

Calidad del aire en la Ciudad de México

Informe
2017

CDMX
CIUDAD DE MÉXICO



José Ramón Amieva Gálvez
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 mejora de la calidad del aire es uno de los retos más importantes que ha asumido en los últimos años la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México, en este esfuerzo no se han escatimado recursos para asegurar la reducción de las concentraciones de los principales contaminantes del aire, basándose en la mejor información y el conocimiento disponible. En un contexto meteorológico cambiante, como consecuencia de las variaciones en el clima global, en esta administración se presentaron nuevos desafíos para la gestión de la calidad del aire. Éstos se afrontaron a través del acercamiento a la evidencia científica reciente y la mejora de las herramientas tradicionales de la gestión ambiental. Actualmente, la Ciudad de México es la pionera y mantiene el liderazgo en la mejora de la calidad del aire al contar con el mejor sistema de monitoreo de la calidad del aire del país, el inventario de emisiones más actualizado y completo, y el único sistema de pronóstico de calidad del aire operacional. Además, se ha garantizado de manera permanente la difusión de la información de calidad del aire, haciendo uso de los mejores recursos informáticos disponibles para permitir un acceso rápido y oportuno a los datos del monitoreo y del pronóstico de calidad del aire.

El trabajo del monitoreo de la calidad del aire no concluye con la publicación de los datos, la Dirección de Monitoreo Atmosférico realiza periódicamente un análisis objetivo del estado que guarda la contaminación del aire, así como del impacto de los cambios urbanos y de la meteorología. En un esfuerzo por socializar la experiencia y el conocimiento adquirido, anualmente integra y presenta un informe de calidad del aire para la Ciudad de México, el cual describe la situación actual, el avance en el cumplimiento de la normatividad y en las metas de la gestión ambiental, así como las estadísticas más importantes para los diferentes contaminantes medidos a través del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Durante esta administración el monitoreo atmosférico se extendió a otros compuestos diferentes a los contaminantes criterio y que son de gran interés para la gestión, como el carbono negro, compuestos orgánicos volátiles y aerosoles, los resultados de algunas de las campañas se han integrado a estos informes. Adicionalmente, desde 2017 se documenta el desempeño del sistema de pronóstico.

Sirva lo anterior para presentar el Informe 2017 de la Calidad del Aire en la Ciudad de México, si bien el documento se presenta como un instrumento de difusión y consulta dirigido principalmente a la población de la Ciudad de México y su área conurbada, es el deseo de la Secretaría del Medio Ambiente que sea también de utilidad para los especialistas, tomadores de decisiones, expertos e interesados en el tema.

Diseño y cuidado editorial
Ivalu Loya Moreno

Portada
Ramón Gaona Díaz

Integración del documento
Mónica Jaimes Palomera, Olivia Rivera Hernández

Revisión
José Alberto Aguilar Juárez, Beatriz Cárdenas González, Armando Retama Hernández.

D. R. © 2018
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 indebido del documento por parte de terceros.

Citar este documento como:
Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. 2018. **Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2017**. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. Octubre, 2018.



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, Xochilt Loretto, Laura Edith Ocampo Trejo, Carla Fernanda Mayorga Domínguez, David Javier González Bautista, José Alberto Aguilar Juárez, Alejandro Ruiz Olivares, Daniel Mendoza Iglesias, Eduardo Mesa Bustamante, Cintia Gabriela Reséndiz Martínez.

Subdirección de Meteorología

Alfredo Alfonso 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, Julio César Argueta Rodríguez, Fernando Alonso Vega Bernal, 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, Donald Manuel Godínez Ángeles, Ulises Josué López Fabián, Daniel Alejandro Rivera Ávila, Abraham López Dorantes.

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, María Gabriela Holguín Pacheco, Víctor Octavio Valdés Espinosa, Jorge Cornejo Martínez, Carlos Iván Aróstegui Gallardo, Moises Castro Paniagua.

Administración

Margarita Barrientos Contreras, Francisco Serrano Vázquez.

En la elaboración de este informe se contó además con la colaboración de investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera y del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

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

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

Instituto de Geofísica (análisis de plomo / radiación solar global)

Dra. Ofelia Morton, Mtra. Elizabeth Hernández Álvarez, I. Q. Sara L. Ordóñez Godínez / Dr. Mauro Valdéz Barrón.

