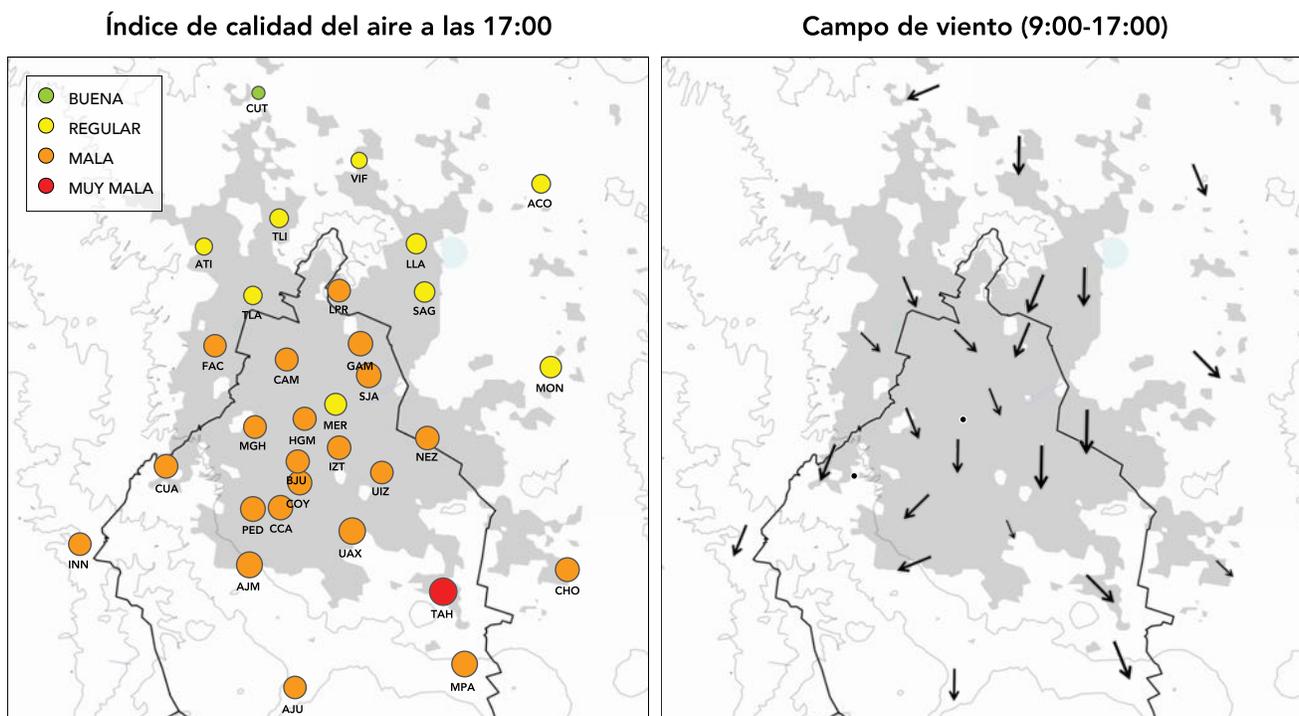


Figura 4.20. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 14 de mayo. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Contingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

Fase I: 20 de mayo de 2016 15:00

Sobre las regiones centro y sur del territorio nacional se observó una circulación anticiclónica en las capas troposféricas inferiores, mientras que en capas medias y altas, este sistema se presentó como una curvatura anticiclónica que ingresaba por el oeste, propagándose hacia la meseta central. Como resultado de estos sistemas se observó estabilidad atmosférica, viento de intensidad débil y cielo despejado. Durante el transcurso del día se observó un desplazamiento de la circulación anticiclónica hacia el norte, junto con una disminución en la intensidad del viento en capas bajas de la atmósfera, aumentando la condición de estabilidad sobre la cuenca durante las primeras horas de la tarde. El perfil vertical mostraba una atmósfera estratificada con viento débil a moderado en las capas por debajo de los ~2000 msns en la mañana y las primeras horas de la tarde. Entre las 12:00 y las 14:00 horas se observó disminución de la estabilidad, además de viento con dirección al suroeste por debajo de los 1000 msns. Entre las 15:00 y las 16:00 horas disminuyó la velocidad del viento en los primeros 800 msns con dirección hacia el noroeste. Entre las 17:00 y las 18:00 se observó una fuerte reducción en la velocidad del viento hasta una altura de 300 msns. Después de las 20:00 aumentó la velocidad del viento en toda la capa superficial.

El campo de viento en la superficie indicaba la presencia de un flujo de viento débil proveniente del sur durante la madrugada y las primeras horas de la mañana, impulsado por un sistema anticiclónico en las capas bajas de la atmósfera con centro sobre el estado de Guerrero. El desplazamiento de este sistema hacia el noroeste permitió que dominara el flujo térmico del norte proveniente de la meseta invirtiendo la dirección del viento hacia el sur entre las 9:00 y las 13:00 horas con un ligero aumento en su velocidad. Después de las 14:00, la corriente del sureste proveniente del paso de Chalco generó un cambio gradual en la dirección predominante del viento agregando una componente hacia el oeste. A partir de las 17:00 se observó un cambio en la dirección impulsado por el reforzamiento de un flujo proveniente del sur, además de un incremento importante en la velocidad del viento. Este comportamiento de los vientos determinó la distribu-

ción espacial del ozono durante la tarde, el cual se caracterizó por concentraciones máximas en el suroeste en las primeras horas, que fueron desplazándose gradualmente hacia el noreste de la ciudad, extendiendo espacial y temporalmente el evento como se muestra en la Figura 4.23.

En la Figura 4.21 se muestra el perfil de las concentraciones horarias de ozono en las estaciones de monitoreo. Debido a las condiciones de estabilidad atmosférica e intensa radiación se produjo un rápido incremento en la concentración de ozono entre las 9:00 y las 14:00 horas, a partir de las 13:00 varias estaciones reportaron una calidad del aire MALA. Para las 15:00, la mayoría de las estaciones mostraban concentraciones mayores a 95 ppb (100 puntos) con máximos en los sitios ubicados al suroeste y oeste. En las estaciones Camarones (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Santa Fe (SFE) y Cuajimalpa (CUA) los valores de los promedios horarios superaron el umbral de la Fase I de 154 ppb (150 puntos) con un máximo de 182 ppb (178 puntos) en SFE (ver Figura 4.20). La CAME activó la Fase I a las 15:40. A las 16:00 se mantuvo el incremento de ozono. Con el cambio en la dirección de viento algunas de las estaciones ubicadas al noroeste experimentaron incrementos en la concentración de ozono, para esa hora las estaciones Hospital General de México (HGM) y FES Acatlán (FAC) se agregaron al listado con sitios con concentraciones mayores a 154 ppb, en la estación CUA la concentración máxima fue de 192 ppb (188 puntos). A las 17:00 todas las estaciones ubicadas dentro del área urbana reportaban una MALA calidad del aire, en las estaciones FAC, CAM y CUA las concentraciones máximas de ozono mantenían valores mayores al umbral de la Fase I. En la siguiente hora, con el impulso de la corriente del sureste se reforzó el desplazamiento de la masa de aire contaminado hacia el noreste, lo cual fue evidente en la estación Tlalnepantla (TLA) en donde la concentración se incrementó hasta alcanzar un máximo de 162 ppb (158 puntos). Después de las 18:00, con la reducción de la radiación solar y el aumento en la inestabilidad atmosférica la concentración de ozono decreció rápidamente. El sábado 21 de mayo disminuyó la influencia del sistema de alta presión, mejorando la capacidad dispersiva en la cuenca, la concentración máxima de ozono no superó los 150 puntos lo que permitió la suspensión de la Fase I.

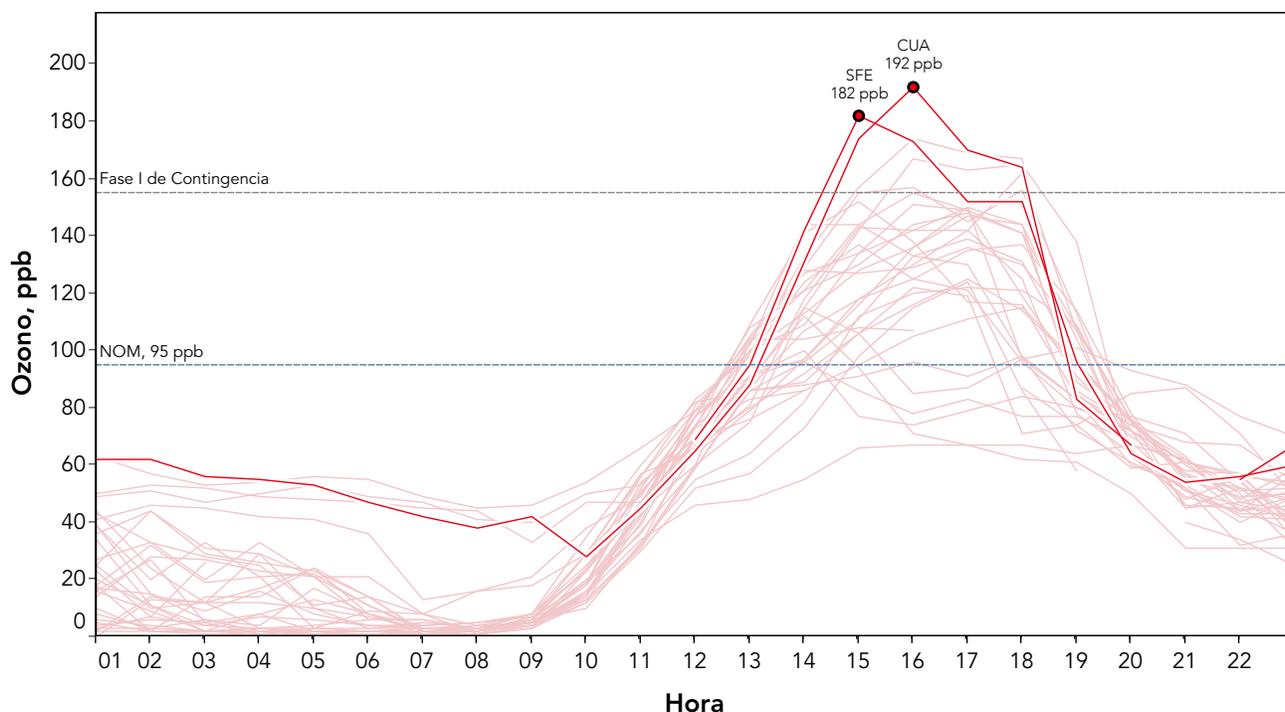


Figura 4.21. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 20 de mayo. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

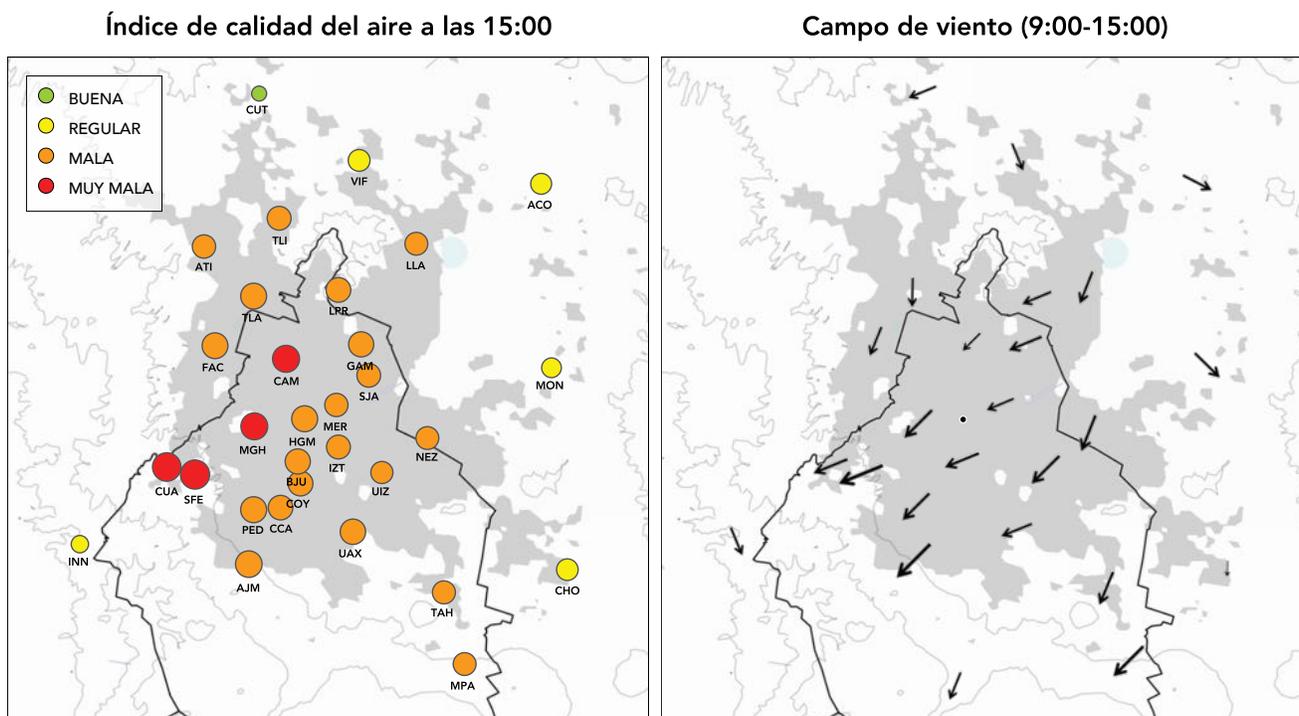


Figura 4.22. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 20 de mayo. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Contingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

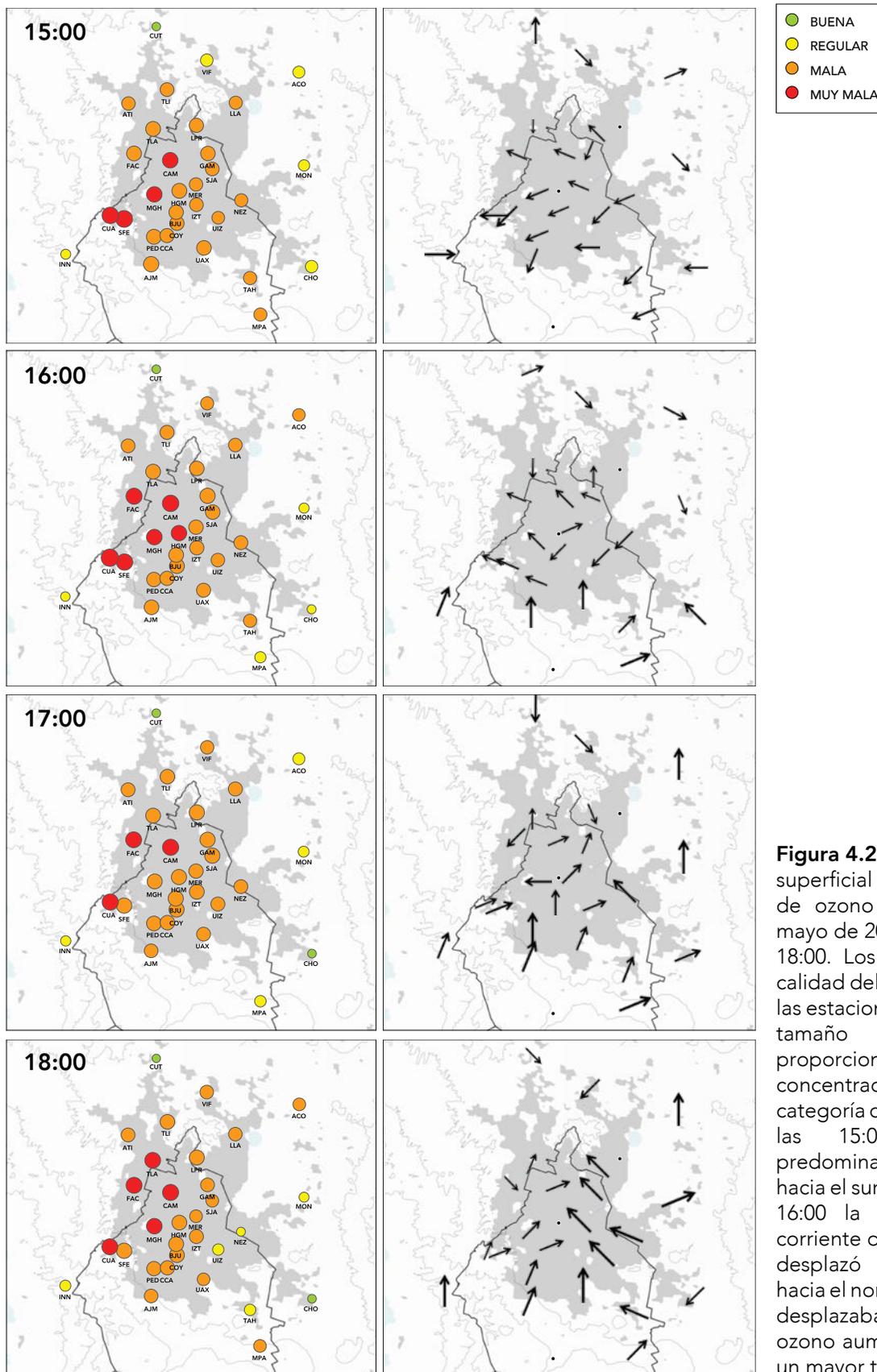


Figura 4.23. Efecto del viento superficial en la concentración de ozono durante el 20 de mayo de 2016 entre las 15:00 y 18:00. Los círculos indican la calidad del aire en cada una de las estaciones de monitoreo, el tamaño del círculo es proporcional a su concentración, el color indica la categoría de calidad del aire. A las 15:00 la dirección predominante del viento fue hacia el suroeste, a partir de las 16:00 la presencia de una corriente de viento del sureste desplazó las masas de aire hacia el norte. A medida que se desplazaba los niveles de ozono aumentaban al permitir un mayor tiempo de reacción.

Fase I: 24 de mayo de 2016 15:00

Desde el 22 de mayo la región central del país estuvo bajo la influencia de una circulación anticiclónica en interacción con un sistema de alta presión localizado al suroeste del país que se propagaba hacia la meseta central. Esto generó condiciones de estabilidad atmosférica y viento débil a nivel de superficie, con un escaso transporte de humedad desde el océano Pacífico. El martes 24 de mayo el centro del sistema se encontraba directamente sobre la cuenca de México, provocando estabilidad en niveles inferiores de la troposfera. Por la mañana, el radiosondeo del Servicio Meteorológico Nacional indicaba una inversión térmica a 340 m de altura con una intensidad 0.2 °C y un espesor de 265 metros, con temperatura de ruptura de 22 °C, la cual se disipó antes del mediodía. Se observó también una capa de viento débil por debajo de los 800 msns. Por la tarde se presentó un aumento en la inestabilidad atmosférica y en la velocidad de viento, tanto en superficie como en altura. El día fue cálido con una temperatura promedio de 20 °C y con nublados y lluvia por la tarde. La presencia del sistema de alta

presión favoreció que los flujos térmicos dominaran el viento de superficie.

En la Figura 4.24 se muestra el perfil horario de las concentraciones de ozono. La presencia de una corriente desde el paso de Chalco con dirección hacia el noroeste, después de las 14:00, influyó para que las concentraciones máximas se observaran en las estaciones de monitoreo ubicadas al centro y noreste de la Ciudad de México. A las 15:00 la concentración máxima se registró en la estación Camarones (CAM) con un valor de 155 ppb (151 puntos), mayor al umbral de la Fase I de Contingencia (ver Figura 4.25). A las 15:30 la CAME emitió el comunicado de activación de la Fase I. El aumento en la actividad convectiva de la atmósfera y la presencia de lluvias aisladas por la tarde, evitaron un incremento mayor en las concentraciones de ozono. El aumento de la velocidad del viento, la precipitación pluvial y la inestabilidad de la atmósfera baja, permitieron una disminución de la concentración de ozono en la mayoría de las estaciones de monitoreo. Ante un pronóstico favorable de calidad del aire para el miércoles 25 de mayo la CAME decidió suspender ese mismo día la Fase I a las 20:54.

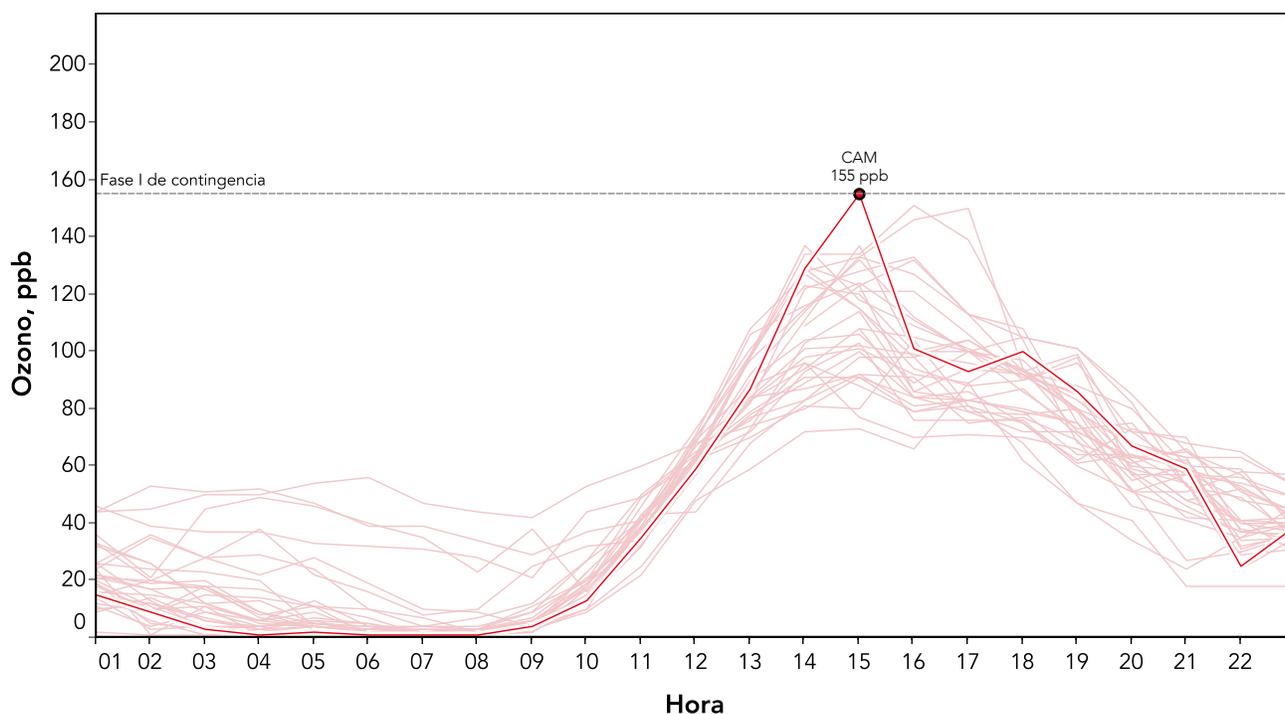


Figura 4.24. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 24 de mayo. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

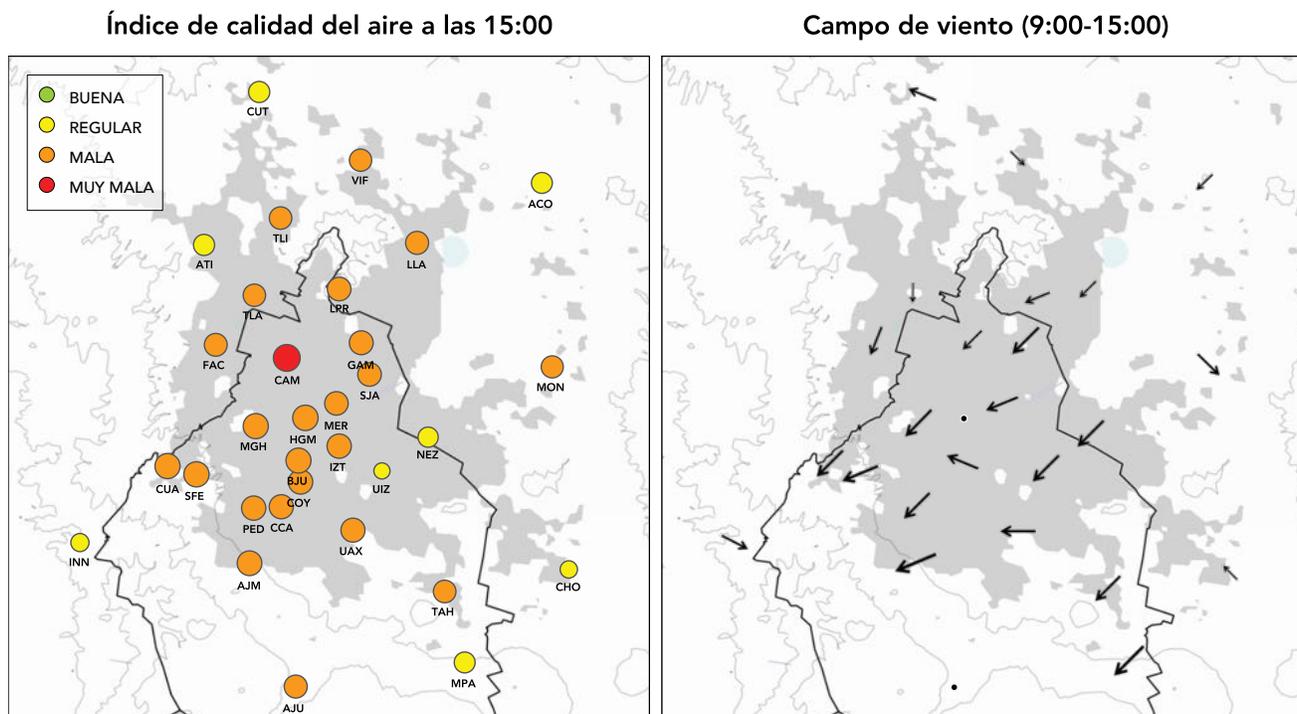


Figura 4.25. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 24 de mayo. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Contingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

Fase I: 27 de mayo de 2016 15:00

En capas medias de la atmósfera se mantenía el sistema anticiclónico sobre la región central del país, provocando estabilidad y escasa nubosidad sobre la Ciudad de México. El perfil de temperatura identificó una zona de subsidencia por debajo de los 1500 m de altitud, la cual se disipó después de las 10:00. El perfil de viento indicaba una región con viento débil por debajo de los 800 m que permaneció desde la mañana hasta pasado el mediodía. Después de las 15:00 se observó una fuerte corriente de viento proveniente del noroeste, a lo largo de toda la estructura de la atmósfera baja con una influencia importante en los vientos de superficie. En alturas mayores se presentó viento moderado proveniente del noroeste, impulsado por el sistema anticiclónico.

A nivel de superficie se identificó un flujo débil de viento desde el sur en la mañana. Entre las 11:00 y las 13:00 horas se observó un cambio gradual en la dirección del viento hacia el suroeste, impulsado por una corriente débil a moderada del noreste. Entre las 14:00 y las 16:00

horas el viento predominante fue hacia el sur. El viento débil durante la mañana favoreció el transporte de los contaminantes precursores de ozono hacia el norte de la ciudad, con el cambio en la dirección se observó el desarrollo de un área de convergencia en el noreste de la Ciudad de México entre las 12:00 y las 14:00 horas que provocó un estancamiento temporal en esta región. La intensa radiación, favorecida por el cielo despejado, contribuyó a la actividad fotoquímica. El ozono reportó incrementos importantes en las estaciones San Juan de Aragón (SJA) y Gustavo A. Madero (GAM) con concentraciones de 166 ppb (162 puntos) y 169 ppb (165 puntos) a las 15:00, respectivamente (ver Figuras 4.26 y 4.27). La CAME activó la Fase I de Contingencia con la publicación del comunicado a las 15:30. El incremento en la velocidad del viento y la presencia de lluvia vespertina contribuyeron a una rápida disminución de la contaminación. Durante la noche el sistema anticiclónico se desplazó hacia el suroeste favoreciendo la entrada de una corriente de aire desde el oeste, permitiendo que el sábado 28 de mayo la CAME suspendiera la Fase I.

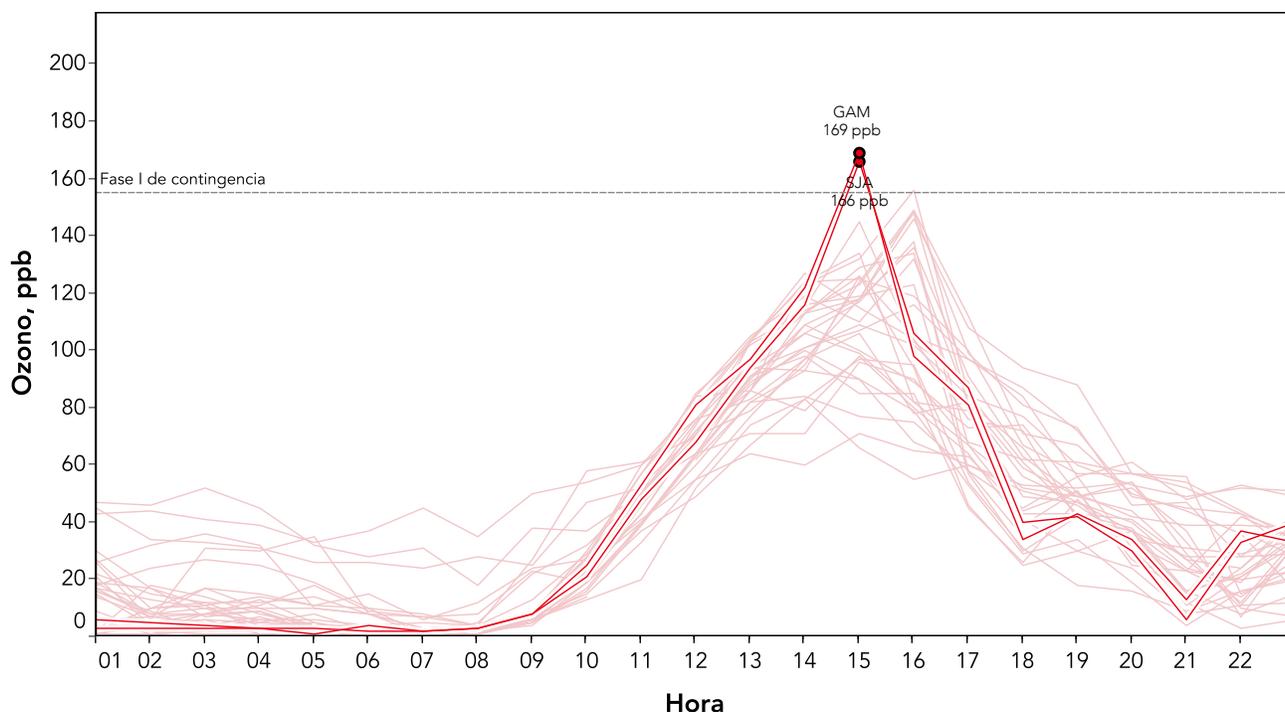


Figura 4.26. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 27 de mayo. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

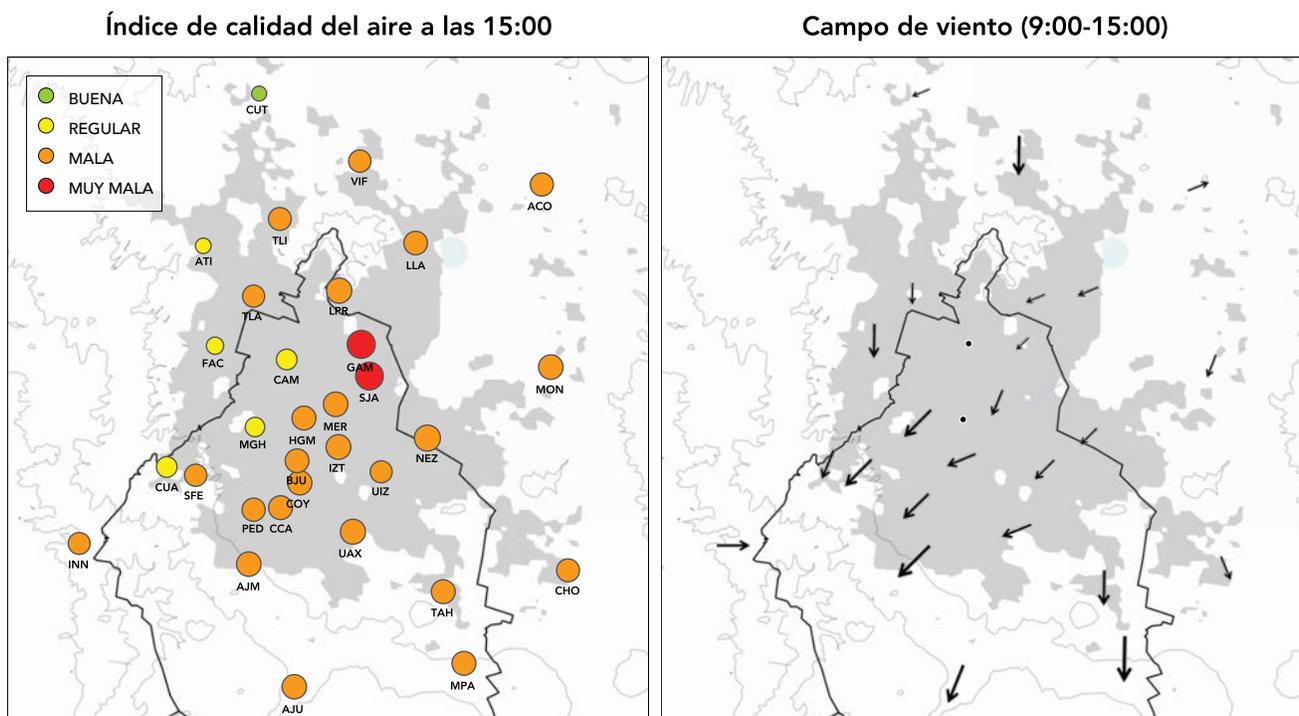


Figura 4.27. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 27 de mayo. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Contingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

Fase I: 31 de mayo de 2016 15:00

El martes 31 de mayo sobre las regiones centro y sur del territorio predominaba una circulación anticiclónica en las capas más cercanas a la superficie, en niveles medios un sistema anticiclónico se posicionaba sobre los estados de Michoacán y Jalisco. Esta combinación de sistemas meteorológicos favoreció estabilidad atmosférica, transporte de humedad ligero a moderado y viento débil en superficie, además de cielo despejado con radiación solar intensa durante la mañana, así como cielo parcialmente nublado a nublado por la tarde. El sondeo indicaba viento débil por debajo de los 800 msns por la mañana, con un incremento gradual en la intensidad a medida que aumentaba la actividad convectiva.

El campo de viento de superficie estuvo determinado por los flujos de montaña en la noche y las primeras horas de la mañana, y por la corriente del norte proveniente de la meseta en el día. A partir de las 9:00 la dirección predominante del viento fue hacia el suroeste con una intensidad débil por la mañana y moderada por la tarde, indi-

cando el arrastre lento pero continuo de las masas de aire. Entre las 8:00 y 16:00 se observó un incremento constante en las concentraciones de ozono en la mayoría de las estaciones de monitoreo (ver Figura 4.28), hasta alcanzar un valor de 159 ppb (155 puntos) en la estación Miguel Hidalgo (MGH) a las 16:00 (Figura 4.29), el movimiento impulsado por el viento provocó que a las 17:00 la concentración máxima se trasladara a la estación Santa Fe (SFE), en donde se registró el valor máximo del día con 165 ppb (161 puntos). La presencia de nublados y lluvia convectiva por la tarde evitó que los niveles de ozono alcancen mayores concentraciones. La CAME emitió el comunicado de activación de la Fase I de Contingencia a las 16:10.

El miércoles 1 de junio el sistema de alta presión se desplazaría hacia el noreste, internándose en el océano Pacífico y disminuyendo su efecto sobre el centro del país, permitiendo una mayor entrada de humedad hacia la cuenca desde el Golfo de México, además del aumento en la capacidad dispersiva de la atmósfera. Con este pronóstico, la CAME decidió suspender ese mismo día la Fase I de Contingencia a las 18:00.

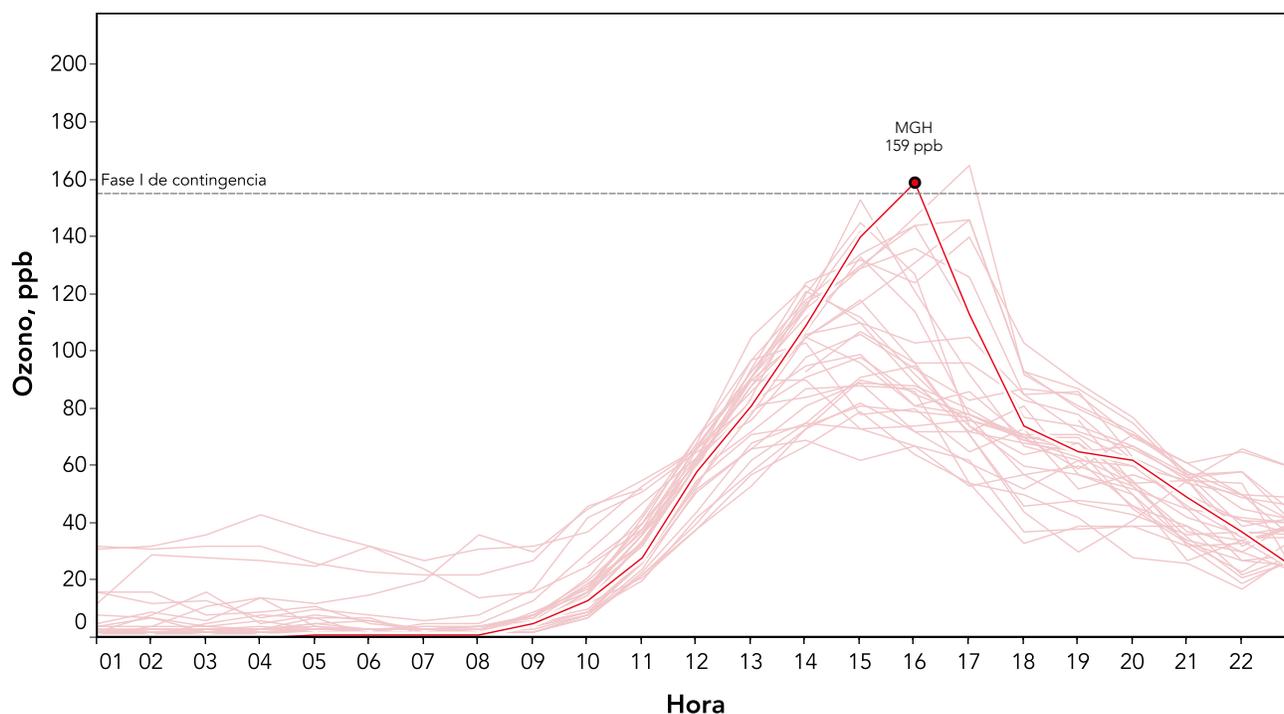


Figura 4.28. Variación horaria de las concentración de ozono en las estaciones de monitoreo el 31 de mayo. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

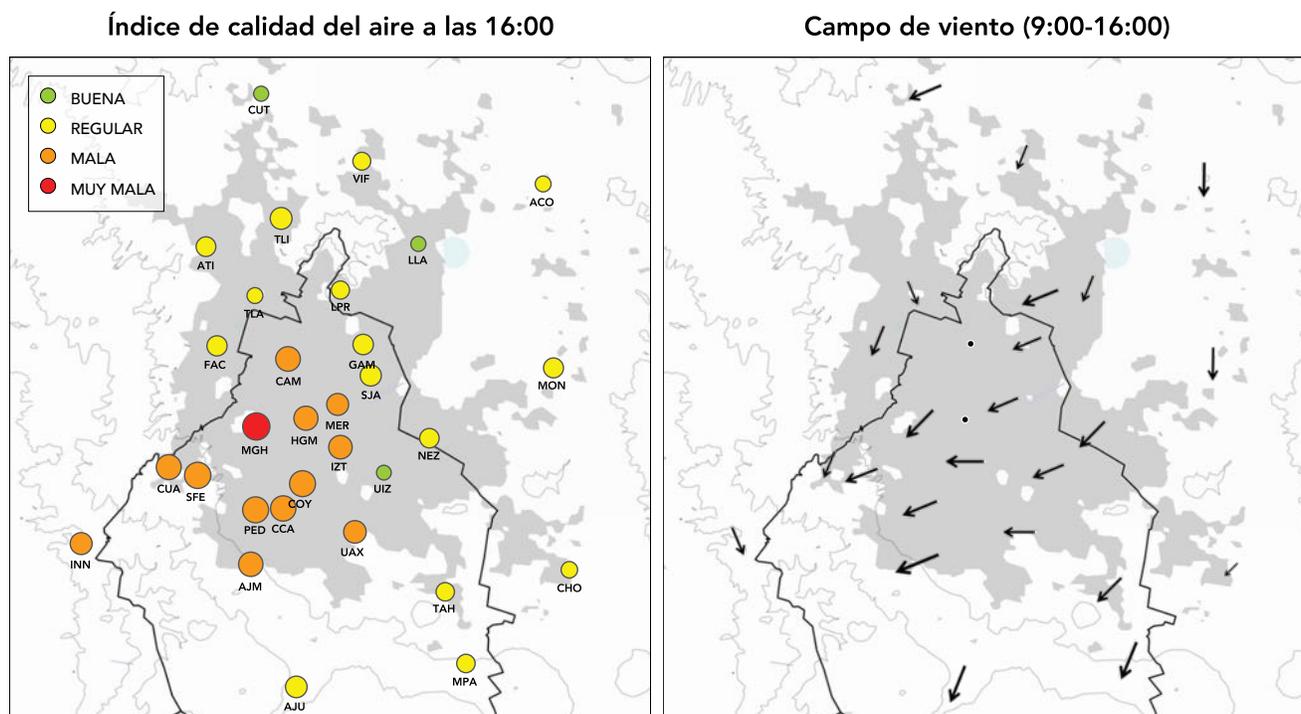


Figura 4.29. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 31 de mayo. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Contingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

Fase I: 8 de julio de 2016 17:00

La mañana del viernes 8 de julio se observó una circulación anticiclónica en niveles bajos de la troposfera que ingresaba al país por la costa oriental y se extendía hasta el estado de Jalisco. Por otro lado, en capas medias se detectó una zona de interacción sobre el centro del país, formada por una circulación anticiclónica que se propagaba por la porción noreste del territorio nacional y una circulación ciclónica que procedía de la región sur. Estos sistemas provocaron estabilidad atmosférica moderada a nivel de superficie, con viento débil y moderado transporte de humedad, durante la mañana. El sondeo mostraba viento débil por debajo de los 1000 msns proveniente del sur de la cuenca que permaneció hasta el mediodía, mientras que por la tarde, con el aumento en la actividad convectiva, se observó un incremento en la inestabilidad atmosférica y en la velocidad de viento con dirección predominante del noreste. En alturas superiores se observó un flujo de viento moderado asociado a una corriente

proveniente del Golfo de México. En la mañana se observó estabilidad atmosférica moderada hasta una altitud de ~2000 msns. La temperatura promedio fue de 18 °C, con cielo despejado en la mañana a nublado por la tarde.