También se reconoce todo el apoyo brindado por las diferentes áreas operativas de la Dirección Ejecutiva de Administración.

Índice

Resumen ejecutivo	7
1. Comparación con las NOM	10
Dióxido de azufre	12
Dióxido de nitrógeno	13
Monóxido de carbono	13
Ozono	13
Partículas suspendidas	14
Plomo	15
2. El tiempo	18
Temperatura	19
Humedad relativa	22
Presión barométrica	23
Viento	24
Altura de mezcla	30
Radiación solar global	31
Radiación solar ultravioleta	33
3. Calidad del aire	36
Antecedentes	37
Dióxido de azufre	38
Óxidos de nitrógeno	43
Monóxido de carbono	50
Ozono	53
Partículas suspendidas	58
Índice de calidad del aire	63
Carbono negro	65
Tendencias	69
La temporada de ozono 2018	75
4. Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas	78
6 de enero, Fase I por PM ₁₀	80
15 y 22 de mayo, Fase I por ozono	81
14 de diciembre, Fase I por PM ₁₀	84

5. Depósito atmosférico	86
pH	88
Composición iónica	90
Depósito atmosférico húmedo	92
6. Composición química de PM_{2.5}	98
Antecedentes	99
Métodos	100
Resultados	101
Discusión	104
7. Modelación	106
Antecedentes	107
Métodos	107
Resultados	111
Discusión	116
Referencias	117
Anexos	120

Resumen ejecutivo

Durante 2017 las concentraciones de dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y plomo en el aire ambiente se mantuvieron por debajo de las concentraciones límite requeridas por las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental, sin embargo, las concentraciones de ozono, partículas menores a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) y a $2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) continuaron superando los valores recomendados para la protección de la salud pública.

En términos generales las condiciones meteorológicas observadas este año fueron favorables para la calidad del aire en la Ciudad de México y su área metropolitana, principalmente durante los periodos en los que generalmente ocurren las concentraciones máximas de ozono y de partículas. Sin embargo, mayo se caracterizó por una anomalía positiva en la temperatura ambiente y negativa en la velocidad del viento, además de la presencia de un sistema de alta presión que generó un episodio de estabilidad atmosférica durante casi 10 días consecutivos, lo que provocó la activación de la Fase I de Contingencia Ambiental en dos ocasiones. De acuerdo con los registros de la Red de Meteorología y Radiación Solar la temperatura ambiente durante 2017 fue 0.4°C mayor que en 2016, con anomalías positivas para la mayoría de los meses del año. Durante marzo y algunos días de abril, la presencia de frentes fríos con lluvias asociadas a la interacción con el aire húmedo de origen tropical, favoreció condiciones de inestabilidad atmosférica que permitieron menores concentraciones de ozono durante la *temporada de ozono*. Se observaron anomalías positivas en la velocidad del viento durante la mayor parte del año, con mayor intensidad en octubre, y en general favorable para la calidad del aire. El promedio anual de la radiación solar global fue de $880\ \text{W}/\text{m}^2$ con una irradiancia promedio de $19.7\ \text{MJ}/\text{m}^2$. En cuanto a la radiación solar ultravioleta (UV), la intensidad promedio fue de 4.6 y $0.22\ \text{W}/\text{m}^2$ para UV-A y UV-B, respectivamente. Las mayores intensidades se observaron entre abril y septiembre, mientras que las menores en enero y diciembre. El índice UV reportó valores de riesgo para la salud humana durante la mayor parte del año, el periodo con la mayor radiación fue de las 12:00 a las 15:00. El índice UV reportó intensidades altas en 41 días, muy altas en 158 días y extremadamente altas en 163 días.

Las concentraciones promedio para la mayoría de los contaminantes fueron menores a las observadas en 2013, al inicio de esta administración, solo en el caso de ozono los niveles promedio no presentaron cambios significativos. En el caso de dióxido de azufre las emisiones provenientes del corredor Tula-Tepeji continuaron como la fuente más importante del contaminantes en la Ciudad de México. Para ozono, las condiciones meteorológicas predominantes durante marzo y abril mitigaron la presencia de episodios de contaminación en la temporada de ozono, presentándose solo un episodio severo de estabilidad atmosférica durante mayo, que activó la Fase I de Contingencia Ambiental en dos ocasiones consecutivas, el 15 y 21 de mayo, con una concentración máxima de 190 ppb. En el caso de PM_{10} las quemas intencionales al noreste de la zona metropolitana y la presencia de un incendio en una pequeña reserva ecológica, ambos eventos al noreste de la zona metropolitana, provocaron la activación de la Fase I de Contingencia Ambiental por PM_{10} el 6 de enero y el 14 de diciembre, respectivamente. La concentración promedio anual de carbono negro (reportado como carbono negro equivalente) presente en las $\text{PM}_{2.5}$ fue de $2.9\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, que representa el 12% de la masa de $\text{PM}_{2.5}$. De acuerdo con el inventario de emisiones los vehículos fueron la fuente más importante de esta especie, sin embargo, se identificó también la presencia de carbono negro de origen regional asociado a la quema de biomasa. El análisis de la tendencia de los

contaminantes reportados por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, utilizando el método de Mann-Kendall, indicó que desde el año 2000 las concentraciones de dióxido de azufre, monóxido de carbono, ozono, partículas suspendidas totales y PM_{10} mantuvieron una tendencia descendente, mientras que los óxidos de nitrógeno y $PM_{2.5}$ no mostraron tendencia significativa.

El análisis de los datos de ozono registrados durante la temporada de ozono 2018 reveló una disminución significativa en el número de horas mayores a la NOM-020-SSA1-2014 con respecto a los años previos, así como el menor número de horas con concentraciones mayores a 150 puntos de las últimas tres décadas. Por lo tanto, el año 2018 se perfila como uno de los mejores en términos de la calidad del aire en la historia reciente de la Ciudad de México.

En la temporada de lluvia el análisis del depósito atmosférico húmedo indicó la presencia de lluvia ácida en muestras obtenidas en sitios al sur y oriente de la Ciudad de México, principalmente en las zonas de suelo de conservación, con un valor mínimo de pH de 4.1. Las especies más abundantes presentes en el agua de lluvia fueron sulfato, nitrato, amonio y calcio que juntos representaron el 91% de la carga iónica inorgánica, expresada en unidades de concentración equivalente. Los promedios de depósito acumulado para sulfato, nitrato y amonio fueron de 19.9, 15.8 y 10.1 kg/ha, respectivamente. Las mayores cantidades de depósito de estos iones se presentaron al suroeste de la Ciudad de México,

Los resultados del análisis de la composición de aerosoles de muestras colectadas durante la campaña AERAS del invierno de 2013-2014 indicó que la suma de los iones orgánicos y el carbono negro equivalente representaron el 41% de la masa total de $PM_{2.5}$, en donde la suma de los iones inorgánicos contribuyó con el 33%, mientras que el carbono negro equivalente aportó el 8%. Los iones inorgánicos más abundantes fueron el nitrato, sulfato y amonio, con contribuciones de 12.1, 11.3 y 6.5%, respectivamente. El 59% de las $PM_{2.5}$ correspondió a otros materiales no identificados durante la campaña, como compuestos orgánicos, metales y polvo del suelo.

Por otra parte, los resultados de la evaluación del pronóstico de calidad del aire para el periodo comprendido entre el 15 de febrero y el 15 de julio, indicaron que el rendimiento del modelo, definido como el porcentaje de pronósticos categorizados como buenos y regulares, fue de 80% para el pronóstico de 24 horas y de 72% para el de 48 horas. Se observó que para los casos en los que el sistema de pronóstico sobrestimó las concentraciones de ozono, el modelo meteorológico subestimó la velocidad de viento lo que provocó que el modelo químico simulará una mayor actividad fotoquímica incrementando la concentración pronosticada de ozono. En los casos en los que el pronóstico subestimó la concentración de ozono, se observó que estuvieron asociados a la dificultad que tuvo el modelo meteorológico para simular la corriente de flujo canalizado que ocurre al sureste de la cuenca a través del paso de Chalco, que determina el movimiento de las masas de aire desde el sur hacia el norte principalmente durante la temporada seca-caliente y es uno de los responsables de los episodios de O_3 -Norte.