La Figura 4.30 muestra la variación diurna del ozono el 8 de julio, el incremento en la concentración de ozono inició a partir de las 8:00 hasta alcanzar el máximo a las 17:00, pero con una tasa de incremento menor que la observada en otros eventos de contaminación. A las 17:00 las concentraciones máximas de ozono tuvieron valores de 156 ppb (152 puntos) en Santa Fe (SFE) y 155 ppb (151 puntos) en Cuajimalpa (CUA), ambas localizadas al suroeste de la Ciudad de México (Figura 4.31). La CAME activó la Fase I de Contingencia en su comunicado de las 17:30. El sábado 8 de julio se observó un incremento en la velocidad de viento de superficie asociada con una corriente sinóptica del este, favorable para la calidad del aire. Los niveles de ozono no superaron los 100 puntos en la escala del índice, por lo tanto la CAME decidió suspender la Fase I de Contingencia.

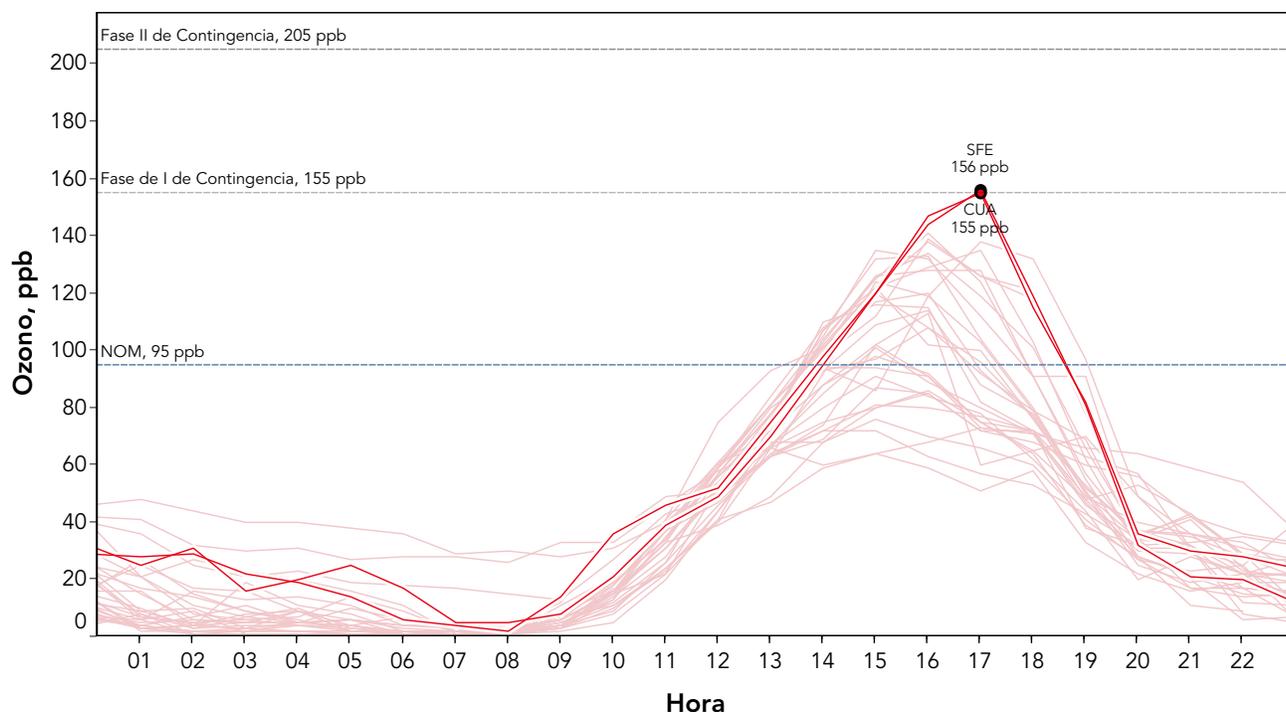


Figura 4.30. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 8 de julio. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

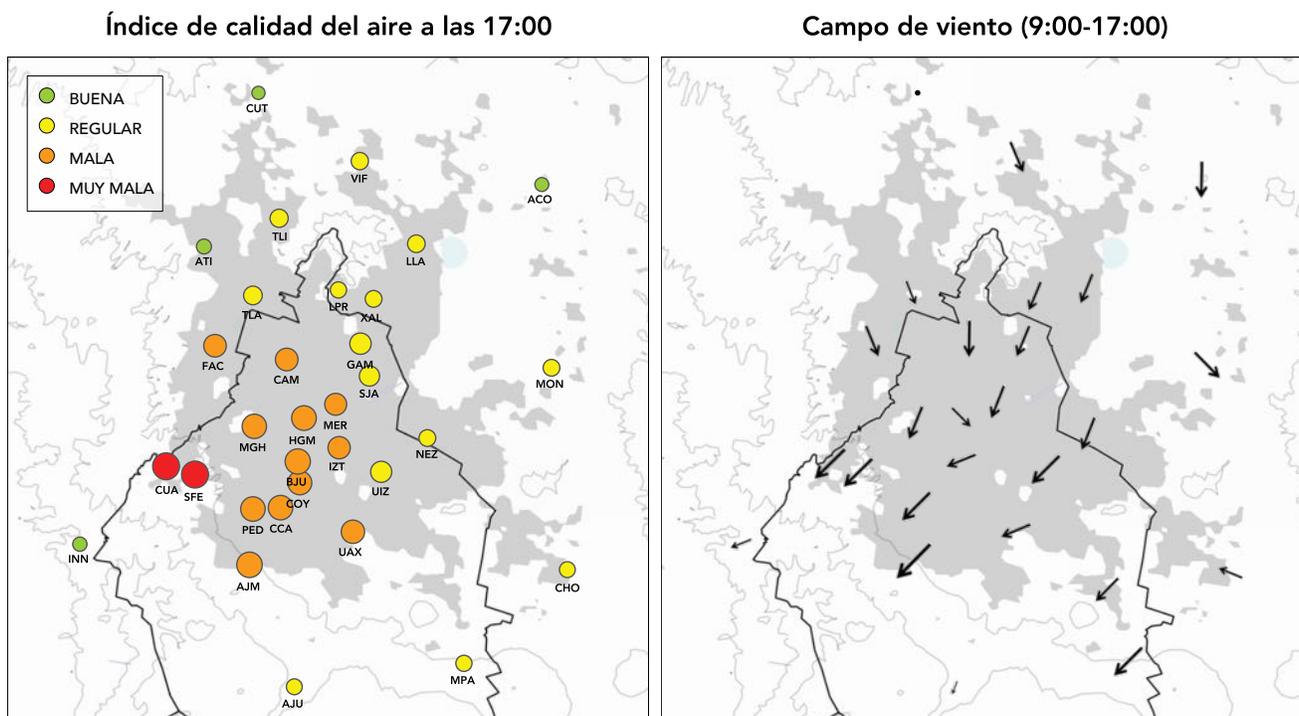


Figura 4.31. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 8 de julio. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Contingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

Fase I: 11 de agosto de 2016 16:00

En capas bajas y medias de la troposfera se identificó una circulación anticiclónica sobre la región oriental del golfo de México, que se extendía hasta la porción central del país. Mientras que en capas superiores, otro sistema similar incursionaba desde la región noreste del país. En las capas más cercanas a la superficie se observó el desarrollo de una circulación anticiclónica directamente sobre la cuenca. Esta estructura propició un transporte moderado de humedad, estabilidad atmosférica y viento débil la mayor parte del día. El perfil vertical mostraba viento débil a moderado por debajo de los 1000 msns, con una componente importante del oeste en la mañana y del norte por la tarde, inducidos por el sistema anticiclónico. A mayores alturas se observó viento del este con una intensidad moderada a fuerte. El día fue parcialmente nublado en la mañana a nublado por la tarde, con lluvia convectiva después de las 18:00. A nivel de superficie se observó el desarrollo de circulaciones térmicas con viento débil durante la mayor parte del día y un flujo de viento prevaleciente hacia el suroeste después

del mediodía. A diferencia de otros episodios, a nivel de superficie no se observó un incremento importante en la velocidad de viento por la tarde, lo que provocó un avance lento de la masa de aire contaminado hacia el sur.

A pesar de que se registró una disminución en la intensidad de la radiación solar por la presencia de nubosidad, el lento avance de la masa de aire y el intenso mezclado vertical fueron suficientes para la producción y acumulación de ozono, por lo que después de las 15:00 horas la mayoría de las estaciones de monitoreo reportaron concentraciones superiores a los 95 ppb (100 puntos). A las 16:00 y 17:00 se registraron las concentraciones máximas de ozono en la estación Ajusco Medio (AJM) con 155 ppb (151 puntos) y 162 ppb (158 puntos), respectivamente (ver Figuras 4.32 y 4.33). En el resto de las estaciones la concentración máxima no superó los 150 puntos. Por lo anterior, la CAME activó la Fase I de Contingencia emitiendo el comunicado a las 16:25.

Debido a la presencia de nublados y mayor inestabilidad en la atmósfera el viernes 12 de agosto, los niveles de ozono no superaron los 150 puntos, por lo que la CAME suspendió la Fase I.

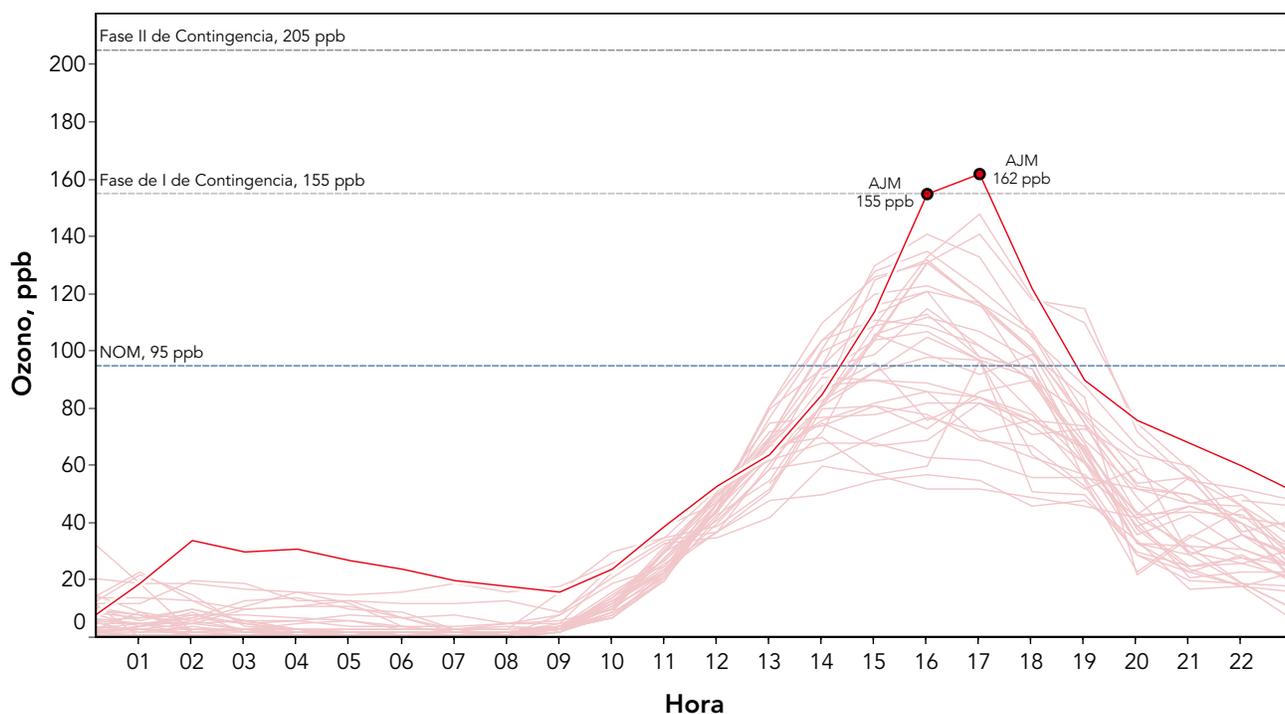


Figura 4.32. Variación horaria de la concentración de ozono en las estaciones de monitoreo en operación el 11 de agosto. En la gráfica se destacan las estaciones que registraron las concentraciones máximas y se indican los valores de referencia de la NOM y del PCAA.

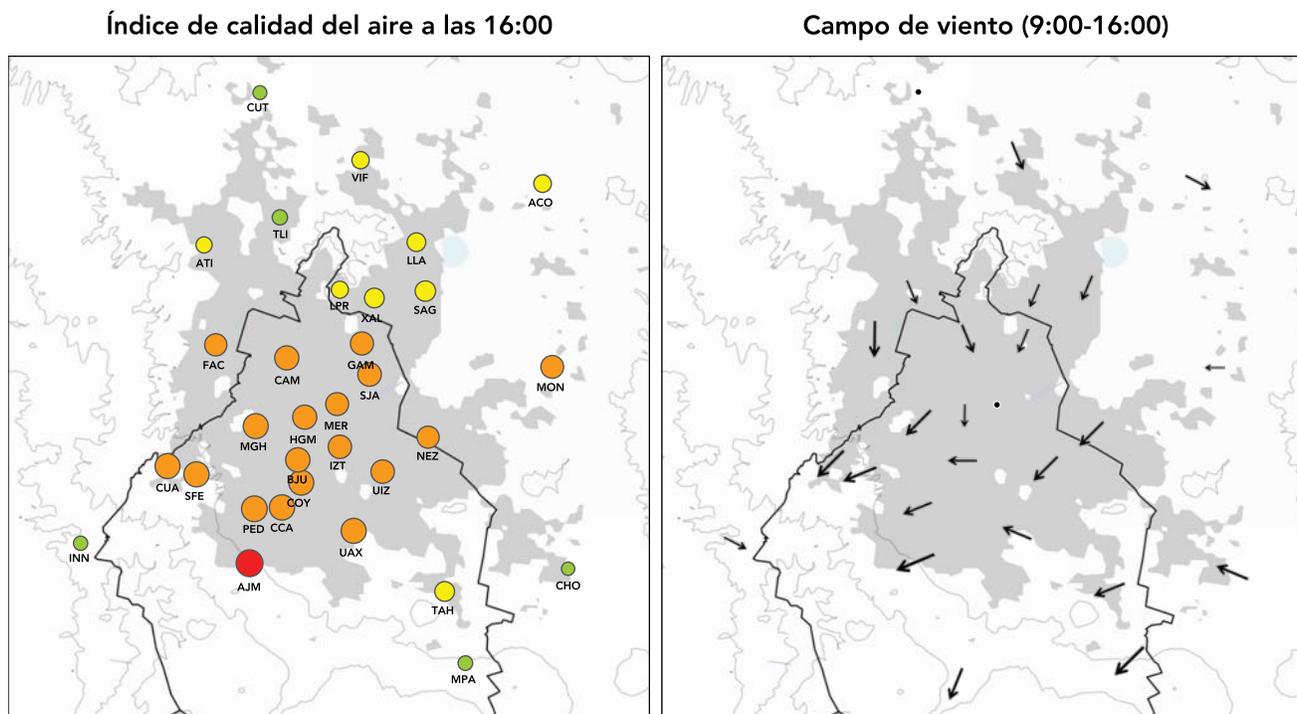


Figura 4.33. Índice de calidad del aire para ozono y campo de viento registrados el 11 de agosto. En el mapa de la izquierda se indica la calidad del aire por ozono empleando las categorías del IMECA, el tamaño del círculo es proporcional a la concentración del contaminante. El mapa de la derecha muestra el campo de viento promedio durante las horas previas a la activación de la Contingencia, el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

Clasificación de los eventos

La campaña MCMA-2003 (*Mexico City Metropolitan Area*) se realizó en abril de 2003 con el objetivo de mejorar la comprensión del problema de la contaminación del aire en la Ciudad de México (Molina *et al.*, 2007). Como parte de esta campaña de Foy *et al.* (2005) realizaron un análisis comprensivo de los patrones de la circulación del viento en la zona metropolitana de la Ciudad de México y su relación con las concentraciones máximas de ozono. Las condiciones meteorológicas durante la campaña fueron identificadas y clasificadas en tres categorías principales: *O3-Sur*, *O3-Norte* y *Oleada fría*. Estas categorías resumían los resultados de la interacción entre las circulaciones sinóptica y local. La categoría *O3-Sur* se relacionó con un esfuerzo sinóptico débil asociado con anticiclones y circulaciones térmicas en superficie que provocaban altas concentraciones de ozono al sur de la ciudad. La categoría *O3-Norte* se asoció con vientos sinópticos del oeste relacionados a condiciones anticiclónicas débiles al sur y un fuerte chorro subtropical hacia el norte de

la zona metropolitana, con una alta concentración de ozono en el norte. La categoría *Oleada Fría* se identificó por una corriente fría del noreste proveniente del Golfo de México que transporta aire frío y húmedo hacia la meseta de México, provocando cielo nublado y convección por la tarde acompañada de precipitaciones sobre la ciudad, así como concentraciones máximas de ozono en el centro de la zona metropolitana, debido a las condiciones estables antes de la convección.

Durante la evaluación de las condiciones meteorológicas de la campaña *Megacity Initiative: Local And Global Research Observations* (MILAGRO) en 2006, de Foy *et al.* (2008) identificaron patrones de circulación similares a los observados en la campaña MCMA-2003, sin embargo, el *O3-Sur* se separó en dos categorías adicionales: *O3-Sur* y *Ventilación Sur*. Este último caracterizado por vientos de altura del noroeste con un fuerte transporte hacia el sur en superficie, que propiciaba una rápida dispersión hacia el sur y bajos niveles de contaminación.

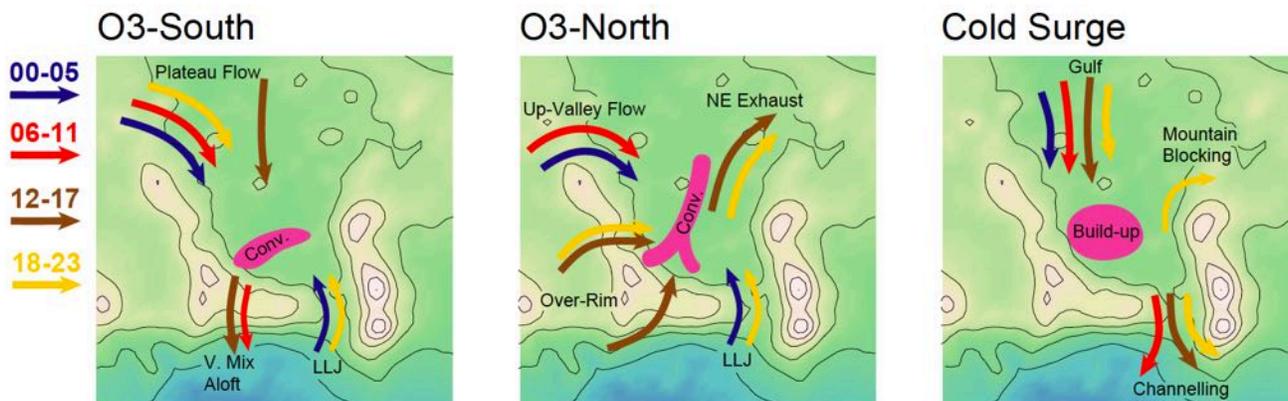


Figura 4.34. Modelo de circulación para episodios O3-Sur, O3-Norte y Oleada fría en la cuenca de la Ciudad de México. Las flechas coloreadas de acuerdo a la hora del día son las corrientes de viento dominantes. Los vientos de la meseta en los días O3-Sur transportan la pluma urbana hacia el sur de las montañas. Un chorro de bajo nivel se forma en el paso de Chalco causando una línea de convergencia en el sur de la ciudad. El fuerte flujo del oeste en los días O3-Norte entra por primera vez en la cuenca desde el noroeste, pero luego llega por los bordes sur y oeste de la cuenca durante el día. La combinación con el chorro de bajo nivel forma una zona de convergencia norte-sur y el escape de la cuenca hacia el noreste. En días de oleaje frío, fuertes vientos del norte soplan hacia la cuenca. Bajas alturas de mezclado conducen a la acumulación de contaminantes en la ciudad y el flujo del canal a través del paso de Chalco (figura tomada de de Foy *et al.* 2006).

La influencia del viento canalizado proveniente del sureste de la cuenca a través del paso natural que se forma entre la Sierra Nevada y la Sierra Ajusco-Chichinautzin (brecha o paso de Chalco), genera patrones de convergencia que se ajustan a los tres tipos de episodios descritos por de Foy *et al.*, (2006; 2008). Los días O3-Sur tienen líneas de convergencia que irradian hacia el norte desde la brecha de Chalco, moviéndose a través de la cuenca por la tarde. Los días O3-Norte tienen líneas de convergencia norte-sur a la mitad de la zona metropolitana, por el encuentro del flujo canalizado del sureste con los vientos de superficie del oeste sobre los bordes sur y oeste de la cuenca. Los días de Oleada fría tienen una línea de convergencia este-oeste a través de la cuenca que provoca la convección del cúmulo y la precipitación. En la Figura 4.34 se resumen los modelos de circulación descritos y las regiones de convergencia.

La clasificación de de Foy *et al.* se utilizó para identificar las características meteorológicas y los patrones de circulación durante los eventos con mayor concentración de ozono de 2016. En esta sección se realiza una evaluación de las características meteorológicas predominantes para cada uno de los días en los que concentración máxima de ozono superó el valor de 154 ppb (150

puntos en el índice), en algunos de los cuales se activó alguna de las fases del PCAA.

En total en 2016 se registraron 18 días (eventos) con máximos horarios superiores a 154 ppb. En la Tabla 4.1 se indica la categoría asignada a cada uno de ellos, mientras que la Figura 4.35 muestra la distribución espacial de las concentraciones máximas en cada evento. La mayoría de los eventos (12 de los 18) fueron del tipo O3-Sur, en donde las concentraciones máximas se observaron principalmente al suroeste de la ciudad. Estos se caracterizaron por la influencia de sistemas anticiclónicos en el centro del país, corrientes débiles en altura del oeste, y flujos de superficie determinados por corrientes térmicas y por la presencia del flujo canalizado del sureste después de las 15:00. Los máximos de ozono se observaron en las zonas de convergencia descritas por de Foy *et al.* En la mayoría de los eventos analizados destaca el temprano y rápido incremento del ozono en la estación Gustavo A. Madero (GAM), el cual ocurre horas antes de que se presenten los máximos del día al sur de la ciudad. Por otra parte, la influencia del flujo canalizado del paso de Chalco es determinante en la ubicación espacial de los máximos de ozono. Se observó también una dependencia importante entre la concentración máxima de ozono y la estabilidad en la capa límite.

La presencia del flujo canalizado del sureste fue determinante durante los eventos O3-Norte, caracterizados por flujos anticiclónicos en la atmósfera media y corrientes térmicas en superficie provenientes de la meseta central durante la mañana. De los eventos analizados se observaron cuatro que podrían clasificarse como O3-Norte, en donde el flujo proveniente del paso de Chalco se presentó con una intensidad moderada a fuerte en las primeras horas de la tarde, como describe de Foy. El encuentro con los vientos del oeste propició el desarrollo de una zona de convergencia de sur a norte que impulsó el movimiento de las masas de aire hacia el noreste, en donde se registraron con mayor frecuencia las concentraciones máximas.

Dos de los eventos podrían clasificarse como Oleada fría, ambos durante la temporada de lluvia cuando se observó una corriente del Golfo de México con aire húmedo, cielo nublado y lluvia vespertina. La acumulación de contaminantes se

observó principalmente en el centro y sur de la Ciudad de México.

El análisis de los eventos de contaminación por ozono refleja la consistencia en los patrones meteorológicos asociados con altas concentraciones de ozono durante 2016, con respecto a los observados en estudios previos.

Con respecto a los eventos de 2016, el hecho de que no se observara una mejoría evidente de la calidad del aire después de la aplicación de las acciones de emergencia, destaca la importancia que tiene la meteorología en los episodios de contaminación fotoquímica. Es importante que antes de aplicar cualquier acción que pretenda reducir los niveles de contaminación secundaria en una contingencia, es necesario que se realice una evaluación objetiva de la meteorología tomando en cuenta la química atmosférica, de otra manera estas acciones podrían tener un impacto mínimo en la mejora de la calidad del aire o, bajo ciertas condiciones, agravar el problema.

Tabla 4.1. Clasificación de los eventos de ozono de 2016.

Fecha	Tipo de evento	Estación	Concentración máxima	Día de la semana
19 de febrero	O3-Sur	MPA	161 ppb	viernes
21 de febrero	O3-Sur	GAM	159 ppb	domingo
12 de marzo	O3-Norte	GAM	163 ppb	sábado
13 de marzo	O3-Sur	CUA	181 ppb	domingo
14 de marzo	O3-Sur	CUA	210 ppb	lunes
15 de marzo	O3-Norte	FAC	156 ppb	martes
4 de abril	O3-Sur	BJU	159 ppb	lunes
5 de abril	O3-Sur	AJM	160 ppb	martes
2 de mayo	O3-Norte	GAM	172 ppb	lunes
3 de mayo	O3-Norte	TLA	168 ppb	martes
4 de mayo	O3-Sur	AJM	196 ppb	miércoles
14 de mayo	O3-Sur	TAH	161 ppb	sábado
20 de mayo	O3-Sur	CUA	192 ppb	viernes
24 de mayo	O3-Sur	CAM	155 ppb	martes
27 de mayo	O3-Sur	GAM	169 ppb	viernes
31 de mayo	O3-Sur	SFE	165 ppb	martes
8 de julio	Oleada fría	SFE	156 ppb	viernes
11 de agosto	Oleada fría	AJM	162 ppb	jueves

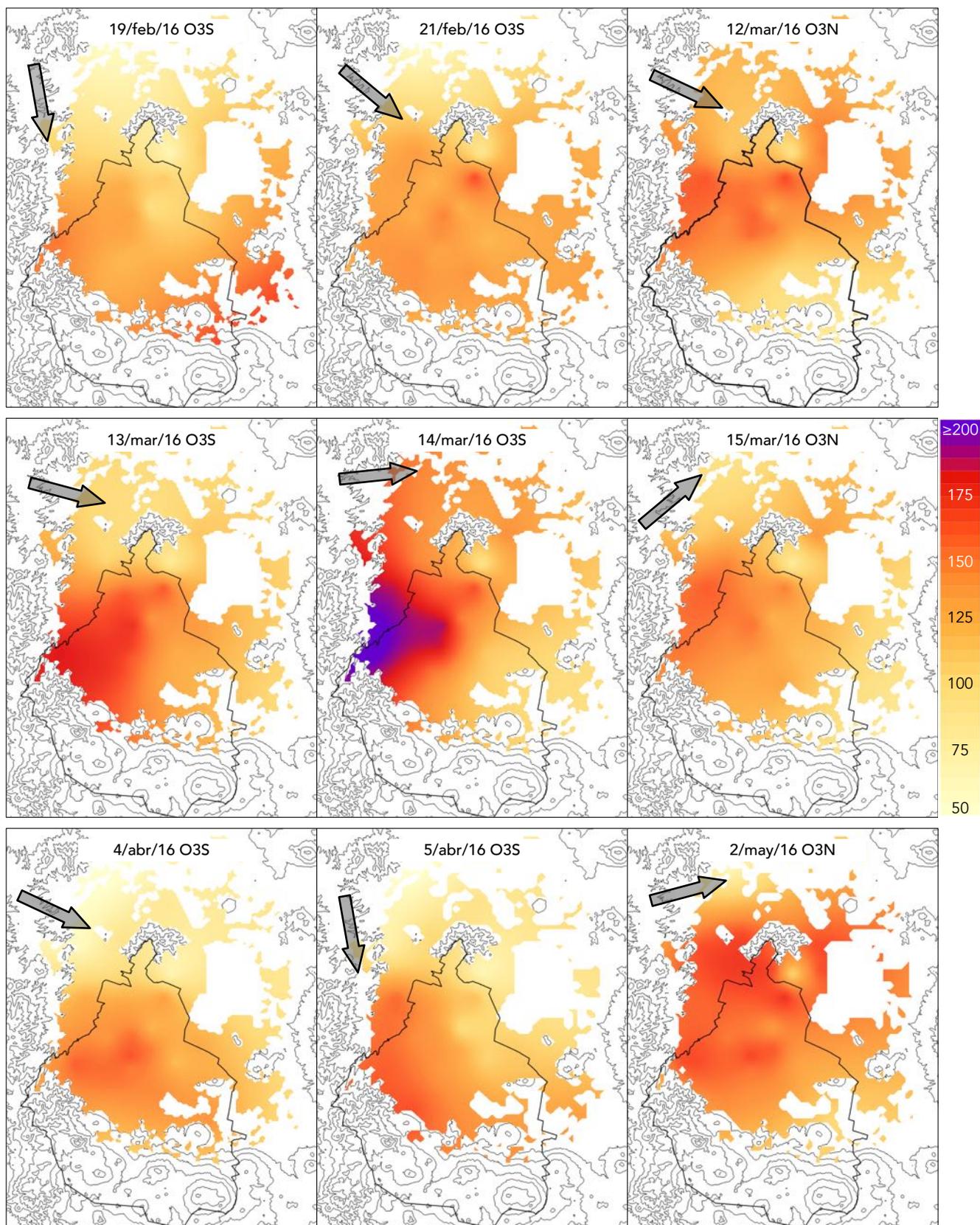


Figura 4.37. Distribución espacial de las concentraciones máximas de ozono para aquellos días en los que la concentración de ozono superó la concentración de 155 ppb y activando el PCAA. La flecha en la esquina superior izquierda indica la dirección predominante del viento de escala sinóptica.

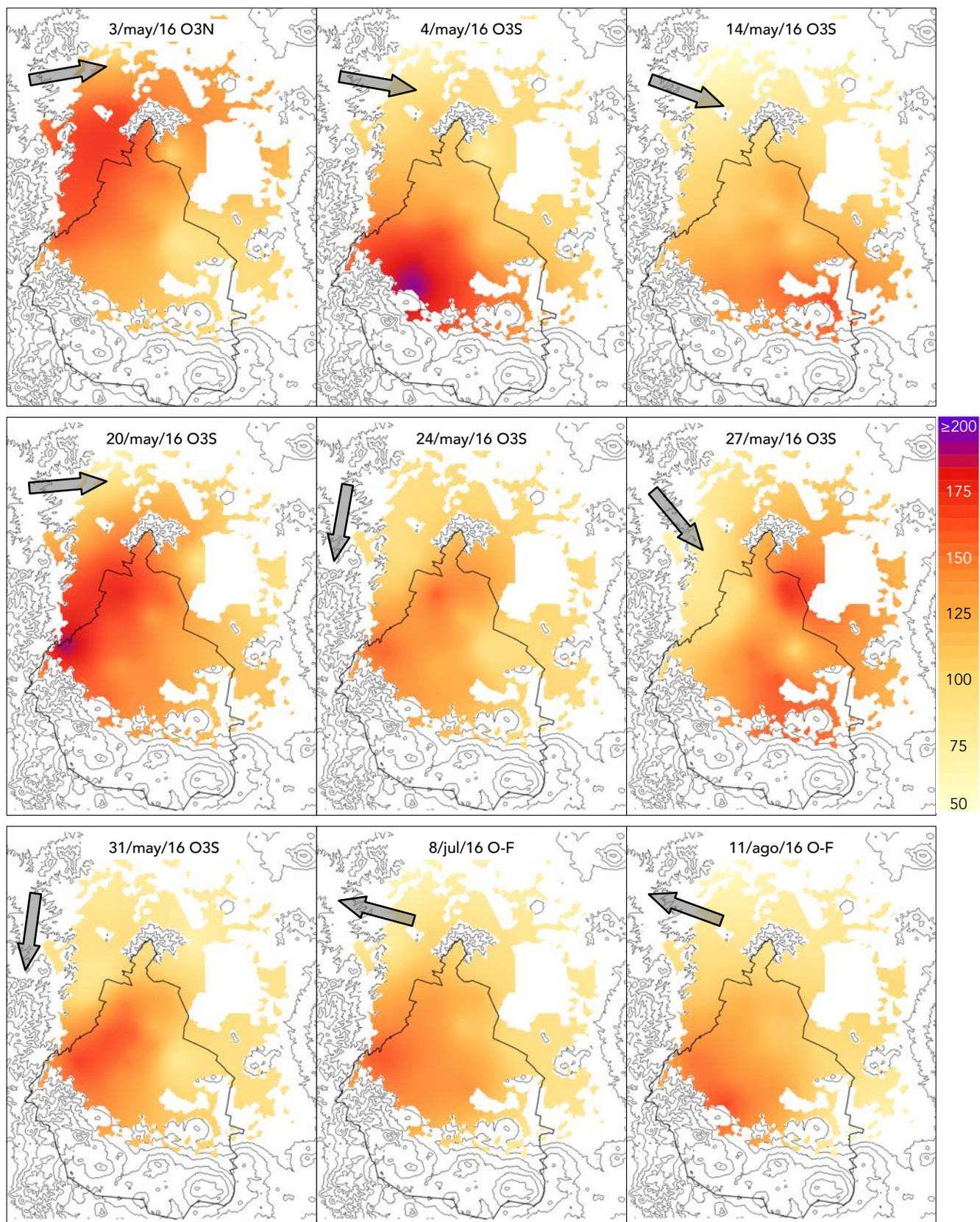


Figura 4.37 (continuación).



Barbarea vulgaris en el cráter del Volcán Totlama, Tláhuac, Ciudad de México.

5. Depósito atmosférico

Composición, pH y lluvia ácida

Los gases y partículas liberados a la atmósfera por las principales fuentes de combustión, contienen, entre otros compuestos, óxidos de nitrógeno, azufre y compuestos metálicos que eventualmente se depositan en el suelo como polvo o por la acción de la lluvia, rocío o nieve. Los óxidos de nitrógeno y azufre se oxidan rápidamente en la atmósfera para formar ácidos nítrico y sulfúrico, que pueden ser neutralizados por el amoníaco o por los metales alcalinos del polvo en suspensión (sodio, magnesio, calcio) que, dependiendo de la temperatura y humedad, pueden encontrarse en forma sólida o líquida. Estas partículas pueden disolverse en el agua de las nubes o en las gotas de lluvia, para posteriormente depositarse en el suelo (depósito húmedo), también pueden depositarse por sedimentación gravitacional (depósito seco). En la Figura 5.1 se muestra un diagrama simplificado de este proceso.

Como cada temporada de lluvia, la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) realizó la recolección de muestras de depósito atmosférico húmedo en sus 16 estaciones de monitoreo. Las muestras de lluvia se obtuvieron semanalmente, entre mayo y octubre, empleando colectores

semiautomáticos. En total para cada estación se programaron 25 muestreos entre la primera semana de mayo y la tercera de octubre. En algunos sitios se colocó un muestreo adicional en la última semana de octubre debido a que aún se registraron algunos eventos de lluvia. En la Figura 5.2 se muestra la ubicación de los sitios de muestreo así como el número de muestras válidas obtenidas en cada uno de ellos. Como se puede observar la mayoría de ellos (doce sitios) se encuentra dentro del territorio de la Ciudad de México, con mayor presencia en las áreas de suelo de conservación al sur de la ciudad (siete sitios). Cuatro sitios se localizan en la zona conurbada del Estado de México de los cuales dos (Tlalnepantla, TLA, y Xalostoc, XAL) se encuentran en importantes corredores industriales. Los sitios Nezahualcóyotl (NEZ) y Montecillo (MON), ubicados al este de la zona metropolitana, se encuentran en zonas influenciadas por las emisiones de polvo resuspendido proveniente de lo que alguna vez fue el Lago de Texcoco. Montecillo se encuentra en un área suburbana en donde aún se realizan actividades agrícolas y cerca de donde se construye el Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México.

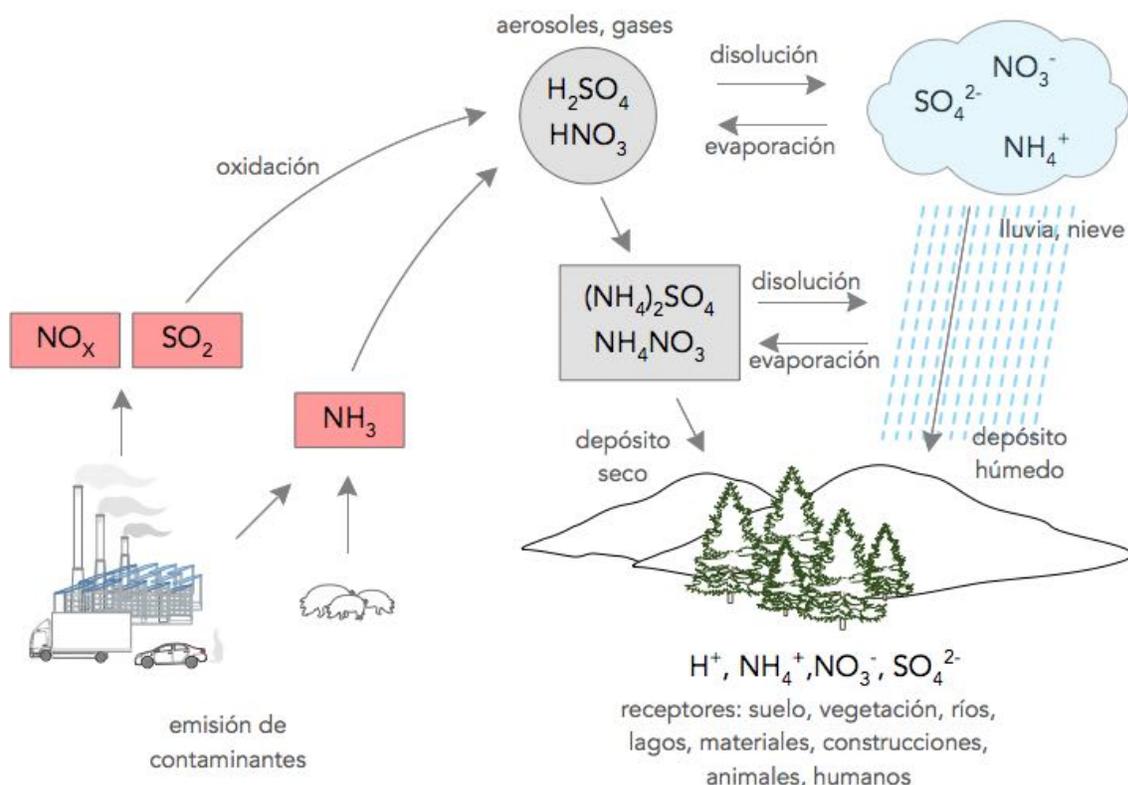


Figura 5.1. Proceso de la formación del depósito atmosférico.

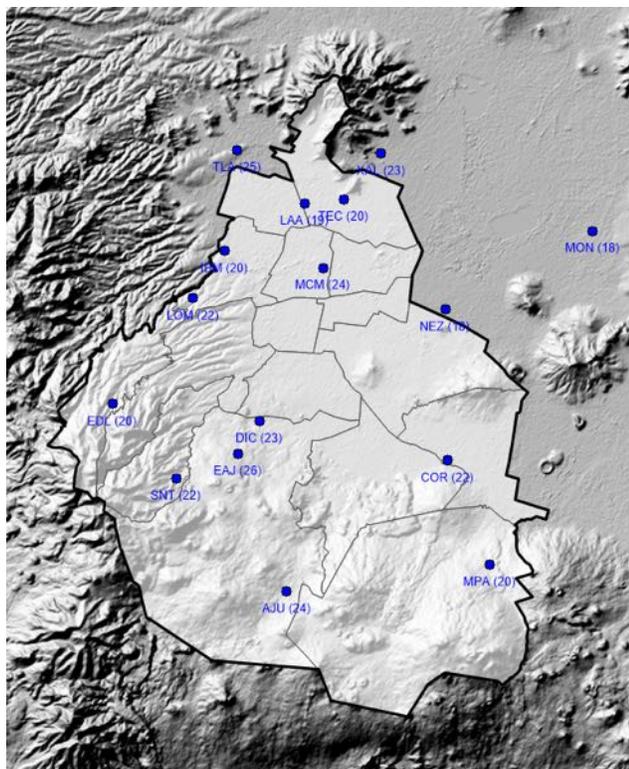


Figura 5.2. Ubicación de los sitios de muestreo de la REDDA. El número dentro del paréntesis indica el número de muestreos válidos.

Las muestras se analizaron en el laboratorio del grupo de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En el laboratorio se determinaron el pH, la conductividad y la concentración de los siguientes iones: hidronio (H^+), sodio (Na^+), potasio (K^+), magnesio (Mg^{2+}), calcio (Ca^{2+}), cloruro (Cl^-), amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}). La colecta de las muestras y el análisis químico se realizaron siguiendo las recomendaciones del Programa Nacional de Deposición Atmosférica (NADP, por sus siglas en inglés) de la US EPA.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante la campaña de muestreo.

Precipitación acumulada

En la Figura 5.3 se muestra la distribución espacial del volumen acumulado durante el periodo de muestreo. Los sitios ubicados al suroeste de la Ciudad de México reportaron los mayores volúmenes de precipitación, mientras que los sitios ubicados al este registraron los menores valores.

San Nicolás Totoloapan (SNT) registró el volumen acumulado máximo con 1146 mm (~1146 litros por metro cuadrado). En Milpa Alta (MPA), al sureste de la ciudad, se reportó un mínimo de 342 mm, es importante mencionar que en este sitio se invalidaron 5 muestras consecutivas durante julio y la primera semana de agosto, lo que pudo inducir una subestimación en el volumen acumulado total. La comparación con datos de años previos indicó que los volúmenes registrados en MPA generalmente son menores en comparación con la mayoría de las estaciones del sur.

En la Figura 5.4 se muestran los volúmenes acumulados por semana de todas las muestras colectadas durante la temporada en cada uno de los sitios. Estos registros de volumen se emplearon en el cálculo del depósito atmosférico. Destaca el muestreo de la segunda semana de julio con un volumen acumulado de 181 mm en el sitio Exconvento Desierto de los Leones (EDL). Este sitio junto con SNT y Ajusco (AJU) son los que registraron los mayores volúmenes acumulados semanales de la temporada.

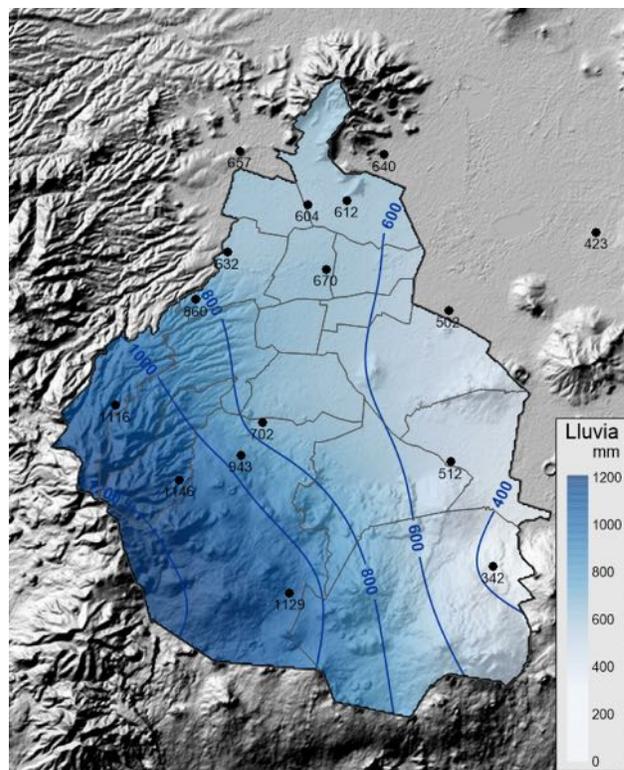


Figura 5.3. Distribución espacial de la precipitación pluvial en la Ciudad de México durante la temporada de lluvia de 2016.

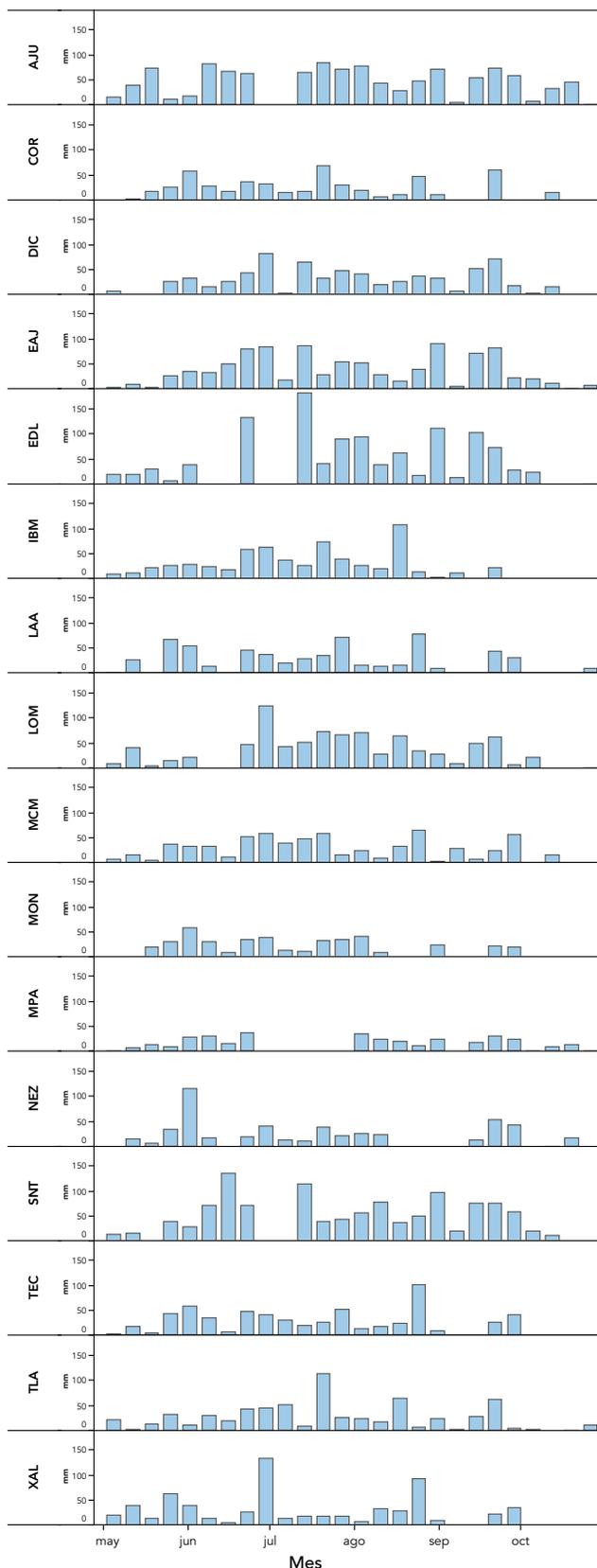


Figura 5.4. Precipitación acumulada semanal en los sitios de la REDDA, durante la campaña de 2016. Las columnas vacías indican la falta de muestra.

Composición iónica

En la Figura 5.5 se muestran las contribuciones promedio para cada una de las especies iónicas analizadas. La abundancia relativa de los iones inorgánicos presentes en el depósito atmosférico estuvo definida por el siguiente orden: $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+$. Los iones SO_4^{2-} y NO_3^- contribuyeron con alrededor del 70% de la masa total de la fracción iónica inorgánica, ambos tienen su origen en los procesos de oxidación de los óxidos de nitrógeno y de azufre emitidos a la atmósfera. Por otra parte, el NH_4^+ y el Ca^{2+} fueron los cationes más abundantes y los principales responsables de la neutralización de los compuestos ácidos. El NH_4^+ se forma durante de las reacciones de neutralización del amoníaco (NH_3) con los ácidos presentes en la atmósfera. El Ca^{2+} se asocia generalmente con la resuspensión del polvo del suelo, es un metal alcalino que reacciona fácilmente con los compuestos ácidos. Los iones metálicos Mg^{2+} , Na^+ y K^+ se encontraron en menor proporción, sin embargo, su presencia fue un indicador importante del posible origen del depósito. Los iones Mg^{2+} y Na^+ se relacionan generalmente con el polvo del suelo, mientras que el K^+ puede tener su origen en los suelos salitrosos del este de la ciudad o en la quema de biomasa. La presencia del Cl^- se asocia principalmente con la sal marina, sin embargo, también puede ser emitido a la atmósfera por los incendios forestales, la quema de basura y las emisiones volcánicas.

El balance iónico (Figura 5.6) de las muestras mostró una fuerte correlación ($R^2=0.985$), un valor de 0.94 en la pendiente sugirió una pequeña deficiencia de aniones que podría explicarse por la falta de algunas especies como el carbonato y posibles aniones orgánicos. La fuerte correlación entre la conductividad y la suma de las especies iónicas ($R^2=0.960$) fue un buen indicador de la calidad del análisis químico (Figura 5.7).

Debido a que el depósito atmosférico es un complejo agregado de contribuciones generadas por múltiples fuentes en diferentes escalas de tiempo, en un futuro se requerirá de un estudio detallado que permita la identificación de contribuciones específicas de potenciales fuentes locales y regionales.

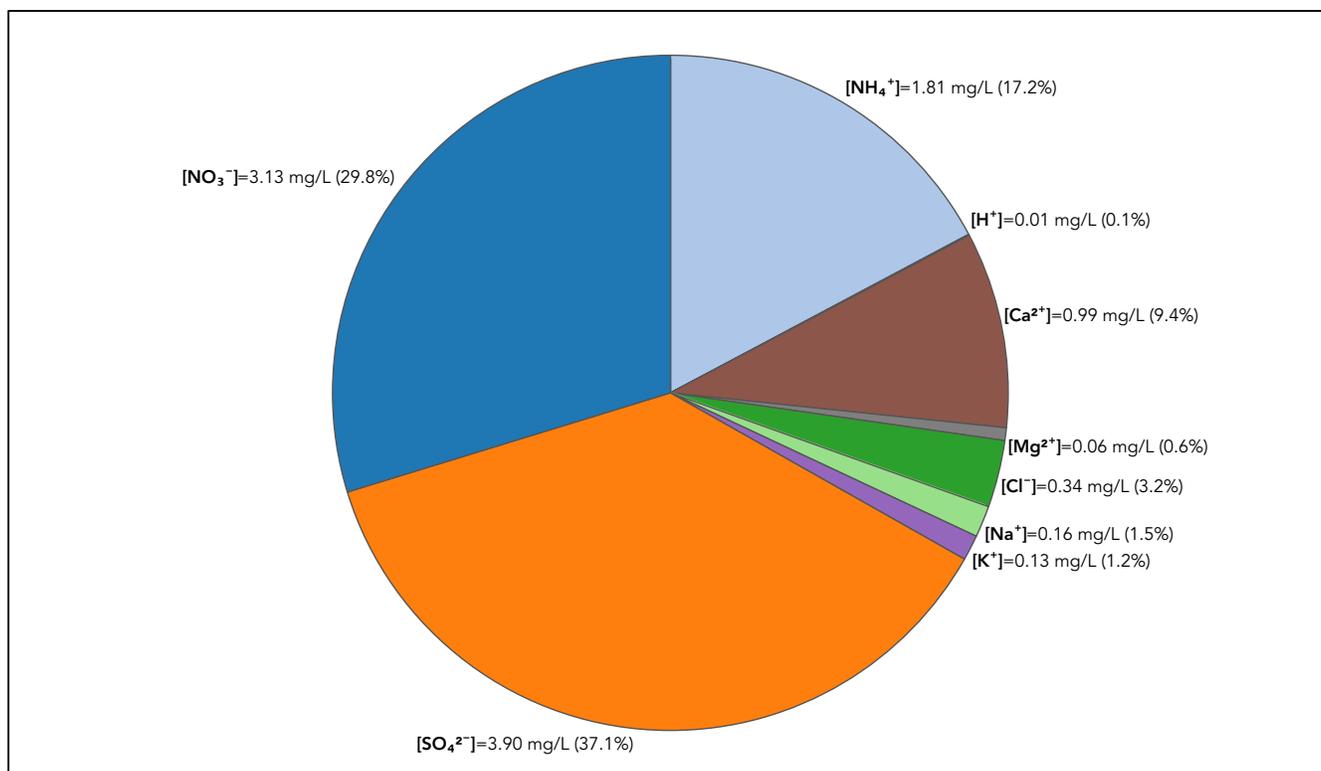


Figura 5.5. Contribución promedio de cada una de las especies iónicas analizadas en todas las muestras colectadas durante la campaña de 2016. Las contribuciones se indican tanto en unidades de concentración promedio (mg/L), como en porcentaje con respecto a la suma de la masa total de los iones analizados.

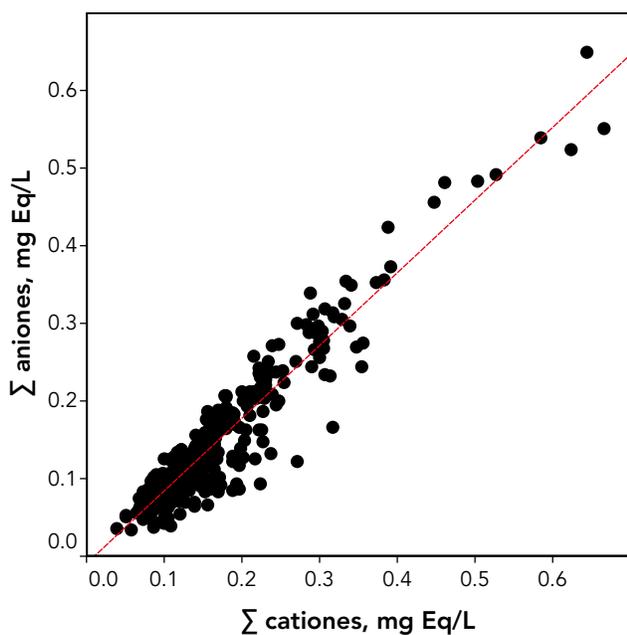


Figura 5.6. Balance iónico entre la suma de las concentraciones equivalentes de los cationes y aniones. En la figura cada punto corresponde a una muestra, la línea roja indica la línea de regresión.

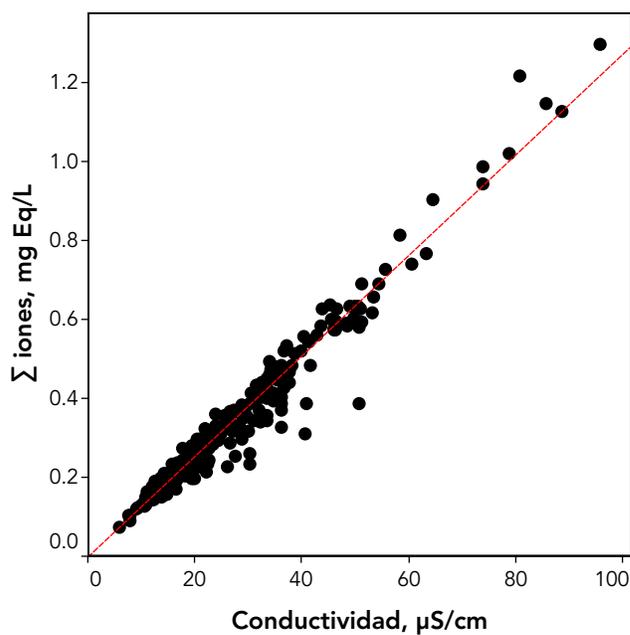


Figura 5.7. Relación entre la suma de las concentraciones equivalentes y la conductividad eléctrica expresada en unidades de $\mu\text{S}/\text{cm}$. La línea roja corresponde a la línea de regresión.

Los resultados del balance iónico (\sum aniones vs. \sum cationes) por sitio de muestreo indicaron que los sitios Ajusco (AJU), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), Lomas (LOM), Montecillo (MON), Milpa Alta (MPA), Cerro del Tepeyac (TEC) y Tlalnepantla (TLA), tuvieron una mayor contribución de aniones con respecto a la suma de cationes con pendientes entre 1.03 y 1.1. Por otra parte, en los sitios de CORENA (COR), DICONSA (DIC), Eco-guardas Ajusco (EAJ), Legaria IBM (IBM), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Nezahualcóyotl (NEZ), San Nicolás Totoloapan (SNT) y Xalostoc (XAL), predominaron los cationes con respecto a la suma de aniones, con valores para la pendiente entre 0.84 y 0.92. Los valores extremos se observaron en los sitios IBM y TLA con pendientes de 0.838 y 1.097, respectivamente.

En la Tabla 5.1 se presenta el promedio de las concentraciones de cada especie por sitio de muestreo. En términos generales, los sitios ubicados al norte de la ciudad y la zona conurbada registraron las mayores concentraciones de SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} , Na^+ y Mg^{2+} , mientras que los sitios ubicados al sur registraron las mayores concentraciones promedio de H^+ , Cl^- y K^+ . El sitio de

Legaria IBM (IBM), ubicado al noroeste de la Ciudad de México, registró las mayores concentraciones promedio de los iones más abundantes. La abundancia relativa de los iones alcalinos podría explicar los bajos niveles de acidez en los sitios localizados al norte de la ciudad, mientras que la abundancia de iones H^+ en los sitios del sur explica la presencia de acidez en las muestras. Es importante destacar la abundancia de los iones Cl^- y K^+ en las muestras colectadas en el sur, aún cuando las concentraciones son menores que en las muestras colectadas en el norte, su presencia podría ser un indicador importante de las emisiones provenientes de la quema de biomasa local o regional. La presencia y distribución de las diferentes especies iónicas permite establecer relaciones entre ellas y realizar inferencias sobre su posible origen. En trabajos posteriores será necesario estudiar los efectos del transporte regional y la contribución de los diferentes iones en la formación de la lluvia ácida. Será importante conocer también los posibles efectos del depósito atmosférico en: la infraestructura urbana, las esculturas y edificaciones que forman parte del patrimonio histórico, el ecosistema lacustre y en los bosques y cultivos en el suelo de conservación de la Ciudad de México.

Tabla 5.1. Composición iónica promedio de las muestras de depósito atmosférico colectadas durante la temporada de lluvia. Las concentraciones están expresadas en mg/L.

	[H ⁺]	[Na ⁺]	[K ⁺]	[Mg ²⁺]	[Ca ²⁺]	[Cl ⁻]	[NH ₄ ⁺]	[NO ₃ ⁻]	[SO ₄ ²⁻]
AJU	0.009	0.124	0.103	0.054	0.607	0.323	1.287	2.303	3.031
COR	0.004	0.152	0.127	0.065	0.752	0.391	1.784	2.900	3.561
DIC	0.011	0.159	0.084	0.060	0.887	0.380	1.685	2.880	3.631
EAJ	0.012	0.176	0.132	0.087	0.998	0.437	1.699	3.216	3.981
EDL	0.009	0.127	0.108	0.040	0.806	0.228	1.263	2.580	3.055
IBM	0.004	0.191	0.121	0.076	1.468	0.331	2.528	4.435	5.568
LAA	0.002	0.116	0.126	0.058	1.211	0.268	1.941	3.118	4.154
LOM	0.006	0.179	0.120	0.067	1.294	0.331	1.967	3.790	4.438
MCM	0.002	0.223	0.178	0.080	1.441	0.397	2.115	3.712	4.620
MON	0.001	0.098	0.096	0.049	0.636	0.232	1.694	2.690	2.984
MPA	0.009	0.148	0.132	0.061	0.641	0.428	1.475	2.473	3.221
NEZ	0.002	0.179	0.158	0.069	0.974	0.332	2.352	3.438	4.237
SNT	0.008	0.104	0.227	0.060	0.737	0.300	1.179	2.539	2.941
TEC	0.003	0.170	0.114	0.074	0.987	0.306	1.985	3.279	4.093
TLA	0.005	0.194	0.119	0.075	1.198	0.381	2.150	3.694	4.909
XAL	0.002	0.177	0.116	0.056	1.035	0.274	1.940	2.873	3.702

Depósito atmosférico húmedo

En la Tabla 5.2 se presentan los valores promedio del depósito total en 2016, mientras que la Tabla 5.3 muestra el depósito por especie iónica y sitio de muestreo. En promedio se depositaron 23.2 kg/ha de SO_4^{2-} (7.7 kg/ha de azufre), mientras que para NO_3^- y NH_4^+ , los promedios fueron de 18.3 y 10.8 kg/ha, que corresponden a 12.6 kg/ha de nitrógeno (N) total. Los resultados no muestran diferencias importantes con respecto a los valores observados durante la temporada de lluvia del año previo.

En las Figuras 5.7 a 5.14 se muestra la distribución espacial del depósito de los iones Ca^{2+} , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} , respectivamente. En la interpolación del depósito se utilizó el método de *kriging*, en las imágenes se muestra únicamente la interpolación para el territorio de la Ciudad de México, esto debido a que no existen suficientes sitios de muestreo para cubrir la totalidad de la zona metropolitana y el área periurbana. Como se puede observar en los gráficos, en la distribución del depósito total para los cationes Ca^{2+} y Na^+ (Figuras 5.7 y 5.11) se observaron mayores depósitos en el norte, centro y suroeste, aso-

ciadas con los flujos predominantes de las masas de aire durante la temporada de lluvia, sugiriendo un posible origen geogénico. Un patrón similar, pero de menor intensidad se observó en la distribución de Cl^- y Mg^{2+} (Figuras 5.8 y 5.10). Por otra parte, los mayores depósitos del ion K^+ se presentaron al suroeste (Figura 5.9) de la ciudad, con un máximo en San Nicolás Totoloapan (SNT).

Tabla 5.2. Promedio del depósito atmosférico húmedo total en los sitios de la REDDA, en kg/ha.

Ion	Depósito kg/ha	%
H^+	0.038	0.1
Na^+	0.913	1.5
K^+	0.737	1.2
Mg^{2+}	0.347	0.6
Ca^{2+}	5.493	8.9
Cl^-	2.004	3.2
NH_4^+	10.848	17.5
NO_3^-	18.311	29.6
SO_4^{2-}	23.178	37.5

Tabla 5.3. Depósito atmosférico húmedo total calculado para las diferentes especies iónicas analizadas, por sitio de muestreo. Las unidades empleadas son kg/ha.

	[H^+]	[Na^+]	[K^+]	[Mg^{2+}]	[Ca^{2+}]	[Cl^-]	[NH_4^+]	[NO_3^-]	[SO_4^{2-}]
AJU	0.09	1.30	0.95	0.47	5.37	3.05	12.78	21.46	29.60
COR	0.03	0.69	0.52	0.27	3.40	1.69	8.52	13.89	17.87
DIC	0.07	0.88	0.50	0.29	4.55	2.10	10.89	18.30	21.43
EAJ	0.08	0.86	0.55	0.36	5.22	2.84	11.14	20.51	25.30
EDL	0.07	1.27	1.19	0.39	9.05	2.44	12.78	25.36	29.77
IBM	0.02	1.04	0.55	0.37	7.55	1.96	13.05	22.94	28.20
LAA	0.01	0.61	0.66	0.30	5.94	1.25	11.29	18.21	23.47
LOM	0.05	1.38	0.75	0.44	8.53	2.70	13.62	25.55	28.48
MCM	0.01	1.22	0.78	0.40	6.81	2.20	11.95	18.94	24.93
MON	0.01	0.42	0.41	0.18	2.39	0.88	7.03	10.67	12.40
MPA	0.04	0.40	0.38	0.16	1.66	1.40	4.46	7.24	10.20
NEZ	0.01	0.87	0.72	0.30	4.43	1.48	10.89	14.63	20.97
SNT	0.07	0.97	2.26	0.64	6.68	3.01	12.24	23.44	28.42
TEC	0.02	0.94	0.51	0.38	5.35	1.66	10.76	18.45	22.62
TLA	0.03	0.82	0.42	0.29	5.61	1.89	11.23	17.50	25.15
XAL	0.01	0.96	0.65	0.30	5.35	1.51	10.93	15.89	22.03

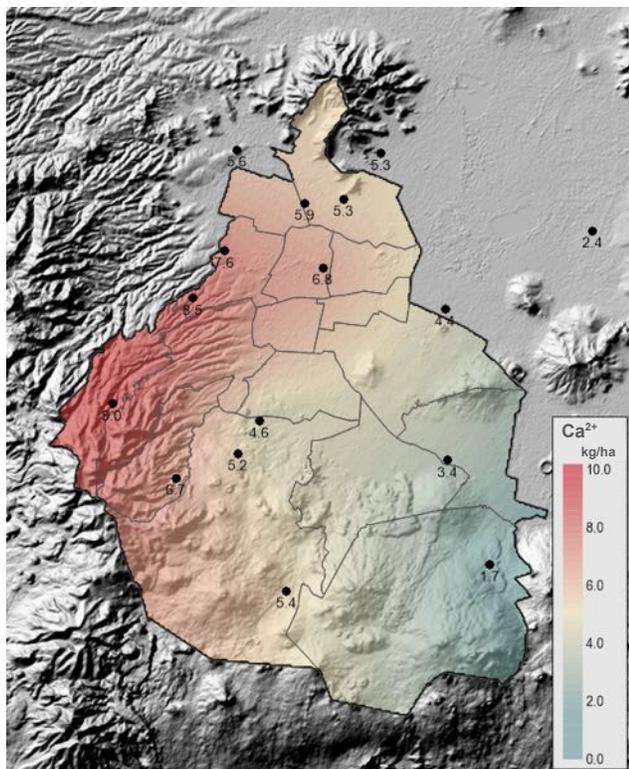


Figura 5.7. Distribución espacial del depósito del ion calcio (Ca^{2+}).

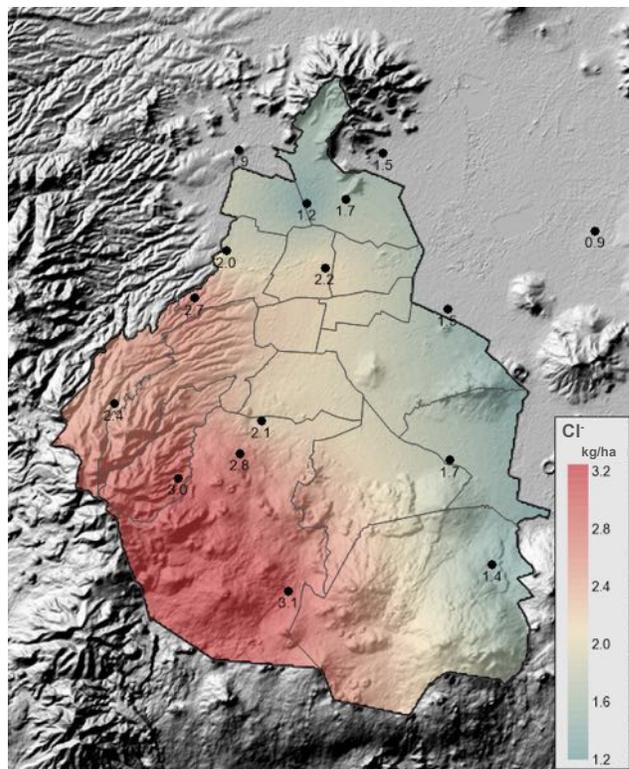


Figura 5.8. Distribución espacial del depósito del ion cloruro (Cl^-).

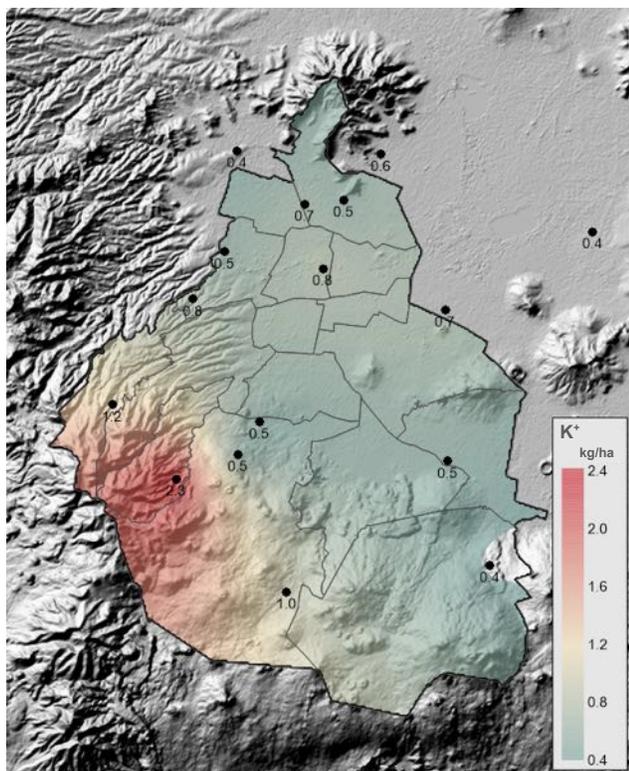


Figura 5.9. Distribución espacial del depósito del ion potasio (K^+).

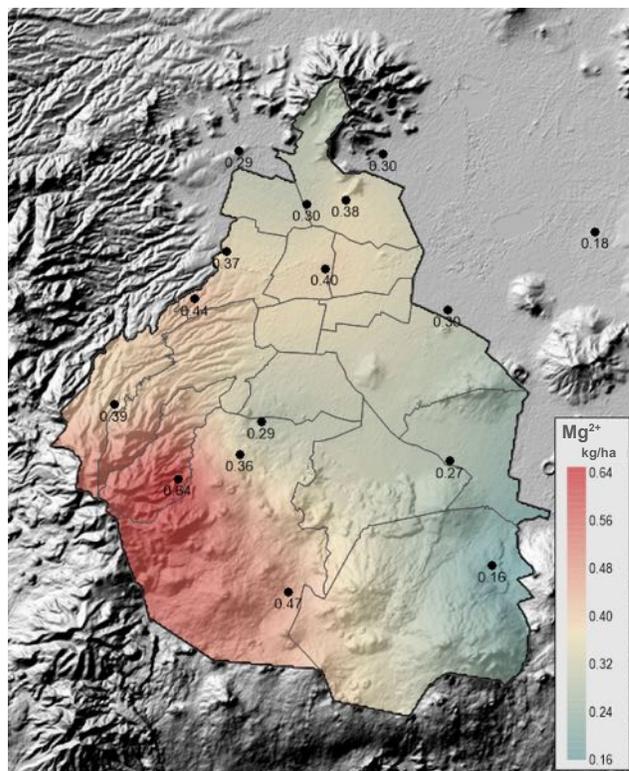


Figura 5.10. Distribución espacial del depósito del ion magnesio (Mg^{2+}).

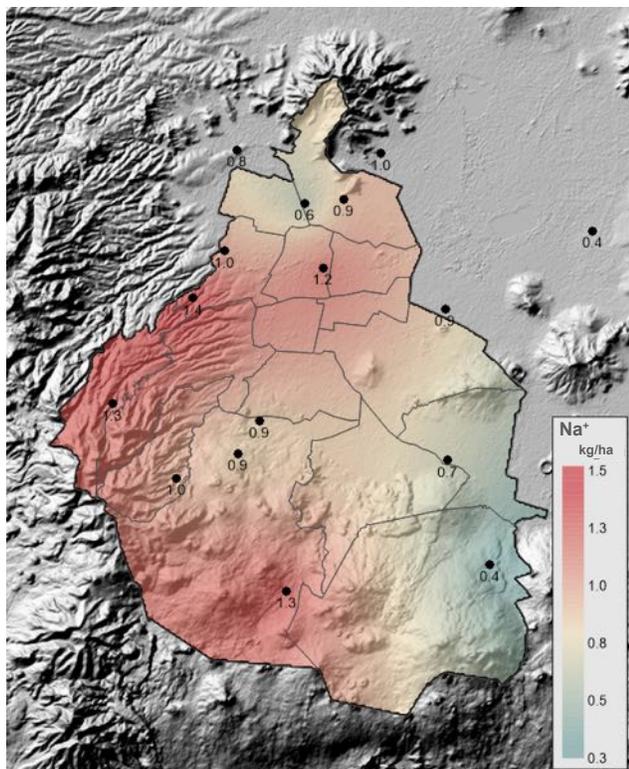


Figura 5.11. Distribución espacial del depósito del ion sodio (Na^+).

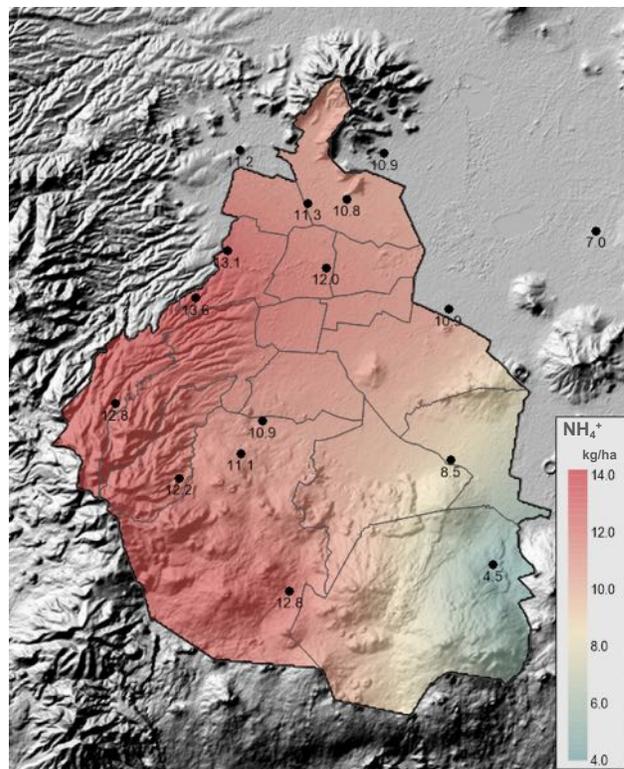


Figura 5.12. Distribución espacial del depósito del ion amonio (NH_4^+).

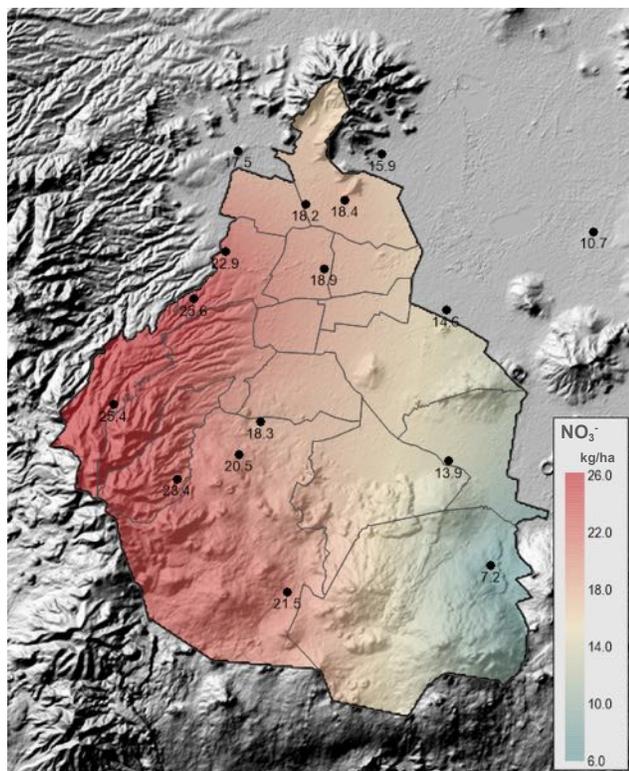


Figura 5.13. Distribución espacial del depósito del ion nitrato (NO_3^-).

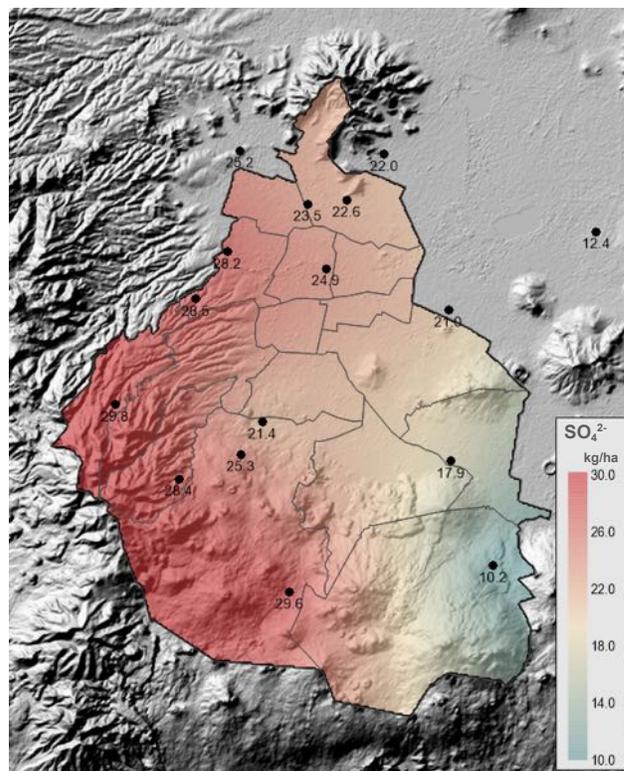


Figura 5.14. Distribución espacial del depósito del ion sulfato (SO_4^{2-}).

El K^+ se asocia principalmente con la quema de biomasa (p.e., incendios forestales), sin embargo, debido a que durante la temporada de lluvia se reducen significativamente los incendios forestales, es probable que la presencia de K^+ esté relacionada con el uso de leña como combustible en la región. La distribución espacial de los iones SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ (ver Figuras 5.12 a 5.14) indica depósitos relativamente homogéneas al norte y oeste de la Ciudad de México, con mayores valores en el suroeste y una disminución importante hacia el sureste. Esta distribución espacial tiene correspondencia con la naturaleza secundaria de estas especies.

Los bajos valores de depósito así como las menores concentraciones iónicas observados al sureste de la Ciudad de México podrían explicarse por la presencia frecuente del flujo de viento canalizado proveniente del paso de Chalco, capaz de transportar masas de aire con menores niveles de contaminantes desde el estado de Morelos. Esta corriente podría tener una influencia importante en las concentraciones y la distribución espacial del depósito en esa zona.

Lluvia ácida

En el agua de lluvia el ácido carbónico se encuentra en equilibrio con el dióxido de carbono atmosférico lo que le confiere una acidez natural de ~ 5.6 . La presencia de ácidos fuertes, como el ácido sulfúrico, nítrico o clorhídrico, disminuye considerablemente el pH por debajo del nivel natural. Existe un consenso importante que relaciona los niveles de acidez del agua de lluvia con la acidificación y degradación del suelo, la acidificación cuerpos de agua y el deterioro de la infraestructura urbana. Una de las actividades más importantes de la REDDA es la evaluación de la acidez del agua de lluvia. De acuerdo con los resultados, en el suroeste de la Ciudad de México se presentaron los mayores valores de depósito para H^+ (ver Figura 5.15). Los valores máximos de acidez, estimada como el promedio ponderado del pH, se observaron en la porción sur de la Ciudad de México (ver Figura 5.16) con un pH ponderado mínimo en Milpa Alta (MPA), ubicado en la delegación del mismo nombre en una región con uso de suelo predominantemente agrícola.