Por último, este año las estaciones de monitoreo Coyoacán (COY) y San Juan de Aragón (SJA) dejaron de operar a consecuencia de los graves daños que sufrieron las instalaciones de los edificios públicos que las alojaban durante el sismo del 19 de septiembre. Ambas estaciones concluyeron su operación el martes 19 de septiembre de 2017.



1. Comparación con las NOM

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

Evaluación del cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas

Con propósitos normativos y regulatorios la calidad del aire en el país se evalúa comparando las concentraciones de los contaminantes medidos en el aire ambiente contra los valores límite descritos por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Salud Ambiental expedidas por la Secretaría de Salud. En la Tabla 1.1 se presentan las normas que estuvieron vigentes en 2017, para cada una de ellas se especifican los valores límite, el tipo de estadístico para su evaluación y la forma, esta última se refiere a la manera en la que se evalúa el valor límite. Para el caso de partículas y plomo la evaluación se realiza comparando el estadístico de la norma contra el valor límite, mientras que para el resto de los contaminantes la forma se describe en términos de un valor máximo que no debe superarse durante el año. Es importante mencionar que en algunos casos la redacción de la especificación de la norma no

es precisa, por lo que, para evitar confusiones se hacen las siguientes aclaraciones:

- En el caso del dióxido de nitrógeno la especificación menciona que «no debe rebasar el límite máximo normado de 0.21 ppm o lo que es equivalente a $395 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en una hora una vez al año», para propósitos de esta evaluación se entiende que el valor límite puede superarse una hora durante el año.
- En monóxido de carbono la especificación menciona que la concentración «no debe rebasar el valor permisible de 11.00 ppm o lo que es equivalente a $12\,595 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio móvil de ocho horas una vez al año», lo anterior se interpreta como el valor límite no debe superarse durante el año.
- Para dióxido de azufre la especificación para el

Tabla 1.1. Listado de las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental.

Contaminante	Norma Oficial Mexicana	Concentración y tipo de promedio	Forma	Última actualización
Ozono (O_3)	NOM-020-SSA1-2014	0.095 ppm 1 hora 0.070 ppm Móvil de 8 horas	No deben rebasarse durante el año	19 de agosto de 2014
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	11 ppm Móvil de 8 horas	No debe rebasarse durante el año	23 de diciembre de 1994
Dióxido de azufre (SO_2)	NOM-022-SSA1-2010	0.110 ppm 24 horas	No debe rebasarse durante el año	8 de septiembre de 2010
		0.200 ppm Móvil de 8 horas	No debe rebasarse más de una vez al año	
		0.025 ppm 1 año	Promedio anual	
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	NOM-023-SSA1-1994	0.210 ppm 1 hora	No debe rebasarse durante el año	23 de diciembre de 1994
Partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10})	NOM-025-SSA1-2014	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 horas	Valor promedio	20 de agosto de 2014
		40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 1 año	Valor promedio	
Partículas menores a 2.5 micrómetros ($\text{PM}_{2.5}$)	NOM-025-SSA1-2014	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 horas	Valor promedio	20 de agosto de 2014
		12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 1 año	Valor promedio	
Plomo (Pb)	NOM-026-SSA1-1993	1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 1 trimestre	Valor promedio	23 de diciembre de 1994

promedio de 24 horas menciona «no debe rebasar el límite máximo normado de 288 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o 0.110 ppm promedio en 24 horas, una vez al año», lo anterior se interpreta como no rebasar durante el año. Para el caso del promedio de 8 horas la especificación menciona que la concentración «debe ser menor o igual a 524 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o 0.200 ppm promedio horario para no ser rebasado dos veces al año», el enunciado se interpreta como la concentración del promedio de 8 horas no debe rebasarse más de 1 vez al año, por lo tanto se utiliza el segundo máximo.

En esta sección se describe el estado del cumplimiento de las NOM en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), la cual incluye a la Ciudad de México y aquellos municipios conurbados del Estado de México (EdoMéx) en donde se realiza monitoreo. En el Anexo 4 se muestran los resultados de la evaluación de las NOM para cada una de las estaciones. Adicionalmente y con propósitos comparativos se evaluaron los valores observados en 2017 con respecto a los valores descritos por los estándares de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) y los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Las unidades de concentración empleadas para los compuestos gaseosos fueron partes por millón (ppm), donde 1 ppm=1000 partes por billón (ppb), mientras que las unidades de concentraciones para partículas suspendidas y plomo fueron microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las condiciones

locales de presión y temperatura. Aquellas concentraciones que superaron los valores límite de la NOM, el estándar de la US EPA o el valor guía de la OMS se indicaron en color rojo. Se considera que la Ciudad de México y su área metropolitana no cumplieron con la norma correspondiente cuando la concentración máxima en una o más estaciones de monitoreo superó cualquiera de los valores límite. La evaluación se realizó solamente para aquellas estaciones que tuvieron más del 75% de datos válidos durante el año, a menos que los requerimientos de la norma correspondiente proporcionaran una especificación distinta.

Dióxido de azufre

En 2017 se mantuvo el cumplimiento de la NOM-022-SSA1-2010 en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), con concentraciones menores a los valores límite para los promedios de 8 y 24 horas, además del anual. Las mayores concentraciones para los promedios de 8 y 24 horas se registraron en la estación Cuautitlán (CUT), con valores de 0.158 ppm para el segundo máximo del promedio de 8 horas y de 0.072 ppm para el máximo de 24 horas. En la estación Tlalnepantla se registró el promedio anual máximo con 0.008 ppm. Ambas estaciones se encuentran al norte de la ZMCM. En la Tabla 1.2 se resumen los resultados de la comparación de las concentraciones máximas con los valores de la NOM, el estándar de la US EPA y la guía de la OMS.

Tabla 1.2. Comparación de las concentraciones máximas de dióxido de azufre con respecto a los valores límite de la NOM-022-SSA1-2010, el estándar de la US EPA y los valores guía de la OMS.

	NOM		Promedio anual máximo	OMS	US EPA
	Máximo 24 h	2° máximo 8 h		Máximo 24 h	Promedio trianual percentil 99
	0.110 ppm	0.200 ppm	0.025 ppm	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ *	0.075 ppm
Zona metropolitana	0.072 ppm	0.158 ppm	0.008 ppm	149 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.170 ppm
Ciudad de México	0.052 ppm	0.097 ppm	0.006 ppm	116 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.104 ppm
Área conurbada (EdoMéx)	0.072 ppm	0.158 ppm	0.008 ppm	149 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.170 ppm

* Equivalencia a 17 °C y 585 mmHg.

Dióxido de nitrógeno

Durante 2017 la concentración de este contaminante fue inferior al valor límite descrito por la NOM-023-SSA1-1994 para todas las estaciones de la red. La concentración máxima del contaminante fue de 0.109 ppm en la estación Miguel Hidalgo (MGH), en la Ciudad de México. En la Tabla 1.3 se presentan la comparación de los valores máximos con la NOM, el estándar de la US EPA y la guía de la OMS.

Monóxido de carbono

En el 2017 no se registraron valores superiores a la NOM-021-SSA1-1993. Las concentraciones máximas se observaron en las estaciones de monitoreo ubicadas en las zonas de mayor tránsito vehicular. El máximo para el promedio de 8 horas se observó en Xalostoc (XAL) con un valor de 3.8 ppm. Los niveles del contaminante cumplieron con el estándar de la US EPA y los valores guía de la OMS (ver Tabla 1.4).

Ozono

Uno de los principales contaminantes responsables del deterioro de la calidad del aire en la Ciudad de México y su área metropolitana es el ozono. A pesar de que en los últimos años se ha observado una reducción importante en las concentraciones máximas, éstas aún superan los valores establecidos por la NOM-020-SSA1-2104. Debido a las características fisiográficas y meteorológicas de la cuenca, el

centro y sur de la Ciudad de México fueron las regiones más afectadas por el contaminante.