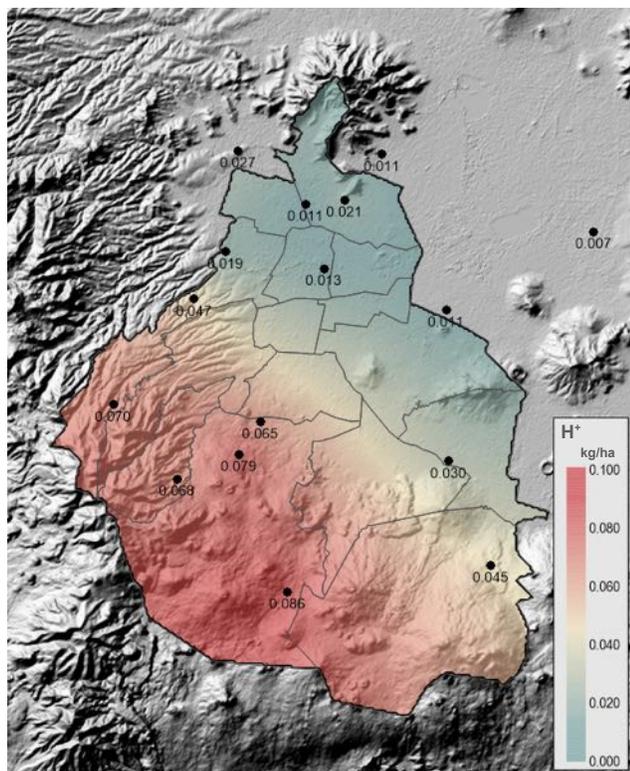


Figura 5.15. Distribución espacial del depósito del ion hidronio.

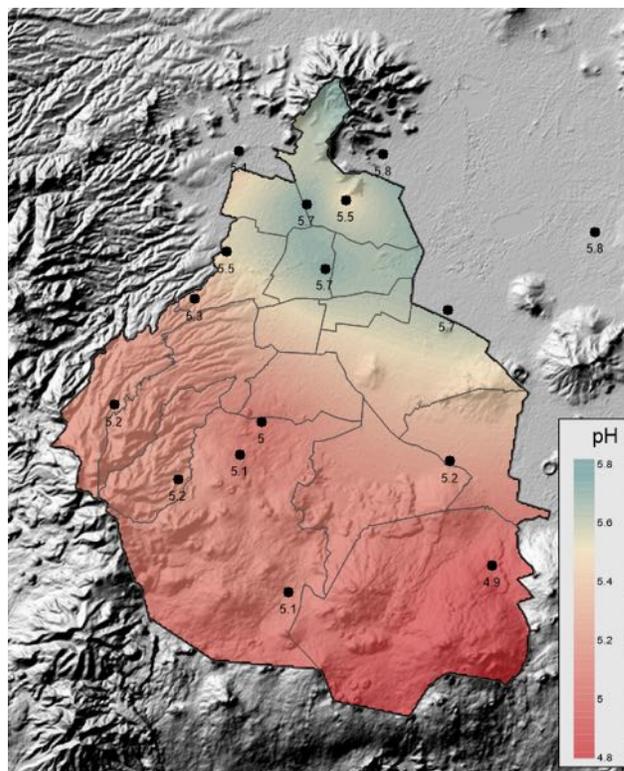


Figura 5.16. Distribución espacial del pH ponderado.

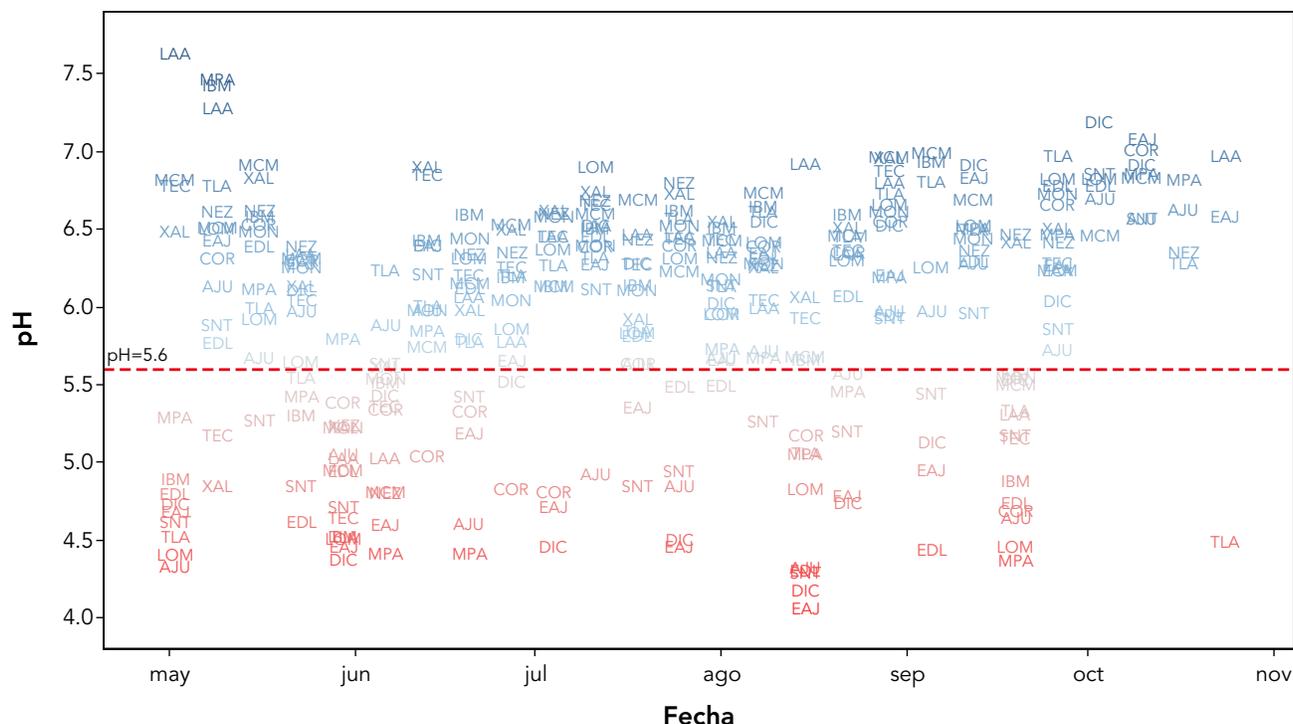


Figura 5.17. Valores de pH de las muestras colectadas durante la temporada de lluvia de 2015. La línea punteada indica el pH natural del agua de lluvia, las iniciales de cada sitio corresponden al valor de pH de cada muestra analizada, los tonos en azul indican valores de pH mayores al umbral de la lluvia ácida, mientras que los tonos rojos indican la presencia de lluvia ácida.

En la Figura 5.17 se indican los valores de pH de cada una de las muestras analizadas. Alrededor del 29 % de ellas reportaron valores de pH menores a 5.6 este porcentaje fue inferior que el observado en 2015, que fue de 62 %, esto indicó una disminución en la acidez con respecto al año previo. El pH mínimo de 4.1 se obtuvo en agosto en el sitio Ecoguardas Ajusco (EAJ), este fue mayor que el mínimo reportado el año previo de 3.8. Los mayores valores de acidez se registraron en las zonas boscosas y de cultivos al sur del territorio de la Ciudad de México. En todas los sitios de monitoreo se observaron valores de pH correspondientes a lluvia ácida (ver Figura 5.18), el mayor número de muestras con un pH menor a 5.6 se colectaron en el sitio San Nicolas Totoloapan (SNT) con un total de 12, que equivalen al 55 % de las muestras analizadas, seguido del sitio Ecoguardas Ajusco (EAJ) con 11 muestras que corresponde al 50 % de las muestras analizadas. El menor número de muestras con valores ácidos se obtuvo en el sitio Xalostoc (XAL) con únicamente dos muestras que equivalen al 10 % de las muestras analizadas.

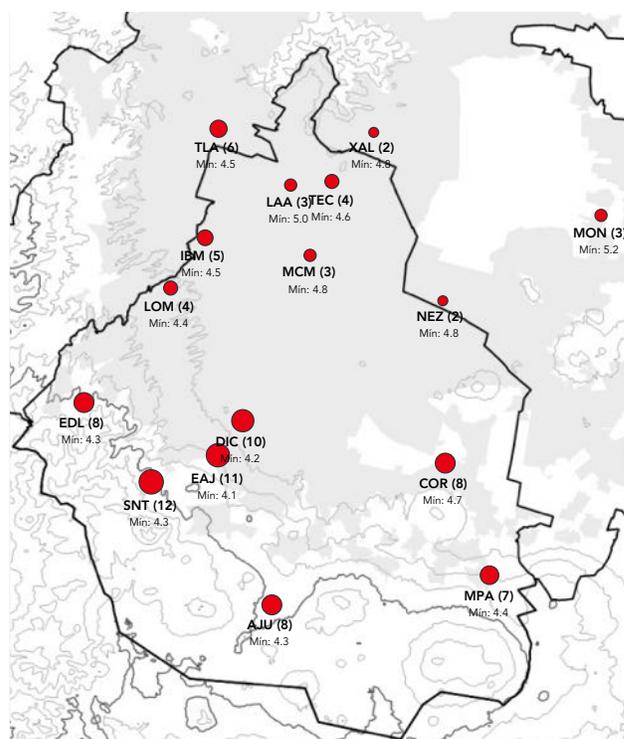


Figura 5.18. Muestras con pH menor a 5.6. En el mapa se indica la clave del sitio, entre paréntesis el número de muestras con pH < 5.6 y el valor mínimo de pH.



Humo negro de una chimenea en el corredor industrial de Xalostoc, Ecatepec, Estado de México

6. Carbono negro

Resultados del análisis de carbono negro equivalente en
muestras de PM_{2.5}

El carbono negro es un componente importante del hollín y se emite durante la quema incompleta de combustibles fósiles y biomasa. Es emitido por diversas fuentes que incluyen automóviles y camiones *diesel*, estufas residenciales, incendios forestales, quemas agrícolas, quema de basura a cielo abierto y por algunas industrias. El carbono negro es un componente importante en los aerosoles atmosféricos y su presencia influye en sus propiedades físicas y químicas. Es un compuesto de especial interés en los estudios de cambio climático ya que por su capacidad de absorber energía infrarroja, tiene una contribución importante al calentamiento regional y global de la atmósfera.

Desde 2015 la REDMA realiza el análisis de carbono negro presente en las muestras de $PM_{2.5}$. Para el análisis se emplea un transmisómetro Magee OT-21, el cual mide la intensidad de la transmisión de la luz a 880 y 370 nm a través del filtro con la muestra y la compara contra la intensidad de la transmisión en un filtro en blanco, a partir de ambas lecturas determina la atenuación causada por la muestra utilizando la relación de Beer-Lambert. La atenuación es proporcional a la cantidad de carbono negro en la muestra. En la determinación de carbono negro utilizando métodos ópticos se asume que la atenuación es proporcional a la cantidad de carbono negro presente en la muestra. Es importante mencionar que

no existe un método único para la medición de carbono negro. Hay una discusión vigente entre la comunidad científica sobre la capacidad de los instrumentos continuos para la medición de este componente de los aerosoles y hasta la fecha no se cuenta con un estándar para su medición. En el caso de los sistemas ópticos se sabe que pueden presentar interferencias relacionadas con las propiedades ópticas de la muestra y del medio filtrante. Algunos autores sugieren que el coeficiente de atenuación depende no solo de la concentración de carbono negro, también del tipo de aerosol y la edad del carbono negro (Liousse *et al.*, 1993; Petzold *et al.*, 1997).

En el cálculo de la densidad del carbono negro se utilizó el coeficiente de atenuación sugerido por el fabricante de $16.6 \text{ m}^2/\text{g}$ para una longitud de onda de 880 nm. Por otra parte, algunos autores han reportado que la dispersión en las capas superiores de las partículas depositadas en los filtros, pueden disminuir la absorción del haz de luz en las capas inferiores de la muestra, provocando una subestimación de la concentración de carbono negro. Este fenómeno es significativo en filtros con una carga importante de partículas, como es el caso de las muestras colectadas para la Ciudad de México y su área metropolitana. Para compensar este efecto se aplicó la corrección propuesta por Virkkula *et al.* (2007) y Park *et al.* (2010) durante el procesamiento de los datos.

Tabla 6.1. Análisis estadístico básico de la concentración de carbono negro equivalente ([CNe]), partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) y la relación entre el carbono negro equivalente y $PM_{2.5}$ ([CNe]/ $PM_{2.5}$) Todas las concentraciones están reportadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Sitio	[CNe] $\mu\text{g}/\text{m}^3$				$PM_{2.5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$				[CNe]/ $PM_{2.5}$			
	Promedio \pm desviación estándar	Mediana	Máx.	Mín.	Promedio \pm desviación estándar	Mediana	Máx.	Mín.	Promedio \pm desviación estándar	Mediana	Máx.	Mín.
Coyoacán (COY)	1.9 \pm 1.3	1.7	8.3	0.3	18.7 \pm 11.6	18.0	77.0	6.0	0.10 \pm 0.03	0.10	0.17	0.05
Merced (MER)	2.7 \pm 1.6	2.5	9.9	0.6	21.8 \pm 12.2	21.0	85.0	5.0	0.13 \pm 0.03	0.12	0.21	0.06
Pedregal (PED)	1.6 \pm 1.1	1.5	7.4	0.3	17.2 \pm 10.5	16.0	73.0	5.0	0.09 \pm 0.03	0.09	0.17	0.04
San Agustín (SAG)	2.2 \pm 1.6	1.9	8.5	0.3	19.1 \pm 11.2	18.0	74.0	3.0	0.11 \pm 0.04	0.11	0.29	0.04
Tlalnepantla (TLA)	2.9 \pm 1.7	2.6	9.9	0.4	24.0 \pm 13.6	23.0	96.0	5.0	0.12 \pm 0.04	0.12	0.23	0.04
UAM Iztapalapa (UIZ)	2.2 \pm 1.6	2.0	10.0	0.4	18.8 \pm 11.7	17.0	77.0	4.0	0.12 \pm 0.05	0.11	0.42	0.05
Xalostoc (XAL)	4.1 \pm 2.3	3.6	9.9	0.5	24.4 \pm 11.3	24.0	49.0	4.0	0.16 \pm 0.05	0.16	0.29	0.07

En esta sección se muestran los resultados del análisis de carbono negro en las muestras de $PM_{2.5}$ de 2016. Las muestras de 24 horas se colectaron cada seis días de acuerdo al calendario de la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA). Siguiendo las recomendaciones de Petzold et al. (2013), se utilizó el término *carbono negro equiva-*

lente (CNe) para reportar de las concentraciones. Es importante mencionar que existe una discusión vigente sobre la medición de CNe, por lo tanto, el método se encuentra en revisión continua y los datos podrían cambiar en futuras revisiones.

Los resultados se reportan en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las condiciones locales de presión y temperatura.

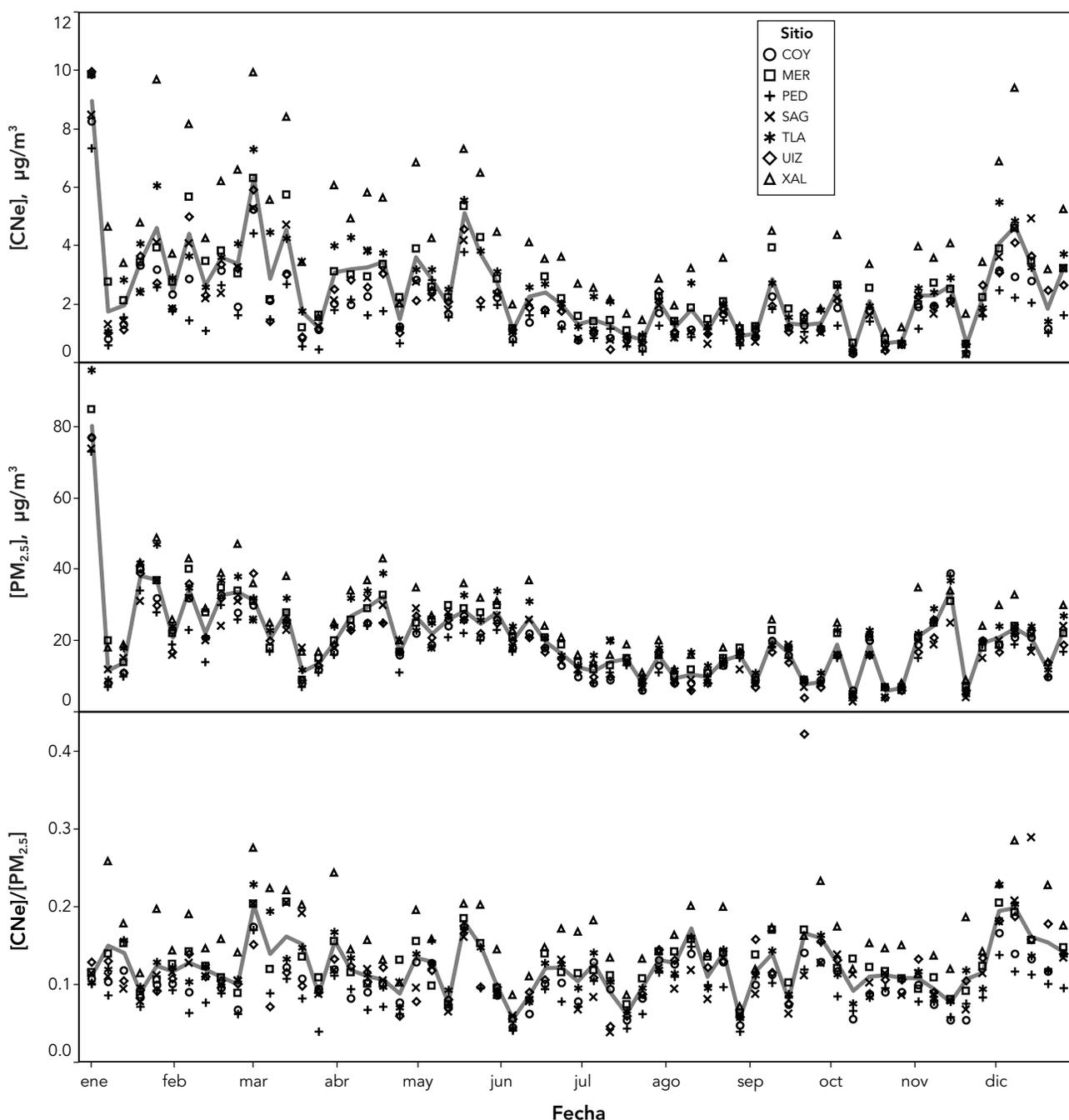


Figura 6.1. Serie de tiempo de la concentración de carbono negro equivalente (CNe), $PM_{2.5}$ y la relación $CNe/PM_{2.5}$ durante 2016. Cada sitio de muestreo está representado por un símbolo, la línea continua representa el valor promedio calculado para todos los sitios de muestreo.

Se analizaron 397 muestras de los siete sitios de muestreo, para cada uno de ellos se obtuvieron más del 85% de muestras válidas. El promedio anual total de CNe fue de $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desviación estándar= $1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), el valor de la mediana fue de $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la Tabla 6.1 se presentan las estadísticas básicas de cada uno de los sitios de muestreo. En la Figura 6.1 se muestran las series de tiempo para las concentraciones de CNe, $\text{PM}_{2.5}$ y el cociente $\text{CNe}/\text{PM}_{2.5}$. En la gráfica se observa un patrón estacional con las mayores concentraciones durante la temporada seca y las menores concentraciones en la temporada de lluvia (junio-octubre). En los meses de la temporada seca fría (diciembre, enero y febrero) las condiciones de estabilidad atmosférica y la presencia de inversiones térmicas de superficie pueden inducir el incremento en las concentraciones de los

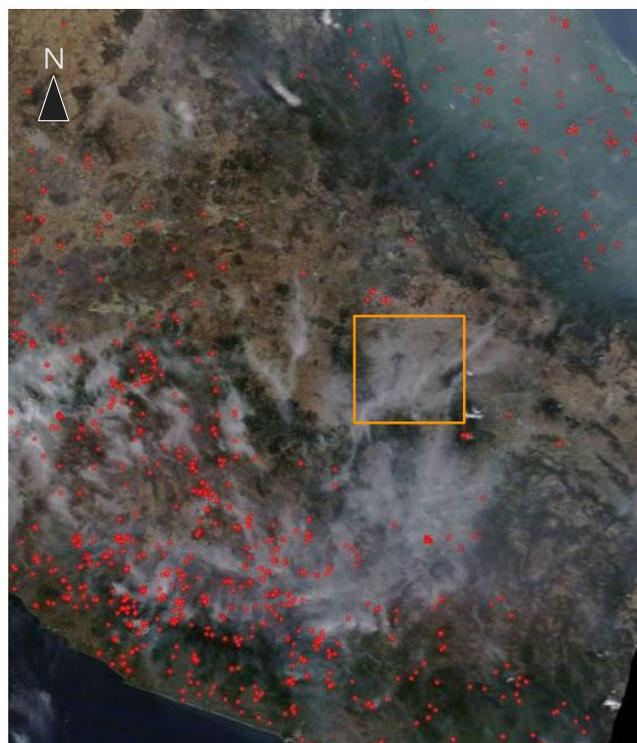


Figura 6.2. Incendios y anomalías térmicas detectadas el 28 de abril de 2016 por el VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) del satélite Suomi-NPP. Los puntos rojos corresponden a los incendios y anomalías térmicas, las manchas grises indican el humo originado por los incendios, el rectángulo muestra la ubicación de la zona metropolitana de la Ciudad de México. Fuente: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>, consultado el 23 de marzo de 2017.

contaminantes primarios, incluyendo el CNe. Las altas concentraciones observadas entre marzo y mayo podrían relacionarse con fuentes regionales, como la contribución de las emisiones producidas por los incendios forestales en los estados del oeste y sur del país, acarreadas grandes distancias por el viento (ver Figura 6.2). A medida que se cuente con más y mejor información sobre el CNe, será posible realizar un análisis sobre la posible contribución de las diferentes fuentes potenciales de CNe tanto locales como regionales.

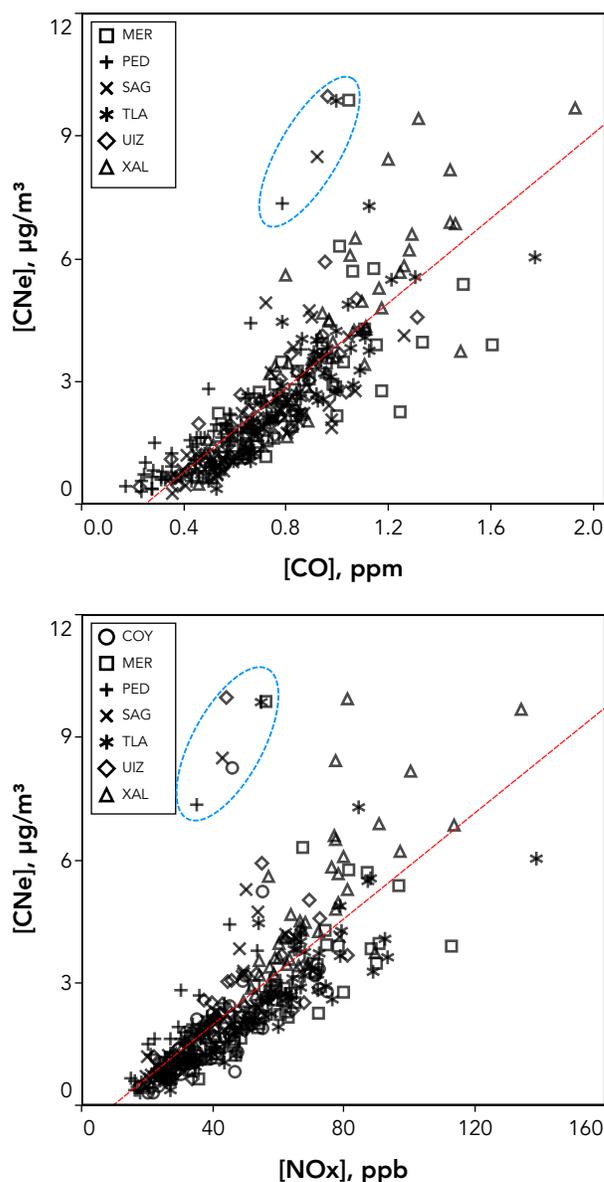


Figura 6.3. Gráficos de correlación del CNe con monóxido de carbono (superior) y óxidos de nitrógeno (inferior). Los datos encerrados en el óvalo azul corresponden a las muestras del 1 de enero de 2016.

El promedio anual máximo se observó en la estación Xalostoc (XAL), ubicada en el corredor industrial de Xalostoc, en Ecatepec de Morelos, con un valor de $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; mientras que la estación Pedregal (PED), ubicada al sur de la Ciudad de México, registró el menor promedio con un valor de $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones máximas de CNe y $\text{PM}_{2.5}$ para el promedio de 24 horas se observaron el 1 de enero, debido a la quema de pirotecnia durante las celebraciones del Año Nuevo, alcanzando valores de CNe entre 7.4 y $10.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio integrado de 24 horas. Ese día la concentración de 24 horas de $\text{PM}_{2.5}$ alcanzó valores entre 73 y $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La contribución promedio del CNe a la masa total de las $\text{PM}_{2.5}$ fue de 12 %, el mayor aporte se observó en el sitio de Xalostoc (XAL) con un 16%, mientras que en Pedregal (PED) fue de 9 %. En los sitios ubicados dentro del territorio de la Ciudad de México el promedio de la contribución fue de 10%, el sitio de Merced (MER) fue el que registró el mayor aporte con 13 %.

En las estaciones en las que se contaba con mediciones simultáneas de otros contaminantes gaseosos se observó una correlación importante

con monóxido de carbono ($R^2=0.631$) y óxidos de nitrógeno ($R^2=0.552$), lo que sugiere que los vehículos fueron una fuente importante de CNe. En la Figura 6.3 se muestra la correlación del CNe con los promedios de 24 horas de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, en ella se destacan los valores correspondientes al 1 de enero (ovalo azul) los cuales se alejan significativamente de la línea de regresión indicando un origen distinto a las emisiones vehiculares.

Al analizar los promedios por día de la semana se observó un patrón similar al de la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ (ver Figura 6.4) y al de monóxido de carbono, con mayores concentraciones en los días laborales que en fin de semana. El promedio del viernes fue mayor en comparación con el resto de los días para todas las estaciones con excepción de Xalostoc, en donde el promedio máximo se observó en lunes. El domingo fue el día con el menor promedio en todas las estaciones. La presencia de otras fuentes de emisión de CNe en la zona industrial podría explicar estas variaciones. Un comportamiento similar se observó en la fracción $\text{CNe}/\text{PM}_{2.5}$, con los mayores valores en viernes y los mínimos en domingo.

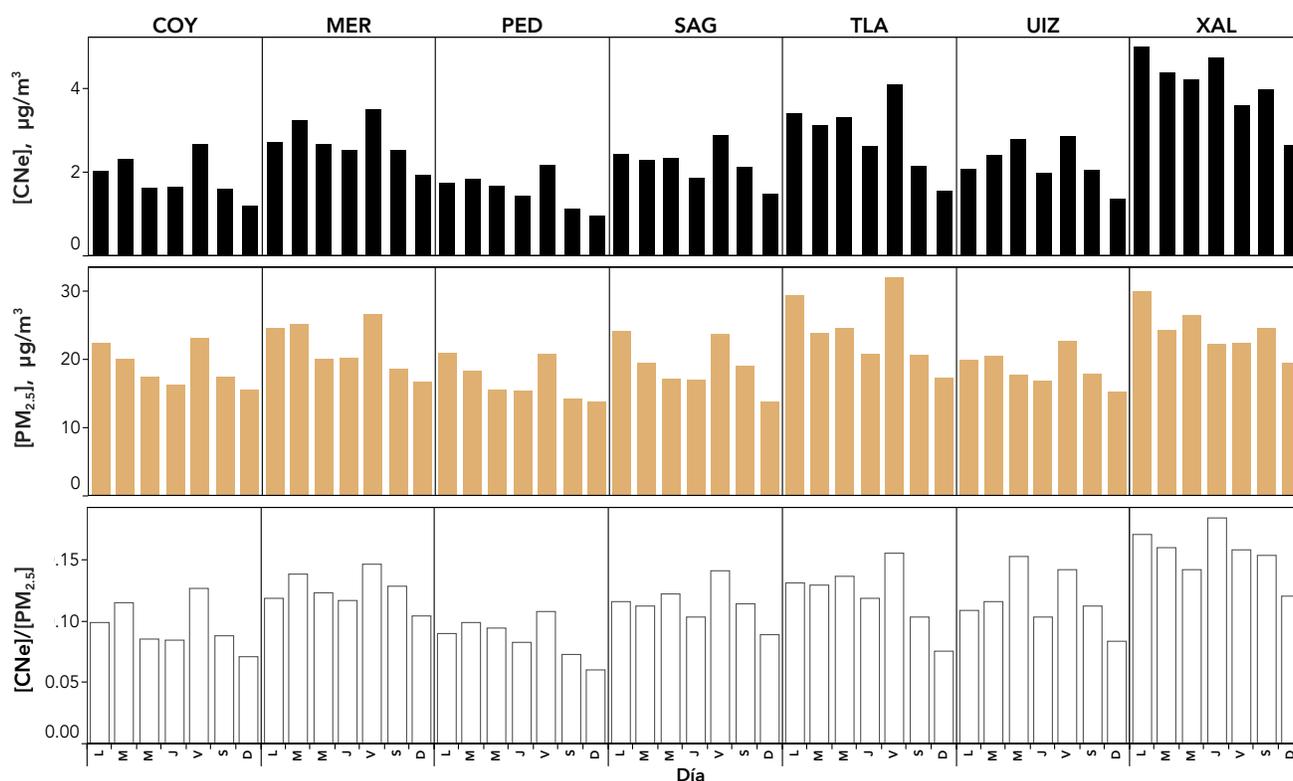
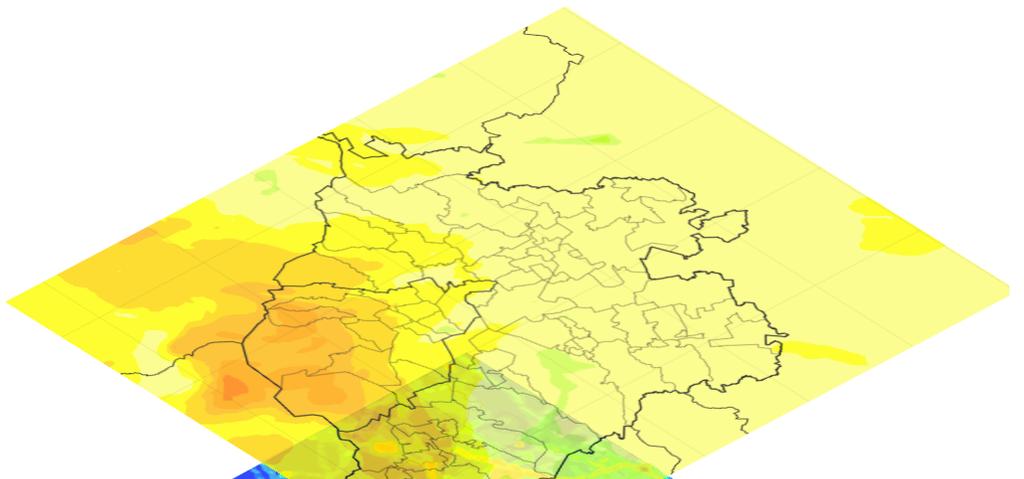
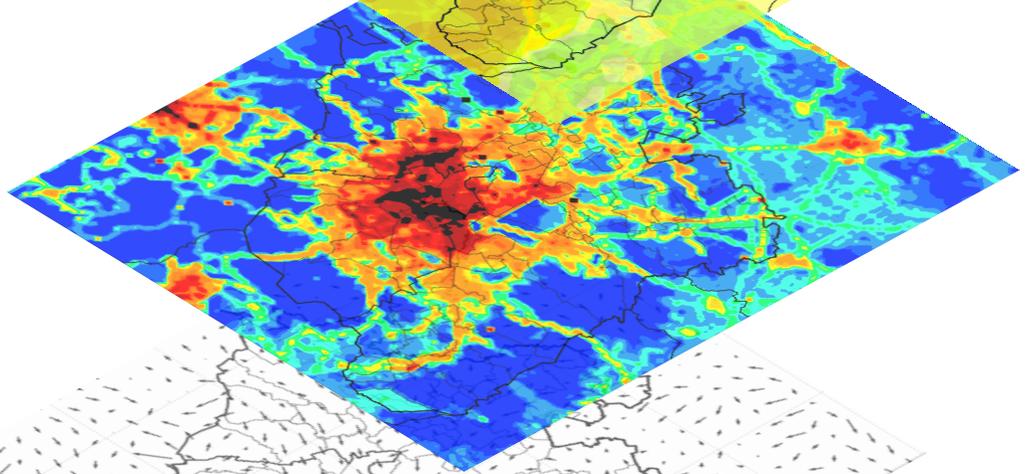


Figura 6.4. Concentraciones promedio de CNe, $\text{PM}_{2.5}$ y la relación $\text{CNe}/\text{PM}_{2.5}$ por día de la semana.

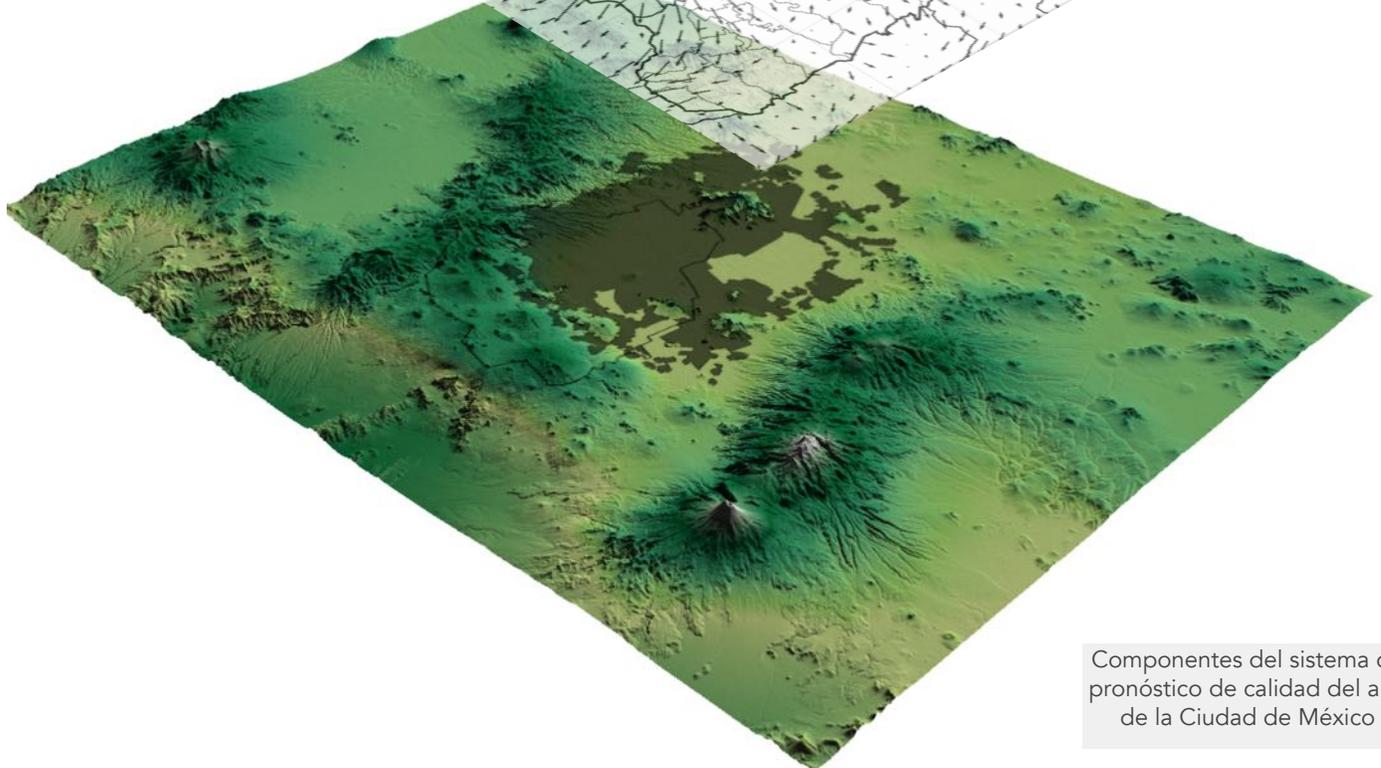
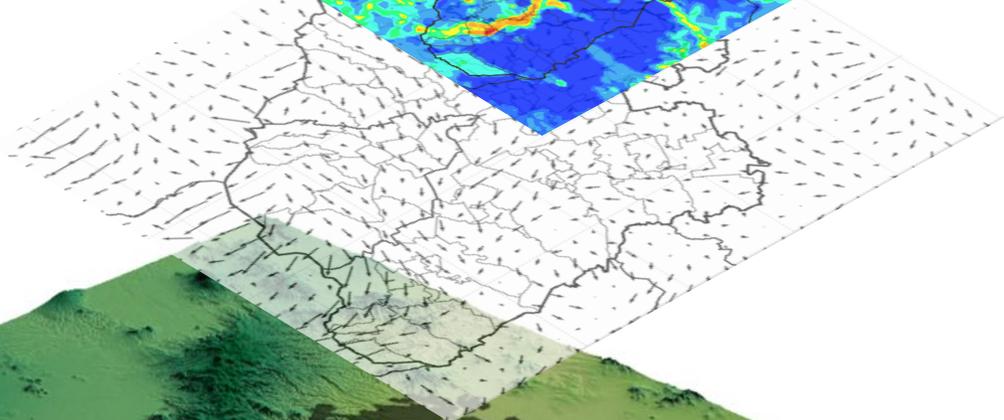
Modelo de calidad del aire



Modelo de emisiones



Modelo meteorológico



Componentes del sistema de pronóstico de calidad del aire de la Ciudad de México

7. Modelación

El sistema AQFS-CdMX para el pronóstico de la calidad del aire de la Ciudad de México

Antecedentes

La gestión de la calidad del aire se refiere al conjunto de políticas y acciones diseñadas para alcanzar los objetivos de la calidad del aire de la ciudad. La gestión se vale de herramientas como el monitoreo, el inventario de emisiones y la modelación numérica. Los modelos se emplean para describir la relación entre los factores que determinan las concentraciones atmosféricas de los contaminantes (emisiones, transporte, difusión, transformación química y deposición), son una herramienta útil para el pronóstico de la calidad del aire, pero también para el diseño y evaluación de las medidas de control. Desde hace algunos años la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire (DGGCA) hace uso de modelos numéricos para el diseño de las políticas de calidad del aire, sin embargo, se trataba de un modelo con limitaciones para realizar el pronóstico operativo, así como para el diagnóstico oportuno de las políticas de control.

Con el fin de mejorar las capacidades de gestión, la actual administración se planteó el reto de desarrollar un sistema de modelación capaz de integrar el conocimiento científico reciente y de utilizar las herramientas de última generación y las mejores prácticas en modelación. Para este propósito, en una etapa previa se realizó el reforzamiento de la infraestructura informática y la actualización del inventario de emisiones. Para cubrir las necesidades informáticas se diseñó e instaló un módulo de cómputo de alto desempeño que consistió en un nodo maestro con 2 procesadores de 12 núcleos de 64 bits a 2.4 GHz, 3 nodos de cálculo con 2 procesadores de 12 núcleos de 64 bits a 2.4 GHz, 2 nodos de almacenamiento con un total de 30 TB de capacidad. En el caso del inventario de emisiones, en 2015 el Colegio de Ingenieros Ambientales de México A.C. (CINAM) y el *Eastern Research Group, Inc.* (ERG) realizaron una evaluación técnica del inventario de emisiones de la zona metropolitana del Valle de México (versión 2012), con el objetivo de identificar las deficiencias en el inventario y recomendar mejoras específicas para su atención. Estas mejoras fueron integradas al inventario de emisiones para la edición de 2014.