En 2017 se registraron en la Ciudad de México y su área metropolitana un total de 234 días en los que el valor máximo del promedio horario superó el valor límite de la norma de 0.095 ppm. Para este criterio, que considera a todas las estaciones de la red, se consideró que un día no cumplió con la norma cuando en cualquiera de las estaciones de monitoreo se registró una concentración horaria mayor al valor límite. Para el caso del promedio móvil de 8 horas, en 233 días se registraron valores mayores al valor límite de 0.070 ppm. La concentración máxima para el promedio de 1 hora fue de 0.190 ppm en la estación Benito Juárez (BJU), ubicada al sur de la Ciudad de México. La estación Pedregal (PED), ubicada al suroeste de la Ciudad de México, reportó el mayor número de horas con concentraciones superiores al valor límite de 1 hora con un total de 391 horas distribuidas en 147 días. En la estación Milpa Alta (MPA), al sureste de la Ciudad de México, se presentó el mayor número de días con concentraciones máximas para el promedio móvil de 8 horas, con un total de 170 días. Prácticamente todas las estaciones reportaron concentraciones mayores a la NOM en más de una ocasión, sin embargo, las estaciones ubicadas al norte de la zona metropolitana fueron las que reportaron el menor número.

En la Tabla 1.5 se presenta el número de horas mayores a la NOM, además de la comparación contra los valores límite de la US EPA y la OMS. En la Tabla 1.6 se indica el número de horas mayores a los valores límite de la NOM por estación.

Tabla 1.3. Comparación de las concentraciones máximas de dióxido de nitrógeno con respecto a los valores límite de la NOM-023-SSA1-1994, el estándar de la US EPA y los valores guía de la OMS.

	NOM	OMS		US EPA	
	No exceder el máximo de 1 h	Máximo 1 h	Promedio anual	Percentil 99 del promedio de 1 h, evaluado en 3 años	Promedio anual
	210 ppb	200 µg/m ³ *	40 µg/m ³ *	100 ppb	53 ppb
Zona metropolitana	0 h	192 µg/m ³	52 µg/m ³	108 ppb	35 ppb
Ciudad de México	0 h	181 µg/m ³	52 µg/m ³	108 ppb	35 ppb
Área conurbada (EdoMéx)	0 h	192 µg/m ³	49 µg/m ³	106 ppb	33 ppb

* Equivalencia a 17 °C y 585 mmHg.

Tabla 1.4. Comparación de las concentraciones máximas de monóxido de carbono con respecto a los valores límite de la NOM-021-SSA1-1993, el estándar de la US EPA y la recomendación de la OMS.

	NOM	OMS		US EPA	
	Máximo 8 h	Máximo 1 h	Máximo 8 h	Máximo 1 h	Máximo 8 h
	11 ppm	30 000 µg/m ³ *	10 000 µg/m ³ *	35 ppm	9 ppm
Zona metropolitana	3.8 ppm	5424 µg/m ³	3435 µg/m ³	6.0 ppm	3.8 ppm
Ciudad de México	2.8 ppm	4972 µg/m ³	2531 µg/m ³	5.5 ppm	2.8 ppm
Área conurbada (EdoMéx)	3.8 ppm	5424 µg/m ³	3435 µg/m ³	6.0 ppm	3.8 ppm

* Equivalencia a 17 °C y 585 mmHg.

Partículas suspendidas

Las concentraciones para los promedios de 24 horas y anual de PM₁₀, evaluados con el método de referencia (manual), superaron los valores límite de la NOM-025-SSA1-2014 con valores máximos para los promedios de 24 horas y anual de 164 µg/m³ y 70 µg/m³, respectivamente, en la estación Xalostoc, ubicada en un corredor industrial en el municipio de Ecatepec de Morelos. Ninguna de las estaciones que reportaron este contaminante alcanzaron el cumplimiento de la norma, sin embargo, las estaciones ubicadas al norte de la zona metropolitana registraron consistentemente concentraciones mayores que las localizadas al sur. En la Tabla 1.7 se muestra la comparación de las con-

centraciones máximas contra los valores límite de la NOM, US EPA y los valores guía de la OMS.

En el caso de PM_{2.5} se observó una situación similar, en donde las concentraciones promedio superaron las recomendaciones de la NOM-025-SSA1-2014. Ninguna de las estaciones de la red que reportaron este contaminante logró el cumplimiento de la norma. A diferencia de PM₁₀ se observó una menor variabilidad entre las concentraciones promedio reportadas en las estaciones que midieron este contaminante, esto debido a una menor influencia de las fuentes primarias. En la Tabla 1.8 se muestra la comparación de las concentraciones máximas del contaminante contra los valores límite de la NOM, US EPA y los valores guía de la OMS.