El conocimiento científico es un marco referencial para el diseño de las políticas de gestión de

calidad del aire. Las investigaciones realizadas en las campañas MCMA-2003 (*Mexico City Metropolitan Area – 2003*) (Molina et al., 2007) y MILAGRO-2006 (*Megacity Initiative: Local And Global Research Observations – 2006*) (Molina et al., 2010) generaron nueva evidencia científica sobre los procesos físicos y químicos en la atmósfera relacionados con la contaminación en la Ciudad de México. La campaña MCMA-2003 (abril de 2003) proporcionó mediciones detalladas de diferentes oxidantes precursores y de productos fotoquímicos intermedios, incluyendo radicales, así como información meteorológica y de emisiones. Los resultados obtenidos fueron un antecedente fundamental para la realización de la campaña MILAGRO en la primavera de 2006, que fue el primer proyecto de colaboración internacional orientado a evaluar las características y el transporte de contaminantes atmosféricos e involucró más de 450 científicos de 150 instituciones de 30 países.

En este contexto la meta fue implementar un sistema de modelación numérica para el pronóstico y diagnóstico de la calidad del aire capaz de integrar el conocimiento científico vigente, empleando modelos de última generación. Con el apoyo del Centro de Supercómputo de Barcelona (BSC, por su siglas en inglés), la Dirección de Monitoreo Atmosférico (DMA) y la Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventarios de Emisiones (DPCAIE) pusieron en marcha un sistema operativo con los siguientes objetivos:

- Estimar emisiones de contaminantes primarios (NO_x , SO_x , COV, CO, NH_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$) y de los principales gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 y N_2O).
- Cuantificar la relación entre emisiones, meteorología y concentraciones atmosféricas.
- Ofrecer un servicio público de información del pronóstico de la calidad del aire.
- Anticipar los episodios de contaminación y consecuentemente aplicar acciones preventivas.
- Contribuir en el desarrollo de planes de emergencia, la adopción de medidas y programas de reducción cuando se superen los valores límite de la NOM.

Esta sección, que describe los componentes del sistema, fue elaborada a partir del Informe Final del CSB.

Descripción del sistema

El sistema de pronóstico de la calidad del aire para la Ciudad de México (AQFS-CdMX) fue diseñado para proporcionar el pronóstico meteorológico y de la calidad del aire a 24 y 48 horas para la Ciudad de México y su área metropolitana con una alta resolución espacial (1km^2) y temporal (1 hora). Esto a través de la interacción de tres componentes fundamentales:

- Pronóstico meteorológico: temperatura, precipitación, humedad, presión, nubosidad, dirección y velocidad del viento, entre otras
- Pronóstico de emisiones: óxidos de nitrógeno (NO_2 y NO), compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), amoníaco (NH_3), material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) y principales gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 y N_2O)
- Pronóstico de calidad del aire: O_3 , NO_2 , CO, SO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y benceno.

La operación del sistema AQFS-CdMX requiere de un suministro continuo de información detallada sobre el comportamiento de los parámetros meteorológicos que influyen en la formación y el transporte de contaminantes (temperatura, viento, radiación solar, etc), así como de las concentraciones de los gases y partículas primarios emitidos por fuentes antropogénicas y naturales (NO_x , COV, PM_{10} , etc.) y las reacciones fotoquímicas que tienen lugar durante la formación de contaminantes secundarios (por ejemplo: O_3 , aerosoles secundarios). Por lo que fue necesaria la implementación y acoplamiento de un modelo meteorológico, un modelo de emisiones y un modelo de transporte químico. En el caso de los modelos meteorológico y de transporte químico, se emplearon los modelos existentes y ampliamente usados por la comunidad científica. En el caso del modelo de emisiones, teniendo en cuenta que es una de las fuentes más importantes de incertidumbre, se desarrolló un modelo para el pronóstico de emisiones haciendo uso del inventario de emisiones de la zona metropolitana, desarrollado por la SEDEMA, y del Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM), elaborado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Para la estimación de los parámetros meteorológicos se empleó el modelo *Weather Research and Forecasting - Advanced Research* (WRF-ARW, por sus siglas en inglés). Mientras que para el modelado de las emisiones se desarrolló un sistema flexible para el procesamiento de las emisiones, el cual permite realizar desagregaciones espaciales, temporales y de especiación a partir de la información disponible en el inventario de emisiones de la Secretaría del Medio Ambiente para 2014 y del Inventario Nacional de Emisiones 2013. Finalmente, la simulación del transporte y las reacciones químicas de los contaminantes se realiza con el modelo *Community Multi-scale Air Quality* (CMAQ, por sus siglas en inglés) que es un sistema de modelado de la calidad del aire desarrollado por la US EPA y soportado y distribuido por la *Community Modeling and Analysis* (<https://www.cmascenter.org/cmaq/>).

En su configuración original el sistema AQFS-CdMX se ejecuta en un total de 4 dominios. En los dos primeros se ejecuta únicamente el modelo WRF-ARW con una resolución de 27 km^2 y 9 km^2 , respectivamente, la cobertura de estos dominios permite abarcar adecuadamente los sistemas meteorológicos que proceden tanto del norte como del sur del continente que tienen efecto sobre la Ciudad de México, así como de los fenómenos que ocurren en el Golfo de México y el océano Pacífico. En el tercer dominio se ejecutan los tres modelos (meteorológico, de emisiones y fotoquímico), tiene una resolución de 3 km^2 y proporciona las condiciones de contorno meteorológicas y químicas para el cuarto dominio, que tiene una resolución de 1 km^2 , mediante un proceso de anidamiento. En este último dominio se generan los pronósticos de calidad del aire para la zona metropolitana con una alta resolución temporal y espacial para los contaminantes criterio. Adicionalmente se produce información meteorológica detallada para toda la región central del país. En la Figura 7.1 se presenta un diagrama de flujo con la interacción de los diferentes componentes del modelo.

En siguientes apartados se ofrece una descripción detallada de cada uno de los componentes, las configuraciones usadas, metodologías implementadas y las bases de datos usadas para que el sistema AQFS-CdMX presente el mejor rendimiento.

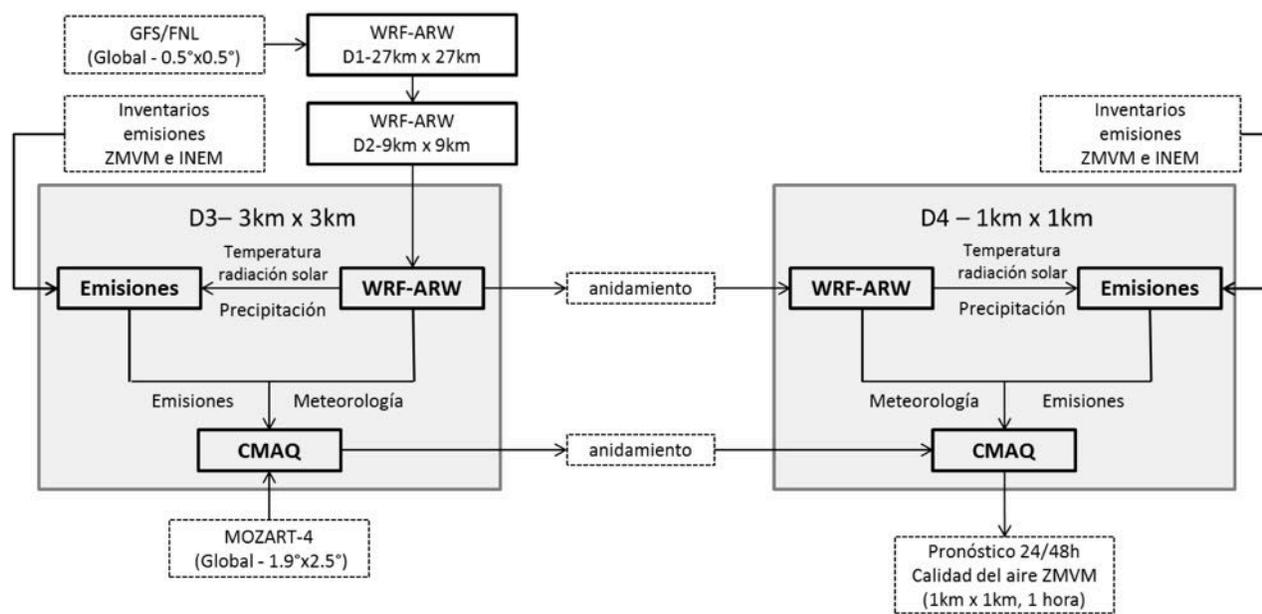


Figura 7.1. Estructura del sistema de pronóstico de calidad del aire para la Ciudad de México.

Modelo meteorológico

El modelo WRF-ARW es un modelo meteorológico mesoescalar de última generación diseñado para operar en modo pronóstico y para las principales necesidades de la investigación atmosférica (<http://www.wrf-model.org>). El modelo cuenta con múltiples núcleos dinámicos, un sistema de asimilación de datos variacional en 3 dimensiones (3DVAR) y una arquitectura que permite su ejecución en un entorno de hardware de computación paralela (Skamarock et al., 2008). El modelo WRF-ARW es ampliamente usado y es el resultado de un proyecto donde participaron el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), *National Centers of Environmental Prediction* (NCEP) y otras instituciones de América del Norte. Algunas de las razones por las cuales se eligió el modelo WRF-ARW para la simulación meteorológica, se describen a continuación:

- Existe una extensa y creciente comunidad científica y de usuarios que lo emplean, evalúan y actualizan de forma continua (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>).

- Se utilizó como modelo meteorológico de referencia durante las campañas MC-MA-2003 y MILAGRO-2006, para la formulación de estrategias en materia de contaminación local en la zona metropolitana de la Ciudad de México (Molina et al., 2007 y 2010), así como durante el proyecto MIRAGE para caracterizar las transformaciones químicas y físicas y el transporte de contaminantes emitidos en la zona metropolitana (<http://www2.mmm.ucar.edu/projects/mirage/index.php>).
- Sus necesidades de cómputo eran compatibles con la infraestructura de hardware de la DGGCA.
- Desde 2014 era empleado por la Dirección de Monitoreo Atmosférico para el estudio de la meteorología regional.
- El BSC tiene una amplia experiencia para su uso y evaluación en áreas complejas como la Península Ibérica (Jorba et al., 2004 y 2008).
A continuación se describe la metodología empleada para la definir la configuración y evaluar del modelo WRF-ARW.

Definición de los dominios de trabajo

Durante la selección de los dominios de trabajo se tomó en cuenta la complejidad de la topografía de la región central del país y la influencia de los sistemas meteorológicos procedentes del norte y sur del continente, así como aquellos sistemas que se generan en el Golfo de México y el océano Pacífico. Siguiendo las recomendaciones y buenas prácticas descritas por Wang (2014), en la selección de los dominios se aplicaron los siguientes criterios:

- Configuración del anidado entre dominios (*nesting*): los dominios deben definirse en una metodología *top-down*.
- Topografía: el dominio de trabajo no debe

presentar incrementos de altura elevados cerca de los contornos.

- Distancia entre dominios: se recomienda una distancia mínima entre los límites de un dominio madre y su dominio anidado de 4 celdas, aunque se aconseja mantener una distancia de *buffer superior*.
- Relación de la resolución espacial: se recomienda trabajar con una relación de 5/1 o 3/1 entre el dominio madre y su dominio anidado.

Tomando en cuenta lo anterior se definieron cuatro dominios de trabajo: Dominio 1 (D1), Dominio 2 (D2), Dominio 3 (D3) y Dominio 4 (D4), cada uno de ellos con 37 niveles verticales. En la Figura 7.2 se muestra cada uno de estos dominios.

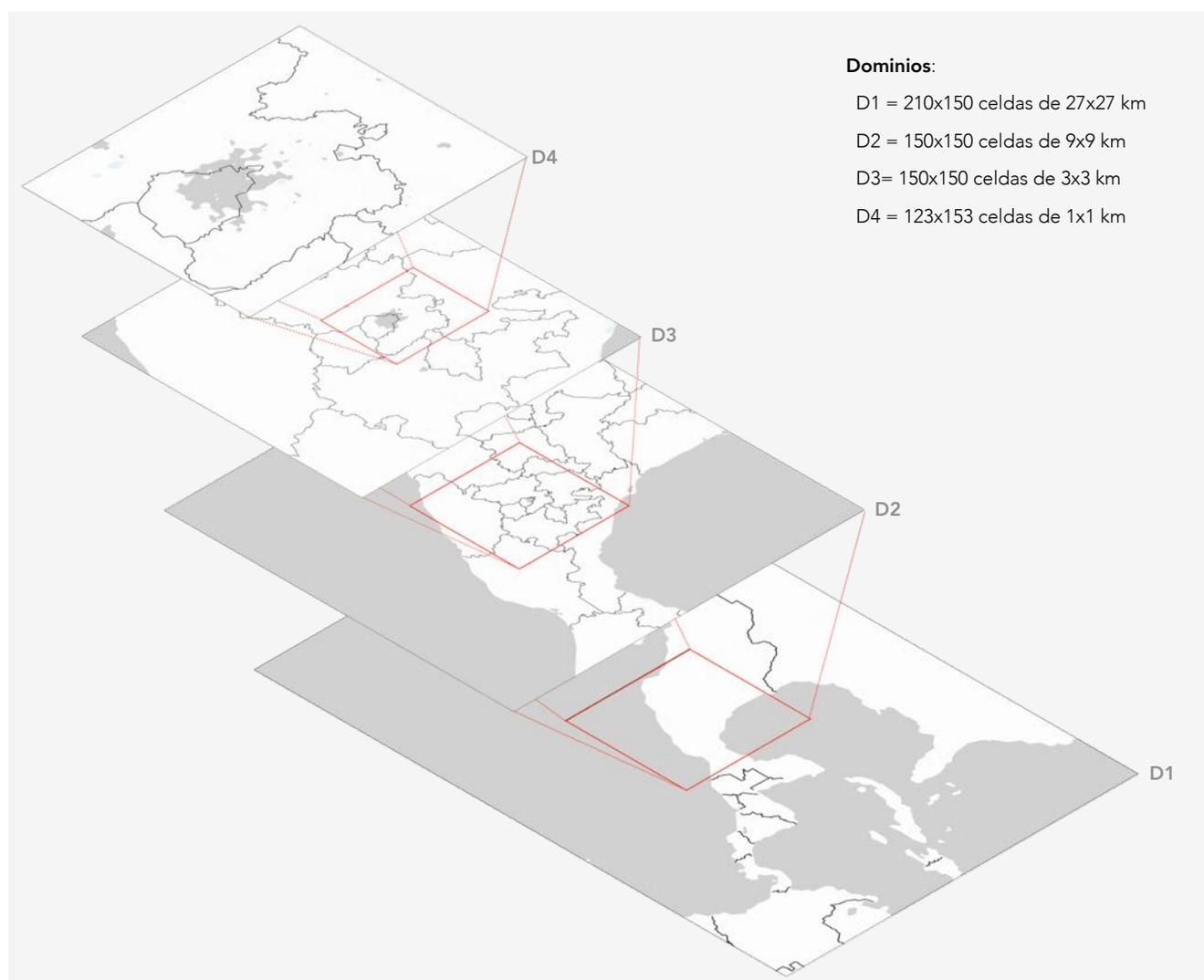


Figura 7.2. Dominios empleados en el modelo WRF-ARW.

Parametrización de la física

El buen desempeño del modelo está determinado por la elección de las parametrizaciones que definen la física del modelo. La física debe ser capaz de simular de manera adecuada la dinámica meteorológica regional y local en un terreno tan complejo como de los dominios D2 a D4. Por ello, la elección de las parametrizaciones se realizó tomando en consideración la experiencia previa del uso del WRF-ARW para estudios en la Ciudad de México. En la Tabla 7.1 se describen las opciones de parametrización elegidas para la física del modelo.

Condiciones iniciales y de contorno

Las condiciones meteorológicas iniciales y de contorno del dominio D1 proceden de las predicciones globales del *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), que utiliza el modelo *Global Forecast System* (GFS) (0.25°x0.25° de resolución) (Kalnay *et al.*, 1990). El

modelo GFS se ejecuta 4 veces al día: a las 00, 06, 12 y 18 horas (UTC). Dentro del sistema AQFS-CdMX el modelo WRF-ARW se inicializa con los GFS de las 06 horas UTC.

Actualización de la topografía

La Ciudad de México se ubica dentro de la cuenca del Valle de México, un terreno plano cercado por montañas con una altura media entre 600 y 800 metros sobre el nivel del piso del valle. La ciudad está rodeada por la Sierra de Guadalupe al norte, la Sierra de las Cruces al oeste, la Sierra del Ajusco al sur y la Sierra Nevada al este, esta última incluye a los volcanes Iztaccíhuatl (5200 msnm) y Popocatepetl (5400 msnm). La cantidad y distribución de las montañas, hacen de la Ciudad de México y su área metropolitana un terreno de gran complejidad que tiene una influencia importante en la meteorología y en la manera en la que los contaminantes se comportan en la atmósfera. En este sentido, fue importante incorporar al modelo WRF-ARW la información topográfica más detallada disponible.

Tabla 7.1. Parametrización de la física del modelo meteorológico WRF-ARW.

Física	Parametrización	Justificación
<i>Planetary boundary layer</i> (PBL)	YSU	Se trata del esquema de PBL más efectivo para la zona metropolitana de la Ciudad de México según los estudios de Fast <i>et al.</i> (2007) y de Foy <i>et al.</i> (2009) realizados en el marco de la campaña MILAGRO.
<i>Land surface model</i>	<i>Noah Land Surface Model</i>	Esta opción se empleó en las simulaciones realizadas en el marco de las campañas MCMA-2003 (de Foy <i>et al.</i> , 2006) y MILAGRO (Zhang <i>et al.</i> , 2009), así como, en el proyecto MIRAGE y en el estudio de López-Espinosa y Zavala-Hidalgo (2012)
<i>Cumulus parameterization</i>	<i>Kain-Fritsch scheme</i>	Utilizado en las simulaciones realizadas en el marco de las campañas MCMA-2003 (de Foy <i>et al.</i> , 2006) y MILAGRO (Zhang <i>et al.</i> , 2009), así como, en el proyecto MIRAGE y en los estudios de Cui y De Foy (2012) y López-Espinosa y Zavala-Hidalgo (2012)
<i>Longwave radiation</i>	RRTM	Utilizado en las simulaciones realizadas en el marco de las campañas MCMA-2003 (de Foy <i>et al.</i> , 2006) y MILAGRO (Zhang <i>et al.</i> , 2009), así como, en el proyecto MIRAGE y en los estudios Cui y de Foy (2012) y López-Espinosa y Zavala-Hidalgo (2012)
<i>Shortwave radiation</i>	Goddard	Utilizado en el estudio de Cui y de Foy (2012) para analizar el efecto de isla de calor de la ZMVM
<i>Surface layer</i>	<i>Revised MM5 scheme</i>	En el proyecto MIRAGE y en el estudio de Cui y de Foy (2012) se utilizó el esquema MM5 <i>similarity</i> . Se decidió usar una versión actualizada de este esquema la cual apareció a partir de la versión WRF3.4
<i>Microphysics</i>	<i>WRF Single-Moment 5-class scheme</i> (WSM5)	En las simulaciones realizadas en la campaña MILAGRO (Zhang <i>et al.</i> , 2009) y el estudio de Cui y de Foy (2012) se utilizó el WSM6. La única diferencia entre el WSM5 y el WSM6 es que este último incorpora también los procesos de granizo.

El modelo WRF-ARW emplea los datos de topografía procedentes de la base de datos del *United States Geological Survey* (USGS), creada en 1993 y que tiene una resolución espacial de aproximadamente 1 km. Algunos estudios han demostrado que el uso de esta base de datos topográfica puede tener asociada cierta incertidumbre en los resultados del modelo, especialmente en términos de temperatura, velocidad y dirección del viento y precipitación (por ejemplo: De Meji y Vinuesa, 2014). Por lo tanto se realizó la actualización de la base de datos de topografía empleando la reportada por el *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), creada en el año 2000, con una resolución espacial de 90 m (Farr et al., 2007; Jarvis et al., 2008).

Actualización de usos de suelo

El modelo WRF emplea por omisión los datos de usos de suelo procedentes de la base de datos del USGS, creados a partir de imágenes del satélite *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), obtenidas entre 1992 y 1993 con una resolución aproximada de 1 km. Sin embargo, entre 1990 y la actualidad la población del país ha crecido en más de un 30% (principalmente en las áreas metropolitanas), lo cual representa un incremento importante en la extensión de las zonas urbanas, particularmente en el caso de la Ciudad de México y su área metropolitana.

Por lo anterior, fue necesario realizar la actualización de la base de datos del uso de suelo del WRF-ARW, empleando el mapa de usos de suelo del 2010 creado por la *European Space Agency Climate Change Initiative* (ESA CCI). Se trata de un mapa creado a partir de la información de usos de suelo obtenida entre los años 2008 y 2012, con una resolución espacial de 300 m. La base de datos de usos de suelo del USGS define únicamente 24 categorías, mientras que el mapa de la ESA CCI contiene un total de 36. Por lo tanto fue necesario reclasificar las 36 categorías de usos de suelo de la ESA CCI para que coincidieran con las 24 del USGS.

Activación del Urban Canopy Model

Con el propósito de representar mejor los procesos físicos que intervienen en el intercambio

de calor, impulso y vapor de agua en un entorno urbano como el de la Ciudad de México, el modelo mesoescalar WRF-ARW cuenta con la posibilidad de acoplarse a un *Urban Canopy Model* (UCM). El objetivo principal del UCM es mejorar la descripción de las condiciones de contorno inferior y proporcionar pronósticos más precisos para las regiones urbanas.

El UCM es un modelo de capa única que incluye una geometría urbana simplificada. Algunas de sus características incluyen sombras de los edificios, reflejo de radiación de onda corta y larga, el perfil del viento en la capa *canopy* y la ecuación de transferencia de calor de múltiples capas para techo, pared y carretera (Kusaka y Kimura, 2004; Tewari et al., 2007; Chen et al., 2011). El UCM se acopla con la parametrización *Noah Land Surface Model*. Aunque el UCM puede ejecutarse con la configuración por omisión, es recomendable ajustar los parámetros urbanos para reflejar las características urbanas de la región de estudio.

Con el objetivo de adecuar el UCM a las condiciones locales y específicas de la Ciudad de México y su área metropolitana, se realizaron las siguientes acciones:

- Creación de un mapa de usos urbanos. Esto se realizó tomando en cuenta los valores de densidad de población de cada uno de los municipios (CONABIO, 2015). Todo uso urbano ubicado en un municipio con una densidad de población igual o superior a 5500 habitantes/km² fue reclasificado como *High intensity residential*. Por otro lado, los usos urbanos ubicados en municipios con una densidad poblacional inferior a 5500 habitantes/km² fue redefinido como *Low intensity residential*. Las principales zonas industriales, así como, el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México fueron reclasificados en la categoría *Commercial/Industrial/Transportation*.
- Actualización de las variables urbanas del UCM. Para ello se tomaron en cuenta las observaciones y cálculos realizados para la Ciudad de México y recopilados en literatura científica.
- Adicionalmente se modificó el perfil horario del calentamiento antropogénico haciendo uso de los datos reportados por Cisneros y Pardo (2015).

Modelo de emisiones

El modelo de emisiones consiste en un sistema flexible de procesamiento de emisiones que permite aplicar una desagregación espacial y temporal por actividad contaminante y de especiación del inventario de emisiones existente, lo anterior con el objetivo de calcular emisiones horarias y especiadas por celda, que puedan ser utilizadas por el modelo de transporte químico CMAQ. El modelo sigue un concepto parecido al modelo *Sparse Matrix Operator Kernel Emissions* (SMOKE) y al modelo HERMESv2.0 (Ferreira et al., 2013).

El modelo de emisiones se aplica en los dominios de trabajo D3 y D4 definidos previamente con el modelo WRF-ARW, ya que el dominio de trabajo en el que se centra el sistema AQFS-CdMX es el D4, además, reduce considerablemente la demanda de recursos computacionales y el tiempo de cálculo. En el dominio D3 se utilizan las condiciones de contorno del modelo global MOZART-4/GEOS-5.

Inventario de emisiones

El modelo utiliza el inventario de emisiones de la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) el cual reporta datos de emisiones para cada una de las 16 delegaciones de la Ciudad de México y un total de 59 municipios del Estado de México, considerando las fuentes puntuales, de área, móviles y naturales e incluyendo los contaminantes NO_x, SO_x, VOC, TOC, CO, NH₃, PM₁₀, PM_{2.5} y los gases de efecto invernadero (GEI) CO₂, CH₄ y N₂O.

La elección del inventario de la SEDEMA como fuente de información de emisiones está determinada por los siguientes factores:

- Fue desarrollado haciendo uso de datos locales y aplicando metodologías de estimación de emisiones que cumplen con el estado del arte.
- Está en continuo desarrollo y actualización. El inventario cuenta con resultados de emisiones anuales para la serie temporal 1998–2014, lo que permitirá realizar estudios de calidad del aire de años previos.
- La estimación de emisiones se hace clasificando por municipio, fuente específica (ej. central térmica), tipo de combustible (ej.

combustión residencial de gas natural) y tipo de tecnología (por ejemplo, categoría de vehículo). Lo anterior proporciona flexibilidad al modelo y ofrece la posibilidad de usarlo en estudios de evaluación de medidas de mejora de la calidad del aire.

El inventario de la SEDEMA sólo cubre una parte del dominio D4, por lo tanto, para complementar la información requerida por los dominios D3 y D4 se utilizó el Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM) desarrollado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) para el año 2013, es importante mencionar que la información pública de este inventario no tiene los valores desagregados en malla y presenta deficiencias importantes para la caracterización de varias fuentes, por lo cual, cualquier mejora futura en el inventario será incorporada al modelo.

Los contaminantes primarios considerados por el modelo de emisiones son NO_x, SO_x, VOC, TOC, CO, NH₃, PM₁₀, PM_{2.5} así como los GEI CO₂, CH₄ y N₂O. Aunque los GEI no se usarán dentro del sistema AQFS-CdMX, su inclusión en el modelo permitirá explotar los resultados para otros objetivos/proyectos enfocados a temas de cambio climático.

Desagregación espacial

El primer paso que ejecuta el modelo es la distribución horizontal de las emisiones anuales en celdas de cuadrantes individuales definidas sobre los dominios de trabajo. En la desagregación horizontal se asignan sustitutos espaciales de forma específica a cada una de las fuentes de emisión (datos de población, red de carreteras, usos de suelo, etc.), lo que permite repartir las emisiones municipales en aquellas celdas que: se encuentran dentro del municipio en cuestión y contienen el total o una parte del sustituto espacial asignado.

En el caso de las fuentes fijas, las emisiones están identificadas espacialmente en los inventarios de emisiones. El uso del INEM en el dominio D4 permite incluir las zonas industriales de Tula/Atitalaquia y Lerma/Toluca que, aunque están localizadas fuera de la zona metropolitana, pueden tener un impacto importante en la calidad del aire de la Ciudad de México dependiendo de las condiciones meteorológicas

Para la desagregación espacial horizontal de las fuentes de área se recurrió a distintas coberturas espaciales que incluyeron usos de suelo, datos de población y a la ubicación de instalaciones específicas previamente determinadas. La desagregación espacial de las emisiones se realizó en función del tipo de cobertura.

En cuando a la desagregación espacial de las fuentes móviles, esta se realizó con un enfoque lineal, teniendo en cuenta los tramos de carretera que intersectan en cada celda. La solución toma en consideración los diferentes tipos de vías que existen en cada celda. La cobertura espacial fue obtenida a través de *Open Street Map* (OSM), un proyecto colaborativo para crear mapas de contenido libre usando datos obtenidos mediante dispositivos GPS móviles, ortofotografías y otras fuentes de datos. En el caso de las emisiones de Metrobuses y Mexibuses se consideraron sólo las vías por donde circulan estos transportes públicos, mientras que en el caso de la resuspensión en vialidades no pavimentadas, las emisiones se repartieron en el conjunto de carreteras clasificadas como Terracerías.

Para la desagregación vertical en el caso de las fuentes fijas, la distribución se realizó tomando en cuenta la altura física de cada fuente. A diferencia de otros países, en donde las alturas de chimenea pueden superar los 300 m, en la República Mexicana las chimeneas raramente alcanzan o superan los 100 m. En las industrias localizadas dentro de la zona metropolitana la altura máxima registrada fue de 87.7 m para la Nueva Fábrica Nacional de Vidrio, S. A. En el caso de instalaciones con altos valores de emisión (Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos ó la Refinería Miguel Hidalgo), las alturas registradas fueron de 65 m. El modelo asume una discretización vertical de la malla, estableciendo que las emisiones fugitivas y de chimeneas de altura inferior a 25 m ocurren en la primera capa (0 a 56.6 m), las de chimeneas entre 25 y 50 m de altura en la segunda capa (56.6 a 137.9 m), las de chimeneas entre 50 y 100 m de altura en la tercera capa (137.9 a 244.7 m) y las de chimeneas mayores a 100 m de altura en la cuarta capa (244.7 a 377.6 m). Para las fuentes de área y móviles, que prácticamente ocurren a nivel de superficie, las emisiones se distribuyen íntegramente en la primera capa del modelo (0 a 56.6 m).

Desagregación temporal

Debido a que la simulación numérica de la calidad del aire tiene el objetivo de representar los procesos físicos y químicos que ocurren en un lapso específico de tiempo, es necesario realizar una desagregación temporal adecuada de las emisiones. En condiciones reales, se sabe que algunas fuentes de emisión pueden incrementar su actividad durante el invierno, no operar los domingos (en el caso de ciertos sectores industriales), o tener picos de actividad durante determinadas horas del día (como es el caso del tránsito vehicular). En este sentido, el uso de perfiles temporales para cada fuente de contaminantes permite modelar correctamente la variabilidad de las emisiones durante los periodos deseados.

En el caso de las fuentes fijas se utilizaron los perfiles usado por la DPCAIE en los inventarios de emisiones. Estos perfiles distinguen entre días laborales (lunes a viernes), sábados y domingos. Durante la semana se asumió un perfil plano de lunes a viernes para todos las fuentes, mientras que para sábado y domingo sólo se activan aquellas industrias que tienen asignado un perfil horario. A nivel mensual, se asumió un comportamiento plano de todos los sectores puntuales (emisiones constantes durante todos los meses).

Para la desagregación temporal de las fuentes de área se tomaron en cuenta los perfiles horarios reportados por la DPCAIE. En este caso, y a diferencia de las fuentes fijas, no se distingue entre días laborables, sábados y domingos. A nivel de día de la semana, y debido a la falta de información más concreta, se asumió un perfil plano para todos los sectores. A nivel mensual, se asumió un comportamiento plano de todos los sectores (emisiones constantes durante todos los meses) excepto para la combustión habitacional/comercial/agrícola/industrial, las operaciones de aeronaves, las quemas controladas y las actividades agrícolas.

En el caso de las fuentes móviles se utilizaron los perfiles promedio, horarios y por día de la semana, derivados de los conteos de tránsito vehicular disponibles para algunas de las vialidades de la Ciudad de México. Para las vialidades ubicadas en el resto del área metropolitana se asumió un comportamiento temporal en el tránsito vehicular similar al de la Ciudad de México.

Especiación

La especiación se realizó de acuerdo al mecanismo químico seleccionado para el modelo de transporte químico, el cual describe matemáticamente los procesos fotoquímicos en la atmósfera a través de una serie de reacciones químicas que incluyen a los contaminantes primarios y los secundarios producidos. Debido al elevado número de compuestos y reacciones atmosféricas que existen en la realidad, los mecanismos químicos incluyen distintos tipos de parametrizaciones y aproximaciones, expresando las especies químicas no explícitamente sino según distintas categorías.

A escala regional y urbana, los dos mecanismos más usados son el *Statewide Air Pollution Research Center* (SAPRC99) (Carter, 2010) y el *Carbon Bond 05* (CB05) (Yarwood et al., 2005). La principal diferencia entre ellos es la técnica de agrupación usada para clasificar a los compuestos orgánicos en grupos subrogados: mientras que el mecanismo CB05 requiere que las emisiones orgánicas sean desagregadas en emisiones de especies agrupadas con base en la estructura del enlace de carbono, el mecanismo SAPRC99 agrupa los compuestos con base en su reactividad relativa con el radical hidroxilo. Ambos modelos son capaces de generar resultados razonables para los niveles de los contaminantes secundarios de interés, por lo tanto, en la selección del mecanismo se priorizó la capacidad y demanda de recursos computacionales, esto tomando en cuenta que durante la ejecución del modelo la resolución de un mecanismo químico es la parte más intensiva de la ejecución. El modelo CB05 se seleccionó porque contiene un menor número de especies y reacciones y, por lo tanto, demanda menos recursos de cómputo.

El modelo CMAQ requiere que los NO_x sean caracterizados como NO y NO_2 , por lo que asignaron ponderaciones particulares para las fuentes fijas y de área, mientras que para las fuentes móviles se asignaron distribuciones en función del tipo de vehículo y combustible usado. Además se asignó una contribución para el ácido nitroso (HONO) emitido por los vehículos, ya que juega un papel muy importante en la fotoquímica de la troposfera. Para la especiación química de los compuestos orgánicos totales y de las partículas

suspendidas se usó la base de datos SPECIATE 4.4 de la US EPA. Los perfiles de especiación para las fuentes fijas se seleccionaron en función del tipo de combustible utilizado en las instalaciones. En algunas categorías de fuentes de área se emplearon los perfiles de especiación obtenidos de diversas campañas realizadas en la Ciudad de México (Mugica et al., 2002), para aquellas en las que no había perfil disponible se empleó la base de datos SPECIATE 4.4. En el caso de las fuentes móviles, para los vehículos de gasolina y *diesel* los perfiles de especiación se obtuvieron de campañas de muestreo, cuando no estuvieron disponibles se empleó SPECIATE 4.4.

Las emisiones biogénicas se calculan a través del sistema SMOKE, que hace uso del modelo de emisiones biogénicas *Biosphere Emissions and Interactions System* versión 3 (BEIS3). BEIS es un sistema de modelado de emisiones biogénicas desarrollado por el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) y la *Environ International Corporation* que permite estimar las emisiones biogénicas de COV, CO y NO_x procedentes del suelo para cualquier escala de tiempo y dominio espacial (Norteamérica). El modelo incluye una base de datos de la vegetación a 1 km de resolución con un total de 230 tipos de usos de suelo y factores de emisión para 35 especies químicas (incluyendo isoprenos, monoterpenos y sesquiterpenos).

Modelo químico y de transporte

El modelo químico implementado en el AQFS-CdMX es el *Community Multi-scale Air Quality* (CMAQ). CMAQ es un sistema de modelado de la calidad del aire desarrollado por la US EPA, soportado y distribuido por la *Community Modeling and Analysis* (CMAS). El modelo combina el conocimiento científico actual en la simulación de la calidad del aire atmosférico con técnicas de computación con procesadores múltiples en un marco de código abierto, ofreciendo la capacidad de realizar simulaciones técnicamente sólidas a escala regional y urbana de múltiples problemas de calidad del aire, incluyendo el ozono troposférico, las partículas finas, la deposición ácida y la degradación de la visibilidad (Byun y Schere, 2006).

El CMAQ es un modelo Euleriano tridimensional que utiliza ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas, para predecir cambios en las concentraciones de contaminantes a través de una malla tridimensional que se fija en el espacio. La razones que motivaron la selección del CMAQ fueron las siguientes:

- Existe una extensa comunidad científica y de usuarios que usan/evalúan/actualizan CMAQ de forma continua, incluyendo los avances en química atmosférica. Además el alto índice de usuarios y publicaciones científicas, avalan y soportan la confianza en el modelo.
- El CMAQ permite el cálculo de la altura sobre elevación del penacho (CMAQ-APT) de fuentes puntuales como es el caso de la emisiones de chimeneas de centrales térmicas. Esto es crítico para estimar el alcance y la dispersión de altas concentraciones procedentes de precursores de aerosoles secundarios inorgánicos emitidos desde fuentes puntuales, en función de las condiciones meteorológicas de cada momento (Guevara et al., 2014).

- CMAQ tiene un gran potencial para la gestión y análisis de la calidad del aire ya que dispone de herramientas específicamente desarrolladas para realizar análisis de contribución de fuentes de emisión y áreas de emisión (CMAQ-ISAM) (Pay et al., 2014), sensibilidad de las concentración a las emisiones (CMAQ-HDDM), análisis de procesos (*process analysis*) y modelización inversa (CMAQ-adjoint) (Cohan y Napelenok, 2011).

Como se mencionó, el modelo de transportes solo se aplica a los dominios D3 y D4. El dominio usa como condiciones de contorno las obtenidas del modelo fotoquímico global *Model for ozone and related chemical tracers, version 4* (MOZART-4). Este modelo, desarrollado y mantenido por la NCAR, se alimenta con la meteorología simulada por el modelo de la NASA GMAO GEOS-5, las emisiones antropogénicas del inventario ARCTAS, las biogénicas del modelo MEGAN-v2.04 (Guenther et al., 2006) y las de incendios del modelo FINN-v1 (Wiedinmyer et al., 2011).

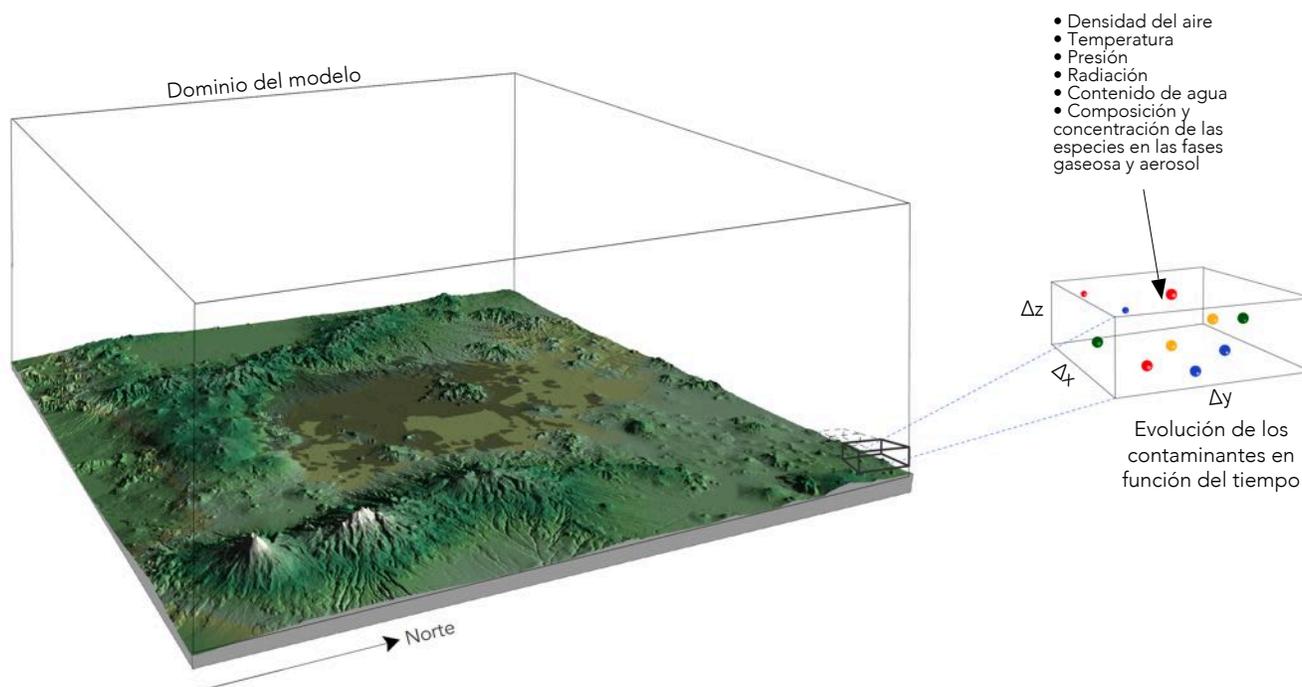


Figura 7.1. Representación de las celdas en el modelo CMAQ.

El modelo CMAQ simula cada uno de los procesos atmosféricos que afectan al transporte, formación, transformación y eliminación del ozono, partículas y otros contaminantes, y que incluyen: (i) química de los gases, (ii) química de los aerosoles, (iii) procesos de difusión, (iv) procesos de advección, (v) deposición de aerosoles y (vi) nubes y química acuosa. Para cada uno de ellos, CMAQ utiliza técnicas que cumplen con el estado del arte (Figura 7.1).

Adveccion y difusion

El transporte de contaminantes incluye tanto los procesos de advección como de difusión. La advección se relaciona con el transporte de contaminantes debido a los campos de vientos (horizontal o vertical), mientras que la difusión implica la mezcla turbulenta de los contaminantes. Si una pluma de contaminación se transporta principalmente por advección, entonces puede viajar una larga distancia sin sufrir muchos cambios en las concentraciones de contaminantes. Por otro lado, si la pluma se transporta principalmente por difusión los contaminantes se mezclan rápidamente

cerca de la fuente, lo que da lugar a cambios sustanciales en sus concentraciones. En la realidad el transporte de contaminantes ocurre de manera compleja en donde ocurren simultáneamente ambos fenómenos.

En el CMAQ el proceso de advección se basa en las características de conservación de masa de la ecuación de continuidad y se divide en las componentes horizontal y vertical. Esta distinción es posible debido a que el movimiento atmosférico medio es principalmente horizontal, mientras que el movimiento vertical se relaciona con la interacción de la dinámica y la termodinámica. Tanto el módulo de advección horizontal como el vertical, se basan en el *piecewise parabolic method* (PPM) (Colella y Woodward, 1984). Mientras que, la difusión vertical está representada por el *Asymmetric Convective Method* versión 2 (ACM2) (Pleim, 2007). Este método reconoce que en condiciones de convección (cuando la superficie se está calentando) el aire caliente es transportado verticalmente por flotabilidad y se mezcla con el aire ambiente en cada nivel por encima de la superficie, hasta que la temperatura del aire ascendente es igual a la temperatura ambiente.

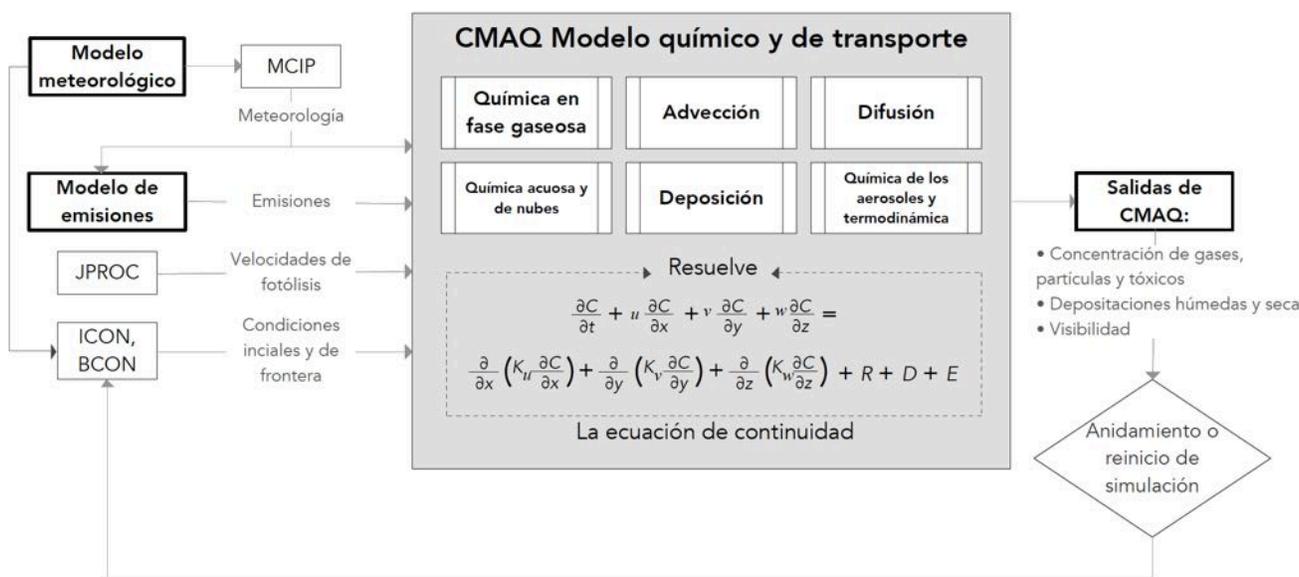


Figura 7.1. Diagrama de flujo del modelo CMAQ usado para simular los procesos químicos y de transporte de contaminantes. Adaptado de http://bioearth.wsu.edu/cmaq_model.html.

Química de gases y aerosoles

Para la simulación de la química de componentes en fase gas, el modelo CMAQ ofrece como alternativas tres posibles mecanismos químicos: CB05, SAPRC-07 o SAPRC-99. Cada uno de estos mecanismos describe matemáticamente los procesos fotoquímicos en la atmósfera a través de una serie de reacciones químicas que incluyen contaminantes primarios y secundarios. Debido al elevado número de compuestos y reacciones atmosféricas que existen en la realidad, los mecanismos químicos incluyen distintos tipos de parametrizaciones y aproximaciones, expresando las especies químicas no explícitamente sino según distintas categorías. La principal diferencia entre el mecanismo CB05 y los SAPRC-07 y SAPRC-99 es la técnica de agrupación usada para clasificar a los COT en grupos subrogados: El mecanismo CB05 requiere que las emisiones de COT sean desagregadas en emisiones de especies agrupadas con base en la estructura del enlace de carbono de dichas especies. En los mecanismos SAPRC-07 y SAPRC-99 los compuestos son agrupados con base en su reactividad relativa con el radical hidroxilo (OH). Como se mencionó anteriormente, el mecanismo químico seleccionado para ejecutar CMAQ en el sistema AQFS-CdMX es el CB05. La especiación de las emisiones de COT a las especies de CB05 se ha realizado aplicando unos perfiles obtenidos principalmente de la base de datos SPECIATE y también de resultados de campañas de observación realizadas en la ciudad de México.

En el caso de los aerosoles la distribución de partículas en CMAQ está representada como la superposición de tres distribuciones logarítmicas

normales o modos: Aitken (hasta $\sim 0.1 \mu\text{m}$), acumulación (0.1 a $2.5 \mu\text{m}$) y gruesa (2.5 a $10 \mu\text{m}$) (Binkowski y Roselle, 2003; Mebust et al., 2003). Los modos Aitken y acumulación representan a las $\text{PM}_{2.5}$ (partículas de diámetro igual o inferior a $2.5 \mu\text{m}$), mientras que el modo grueso representa las partículas con un diámetro superior a $2.5 \mu\text{m}$ e igual o inferior a $10 \mu\text{m}$. Así pues, PM_{10} se consideraba como la suma de $\text{PM}_{2.5}$ y del modo grueso.

Para cada uno de los modos, el modelo CMAQ simula distintos componentes químicos de $\text{PM}_{2.5}$, incluyendo los componentes primarios y secundarios.

En cuanto a los componentes primarios, CMAQ requiere que las emisiones primarias de $\text{PM}_{2.5}$ sean introducidas mediante una clasificación que incluye 5 especies distintas: carbón orgánico (POC), carbón elemental (PEC), sulfatos (PSO_4), nitratos (PNO_3) y una última categoría que incluye el resto de especies (PMFINE). Para especificar las emisiones de $\text{PM}_{2.5}$ se emplearon los perfiles de especiación obtenidos principalmente de la base de datos SPECIATE y también de resultados de campañas de observación realizadas en la Ciudad de México. Para la simulación de los componentes secundarios (orgánicos e inorgánicos), la versión de CMAQ configurada para el sistema AQFS-CdMX utiliza el módulo AERO 5, que incluye la componente de química inorgánica ISORROPIA (Fountoukis y Nenes, 2007) y la química para la formación de secundarios orgánicos (Carlton et al., 2010). El modelo considera también la contribución de aerosoles marinos principalmente para el dominio D3.

La deposición de las partículas se simula en CMAQ mediante mecanismos de deposición seca o húmeda.

Tabla 7.2. Parámetros de la configuración final del modelo CMAQ.

Parámetros	Configuración
Versión	5.0.1
Condiciones iniciales y de frontera	MOZART-4 $1.9 \times 2.5^\circ$ (06:00 UTC)
Capas verticales	37
Química y transporte	
Mecanismo químico	CB05
Aerosoles	AERO5
Esquema de advección horizontal/vertical	<i>Piecewise Parabolic Method</i> (PPM)
Módulo de difusión vertical	<i>Asymmetric Convective Model v2</i> (ACM2)
Velocidad de deposición de aerosoles	aero-depv2

Referencias

- Bell, M. L.; McDermott, A.; Zeger, S. L.; Samet, J. M.; Dominici, F. (2004). Ozone and short-term mortality in 95 US urban communities, 1987-2000. *JAMA* 292: 2372-2378.
- Brown, J. S.; Bateson, T. F.; McDonnell, W. F. (2008). Effects of exposure to 0.06 ppm ozone on FEV1 in humans: A secondary analysis of existing data. *Environ Health Perspect* 116: 1023-1026.
- Block, M. L.; Elder, A.; Auten, R. L.; Bilbo, S. D.; Chen, H. M.; Chen, J. C.; Cory-Slechta, D. A.; Costa, D.; Diaz-Sanchez, D.; Dorman, D. C.; Gold, D. R.; Gray, K.; Jeng, H. A.; Kaufman, J. D.; Kleinman, M. T.; Kirshner, A.; Lawler, C.; Miller, D. S.; Nadadur, S. S.; Ritz, B.; Semmens, E. O.; Tonelli, L. H.; Veronesi, B.; Wright, R. O.; Wright, R. J. (2012). The outdoor air pollution and brain health workshop. *Neurotoxicology*, 33 (2012), pp. 972-984
- Brook, R. D.; Rajagopalan, S.; Pope, C. A. III; Brook, J. R.; Bhatnagar, A.; Diez-Roux, A. V.; Holguin, F.; Hong, Y.; Luepker, R. V.; Mittleman M. A.; Peters, A.; Siscovick, D.; Smith, S. C. Jr.; Whitsel, L.; Kaufman J. D.; American Heart Association Council on Epidemiology and Prevention, Council on the Kidney in Cardiovascular Disease, and Council on Nutrition, Physical Activity and Metabolism. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 121: 2331-2378.
- Byun, D.W. Schere, K.L. (2006) Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. *Applied Mechanics Reviews*, 59, 51-77.
- Carter, W.P.L. (2010) Updated Maximum Incremental Reactivity Scale And Hydrocarbon Bin Reactivities For Regulatory Applications. College of Engineering Center for Environmental Research and Technology University of California, Riverside, CA 92521.
- Cai, Y.; Zhang, B.; Ke, W.; Feng, B.; Lin, H.; Xiao, J.; Zeng, W.; Li, X.; Tao, J.; Yang, Z.; Ma, W.; Liu, T. (2016). *Epidemiology/Population Hypertension*, 68, 62-70.
- CAMe (2016). <http://www.gob.mx/semarnat/prensa/anuncio-came-medidas-emergentes-para-modificar-programa-de-contingencias-ambientales-y-hoy-no-circula>. Fecha de consulta: 26 de junio 2017.
- Carlton, A.G., P.V. Bhave, S.L. Napelenok, E.O. Edney, G. Sarwar, R.W. Pinder, G.A. Pouliot, M. Houyoux (2010) Model Representation of Secondary Organic Aerosol in CMAQv4.7. *Env. Sci. & Techno.* 44 (22), 8553-8560.
- Chen, F.; Kusaka, H.; Bornstein, R.; Ching, J.; Grimmond, C. S. B.; Grossman-Clarke, S.; Loridan, T.; Manning, K. W.; Martilli, A.; Miao, S.; Sailor, D.; Salamanca, F. P.; Taha, H.; Tewari, M.; Wang, X.; Wyszogrodzki, A. A.; Zhang, C. (2011). The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 31(2), 273-288.
- Cisneros, G.V.S.; Pardo, C.S. (2015) The hourly profile of the anthropogenic component of the Surface energy balance for the urban region of the Mexico City. ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment.
- Cohan, D.S.; Napelenok, S. L. (2011) Air Quality Response Modeling for Decision Support. *Atmosphere*, 2, 407-425.
- CONABIO, 2015. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad. Portal de geoinformación. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA. (2017). Reporte del Clima en México, Reporte Anual 2016. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Gerencia de Meteorología y Climatología, Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo. Ciudad de México, México.
- Cui, Y. Y.; De Foy, B. (2012). Seasonal variations of the urban heat island at the surface and the near-surface and reductions due to urban vegetation in Mexico City. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5), 855-868.
- de Foy, B.; Caetano, E.; Magaña, V.; Zítácuaro, A.; Cárdenas, B.; Retama, A.; Ramos, R.; Molina, L. T.; Molina, M. J. (2005) Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2267-2288.
- de Foy, B.; Krotkov, N. A.; Bei, N.; Herndon, S. C.; Huey, L. G.; Martinez, A. P.; Ruiz-Suarez, L. G.; Wood, E. C.; Zavala, M.; and Molina, L. T. (2009) Hit from both sides: tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO2 retrievals during the MILAGRO field campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 9599-9617.
- de Foy, B.; Fast, J. D.; Paech, S. J.; Phillips, D.; Walters, J. T.; Coulter, R. L.; Martin, T. J.; Pekour, M. S.; Shaw, W. J.; Kastendeuch, P. P.; Marley, N. A.; Retama, A.; Molina, L. T. (2008) Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 1209-1224.
- Delfino, R. J.; Gone, H.; Linn, W. S.; Pellizzari, E. D.; Hu, Y. (2003). Asthma symptoms in Hispanic children and daily ambient exposures to toxic and criteria air pollutants. *Environ Health Perspect* 111: 647-656.
- Doran, J. C.; Zhong, S. (2000). Thermally driven gap winds into the Mexico City basin, *J. Appl. Meteorology*, 39, 1330-1340.
- Eiguren-Fernandez, A.; Di Stefano, E.; Schmitz, D. A.; Guarieiro, A. L. N.; Salinas, E. M.; Nasser, E.; Froines, J. R.; Cho, A. K. (2015) Chemical reactivities of ambient air samples in three Southern California communities. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 65(3), pp. 270-277.
- Farr, T. G.; Rosen, Paul A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R.; Hensley, S.; Kobrick, M.; Paller, M.; Rodriguez, E.; Roth, L.; Seal, D.; Shaffer, S.; Shimada, J.; Umland, J.; Werner, M.; Oskin, M.; Burbank, D.; Alsdorf, D. (2007) The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004.
- Fast, J. D.; de Foy, B.; Acevedo-Rosas, F.; Caetano, E.; Carmichael, G.; Emmons, L.; McKenna, D.; Mena, M.; Skamarock, W.; Tie, X.; Coulter, R. L.; Barnard, J. C.; Wiedinmyer, C.; Madronich, S. (2007) A meteorological overview of the MILAGRO field campaigns, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2233-2257.
- Ferreira, J.; Guevara, M.; Baldasano, J. M.; Tchepel, O.; Schaap, M.; Miranda, A. I.; Borrego, C. (2013) A comparative analysis of two highly spatially resolved atmospheric emission inventories that are available in Europe. *Atmos. Environ.*, 75, 43-57.

- Fountoukis C. Nenes, A. (2007) ISORROPIA II: a computationally efficient thermodynamic equilibrium model for K⁺-Ca²⁺-Mg²⁺-NH₄⁺-Na⁺-SO₄²⁻-NO₃⁻-Cl⁻-H₂O aerosols. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4639-4659.
- Gilliland, F. D.; Berhane, K.; Rappaport, E. B.; Thomas, D. C.; Avol, E.; Gauderman, W. J.; London, S. J.; Margolis, H. G.; McConnell, R.; Islam, K. T.; Peters, J. M.. (2001). The effects of ambient air pollution on school absenteeism due to respiratory illnesses. *Epidemiology* 12: 43-54.
- Gray, K. A.; Finster, M. E. (2000). The urban heat island, photochemical smog, and Chicago: Local features of the problem and solution. Department of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, IL. Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P. I., Geron, C., 2006. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3181-3210.
- Hart, C. L.; Smith, G. D.; Hole, D. J.; Hawthorne, V. M. (2006). Carboxyhaemoglobin concentration, smoking habit, and mortality in 25 years in the Renfrew/Paisley prospective cohort study. *Heart*, 92: 321-324.
- Jauregui, E. (1988). Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin. *Atmosfera*, 1, 131-140.
- Jáuregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmos. Environ.*, 31, 3821-3831.
- Jáuregui, E.; Luyando, E. (1999). Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City. *International Journal of Climatology*, 19(6), 683-694.
- Jarvis, A.; Reuter, H. I.; Nelson, A.; Guevara, E. (2008). Hole-Filled Seamless SRTM Data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).
- Jazcilevich, A.; Garcia A. R.; Ruiz-Suarez, L. G. (2002). A modeling study of air pollution modulation through land-use change in the Valley of Mexico. *Atmos. Environ.*, 36, 2297-2307.
- Jazcilevich, A. D.; Garcia, A. R.; Ruiz-Suarez, L.G. (2003). A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico, *Atmos. Environ.*, 37, 183-193.
- Jerrett, M.; Burnett, R. T.; Pope, C. A., III; Ito, K.; Thurston, G.; Krewski, D.; Shi, Y.; Calle, E.; Thun, M. (2009). Long-term ozone exposure and mortality. *N Engl J Med* 360: 1085-1095.
- Jorba, O.; Pérez, C.; Rocadenbosch, F.; Baldasano, J. M. (2004). Cluster Analysis of 4-Day Back Trajectories Arriving in the Barcelona Area, Spain, from 1997 to 2002. *Journal of Applied Meteorology*, 43(6), 887-901.
- Jorba, O.; Jiménez-Guerrero, P.; Baldasano, J. M. (2008). Annual evaluation of WRF-ARW and WRF-NMM meteorological simulations over Europe. 9th Annual WRF Users Workshop, Boulder, Colorado (USA), June 23 - 27.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Baker, W. E. (1990). Global numerical weather prediction at the national-meteorological-center, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 71, 1410-1428.
- Katsouyanni, K.; Samet, J. M.; Anderson, H. R.; Atkinson, R.; Le Tertre, A.; Medina, S.; Samoli, E.; Touloumi, G.; Burnett, R. T.; Krewski, D.; Ramsay, T.; Dominici, F.; Peng, R. D.; Schwartz, J.; Zanobetti, A. (2009). Air pollution and health: A European and North American approach (APHENA). (Research Report 142). Boston, MA: Health Effects Institute.
- Kim, C. S.; Alexis, N. E.; Rappold, A. G.; Kehrl, H.; Hazucha, M. J.; Lay, J. C.; Schmitt, M. T.; Case, M.; Devlin, R. B.; Peden, D. B.; Diaz-Sanchez, D. (2011). Lung function and inflammatory responses in healthy young adults exposed to 0.06 ppm ozone for 6.6 hours. *Am J Respir Crit Care Med* 183: 1215-1221.
- Kusaka, H.; Kimura, F. (2004). Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case. *J. of the Met. Soc. Japan*, 82, 67-80.
- Liousse, C.; Cachier, H.; Jennings, S. G. (1993). Optical and thermal measurements of black carbon aerosol content in different environments variation of the specific attenuation cross-section, sigma (sigma). *Atmos. Environ.*, 27(8), 1203-1211.
- López-Espinosa, E.D.; Zavala-Hidalgo, J. (2012). Weather forecast sensitivity to changes in urban land covers using the WRF model for central México. *Atmósfera* 25(2), 127-154
- Lu, F., Xu, D., Cheng, Y., Dong, S., Guo, C., Jiang, X., Zheng, X. (2015). Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ pollution in the Chinese population. *Environmental Research*, 136, 196-204.
- Matsumoto, Y., Valdés, M., Urbano, J. A., Kobayashi, T., López, G., & Peña, R. (2014). Global solar irradiation in north Mexico city and some comparisons with the south. *Energy Procedia*, 57, 1179-1188.
- Molina, L. T.; Kolb, C. E.; de Foy, B.; Lamb, B. K.; Brune, W. H.; Jimenez, J. L.; Ramos-Villegas, R.; Sarmiento, J.; Paramo-Figueroa, V. H.; Cardenas, B.; Gutierrez-Avedoy, V.; Molina, M. J. (2007). Air quality in North America's most populous city – overview of the MCMA-2003 campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2447-2473.
- Molina, L. T.; Madronich, S.; Gaffney, J. S.; Apel, E.; de Foy, B.; Fast, J.; Ferrare, R.; Herndon, S.; Jimenez, J. L.; Lamb, B.; Osornio-Vargas, A. R.; Russell, P.; Schauer, J. J.; Stevens, P. S.; Volkamer, R.; Zavala, M. (2010). An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 8697-8760.
- Mugica, V., Vega, E., Sánchez, G., Reyes, E., Arriaga, J.L., Chow, J., Watson, J., Egami, R. (2001). Volatile organic compounds emissions from gasoline and diesel power vehicle. *Atmosfera*, 14, 29-37.
- Mugica, V., Watson, J., Vega, E., Reyes, E., Ruiz, M.E., Chow, J. (2002). Receptor Model Source Apportionment of Nonmethane Hydrocarbons in Mexico City. *The Scientific World Journal*, 2, 844-860.
- OMS (2003). Índice UV Solar Mundial: Guía Práctica. Organización Mundial de la Salud. Ginebra, Suiza.
- Park, S. S.; Hansen, A. D. A.; Cho, Y. (2010). Measurement of real time black carbon for investigating spot loading effects of Aethalometer data. *Atmos. Environ.*, 44 (11), 1449-1455.
- Peters, A.; Veronesi, B.; Calderón-Garcidueñas, L.; Gehr, P.; Chen L. C.; Geiser, M.; Reed, W.; Rothenrutshausen, B.; Schürch, S.; Schulz, H. (2006). Translocation and potential neurological effects of fine and ultrafine particles a critical update. *Part Fibre Toxicol* 3:13.

- Petzold, A.; Kopp, C.; Niessner, R. (1997). The dependence of the specific attenuation cross-section on black carbon mass fraction and particle size, *Atmos. Environ.*, 31(5), 661–672.
- Petzold, A.; Ogren, J. A.; Fiebig, M.; Laj, P.; Li, S. M.; Baltensperger, U.; Holzer-Popp, T.; Kinne, S.; Pappalardo, G.; Sugimoto, N.; Wehrl, C.; Wiedensohler, A.; Zhang, X.Y. (2013). Recommendations for reporting "black carbon" measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 8365–8379.
- Pleim, J.E. (2007). A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: model description and testing. *J. of Appl Met. and Climatology*, 46, 1383–1395
- Pope, C. A. III; Muhlestein J. B.; May, H. T.; Renlund, D. G.; Anderson, J. L.; Horne, B. D. (2006). Ischemic heart disease events triggered by short-term exposure to fine particulate air pollution. *Circulation*, 114: 2443–2448.
- Rivera, C.; Sosa, G.; Wöhrnschimmel, H.; de Foy, B.; Johansson, M.; Galle, B. (2009). Tula industrial complex (Mexico) emissions of SO₂ and NO₂ during the MCMA 2006 field campaign using a mobile mini-DOAS system. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 6351–6361.
- Schelegle, E. S.; Morales, C. A.; Walby, W. F.; Marion, S.; Allen, R. P. (2009). 6.6-hour inhalation of ozone concentrations from 60 to 87 parts per billion in healthy humans. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 180: 265–272.
- Seibert, P.; Beyrich, F.; Gryning, S. E.; Joffre, S.; Rasmussen, A.; Tercier, P. (2000). Review and Intercomparison of Operational Methods for the Determination of the Mixing Height, *Atmos. Environ.*, 34(7), 1001–1027.
- Shah A. S.; Lee, K. K.; McAllister D. A.; Hunter, A.; Nair, H.; Whiteley, W.; Langrish, J. P.; Newby, D. E.; Mills, N. L. (2015). Short term exposure to air pollution and stroke: Systematic review and meta-analysis. *BMJ* 350: h1295.
- Sram, R. J.; Binkova, B.; Dejmek, J.; Bobak, M. (2005). Ambient air pollution and pregnancy outcomes: a review of the literature. *Environ Health Perspect*, 113: 375–382.
- Stafoggia, M.; Forastiere, F.; Faustini, A.; Biggeri, A.; Bisanti, L.; Cadum, E.; Cernigliaro, A.; Mallone, S.; Pandolfi, P.; Serinelli, M.; Tessari, R.; Vigotti, M. A.; Perucci, C. A. (2010). Susceptibility factors to ozone related mortality: A population-based case-crossover analysis. *Am J Respir Crit Care Med* 182: 376–384.
- Stephens, S.; Madronich, S.; Wu, F.; Olson, J. B.; Ramos, R.; Retama, A.; Muñoz, R. (2008). Weekly patterns of México City's surface concentrations of CO, NO_x, PM₁₀ and O₃ during 1986–2007. *Atmos. Chem. Phys.*, 8(17), 5313–5325.
- Stieb, D. M.; Chen, L.; Eshoul, M.; Judek, S. (2012). Ambient air pollution, birth weight and preterm birth: a systematic review and meta-analysis. *Environ Res.* 117:100–111.
- Strickland, M. J.; Darrow, L. A.; Klein, M.; Flanders, W. D.; Sarnat, J. A.; Waller, L. A.; Sarnat, S. E.; Mulholland, J. A.; Tolbert, P. E. (2010). Short-term associations between ambient air pollutants and pediatric asthma emergency department visits. *Am J Respir Crit Care Med* 182: 307–316.
- Tewari, M.; Chen, F.; Kusaka, H.; Miao, S. (2007). Coupled WRF/Unified Noah/Urban-Canopy Modeling System. NCAR WRF Documentation. Boulder: NCAR., pp. 1–20.
- US EPA. Air Quality Criteria for Carbon Monoxide Final Report (2000). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, Washington Office, Washington, DC, EPA 600/P-99/001F.
- US EPA. Air quality criteria for particulate matter. U.S. Environmental Protection Agency (2004). Research Triangle Park, NC. EPA/600/P-99/002aF-bF.
- US EPA. Integrated Science Assessment (ISA) for Carbon Monoxide Final Report (2010). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-09/019F.
- US EPA. Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter Final Report (2009). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-08/139F.
- US EPA. Integrated Science Assessment (ISA) for Oxides of Nitrogen – Health Criteria Final Report (2016). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-15/068.
- US EPA. Integrated Science Assessment (ISA) of Ozone and Related Photochemical Oxidants Final Report (2013). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-10/076F.
- US EPA. Integrated Science Assessment (ISA) for Sulfur Oxides – Health Criteria Final Report (2008). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-08/047F.
- Valdes-Barrón, M., Riveros-Rosas, D., Arancibia-Bulnes, C. A., Bonifaz, R. (2014). The solar Resource Assessment in Mexico: State of the Art. *Energy Procedia*, 57, 1299–1308.
- Virkkula, Aki; Mäkelä, T.; Hillamo, R.; Yli-Tuomi, T.; Hirsikko, A.; Hämeri, K.; Koponen, I. K. (2007). A Simple Procedure for Correcting Loading Effects of Aethalometer Data. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 57(10), 1214–1222.
- Wiedinmyer, C., Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Emmons, L. K., Al-Saadi, J. A., Orlando, J. J., Soja, A. J. (2011). The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning, *Geosci. Model Dev.*, 4, 625–641
- WMO/IGAC (2012). WMO/IGAC Impacts of Megacities on Air Pollution and Climate. WMO GAW report No. 205.
- Yarwood, G., Rao, S., Yocke, M., Whitten, G.Z. (2005). Updates to the Carbon Bond chemical mechanism: CB05. Final Report to the US EPA, RT-0400675, December 8.
- Yoshikado, H., Tsuchida M. (1996). High levels of winter air pollution under the influence of the urban heat island along the shore of Tokyo Bay. *J. Appl. Meteor.*, 35, 1804–1813.
- Zanobetti, A.; Schwartz, J. (2011). Ozone and survival in four cohorts with potentially predisposing diseases. *Am J Respir Crit Care Med* 184: 836–841.
- Zhang, Y.; Dubey, M. K.; Olsen, S. C.; Zheng, J.; Zhang, R. (2009). Comparisons of WRF/Chem simulations in Mexico City with ground-based RAMA measurements during the 2006-MILAGRO. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3777–3798.

ANEXOS

ANEXO 1

Configuración del Sistema de Monitoreo Atmosférico

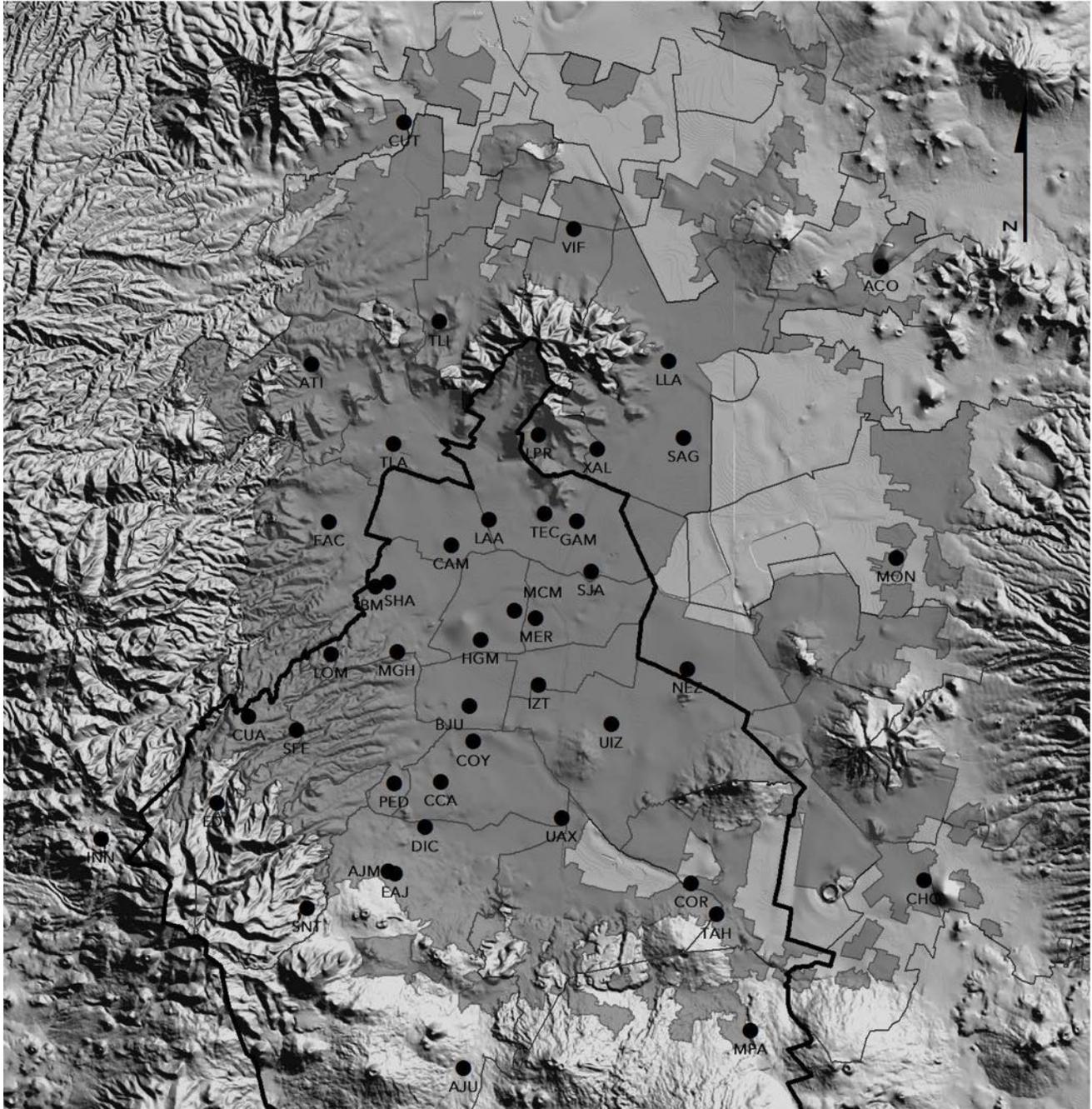


Figura A1.1. Distribución de los sitios de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT).

Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)

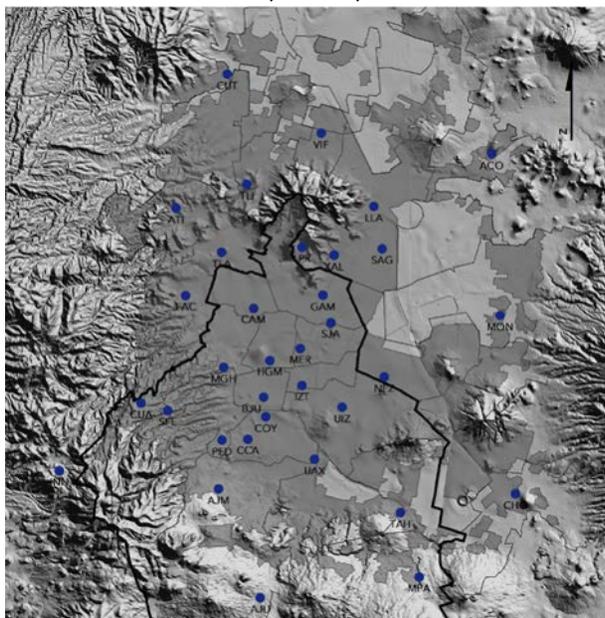


Figura A1.2. Estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico en operación durante 2016.

Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)

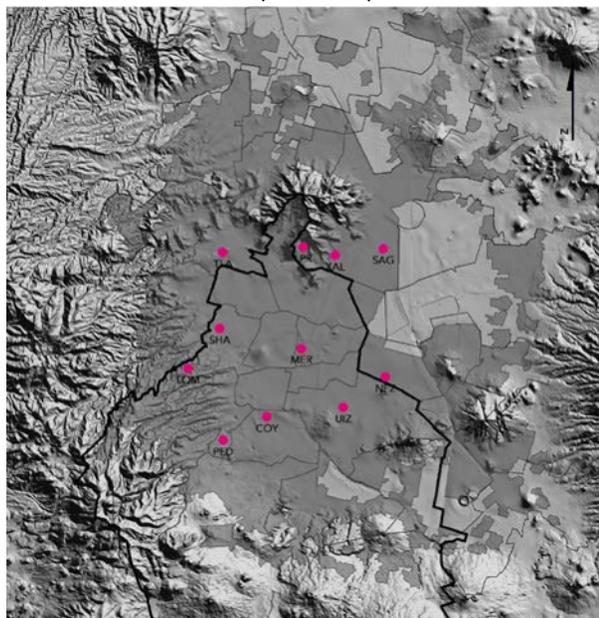


Figura A1.3. Estaciones de la Red Manual de Monitoreo Atmosférico en operación durante 2016.

Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)

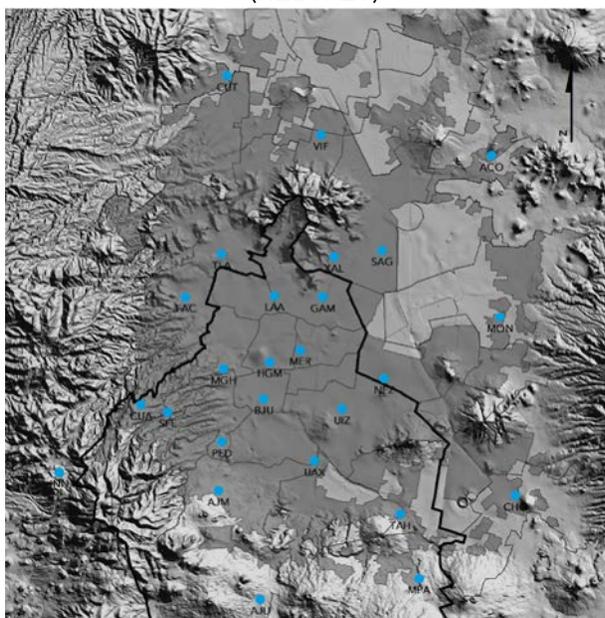


Figura A1.4. Estaciones de la Red de Meteorología y Radiación Solar en operación durante 2016.

Red de Depósito Atmosférico (REDDA)

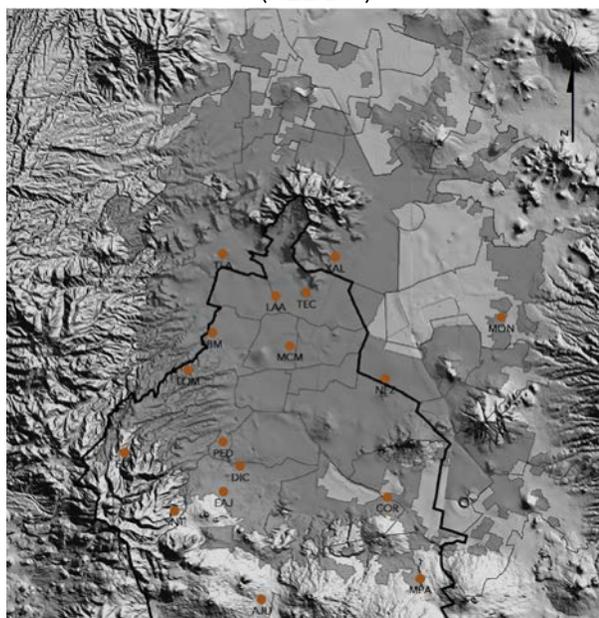


Figura A1.5. Estaciones de la Red de Depósito Atmosférico en operación durante 2016.

Tabla A1.1. Estaciones que integran la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

Entidad	Delegación o Municipio	Estación	Clave	Inicio de Operación	Parámetros						
					O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1986							
	Azcapotzalco	Camarones	CAM	Ago – 2003							
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago – 2015							
	Coyoacán	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	Ago – 2014							
		Coyoacán	COY	Ago – 2003							
		UAM Xochimilco	UAX	Feb – 2012							
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Nov – 1993							
		Santa Fe	SFE	Feb – 2012							
	Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	Feb - 2012							
	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	Dic – 2015							
		San Juan de Aragón	SJA	Ago – 2003							
	Iztacalco	Iztacalco	IZT	Jul – 2007							
	Iztapalapa	UAM Iztaapalapa	UIZ	Ene – 1986							
	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	Ene – 2015							
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	Ene – 2016							
	Tlalpan	Ajusco	AJU	Ene – 2015							
		Ajusco Medio	AJM	Ene – 2015							
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1986							
	Xochimilco	Tláhuac	TAH	Nov – 1993							
	Estado de México	Acolman	Acolman	ACO	Jul – 2007						
Atizapán		Atizapán	ATI	Nov – 1993							
Chalco		Chalco	CHO	Jul – 2007							
Coacalco		Villa de las Flores	VIF	Nov – 1993							
Ecatepec		Los Laureles	LLA	Feb – 1986							
		San Agustín	SAG	Feb – 1986							
		Xalostoc	XAL	Ene – 1986							
Naucalpan		FES Acatlán	FAC	Ene – 1986							
Nezahualcóyotl		Nezahualcóyotl	NEZ	Jul – 2011							
Ocoyoacac		Investigaciones Nucleares	INN	Ago – 2015							
Tepetzotlán		Cuautitlán	CUT	Feb – 2012							
Texcoco		Montecillo	MON	Nov – 1993							
Tlalnepantla		La Presa	LPR	Ene – 1986							
		Tlalnepantla	TLA	Ene – 1986							
Tultitlán		Tultitlán	TLI	Nov – 1993							

Tabla A1.2. Estaciones que integran la Red Manual de Monitoreo Atmosférico.

Entidad	Delegación o Municipio	Estación	Clave	Inicio de Operación	Parámetros				
					PST	PM ₁₀	PM _{2.5}	Pb-PST	Pb-PM ₁₀
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1989					
	Coyoacán	Coyoacán	COY	Ago – 2003					
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Ene – 1989					
	Miguel Hidalgo	Lomas	LOM	Ene – 1989					
		Secretaría de Hacienda	SHA	Ene – 1989					
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1989					
Estado de México	Ecatepec	San Agustín	SAG	Ago – 2003					
		Xalostoc	XAL	Ene – 1989					
	Nezahualcóyotl	NEZ	Ene – 1989						
	Tlalnepantla	La Presa	LPR	Ene – 1989					
		Tlalnepantla	TLA	Ene – 1989					

Tabla A1.3. Estaciones que integran la Red de Meteorología y Radiación Solar.

Entidad	Delegación o Municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	Parámetros						
					WSP	WDR	TMP	RH	RUV-A	RUV-B	PA
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1986							
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago – 2015							
	Coyoacán	UAM Xochimilco	UAX	Abr – 2015							
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Jun – 2000							
		Santa Fe	SFE	Feb – 2012							
	Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	Feb – 2012							
	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	Dic – 2015							
		Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	Ene – 2016							
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Abr – 2014							
	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	Feb – 2015							
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	Ene – 2016							
	Tlalpan	Ajusco	AJU	May – 2015							
		Ajusco Medio	AJM	Ene – 2015							
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1986							
	Xochimilco	Tláhuac	TAH	Jun – 2000							
Estado de México	Acolman	Acolman	ACO	Jul – 2011							
	Chalco	Chalco	CHO	Jul – 2011							
	Coacalco	Villa de las Flores	VIF	Jun – 2000							
	Ecatepec	San Agustín	SAG	Feb – 1986							
		Xalostoc	XAL	Ene – 1986							
	Naucalpan	FES Acatlán	FAC	Ene – 1986							
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jul – 2011							
	Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	Sep – 2015							
	Tepotztlán	Cuautitlán	CUT	Feb – 2012							
	Texcoco	Montecillo	MON	Jun – 2000							
Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene – 1986								

Tabla A1.4. Estaciones que integran la Red de Depósito Atmosférico.

Entidad	Delegación o Municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	Parámetros					
					Pp	pH	H ⁺	CE	Aniones	Cationes
Ciudad de México	Cuajimalpa	Ex Convento Desierto de los Leones	EDL	May - 1998						
	Cuauhtémoc	Museo de la Ciudad de México	MCM	Jun - 1989						
	Gustavo A. Madero	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	Jun - 1995						
		Cerro del Tepeyac	TEC	Ago - 1988						
	La Magdalena Contreras	San Nicolás Totolapan	SNT	Ago - 1998						
	Miguel Hidalgo	Legaria	IBM	Jun - 1989						
		Lomas	LOM	Jun - 1988						
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	May - 1998						
	Tlalpan	Ajusco	AJU	May - 1998						
		Diconsa	DIC	Jun - 1988						
Ecoguardas Ajusco		EAJ	Jun - 1998							
Xochimilco	CORENA	COR	Jun - 1990							
Estado de México	Ecatepec	Xalostoc	XAL	May - 1989						
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jun - 1991						
	Texcoco	Montecillo	MON	Jun - 1994						
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Jun - 1989						

ANEXO 2

Operación del Sistema de Monitoreo Atmosférico

Tabla A2.1. Periodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa en las estaciones de monitoreo ubicadas en la Ciudad de México, durante 2016.

Delegación	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Álvaro Obregón	Pedregal	PED	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	01/01/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Falla del equipo
			REDMET	UVB	01/01/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Se retira el sensor para mantenimiento en el laboratorio
Azcapotzalco	Camarones	CAM	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	15/09/2016	9:00	10/10/2016	24:00	Falla del equipo
Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	RAMA	SO ₂	01/01/2016	1:00	25/01/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
				NO _x , NO ₂ , NO	01/01/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio, falta de suministros
Coyoacán	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO	23/02/2016	15:00	06/04/2016	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
	Cuajimalpa	CUA	RAMA	SO ₂	01/01/2016	1:00	24/05/2016	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio, falta de suministros
Cuajimalpa	Santa Fe	SFE	RAMA	CO, O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO	01/01/2016	1:00	31/03/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	01/01/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
			SO ₂	01/01/2016	1:00	01/04/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros	
			O ₃ , SO ₂ , NO _x , NO ₂ , NO	26/10/2016	12:00	10/11/2016	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio	
REDMET	UVA, UVB	06/08/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Retiro del sensor para mantenimiento en laboratorio			
Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	RAMA	RH, TMP, WSP, WDR, Pba	04/04/2016	12:00	23/06/2016	24:00	Retiro de los sensores para mantenimiento en laboratorio
Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	RAMA	PM _{2.5}	01/01/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Falla del equipo, falta de suministros para su reparación.
	Laboratorio de Análisis	LAA	REDMET	RH, TMP	24/10/2016	20:00	11/11/2016	24:00	Falla del sensor
				WSP, WDR	24/05/2016	20:00	26/06/2016	24:00	Falla del sensor
	San Juan de Aragón	SJA	RAMA	SO ₂ , CO, O ₃	01/01/2016	1:00	12/05/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
NO _x , NO ₂ , NO				01/01/2016	1:00	13/06/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros	
PM _{2.5}	01/01/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros				
Iztacalco	Iztacalco	IZT	RAMA	PM ₁₀	17/02/2016	24:00	15/03/2016	24:00	Trabajo de remodelación en sitio
Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	05/08/2016	10:00	31/12/2016	24:00	Fuera de línea por falta de suministros
Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO	17/11/2016	1:00	01/12/2016	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
			REDMET	TMP	01/05/2016	1:00	13/07/2016	24:00	Falla del sensor
Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	RAMA	SO ₂	20/01/2016	1:00	25/04/2016	24:00	Mantenimiento
	Ajusco Medio	AJM	RAMA	CO	14/03/2016	13:00	24/03/2016	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
Tlalpan	Ajusco	AJU	RAMA	PM ₂	22/02/2016	11:00	20/03/2016	24:00	Impacto de obra cercana a la estación
			REDMET	WSP, WDR	09/06/2016	23:00	04/07/2016	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
Venustiano Carranza	Merced	MER	REDMET	UVA, UVB	06/06/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Retiro del sensor para mantenimiento en laboratorio
				Pba	18/07/2016	1:00	11/08/2016	24:00	Falla en el sensor
				WSP, WDR	28/08/2016	17:00	06/10/2016	24:00	Falla en el sensor
Xochimilco	Tláhuac	TAH	RAMA	CO, O ₃	01/01/2016	1:00	14/03/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
				NO _x , NO ₂ , NO	01/01/2016	1:00	05/04/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
				O ₃	14/06/2016	10:00	12/07/2016	24:00	Falla del equipo
				SO ₂	28/06/2016	13:00	12/07/2016	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio

Tabla A2.2. Periodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa en las estaciones de monitoreo ubicadas en el Estado de México, durante 2016.

Municipio	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo	
Acolman	Acolman	ACO	RAMA	O ₃ , CO, SO ₂ , NO _x , NO ₂ , NO	01/01/2016	1:00	03/03/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros	
				O ₃ , CO, NO _x , NO ₂ , NO, PM ₁₀	20/09/2016	12:00	31/10/2016	23:00	Problemas eléctricos en la estación	
				SO ₂	20/09/2016	1:00	06/11/2016	03:00	Problemas eléctricos en la estación e isla de datos	
				CO	25/11/2016	11:00	06/12/2016	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio	
			REDMET	RH,TMP,WSP,WDR	20/09/2016	12:00	31/10/2016	23:00	Mantenimiento a la torre meteorológica	
Atizapán	Atizapán	ATI	RAMA	O ₃ , CO, NO _x , NO ₂ , NO ₁	01/01/2016	1:00	14/03/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros	
				SO ₂	01/01/2016	1:00	15/03/2016	05:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros	
				SO ₂	16/08/2016	09:00	05/09/2016	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio	
			NO _x , NO ₂ , NO	14/12/2016	17:00	31/12/2016	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio		
Chalco	Chalco	CHO	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO	01/01/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros	
				SO ₂	11/04/2016	11:00	10/05/2016	4:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio	
			REDMET	UVA	01/01/2016	1:00	12/05/2016	24:00	Falla del sensor	
				UVB	01/01/2016	1:00	31/05/2016	24:00	Falla del sensor	
				UVA, UVB	26/08/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Falla del sensor	
Coacalco	Villa de las Flores	VIF	RAMA	O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	01/01/2016	1:00	11/03/2016	3:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros	
				CO	01/01/2016	1:00	15/03/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros	
				SO ₂	01/01/2016	1:00	18/03/2016	13:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros	
Ecatepec	Los Laureles	LLA	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO	01/01/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros	
				O ₃	18/03/2016	11:00	11/04/2016	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio	
				SO ₂	18/03/2016	11:00	19/04/2016	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio	
			SAG	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO	07/06/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio
				REDMET	UVA, UVB	18/11/2016	1:00	16/12/2016	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
Naucalpan	FES-Acatlán	FAC	RAMA	PM ₁₀	25/02/2016	24:00	17/06/2016	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio	
				SO ₂	17/03/2016	9:00	06/04/2016	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio	
				NO _x , NO ₂ , NO	17/03/2016	9:00	08/04/2016	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio	
				PM ₁₀	14/09/2016	13:00	14/10/2016	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio	
			REDMET	UVA, UVB	01/01/2016	1:00	13/05/2016	24:00	Falla en el sensor	
				RH,TMP,WSP,WDR	14/09/2016	12:00	29/09/2016	24:00	Mantenimiento a la torre meteorológica	
Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO	27/01/2016	1:00	18/02/2016	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio	
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	08/03/2016	10:00	14/05/2016	8:00	Falla del equipo por problemas eléctricos en la estación	
			REDMET	SO ₂ , O ₃	08/03/2016	11:00	05/04/2016	24:00	Falla del equipo por problemas eléctricos en la estación	
				RH,TMP,WSP,WDR	01/01/2016	1:00	21/01/2016	24:00	Falla del sensor por problemas eléctricos en la estación	
Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	REDMET	Pba	01/01/2016	1:00	05/04/2016	24:00	Falla del sensor por problemas eléctricos en la estación	
				RH,TMP	04/03/2016	17:00	06/04/2016	8:00	Falla del sensor por problemas eléctricos en la estación	
			REDMET	WSP,WDR	04/03/2016	17:00	05/04/2016	24:00	Falla del sensor por problemas eléctricos en la estación	
				RH,TMP,WSP,WDR	14/10/2016	18:00	31/12/2016	24:00	Falla del sensor por problemas eléctricos en la estación	

Tabla A2.2. (continuación) Periodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa en las estaciones de monitoreo ubicadas en el Estado de México, durante 2016.

Municipio	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Tepetzotlán	Cuautitlán	CUT	RAMA	O ₃	20/08/2016	1:00	08/09/2016	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
			REDMET	UVA	01/01/2016	1:00	13/05/2016	24:00	Falla en el sensor
				UVB	01/01/2016	1:00	22/06/2016	24:00	Falla en el sensor
				WSP, WDR	09/06/2016	10:00	14/10/2016	24:00	Falla en el sensor
Texcoco	Montecillo	MON	RAMA	SO ₂	01/01/2016	1:00	04/08/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
				O ₃	09/01/2016	1:00	24/02/2016	24:00	Falla en el equipo
				CO, NO _x , NO ₂ , NO	28/01/2016	1:00	24/02/2016	24:00	Falla del equipo por problemas eléctricos en la estación
			REDMET	UVA,UVB	01/01/2016	1:00	13/05/2016	24:00	Falla de los sensores
				RH,TMP,WSP,WDR	28/01/2016	16:00	24/02/2016	24:00	Falla de los sensores por problemas eléctricos en la estación
				RH,TMP	29/08/2016	1:00	14/10/2016	24:00	Falla del sensor
				WSP,WDR	09/09/2016	1:00	14/10/2016	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
Tlalnepantla	La Presa	LPR	RAMA	O ₃	01/01/2016	1:00	11/04/2016	24:00	Trabajos de remodelación en sitio
				SO ₂ ,CO	01/01/2016	1:00	10/05/2016	24:00	Trabajos de remodelación en sitio y mantenimiento del equipo
	Tlalnepantla	TLA	REDMET	UVA, UVB	20/04/2016	1:00	31/12/2016	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
Tultitlán	Tultitlán	TLI	RAMA	SO ₂ , O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO	01/01/2016	1:00	15/03/2016	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
				CO	01/01/2016	1:00	17/03/2016	3:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros

ANEXO 3

Nueva estación de monitoreo

Tabla A3.1. Información básica de la nueva estación de monitoreo.

Entidad	Estación	Clave	Subred	Parámetros	Inicio de operación
Ciudad de México	Milpa Alta	MPA	RAMA	SO ₂ , CO, O ₃ , PM ₁₀ , PM _{10-2.5} , PM _{2.5}	20/01/2016 01:00
			REDMET	W, DV, TMP, HR	20/01/2016 01:00
				UVA, UVB	16/07/2016 01:00
			REDDA	Pp, pH, Aniones, Cationes, CE	01/05/1998 01:00

Mapa con la ubicación de la nueva estación de monitoreo

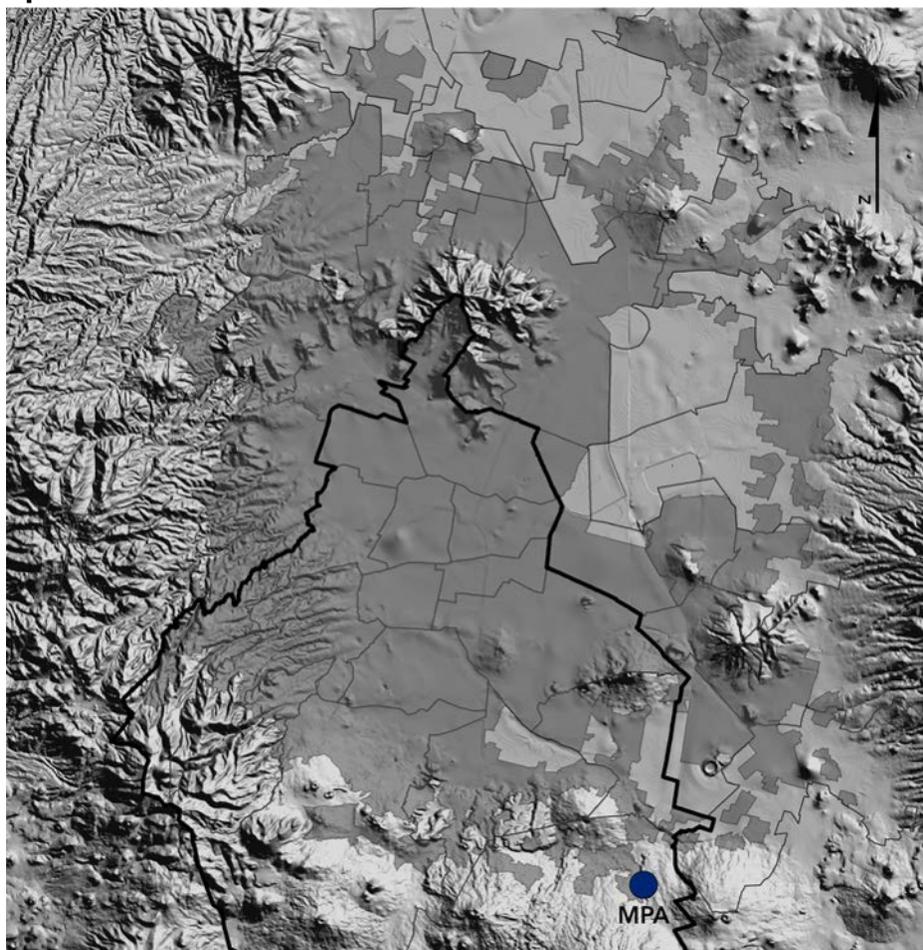


Figura A3.1. Ubicación de la nueva estación de monitoreo

Milpa Alta (MPA)

Domicilio: Profr. Raúl Mejía Zúñiga y prol. Francisco I. Madero s/n, Pueblo de Santa Ana Tlacotenco, Milpa Alta, C.P. 12900, Ciudad de México.

Latitud: 19.17688 **Longitud:** -98.990175 **Altitud:** 2592 msnm

Parámetros: SO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{10-2.5}

Meteorología: VV, DV, TMP, HR

Depósito Atmosférico: Precipitación, pH, aniones, cationes.

Observaciones: En el edificio de la Secundaria "Altepecalli"



Figura A3.2. Estación Milpa Alta (MPA)

ANEXO 4

Estadísticas básicas

Tabla A4.1. Estadísticas básicas para dióxido de azufre, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario. Sólo las estaciones que tuvieron $\geq 75\%$ de datos válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM.

Entidad	Estación	Clave	% de datos válidos	# trimestres con $>75\%$ de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									CUMPLIMIENTO DE LA NOM				
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio 110 ppb (24 h)	2° máximo anual 200 ppb (8 h)	Promedio anual 25 ppb	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	95	4	77	3	0	5	2	1	1	2	3	8	27	44	3	Si
	Benito Juárez	BJU	88	3	154	5	0	8	3	1	1	2	4	11	33	52	5	Si
	Camarones	CAM	92	4	228	6	0	11	5	1	1	3	6	14	44	80	6	Si
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	90	4	93	4	0	6	3	1	1	2	4	8	30	43	4	Si
	Cuajimalpa	CUA	54	2	86	3	0	5	2	0	1	1	3	7	—	—	—	—
	Hospital General de México	HGM	96	4	153	5	0	10	4	1	1	2	5	13	41	71	5	Si
	Iztacalco	IZT	84	3	101	5	0	8	4	1	1	2	5	11	34	57	5	Si
	Merced	MER	90	4	122	6	0	10	4	1	2	3	6	13	36	74	6	Si
	Miguel Hidalgo	MGH	95	4	146	5	0	8	3	1	1	2	4	11	36	58	5	Si
	Milpa Alta	MPA	89	3	45	2	0	3	1	1	1	1	2	5	15	25	2	Si
	Pedregal	PED	90	4	89	4	0	6	2	1	1	2	3	8	25	41	4	Si
	San Juan de Aragón	SJA	59	2	95	2	0	5	1	0	1	1	2	5	—	—	—	—
	Santa Fe	SFE	67	3	87	3	0	4	2	1	1	2	3	6	—	—	—	—
	Tláhuac	TAH	70	3	38	2	0	3	1	1	1	1	2	4	—	—	—	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	90	4	122	4	0	7	3	1	1	2	4	8	32	45	4	Si
UAM Xochimilco	UAX	92	4	105	3	0	6	2	1	1	1	3	7	33	42	3	Si	
Estado de México	Acolman	ACO	66	2	59	2	0	3	1	0	1	1	2	3	—	—	—	—
	Atizapán	ATI	67	2	148	5	0	9	4	0	1	2	5	13	—	—	—	—
	Chalco	CHO	83	3	54	2	0	3	2	1	1	1	3	4	14	29	2	Si
	Cuautitlán	CUT	88	3	220	6	0	14	3	0	1	2	4	14	52	99	6	Si
	FES Acatlán	FAC	87	4	217	6	0	10	3	1	2	3	5	12	39	96	6	Si
	Investigaciones Nucleares	INN	81	3	71	2	0	3	1	1	1	1	2	4	14	28	2	Si
	La Presa	LPR	62	2	56	3	0	5	2	0	1	1	3	6	—	—	—	—
	Los Laureles	LLA	86	3	269	6	0	14	3	1	1	2	4	11	53	111	6	Si
	Montecillo	MON	37	1	44	1	0	3	1	0	0	1	1	3	—	—	—	—
	Nezahualcóyotl	NEZ	91	4	172	4	0	8	2	0	1	2	3	7	29	69	4	Si
	San Agustín	SAG	88	4	155	5	0	10	4	1	1	2	5	10	44	90	5	Si
	Tlalnepantla	TLA	92	4	240	8	0	13	6	1	2	4	8	18	55	90	8	Si
	Tultitlán	TLI	70	2	211	6	0	12	4	1	1	2	5	15	—	—	—	—
	Villa de las Flores	VIF	75	3	181	6	0	12	3	1	1	2	4	13	33	68	6	Si
	Xalostoc	XAL	93	4	104	5	0	8	4	1	1	3	5	11	38	57	5	Si

Tabla A4.2. Estadísticas básicas para dióxido de nitrógeno, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario. Sólo las estaciones que tuvieron $\geq 75\%$ de datos válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM	
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Número de horas >210 ppb	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	94	106	18	0	10	13	7	11	17	24	32	0	Si
	Benito Juárez	BJU	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Camarones	CAM	92	130	33	3	15	19	16	22	30	41	53	0	Si
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	77	101	26	3	12	15	13	17	24	32	43	0	Si
	Coyoacán	COY	94	119	29	3	14	17	13	19	26	36	46	0	Si
	Cuajimalpa	CUA	95	111	22	1	12	15	9	13	19	28	37	0	Si
	Hospital General de México	HGM	94	134	31	2	15	18	15	21	29	39	51	0	Si
	Iztacalco	IZT	90	110	31	4	14	17	15	21	29	38	49	0	Si
	Merced	MER	88	129	35	3	15	18	18	25	32	43	54	0	Si
	Miguel Hidalgo	MGH	91	145	30	4	15	17	15	20	27	37	49	0	Si
	Pedregal	PED	92	119	23	1	12	14	10	15	21	29	39	0	Si
	San Juan de Aragón	SJA	50	113	26	3	13	19	10	15	25	34	43	—	—
	Santa Fe	SFE	67	93	20	2	10	12	9	13	18	25	33	—	—
	Tláhuac	TAH	68	70	17	1	9	12	7	11	16	23	29	—	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	92	113	29	2	14	17	12	19	28	36	46	0	Si
UAM Xochimilco	UAX	93	131	24	1	12	15	10	15	23	30	39	0	Si	
Estado de México	Acolman	ACO	67	57	15	2	8	12	6	8	13	20	26	—	—
	Atizapán	ATI	69	91	20	2	11	13	8	12	17	25	34	—	—
	Chalco	CHO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Cuautitlán	CUT	81	120	20	1	12	16	7	11	18	27	36	0	Si
	FES Acatlán	FAC	86	150	27	2	15	18	12	16	23	34	46	0	Si
	La Presa	LPR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Los Laureles	LLA	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Montecillo	MON	83	66	15	1	9	13	5	8	14	21	28	0	Si
	Nezahualcóyotl	NEZ	88	106	26	2	13	18	11	16	24	34	44	0	Si
	San Agustín	SAG	75	111	23	3	12	16	10	14	22	30	40	0	Si
	Tlalnepantla	TLA	89	134	33	5	15	18	17	22	30	40	52	0	Si
	Tultitlán	TLI	74	94	23	1	13	17	9	13	21	30	40	—	—
	Villa de las Flores	VIF	75	87	19	3	12	16	6	10	17	26	36	0	Si
Xalostoc	XAL	93	116	31	3	15	20	13	19	28	39	50	0	Si	

Tabla A4.3. Estadísticas básicas para monóxido de carbono, las unidades de concentración son ppm, a menos que se indique lo contrario. Sólo las estaciones que tuvieron $\geq 75\%$ de datos válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM	
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio 11.0 ppb (8 h)	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	92	2.1	0.6	0	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1.8	Si
	Benito Juárez	BJU	91	5.1	0.7	0	0.4	0.5	0.3	0.4	0.6	0.9	1.3	3.4	Si
	Camarones	CAM	92	6.3	0.9	0.1	0.6	0.5	0.4	0.5	0.7	1	1.5	4.7	Si
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	89	3.4	0.7	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.1	2.8	Si
	Cuajimalpa	CUA	97	3.5	0.6	0	0.3	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.9	1.8	Si
	Hospital General de México	HGM	89	4.4	0.6	0	0.5	0.5	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	2.9	Si
	Iztacalco	IZT	90	7.7	1	0.2	0.6	0.5	0.5	0.6	0.8	1.1	1.6	5.7	Si
	Merced	MER	87	5.9	0.9	0.1	0.6	0.6	0.4	0.5	0.8	1.1	1.6	3.8	Si
	Miguel Hidalgo	MGH	94	4.5	0.8	0	0.4	0.4	0.3	0.5	0.7	0.9	1.3	3.0	Si
	Milpa Alta	MPA	89	1.5	0.3	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	1.4	Si
	Pedregal	PED	92	2.7	0.5	0	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.6	0.9	2.0	Si
	San Juan de Aragón	SJA	60	4.7	0.9	0.2	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.4	—	—
	Santa Fe	SFE	67	1.7	0.5	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	—	—
	Tláhuac	TAH	76	2.5	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	1.2	Si
	UAM Iztapalapa	UIZ	90	5.7	0.7	0	0.5	0.5	0.3	0.4	0.6	0.9	1.3	4.0	Si
UAM Xochimilco	UAX	82	4	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	2.9	Si	
Estado de México	Acolman	ACO	63	1.6	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	—	—
	Atizapán	ATI	76	3.4	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1	1.7	Si
	Chalco	CHO	95	4.7	0.7	0.1	0.4	0.4	0.3	0.4	0.6	0.8	1.2	2.3	Si
	FES Acatlán	FAC	86	5.8	0.8	0	0.6	0.5	0.3	0.4	0.6	0.9	1.5	3.9	Si
	Investigaciones Nucleares	INN	71	1.4	0.2	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	—	—
	La Presa	LPR	55	4.1	0.6	0	0.5	0.5	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	—	—
	Los Laureles	LLA	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Montecillo	MON	78	3.3	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.7	Si
	Nezahualcóyotl	NEZ	88	10	0.6	0	0.5	0.4	0.2	0.3	0.4	0.7	1.1	7.0	Si
	San Agustín	SAG	84	6.4	0.7	0	0.5	0.5	0.3	0.4	0.6	0.9	1.3	4.7	Si
	Tlalnepantla	TLA	91	5.3	0.8	0	0.5	0.5	0.4	0.5	0.7	1	1.4	3.7	Si
	Tultitlán	TLI	72	3.3	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	—	—
	Villa de las Flores	VIF	75	3.2	0.4	0	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	2.3	Si
	Xalostoc	XAL	92	8.3	1	0	0.7	0.6	0.4	0.6	0.8	1.2	1.8	4.0	Si

Tabla A4.4. Estadísticas básicas para ozono, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									CUMPLIMIENTO DE LA NOM		
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Número de horas >95 ppb (1 h)	Máximo anual 70 ppb (8 h)
Ciudad de México	Ajusco	AJU	87	152	35	0	27	6	15	28	49	74	250	120	No
	Ajusco Medio	AJM	95	196	42	1	28	12	21	35	55	81	479	150	No
	Benito Juárez	BJU	95	183	31	0	31	2	7	20	45	77	402	131	No
	Camarones	CAM	93	174	26	0	28	1	3	15	39	68	255	132	No
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	91	171	32	0	31	2	8	22	48	79	406	130	No
	Coyoacán	COY	94	166	31	0	30	3	7	20	47	78	390	125	No
	Cuajimalpa	CUA	94	210	37	0	27	7	17	30	50	74	352	152	No
	Gustavo A. Madero	GAM	92	172	30	0	30	2	5	21	46	76	342	129	No
	Hospital General de México	HGM	96	189	30	0	30	2	6	19	44	75	343	131	No
	Iztacalco	IZT	92	158	28	0	29	2	5	18	43	73	280	117	No
	Merced	MER	88	144	24	0	26	1	3	15	36	64	140	103	No
	Miguel Hidalgo	MGH	96	190	28	0	28	2	6	18	40	69	285	133	No
	Milpa Alta	MPA	90	161	44	1	25	16	25	39	58	79	279	118	No
	Pedregal	PED	90	183	34	0	30	4	11	24	48	78	412	134	No
	San Juan de Aragón	SJA	55	166	27	0	27	2	4	18	40	68	104	107	No
	Santa Fe	SFE	67	182	35	0	30	5	13	26	49	80	323	138	No
	Tláhuac	TAH	69	161	34	0	27	4	11	27	51	74	181	131	No
UAM Iztapalapa	UIZ	93	129	27	0	26	2	6	19	41	68	143	95	No	
UAM Xochimilco	UAX	94	156	33	0	30	2	8	23	50	79	391	125	No	
Estado de México	Acolman	ACO	67	146	31	0	24	3	11	26	47	66	83	106	No
	Atizapán	ATI	77	164	26	0	23	3	9	20	38	60	65	134	No
	Chalco	CHO	94	160	31	0	26	3	7	25	48	70	116	112	No
	Cuautitlán	CUT	89	105	21	0	19	1	3	16	33	49	4	81	No
	FES Acatlán	FAC	92	185	29	0	27	3	9	22	42	67	218	129	No
	Investigaciones Nucleares	INN	82	149	40	1	22	16	24	36	51	71	161	115	No
	La Presa	LPR	69	163	28	0	25	2	8	23	41	64	106	127	No
	Los Laureles	LLA	89	162	26	0	25	2	6	18	40	63	138	117	No
	Montecillo	MON	77	131	28	0	24	1	6	24	43	63	32	92	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	95	145	28	0	26	2	7	19	43	67	145	107	No
	San Agustín	SAG	89	160	26	0	25	2	6	19	39	62	115	112	No
	Tlalnepantla	TLA	88	168	25	0	25	2	6	16	37	62	143	134	No
	Tultitlán	TLI	72	165	27	0	26	1	6	19	41	66	143	132	No
	Villa de las Flores	VIF	76	138	27	0	23	2	8	21	41	62	61	110	No
Xalostoc	XAL	86	110	23	0	20	2	5	18	34	54	8	77	No	

Tabla A4.5. Estadísticas básicas para óxidos de nitrógeno, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	94	145	24	0	16	18	7	12	20	30	44
	Benito Juárez	BJU	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Camarones	CAM	92	533	59	4	51	43	20	28	42	71	120
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	77	264	38	4	30	27	14	20	29	47	74
	Coyoacán	COY	94	283	46	2	34	35	15	22	35	57	89
	Cuajimalpa	CUA	95	287	32	0	27	21	11	16	24	37	61
	Hospital General de México	HGM	94	359	50	1	37	38	18	25	39	63	96
	Iztacalco	IZT	90	492	52	4	41	39	18	26	40	65	101
	Merced	MER	88	453	64	3	47	46	23	33	50	79	122
	Miguel Hidalgo	MGH	91	540	55	6	48	38	20	27	39	65	111
	Pedregal	PED	92	210	32	1	23	23	12	17	25	40	62
	San Juan de Aragón	SJA	50	421	46	4	41	42	12	18	33	60	98
	Santa Fe	SFE	67	156	28	2	21	20	10	14	21	34	54
	Tláhuac	TAH	68	153	23	1	17	18	8	12	19	30	45
	UAM Iztapalapa	UIZ	92	440	46	2	36	36	14	22	36	58	88
	UAM Xochimilco	UAX	93	322	35	2	29	27	11	17	27	44	70
Estado de México	Acolman	ACO	67	184	23	2	19	20	7	10	17	30	48
	Atizapán	ATI	69	271	31	2	29	22	10	14	21	36	65
	Chalco	CHO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Cuautitlán	CUT	81	361	41	1	43	39	8	13	25	52	94
	FES Acatlán	FAC	86	429	51	2	48	37	15	22	35	59	109
	La Presa	LPR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Los Laureles	LLA	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Montecillo	MON	83	424	29	1	35	25	6	9	17	34	70
	Nezahualcóyotl	NEZ	88	567	41	3	35	31	13	19	30	50	78
	San Agustín	SAG	75	444	41	5	37	31	13	19	29	50	84
	Tlalnepantla	TLA	89	432	60	5	48	40	23	31	45	71	117
	Tultitlán	TLI	74	361	38	1	36	30	11	16	26	46	80
	Villa de las Flores	VIF	75	268	31	3	31	26	8	12	21	38	70
Xalostoc	XAL	93	755	65	4	59	50	20	29	45	79	133	

Tabla A4.6. Estadísticas básicas para óxido nítrico, las unidades de concentración son ppb, a menos que se indique lo contrario.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	94	93	5	0	8	5	0	1	2	6	14
	Benito Juárez	BJU	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Camarones	CAM	92	459	26	0	42	25	2	4	9	29	72
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	77	223	12	0	23	12	1	1	3	13	35
	Coyoacán	COY	94	240	17	0	27	18	1	2	6	20	49
	Cuajimalpa	CUA	95	243	10	0	19	7	1	2	4	9	24
	Hospital General de México	HGM	94	319	19	0	28	21	1	2	7	23	51
	Iztacalco	IZT	90	459	21	0	33	22	2	3	8	25	57
	Merced	MER	88	399	29	0	39	29	3	6	15	35	74
	Miguel Hidalgo	MGH	91	497	25	0	40	22	3	5	10	27	66
	Pedregal	PED	92	150	9	0	15	9	1	1	3	10	25
	San Juan de Aragón	SJA	50	373	20	0	34	21	1	2	5	23	59
	Santa Fe	SFE	67	127	8	0	14	7	0	1	2	8	23
	Tláhuac	TAH	68	127	6	0	11	5	1	1	2	6	17
	UAM Iztapalapa	UIZ	92	394	17	0	28	18	1	2	6	20	46
	UAM Xochimilco	UAX	93	283	12	0	22	11	1	1	3	12	34
Estado de México	Acolman	ACO	67	162	8	0	13	8	1	1	3	9	25
	Atizapán	ATI	69	225	12	0	22	9	1	1	3	10	33
	Chalco	CHO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Cuautitlán	CUT	81	306	20	0	37	21	1	1	4	22	64
	FES Acatlán	FAC	86	354	24	0	40	19	1	4	8	23	66
	La Presa	LPR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Los Laureles	LLA	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Montecillo	MON	83	389	14	0	30	9	1	1	2	10	45
	Nezahualcóyotl	NEZ	88	516	15	0	28	13	1	2	4	15	38
	San Agustín	SAG	75	395	18	0	30	15	2	3	6	18	48
	Tlalnepantla	TLA	89	384	27	0	39	23	3	7	13	30	69
	Tultitlán	TLI	74	304	15	0	28	13	1	2	4	15	43
	Villa de las Flores	VIF	75	236	12	0	23	9	1	1	3	10	35
	Xalostoc	XAL	93	688	35	0	50	31	4	8	15	39	89

Tabla A4.7. Estadísticas básicas para las muestras de partículas suspendidas totales, las unidades de concentración son $\mu\text{g}/\text{m}^3$ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Método de muestreo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Merced	MER	87	Alto volumen	191	82	33	37	49	48	53	73	102	131
	Pedregal	PED	87	Alto volumen	120	57	21	25	34	33	37	52	71	89
	UAM Iztapalapa	UIZ	95	Alto volumen	198	83	25	39	56	42	52	74	108	140
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	98	Alto volumen	209	88	31	39	45	51	59	75	104	148
	Xalostoc	XAL	95	Alto volumen	248	113	37	48	64	63	75	106	139	183

Tabla A4.8. Estadísticas básicas para las muestras de PM_{10} colectadas utilizando el muestreador de referencia (Método FRM de la U.S. EPA), las unidades de concentración son $\mu\text{g}/\text{m}^3$ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que tuvieron $\geq 75\%$ de muestreos válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Método de muestreo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM		
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo anual $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)	Promedio anual $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Cumple
Ciudad de México	Lomas	LOM	92	FRM 16.67 lpm	102	35	8	18	24	18	20	32	44	58	102	34.6	No
	Merced	MER	95	FRM Alto Volumen	99	44	12	19	25	23	29	40	54	71	99	44.3	No
	Pedregal	PED	92	FRM 16.67 lpm	66	31	9	14	20	17	20	30	40	49	66	31.1	Si
	Secretaría de Hacienda	SHA	0	FRM 16.67 lpm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	90	FRM Alto Volumen	103	44	10	22	26	22	28	41	54	75	103	42.9	No
Estado de México	La Presa	LPR	69	FRM Alto Volumen	88	36	6	19	27	13	22	34	49	63	—	—	—
	Nezahualcóyotl	NEZ	95	FRM Alto Volumen	98	41	8	21	26	19	26	36	52	72	98	41.1	No
	Tlalnepantla	TLA	93	FRM Alto Volumen	109	48	12	21	27	27	33	42	60	75	109	47.4	No
	Xalostoc	XAL	97	FRM Alto Volumen	123	61	13	26	37	32	39	62	76	94	123	61.2	No

Tabla A4.9. Estadísticas básicas de la concentración horaria de PM₁₀ reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Tipo de analizador continuo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	95	TEOM (30°C)	150	31	1	20	26	10	16	27	42	59
	Benito Juárez	BJU	98	TEOM (30°C)	281	39	1	24	30	14	22	35	52	70
	Camarones	CAM	85	TEOM (30°C)	242	50	2	28	34	20	30	45	64	85
	Cuajimalpa	CUA	97	BETA (35°C)	191	31	1	20	25	9	16	27	41	57
	Hospital General de México	HGM	94	TEOM (30°C)	376	39	2	23	29	14	22	34	51	69
	Iztacalco	IZT	91	BETA (35°C)	476	33	1	22	23	12	19	29	42	58
	Merced	MER	83	TEOM (30°C)	468	52	2	31	39	19	30	47	69	92
	Miguel Hidalgo	MGH	99	TEOM (30°C)	177	34	2	20	25	13	19	30	44	60
	Milpa Alta	MPA	88	TEOM (30°C)	223	32	1	24	28	9	15	26	43	62
	Pedregal	PED	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Santa Fe	SFE	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Tláhuac	TAH	91	TEOM (35°C)	236	39	1	29	36	7	17	33	53	76
UAM Iztapalapa	UIZ	55	TEOM (30°C)	280	50	2	28	35	18	30	45	65	87	
Estado de México	Acolman	ACO	81	BETA (35°C)	535	40	1	26	30	12	22	36	52	70
	Atizapán	ATI	97	TEOM (35°C)	335	41	1	29	33	12	20	34	53	79
	Chalco	CHO	95	TEOM (35°C)	400	50	1	37	42	12	24	42	66	96
	Cuautitlán	CUT	95	TEOM (35°C)	302	52	1	39	40	15	26	43	66	102
	FES Acatlán	FAC	59	TEOM (35°C)	264	36	1	29	31	7	16	28	47	74
	Investigaciones Nucleares	INN	76	TEOM (30°C)	259	21	1	16	18	5	10	17	28	40
	San Agustín	SAG	88	TEOM (30°C)	807	47	1	31	34	17	27	41	61	83
	Tlalnepantla	TLA	88	TEOM (30°C)	291	53	2	31	36	22	32	47	68	92
	Tultitlán	TLI	93	TEOM (35°C)	368	49	1	35	39	14	25	42	64	93
	Villa de las Flores	VIF	94	TEOM (35°C)	511	55	1	42	47	13	25	44	72	109
	Xalostoc	XAL	98	TEOM (30°C)	340	66	2	43	49	23	36	57	85	122

Tabla A4.10. Estadísticas básicas para las muestras de PM_{2.5} colectadas utilizando el muestreador de referencia (Método FRM de la U.S. EPA), las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que tuvieron >= 75% de muestreos válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Método de muestreo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM		
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo anual 45 µg/m ³ (24 h)	Promedio anual 12 µg/m ³	Cumple
Ciudad de México	Coyoacán	COY	93	FRM 16.67 lpm	77	19	6	12	14	8	10	18	24	31	77	18.9	No
	Merced	MER	95	FRM 16.67 lpm	85	22	5	12	14	9	14	21	28	33	85	21.5	No
	Pedregal	PED	98	FRM 16.67 lpm	73	17	5	10	11	7	10	16	21	26	73	17.1	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	95	FRM 16.67 lpm	77	19	4	12	13	7	10	17	23	31	77	18.7	No
Estado de México	San Agustín	SAG	89	FRM 16.67 lpm	74	19	3	11	13	8	12	18	25	31	74	19.0	No
	Tlalnepantla	TLA	93	FRM 16.67 lpm	96	24	5	14	15	12	16	23	31	37	96	23.8	No
	Xalostoc	XAL	93	FRM 16.67 lpm	49	24	4	11	18	9	16	24	34	38	49	24.2	No

Tabla A4.11. Estadísticas básicas de la concentración horaria de PM_{2.5} reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Tipo de equipo continuo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco	AJU	77	BETA (35°C)	146	16	1	13	16	3	7	14	23	32
	Ajusco Medio	AJM	95	TEOM (30°C)	112	19	1	13	16	5	9	16	25	36
	Benito Juárez	BJU	98	TEOM (30°C)	250	23	1	16	19	7	12	20	31	44
	Camarones	CAM	85	TEOM (30°C)	186	25	1	16	20	7	13	22	33	45
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	98	BETA (35°C)	121	17	1	11	14	6	9	15	23	31
	Coyoacán	COY	98	TEOM-FDMS (30°C)	232	24	1	16	19	8	13	21	32	45
	Gustavo A. Madero	GAM	0	TEOM-FDMS (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Hospital General de México	HGM	94	TEOM (30°C)	346	25	1	17	19	8	13	21	32	46
	Merced	MER	83	TEOM (30°C)	380	27	1	19	23	7	14	24	37	51
	Miguel Hidalgo	MGH	99	TEOM (30°C)	153	22	1	15	18	7	11	19	29	41
	Milpa Alta	MPA	88	TEOM (30°C)	159	19	1	14	16	5	9	16	25	36
	Pedregal	PED	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	San Juan de Aragón	SJA	0	BETA (35°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Santa Fe	SFE	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	55	TEOM (30°C)	225	26	1	17	21	7	14	24	35	48
	UAM Xochimilco	UAX	93	BETA (35°C)	183	21	1	14	17	6	11	19	28	37

Tabla A4.11 (continuación). Estadísticas básicas de la concentración horaria de PM_{2.5} reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Tipo de equipo continuo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Estado de México	Investigaciones Nucleares	INN	69	TEOM (30°C)	246	13	1	11	12	4	6	11	18	26
	Nezahualcóyotl	NEZ	98	BETA (35°C)	240	21	1	15	17	6	11	18	28	38
	San Agustín	SAG	88	TEOM (30°C)	698	24	1	18	20	6	12	20	32	44
	Tlalnepantla	TLA	88	TEOM (30°C)	212	26	1	17	20	8	14	22	34	46
	Xalostoc	XAL	98	TEOM (30°C)	253	28	1	21	24	7	14	24	38	55

Tabla A4.12. Estadísticas básicas de la concentración horaria de PM_{coarse} reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	Tipo de analizador continuo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	95	TEOM (30°C)	127	13	1	10	11	3	6	10	17	25
	Benito Juárez	BJU	98	TEOM (30°C)	126	16	1	11	13	5	8	14	21	29
	Camarones	CAM	85	TEOM (30°C)	198	25	1	16	18	9	14	22	32	44
	Hospital General de México	HGM	94	TEOM (30°C)	95	14	1	9	11	5	8	12	19	26
	Merced	MER	83	TEOM (30°C)	176	25	1	16	19	8	14	22	33	45
	Miguel Hidalgo	MGH	99	TEOM (30°C)	84	12	1	8	9	4	6	10	15	22
	Milpa Alta	MPA	88	TEOM (30°C)	188	13	1	14	13	2	4	9	17	28
	Pedregal	PED	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Santa Fe	SFE	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	55	TEOM (30°C)	179	24	1	16	17	7	13	20	30	44
Estado de México	Investigaciones Nucleares	INN	76	TEOM (30°C)	128	7	1	7	7	1	2	5	9	16
	San Agustín	SAG	88	TEOM (30°C)	666	23	1	19	17	8	13	20	30	43
	Tlalnepantla	TLA	88	TEOM (30°C)	164	28	1	17	18	11	16	24	34	49
	Xalostoc	XAL	98	TEOM (30°C)	257	38	1	27	28	11	20	32	48	72

Tabla A4.13. Estadísticas básicas para la concentración de plomo presente en muestras de partículas suspendidas totales, las unidades de concentración son $\mu\text{g}/\text{m}^3$ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que reportaron al menos tres trimestres con al menos 75% de muestreos válidos se utilizaron en el informe anual. El análisis químico se realizó con un ICP óptico.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	# trimestres con más de 75% de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM	
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio trimestral $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Cumple
Ciudad de México	Merced	MER	93	4	0.105	0.035	0.0096	0.017	0.021	0.012	0.022	0.034	0.043	0.050	0.045	Si
	Pedregal	PED	85	4	0.044	0.017	0.0003	0.012	0.017	0.006	0.008	0.011	0.025	0.035	0.019	Si
	UAM Iztapalapa	UIZ	98	4	0.065	0.031	0.0007	0.015	0.019	0.012	0.022	0.032	0.041	0.047	0.039	Si
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	98	4	0.085	0.037	0.0073	0.017	0.022	0.014	0.026	0.036	0.048	0.057	0.046	Si
	Xalostoc	XAL	93	4	0.243	0.055	0.0097	0.044	0.030	0.026	0.033	0.043	0.063	0.095	0.088	Si

Tabla A4.14. Estadísticas básicas para la concentración de plomo presente en muestras de PM_{10} , las unidades de concentración son $\mu\text{g}/\text{m}^3$ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura. Sólo las estaciones que reportaron al menos tres trimestres con al menos 75% de muestreos válidos se utilizaron en el informe anual. El análisis químico se realizó con un ICP óptico.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	# trimestres con más de 75% de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Merced	MER	90	4	0.047	0.020	0.0057	0.013	0.022	0.006	0.009	0.012	0.031	0.038
	UAM Iztapalapa	UIZ	97	4	0.054	0.021	0.0042	0.013	0.022	0.007	0.010	0.021	0.032	0.039
Estado de México	La Presa	LPR	98	4	0.090	0.026	0.0006	0.020	0.031	0.006	0.009	0.024	0.040	0.051
	Nezahualcóyotl	NEZ	90	4	0.086	0.019	0.0028	0.017	0.013	0.006	0.009	0.013	0.022	0.041
	Tlalnepantla	TLA	98	4	0.049	0.025	0.0023	0.012	0.021	0.008	0.013	0.026	0.034	0.040
	Xalostoc	XAL	93	4	0.211	0.040	0.0001	0.044	0.036	0.006	0.010	0.032	0.046	0.076

Tabla A4.15. Estadísticas básicas para temperatura ambiente, todas las unidades están en °C.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco	AJU	89	23.2	10.5	-4.0	4.9	6.7	4.0	7.4	10.6	14.1	18.2
	Ajusco Medio	AJM	99	27.7	16.2	3.0	3.7	5.0	11.5	13.7	15.8	18.7	22.6
	Benito Juárez	BJU	99	29.4	17.5	3.8	4.2	5.7	12.3	14.7	16.9	20.4	24.8
	Cuajimalpa	CUA	97	26.3	14.0	0.0	3.8	5.0	9.5	11.5	13.5	16.5	20.7
	Gustavo A. Madero	GAM	97	30.8	17.8	4.6	4.4	5.9	12.5	15.0	17.3	20.9	25.3
	Hospital General de México	HGM	77	28.4	17.1	3.6	4.1	5.7	12.0	14.3	16.6	20.0	24.0
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	93	30.7	18.3	4.3	4.3	5.9	13.0	15.5	17.8	21.4	25.7
	Merced	MER	90	30.0	17.3	3.9	4.3	5.9	12.0	14.4	16.8	20.3	24.7
	Miguel Hidalgo	MGH	79	29.5	17.0	3.4	4.3	5.9	11.9	14.1	16.4	20.0	24.5
	Milpa Alta	MPA	93	26.8	13.6	-1.1	4.3	6.2	8.4	10.5	13.0	16.7	20.9
	Pedregal	PED	88	28.9	16.9	4.1	4.1	5.7	12.1	14.2	16.3	19.9	24.0
	Santa Fe	SFE	95	26.8	15.0	1.1	3.8	5.1	10.4	12.4	14.5	17.5	21.6
	Tláhuac	TAH	99	31.0	16.9	3.2	4.6	6.4	11.3	13.8	16.3	20.2	24.8
	UAM Iztapalapa	UIZ	99	31.0	17.6	3.3	4.3	5.8	12.2	14.8	17.1	20.6	24.9
UAM Xochimilco	UAX	96	30.7	17.8	4.6	4.6	6.2	12.2	14.8	17.3	21.0	25.6	
Estado de México	Acolman	ACO	87	30.5	16.2	0.3	5.3	7.3	9.5	12.8	16.0	20.1	25.0
	Chalco	CHO	97	30.0	16.0	0.7	4.9	6.6	10.0	12.9	15.7	19.5	24.0
	Cuautitlán	CUT	96	29.9	14.8	-2.2	5.9	8.2	7.1	11.0	14.7	19.2	24.2
	FES Acatlán	FAC	95	33.6	17.1	0.4	6.0	8.8	9.8	12.8	16.2	21.6	27.3
	Investigaciones Nucleares	INN	63	22.3	11.1	0.0	3.7	5.0	6.7	8.7	10.7	13.7	17.5
	Montecillo	MON	78	30.9	16.4	1.1	5.2	7.4	10.0	12.8	16.1	20.2	25.1
	Nezahualcóyotl	NEZ	99	29.9	17.3	3.8	4.2	5.8	12.2	14.5	16.8	20.3	24.6
	San Agustín	SAG	91	31.2	18.1	4.3	4.6	6.2	12.4	15.1	17.7	21.3	26.0
	Tlalnepantla	TLA	97	29.8	16.9	2.7	4.5	6.1	11.4	14.0	16.4	20.1	24.6
	Villa de las Flores	VIF	98	31.2	17.0	2.7	5.0	6.7	10.8	13.8	16.5	20.5	25.6
Xalostoc	XAL	99	29.7	17.2	3.6	4.1	5.6	12.1	14.4	16.8	20.0	24.2	

Tabla A4.16. Estadísticas básicas para humedad relativa, todas las unidades están en %.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango Intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco	AJU	90	100	76	7	21	31	43	62	81	93	99
	Ajusco Medio	AJM	99	95	55	2	21	34	27	39	56	73	86
	Benito Juárez	BJU	99	94	55	5	21	34	27	38	57	72	86
	Cuajimalpa	CUA	97	97	61	2	22	36	30	44	63	80	90
	Gustavo A. Madero	GAM	97	99	59	8	21	33	30	43	61	76	89
	Hospital General de México	HGM	77	87	51	5	19	32	25	36	52	68	79
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	93	100	57	7	23	37	26	39	58	76	93
	Merced	MER	90	95	55	4	21	34	26	38	57	72	85
	Miguel Hidalgo	MGH	99	89	52	4	20	35	24	35	52	70	81
	Milpa Alta	MPA	93	98	63	6	20	33	34	47	65	80	91
	Pedregal	PED	88	96	57	3	21	34	28	40	59	74	88
	Santa Fe	SFE	95	96	60	4	21	36	29	43	62	79	89
	Tláhuac	TAH	99	94	58	4	20	32	30	42	60	74	86
	UAM Iztapalapa	UIZ	99	99	56	4	21	34	28	40	58	74	87
UAM Xochimilco	UAX	97	94	56	4	20	33	28	40	58	73	87	
Estado de México	Acolman	ACO	87	100	61	5	22	36	29	44	64	80	91
	Chalco	CHO	97	96	61	5	20	31	32	46	63	77	89
	Cuautitlán	CUT	96	99	66	5	24	40	30	48	72	88	96
	FES Acatlán	FAC	94	99	56	2	24	41	23	36	58	77	91
	Investigaciones Nucleares	INN	62	97	73	7	22	35	37	58	80	93	96
	Montecillo	MON	78	97	61	7	22	35	30	45	64	80	90
	Nezahualcóyotl	NEZ	97	93	54	4	19	31	28	39	56	70	82
	San Agustín	SAG	91	97	53	5	20	33	25	37	54	70	84
	Tlalnepantla	TLA	97	88	51	5	20	34	23	35	52	69	80
	Villa de las Flores	VIF	98	100	57	4	22	39	25	38	59	77	87
	Xalostoc	XAL	90	88	50	4	19	31	24	35	52	66	79

Tabla A4.17. Estadísticas básicas para velocidad de viento, todas las unidades están en m/s.

Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										Porcentaje de calmas	Dirección del viento dominante*
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90		
Ciudad de México	Ajusco	AJU	84	12.5	2.5	0.1	1.2	1.4	1.3	1.7	2.3	3.1	4.8	0.1	SSO
	Ajusco Medio	AJM	99	13.5	2.7	0.2	1.6	1.7	1.2	1.6	2.4	3.3	5.7	0.3	ONO
	Benito Juárez	BJU	99	5.7	1.8	0.1	0.5	0.6	1.3	1.4	1.7	2.0	2.8	0.1	NNE
	Cuajimalpa	CUA	97	7.1	2.0	0.1	1.0	1.2	0.9	1.3	1.9	2.5	3.8	0.7	N
	Gustavo A. Madero	GAM	97	9.0	2.1	0.1	1.3	1.4	0.9	1.3	1.7	2.7	4.8	0.4	NNE
	Hospital General de México	HGM	78	7.8	1.8	0.1	1.1	1.5	0.6	1.0	1.5	2.5	3.8	5.3	ONO
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	89	8.0	1.9	0.1	1.0	1.4	0.7	1.1	1.8	2.5	3.8	1.5	NO
	Merced	MER	85	8.8	2.2	0.3	1.1	1.5	1.0	1.3	1.9	2.8	4.3	0.3	NNO
	Miguel Hidalgo	MGH	99	8.3	2.0	0.1	1.0	1.2	0.8	1.3	1.9	2.5	3.8	3.1	N
	Milpa Alta	MPA	67	9.8	2.6	0.1	1.2	1.6	1.3	1.7	2.5	3.3	4.9	0.2	OSO
	Pedregal	PED	88	8.6	2.0	0.1	1.0	1.1	0.9	1.3	1.7	2.4	4.0	0.9	NO
	Santa Fe	SFE	96	11.4	2.4	0.2	1.0	1.3	1.3	1.6	2.2	2.9	4.4	0.1	NO
	Tláhuac	TAH	99	9.8	2.2	0.3	1.2	1.5	0.9	1.3	1.9	2.8	4.6	0.0	O
	UAM Iztapalapa	UIZ	99	10.2	2.3	0.1	1.2	1.4	1.0	1.4	2.0	2.8	4.7	0.4	NNE
	UAM Xochimilco	UAX	97	9.3	2.1	0.4	1.2	1.2	1.0	1.3	1.7	2.5	4.5	0.0	E
Estado de México	Acolman	ACO	87	11.8	2.5	0.4	1.5	1.7	1.1	1.4	2.0	3.1	5.4	0.0	N
	Chalco	CHO	97	7.2	1.7	0.1	1.3	1.7	0.5	0.8	1.3	2.5	4.4	6.9	SE
	Cuautitlán	CUT	63	5.7	1.6	0.1	1.0	1.5	0.5	0.7	1.4	2.2	3.4	5.9	NNO
	FES Acatlán	FAC	94	6.7	1.8	0.1	0.9	1.2	0.7	1.1	1.6	2.3	3.6	1.4	NO
	Investigaciones Nucleares	INN	63	7.4	1.7	0.3	0.9	1.3	0.7	0.9	1.4	2.2	3.4	0.3	E
	Montecillo	MON	81	11.8	2.3	0.1	1.6	1.9	0.7	1.1	1.7	3.0	5.7	4.1	SE
	Nezahualcóyotl	NEZ	99	12.1	2.5	0.1	1.5	1.8	1.0	1.5	2.2	3.3	5.5	2.2	NE
	San Agustín	SAG	91	6.6	1.7	0.1	0.9	1.2	0.7	1.0	1.5	2.2	3.5	2.1	NNE
	Tlalnepantla	TLA	98	8.4	2.0	0.1	1.2	1.5	0.7	1.2	1.9	2.7	4.2	3.9	NO
	Villa de las Flores	VIF	98	8.5	1.9	0.1	1.2	1.4	0.7	1.1	1.6	2.5	4.3	1.5	NNO
Xalostoc	XAL	99	14.1	2.6	0.1	2.1	2.6	0.7	1.1	1.9	3.7	7.0	5.5	NNE	

* La dirección predominante corresponde al vector resultante de la suma vectorial de los datos horarios, de donde viene.

Tabla A4.18. Estadísticas básicas para depósito atmosférico húmedo. Sólo las estaciones que obtuvieron más del 75% de muestreos válidos se utilizaron en el informe anual.

Entidad	Estación	Clave	PP	pH			ANIONES			CATIONES					
			Precipitación pluvial total (mm de lluvia)	Mínimo pH	Promedio pH	Porcentaje de eventos de lluvia ácida (%)	NO ₃ depósito total (kg/ha)	SO ₄ ⁻² depósito total (kg/ha)	Cl ⁻ depósito Total (kg/ha)	NH ₄ ⁺ depósito Total (kg/ha)	Ca ²⁺ depósito Total (kg/ha)	K ⁺ depósito Total (kg/ha)	H ⁺ depósito Total (kg/ha)	Mg ²⁺ depósito Total (kg/ha)	Na ⁺ depósito Total (kg/ha)
Ciudad de México	Ajusco	AJU	1129	4.3	5.1	35	21.47	29.62	3.17	12.79	5.37	0.96	0.09	0.47	1.30
	Cerro del Tepeyac	TEC	612	5.2	5.5	21	18.55	22.74	1.67	10.82	5.38	0.52	0.02	0.38	0.95
	Corena	COR	512	4.7	5.2	40	13.95	17.94	1.70	8.55	3.41	0.52	0.03	0.27	0.70
	Diconsá	DIC	702	4.2	5.0	45	18.31	21.45	2.10	10.89	4.55	0.5	0.07	0.29	0.88
	Ecoguardas Ajusco	EAJ	943	4.1	5.1	48	20.98	25.88	2.90	12.12	5.67	0.6	0.08	0.39	0.94
	Ex Convento Desierto de los Leones	EDL	1116	4.3	5.2	42	25.37	29.78	2.44	12.79	9.05	1.19	0.07	0.39	1.27
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	604	5.0	5.7	16	18.24	23.52	1.25	11.31	5.95	0.66	0.01	0.30	0.61
	Legaria	IBM	632	4.9	5.5	26	23.00	28.27	1.97	13.08	7.57	0.55	0.02	0.38	1.04
	Lomas	LOM	860	4.5	5.3	19	25.57	28.50	2.70	13.63	8.54	0.75	0.05	0.44	1.38
	Milpa Alta	MPA	342	4.4	4.9	39	7.27	10.25	1.41	4.48	1.67	0.39	0.04	0.16	0.40
	Museo de la Ciudad de México	MCM	670	4.8	5.7	12	18.96	24.96	2.20	11.97	6.82	0.78	0.01	0.40	1.22
San Nicolás Totolapan	SNT	1146	4.3	5.2	55	23.46	28.45	3.05	12.25	6.68	2.26	0.07	0.64	0.97	
Estado de México	Montecillo	MON	423	5.5	5.8	18	10.71	12.45	0.88	7.05	2.39	0.41	0.01	0.18	0.42
	Nezahualcóyotl Sur	NEZ	502	4.8	5.7	12	14.65	21.00	1.48	10.9	4.43	0.72	0.01	0.30	0.87
	Tlalnepantla	TLA	657	4.5	5.4	25	17.59	25.29	1.90	11.29	5.64	0.43	0.03	0.29	0.82
	Xalostoc	XAL	640	5.6	5.8	10	15.93	22.08	1.51	10.96	5.36	0.65	0.01	0.30	0.97

Tabla A4.19. Conteo de días con calidad del aire favorable. Se considera un día como bueno cuando la concentración del contaminante es menor o igual a 100 puntos en el índice de calidad del aire.

Entidad	Estación	Clave	OZONO			PM ₁₀			PM _{2.5}			Total	
			Porcentaje de datos válidos	% días malos	% días buenos	Porcentaje de datos válidos	% días malos	% días buenos	Porcentaje de datos válidos	% días malos	% días buenos	% días malos	% días buenos
Ciudad de México	Ajusco	AJU	92	26	74	—	—	—	83	2	98	26	74
	Ajusco Medio	AJM	99	39	61	97	2	98	97	2	98	40	60
	Benito Juárez	BJU	98	39	61	99	6	94	99	9	91	42	58
	Camarones	CAM	96	26	74	88	15	85	88	6	94	33	67
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	94	39	61	—	—	—	99	1	99	39	61
	Coyoacán	COY	97	39	61	—	—	—	100	8	92	41	59
	Cuajimalpa	CUA	97	31	69	99	2	98	—	—	—	31	69
	Gustavo A. Madero	GAM	96	32	68	—	—	—	—	—	—	32	68
	Hospital General de México	HGM	99	34	66	96	5	95	96	8	92	38	62
	Iztacalco	IZT	95	33	67	93	3	97	—	—	—	33	67
	Merced	MER	92	20	80	89	20	80	89	11	89	33	67
	Miguel Hidalgo	MGH	99	30	70	100	2	98	100	5	95	33	67
	Milpa Alta	MPA	94	27	73	93	4	96	93	3	97	29	71
	Pedregal	PED	93	39	61	—	—	—	—	—	—	39	61
	San Juan de Aragón	SJA	57	21	79	—	—	—	—	—	—	21	79
	Santa Fe	SFE	70	43	57	—	—	—	—	—	—	43	57
Tláhuac	TAH	71	25	75	96	9	91	—	—	—	25	75	
UAM Iztapalapa	UIZ	97	21	79	57	18	82	57	10	90	27	73	
UAM Xochimilco	UAX	97	38	62	—	—	—	96	5	95	39	61	
Estado de México	Acolman	ACO	70	11	89	84	8	92	—	—	—	17	83
	Atizapán	ATI	79	10	90	99	11	89	—	—	—	21	79
	Chalco	CHO	98	15	85	98	20	80	—	—	—	28	72
	Cuautitlán	CUT	93	1	99	98	25	75	—	—	—	25	75
	FES Acatlán	FAC	96	21	79	61	9	91	—	—	—	25	75
	Investigaciones Nucleares	INN	87	23	77	73	0	100	73	0	100	23	77
	La Presa	LPR	72	16	84	—	—	—	—	—	—	16	84
	Los Laureles	LLA	92	14	86	—	—	—	—	—	—	14	86
	Montecillo	MON	81	6	94	—	—	—	—	—	—	6	94
	Nezahualcóyotl	NEZ	99	18	82	—	—	—	100	4	96	19	81
	San Agustín	SAG	92	14	86	92	17	83	92	6	94	24	76
	Tlalnepantla	TLA	91	16	84	92	18	82	92	10	90	27	73
	Tultitlán	TLI	75	18	82	95	20	80	—	—	—	28	72
Villa de las Flores	VIF	79	9	91	99	29	71	—	—	—	31	69	
Xalostoc	XAL	89	2	98	99	48	52	99	18	82	50	50	
Total	Ciudad de México		100	53	47	100	21	79	100	14	86	65	35
	Estado de México		100	35	65	100	51	49	100	19	81	66	34
	Zona metropolitana		100	58	42	100	52	48	100	21	79	77	23

ANEXO 5

Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas

Tabla A5.1. Activación de la Fase de Precontingencia en la Ciudad de México y su área conurbada entre 2001 y 2016.

Año	Contaminante	Activación			Desactivación	
		Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	Fecha y hora	Duración
2001	Ozono	13-ene 15:00	TPN	209	13-ene 18:00	3 h
	Ozono	17-ene 15:00	AZC	220	17-ene 19:00	4 h
	Ozono	29-ene 15:00	AZC	231	29-ene 18:00	3 h
	Ozono	13-feb 16:00	AZC	208	13-feb 18:00	2 h
	Ozono	07-mar 14:00	CUA	201	07-mar 17:00	3 h
	Ozono	02-may 14:00	BJU	219	02-may 16:00	2 h
	Ozono	02-may 14:00	PLA	214	02-may 16:00	2 h
	Ozono	24-may 15:00	BJU	205	24-may 17:00	2 h
	Ozono	28-may 16:00	CUA	213	28-may 18:00	2 h
	Ozono	07-jun 15:00	TAC	209	07-jun 16:00	1 h
	Ozono	07-jun 16:00	PLA	213	07-jun 18:00	2 h
	Ozono	21-jul 15:00	CUA	206	21-jul 18:00	3 h
	Ozono	04-ago 15:00	SUR	203	04-ago 17:00	2 h
	Ozono	18-ago 15:00	SUR	209	18-ago 17:00	2 h
2002	Ozono	16-ene 15:00	PED	219	16-ene 18:00	3 h
	Ozono	15-feb 16:00	PED	209	15-feb 18:00	2 h
	Ozono	15-mar 17:00	TAC	204	15-mar 18:00	1 h
	Ozono	02-abr 14:00	PLA	208	02-abr 16:00	2 h
	Ozono	20-abr 16:00	PLA	207	20-abr 18:00	2 h
	Ozono	22-abr 15:00	AZC	202	22-abr 17:00	2 h
	Ozono	22-abr 16:00	PED	210	22-abr 17:00	1 h
	Ozono	18-sep 15:00	PED	232	18-sep 18:00	Se activó la Fase I
	Ozono	23-oct 15:00	PED	202	23-oct 17:00	2 h
	Ozono	21-dic 17:00	EAC	212	21-dic 18:00	1 h
2003	PM ₁₀	01-ene 11:00	XAL	161	01-ene 00:00	13 h
	Ozono	03-abr 15:00	AZC	209	03-abr 15:00	59 min
	Ozono	10-may 15:00	SUR	204	10-may 15:00	59 min
	PM ₁₀	25-dic 09:00	XAL	164	25-dic 12:00	Se activó la Fase I
2004	—	—	—	—	—	
2005	—	—	—	—	—	
2006	PM ₁₀	01-ene 09:00	VIF	169	02-ene 03:00	18 h
	PM ₁₀	16-mar 19:00	SAG	167	17-mar 17:00	22 h
2007	Ozono	14-abr 16:00	PED	185	16-abr 16:00	48 h
	Ozono	23-jun 15:00	COY	172	24-jun 15:00	24 h
	Ozono	27-jul 16:00	TPN	184	28-jul 16:00	24 h

Tabla A5.1 (continuación). Activación de la Fase de Precontingencia en la Ciudad de México y su área conurbada entre 2001 y 2016.

Año	Contaminante	Activación			Desactivación	
		Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	Fecha y hora	Duración
2008	Ozono	08-abr 16:00	EAC	172	09-abr 16:00	24 h
	Ozono	10-may 17:00	COY	172	11-may 17:00	24 h
2009	Ozono	13-feb 17:00	PED	180	16-feb 17:00	72 h
	PM ₁₀	03-nov 22:00	XAL	164	05-nov 09:00	48 h
2010	Ozono	03-may 16:00	EAC	168	05-may 16:00	48 h
	Ozono	31-may 17:00	EAC	172	02-jun 17:00	48 h
	Ozono	04-jun 17:00	UIZ	165	05-jun 17:00	24 h
2011	PM ₁₀	11-ene 21:00	XAL	156	12-ene 17:00	20 h
	Ozono	26-mar 16:00	COY	160	27-mar 16:00	24 h
	Ozono	12-may 16:00	PED	161	14-may 16:00	48 h
	Ozono	16-jun 16:00	COY	161	17-jun 16:00	24 h
	Ozono	13-nov 16:00	FAC	156	14-nov 16:00	24 h
2012	Ozono	02-mar 16:00	FAC	153	04-mar 16:00	48 h
	Ozono	11-nov 16:00	PED HGM	159 151	12-nov 15:00	23 h
	PM ₁₀	25-dic 11:00	VIF	152	26-dic 10:00	23 h
2013	PM ₁₀	01-ene 10:00	VIF	158	02-ene 10:00	24 h
	Ozono	22-abr 17:00	NEZ	164	23-abr 20:00	27 h
	Ozono	27-abr 15:00	MER	159	27-abr 20:00	29 h
	Ozono	02-may 17:00	PED	157	03-may 20:00	27 h
	Ozono	09-may 17:00	IZT	158	11-may 20:00	51 h
	Ozono	21-may 16:00	UAX	151	22-may 20:00	28 h
2014	Ozono	20-feb 17:00	FAC	159	21-feb 20:00	27 h
	Ozono	20-mar 16:00	CUA	160	21-mar 20:00	28 h
	Ozono	09-may 16:00	SUR	156	10-may 20:00	28 h
2015	Ozono	03-mar 17:00	CUA	155	04-mar 20:00	27 h
	Ozono	08-abr 17:00	SFE	159	10-abr 19:00	50 h
			CUA	151		
	Ozono	05-may 16:00	IZT	157	06-may 18:00	26 h
			SFE	154		
			SJA	1156		
	Ozono	09-may 17:00	PED	161	10-may 20:00	27 h
CCA			152			
Ozono	10-jun 16:00	COY	152	12-jun 17:00	49 h	
		TPN	151			
Ozono	04-oct 16:00	FAC	170	05-oct 17:00	25 h	
PM ₁₀	25-dic 08:00	VIF	151	26-dic 12:00	28 h	

Tabla A5.1 (continuación). Activación de la Fase de Precontingencia en la Ciudad de México y su área conurbada entre 2001 y 2016.

Año	Contaminante	Activación			Desactivación	
		Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	Fecha y hora	Duración
2016	Ozono	19-feb 16:00	CHO MPA	157 153	20-feb 17:00	25 h
		21-feb 15:00	GAM	155	22-feb 20:00	29 h
	Ozono	12-mar 17:00	GAM FAC	159 154	14-mar 16:00	Se activó Fase I
		04-abr 18:00	BJU	155	05-abr 17:00	Se activó Fase I*

* A partir del 6 de abril de 2016, las autoridades Federales decidieron reducir el valor del umbral de la activación de la Fase I, dejando este límite en el valor de 155 ppb (150 puntos IMECA) que correspondía al valor de la Precontingencia y se desapareció la Fase de Precontingencia del PCAA.

Tabla A5.2. Activación de la Fase de Contingencia en la Ciudad de México entre 2001 y 2016.

Año	Contaminante	Activación			Fase	Desactivación	
		Fecha y hora	Estación	Valor IMECA		Fecha y hora	Duración
2001	—	—	—	—	—	—	—
2002	Ozono	18-sep 16:00	PED	242	Fase I	19-sep 16:00	24 h
2003	PM ₁₀	25-dic 12:00	XAL	176	Fase I, Regional	26-dic 12:00	24 h
2004	—	—	—	—	—	—	—
2005	PM ₁₀	01-ene 08:00	VIF	181	Fase I, Regional	02-ene 08:00	24 h
2006	—	—	—	—	—	—	—
2007	—	—	—	—	—	—	—
2008	—	—	—	—	—	—	—
2009	—	—	—	—	—	—	—
2010	—	—	—	—	—	—	—
2011	—	—	—	—	—	—	—
2012	—	—	—	—	—	—	—
2013	—	—	—	—	—	—	—
2014	—	—	—	—	—	—	—
2015	—	—	—	—	—	—	—
2016	Ozono	14-mar 16:00	CUA	194	Fase I	17-mar 16:00	72 h
	Ozono	05-abr 17:00	AJM	156	Fase I*	06-abr 17:00	24 h
	Ozono	02-may 15:00	BJU	161	Fase I*	05-may 17:00	74 h
	Ozono	14-may 17:00	TAH	157	Fase I*	15-may 15:00	22 h
	Ozono	20-may 15:00	SFE	178	Fase I*	21-may 17:00	26 h
	Ozono	24-may 15:00	CAM	151	Fase I*	24-may 21:00	06 h
	Ozono	27-may 15:00	GAM	165	Fase I*	28-may 18:00	27 h
	Ozono	31-may 16:00	MGH	155	Fase I*	01-jun 18:00	26 h
	Ozono	08-jul 17:00	SFE	152	Fase I*	09-jul 15:00	22 h
Ozono	11-ago 16:00	AJM	151	Fase I*	12-ago 17:00	25 h	

* A partir del 5 de abril de 2016, las autoridades Federales decidieron reducir el valor del umbral de la activación de la Fase I, dejando este límite en el valor de 155 ppb (150 puntos IMECA) que correspondía al valor de la Precontingencia y se desapareció la Fase de Precontingencia del PCAA.

ANEXO 6

Mosaicos

Partículas menores a 2.5 µm (PM_{2.5})

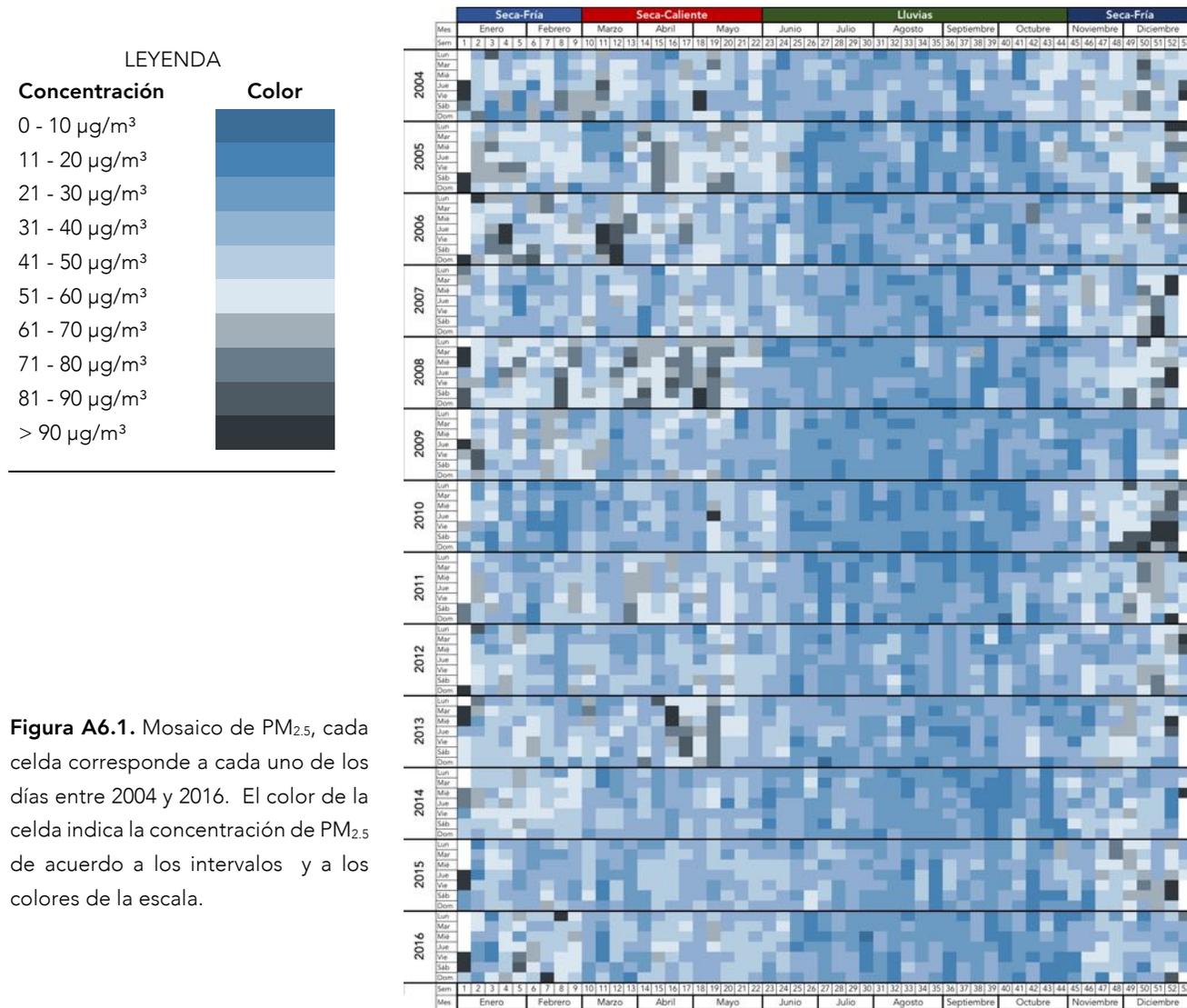


Figura A6.1. Mosaico de PM_{2.5}, cada celda corresponde a cada uno de los días entre 2004 y 2016. El color de la celda indica la concentración de PM_{2.5} de acuerdo a los intervalos y a los colores de la escala.

Partículas menores a 10 µm (PM₁₀)

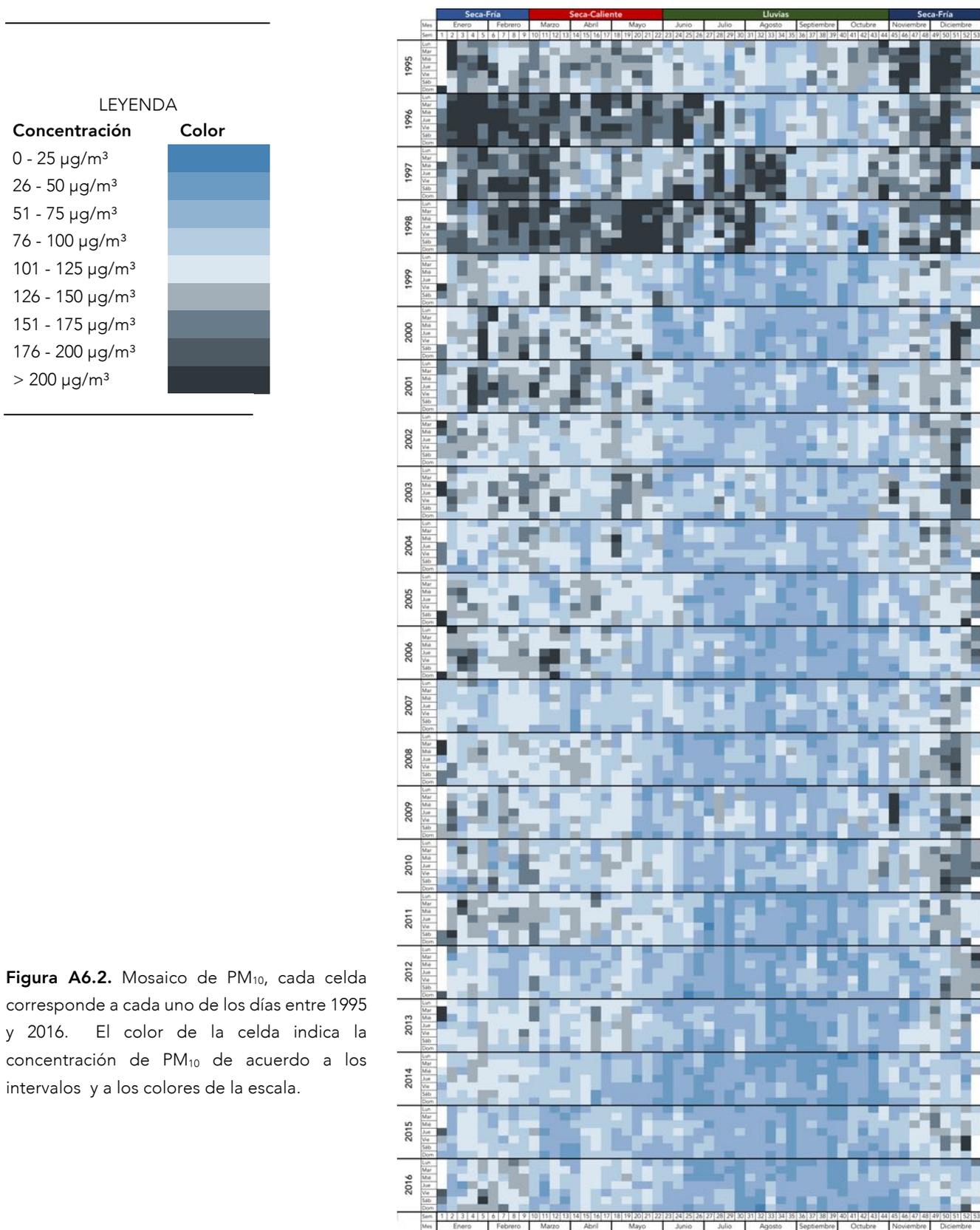


Figura A6.2. Mosaico de PM₁₀, cada celda corresponde a cada uno de los días entre 1995 y 2016. El color de la celda indica la concentración de PM₁₀ de acuerdo a los intervalos y a los colores de la escala.

Ozono

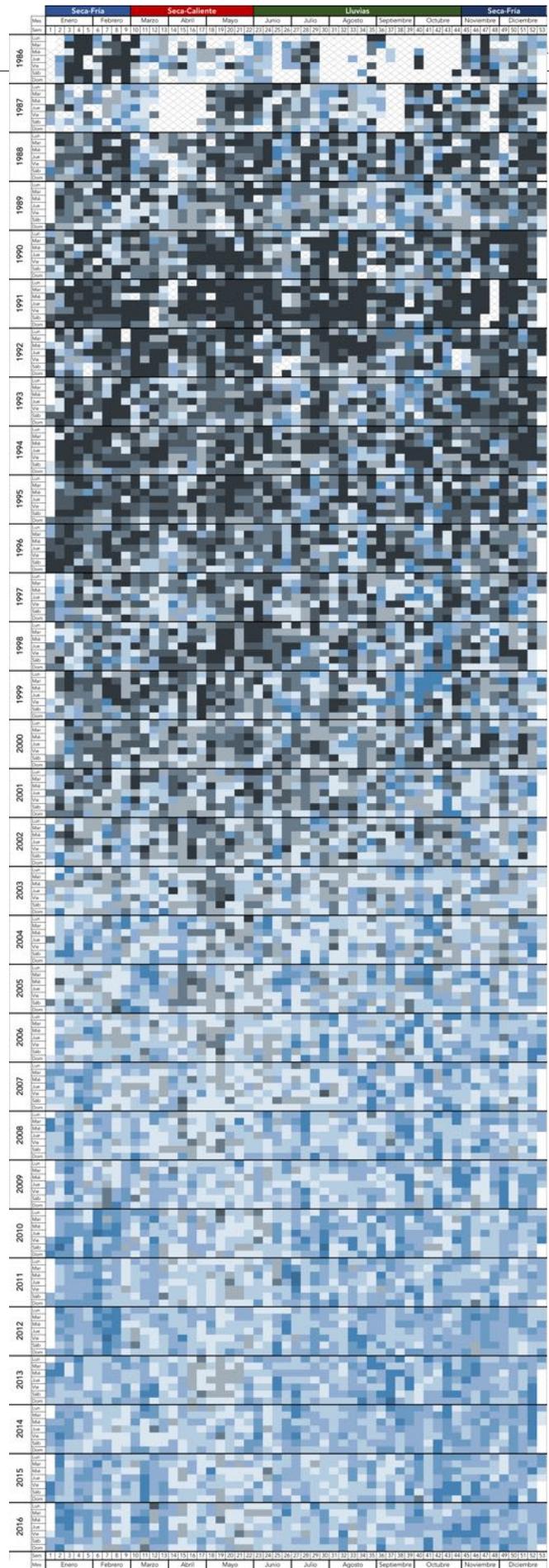
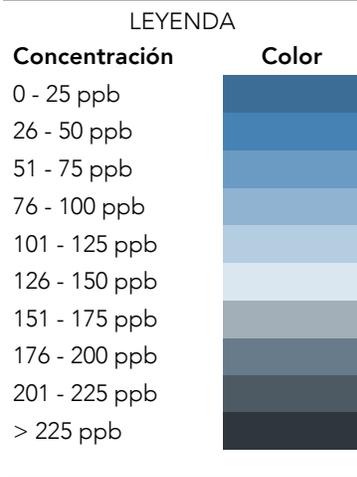


Figura A6.3. Mosaico de ozono, cada celda corresponde a cada uno de los días entre 1986 y 2016. El color de la celda indica la concentración del ozono de acuerdo a los intervalos y a los colores de la escala.



CDMX
CIUDAD DE MÉXICO