Tabla 1.5. Comparación de las concentraciones máximas de ozono con respecto a los valores límite de la NOM-020-SSA1-2014, el estándar de la US EPA y la recomendación de la OMS. En el caso de la NOM se indica el número de horas en las que superó el valor límite.

	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
	95 ppb	70 ppb	100 µg/m ³ *	0.075 ppb
Zona metropolitana	869 h	140 ppb	217 µg/m ³	0.119 ppb
Ciudad de México	817 h	140 ppb	217 µg/m ³	0.119 ppb
Área conurbada (EdoMéx)	443 h	119 ppb	184 µg/m ³	0.105 ppb

* Equivalencia a 17 °C y 585 mmHg.

Tabla 1.6. Número de horas en las que se superó la NOM-020-SSA1-2014 para los promedios de 1 y 8 horas, y valores máximos de los promedios horarios (en ppm), por estación de monitoreo. Para cada estación se indica la clave correspondiente, aquellas marcadas en color azul indican las estaciones de monitoreo ubicadas en la zona conurbada del Estado de México.

Estación	Clave	>NOM 1h	Max 8h ppm	Máx 1h ppm
Acolman	ACO	70	0.095	0.123
Ajusco Medio	AJM	388	0.131	0.178
Ajusco	AJU	252	0.110	0.163
Atizapán	ATI	61	0.098	0.135
Benito Juárez	BJU	368	0.132	0.190
Camarones	CAM	167	0.119	0.161
Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	381	0.128	0.185
Chalco	CHO	75	0.102	0.119
Coyoacán	COY	312	0.131	0.175
Cuajimalpa	CUA	66	0.099	0.139
Cuautitlán	CUT	111	0.119	0.156
FES Acatlán	FAC	160	0.114	0.160
Gustavo A. Madero	GAM	300	0.130	0.171
Hospital General de México	HGM	254	0.124	0.176
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares	INN	120	0.109	0.139
Iztacalco	IZT	292	0.128	0.179
Los Laureles	LLA	105	0.102	0.133
La Presa	LPR	145	0.111	0.139
Merced	MER	103	0.120	0.166
Miguel Hidalgo	MGH	186	0.124	0.189
Montecillo	MON	68	0.100	0.123
Milpa Alta	MPA	318	0.113	0.136
Nezahualcóyotl	NEZ	3	0.075	0.107
Pedregal	PED	388	0.140	0.177
San Agustín	SAG	86	0.100	0.132
Santa Fe	SFE	191	0.109	0.158
San Juan de Aragón	SJA	214	0.118	0.154
Tláhuac	TAH	258	0.114	0.154
Tlalnepantla	TLA	91	0.100	0.140
Tultitlán	TLI	82	0.102	0.122
UAM Xochimilco	UAX	364	0.122	0.162
UAM Iztapalapa	UIZ	227	0.132	0.167
Villa de las Flores	VIF	28	0.093	0.122
Xalostoc	XAL	128	0.106	0.135

Plomo

El plomo es un metal de gran toxicidad que una vez inhalado o ingerido entra al torrente sanguíneo, causando un amplio intervalo de efectos en la salud que incluyen daños al sistema nervioso central, al sistema cardiovascular y a las células de la sangre. Los niños son los más vulnerables ya que tienen una mayor probabilidad de ingerir el metal y su organismo se encuentra en desarrollo. En los niños puede provocar daño en las células rojas de la sangre, afectar al sistema nervioso central y provocar retraso en el aprendizaje, pérdida de atención e incremento en la hiperactividad. Estos daños pueden permanecer hasta la etapa adulta. En los adultos puede provocar incremento en la presión arterial y problemas cardiovasculares (US EPA, 2013).

En el pasado, la presencia de plomo en el aire ambiente de la Ciudad de México estuvo asociada al consumo de gasolinas con plomo, sin embargo, con el retiro de este aditivo en la década de 1990 la concentración disminuyó por debajo del valor requerido por la NOM-026-SSA1-1993 de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio aritmético trimestral en muestras de partículas suspendidas totales (PST). Actualmente, la presencia de plomo en el aire ambiente se relaciona con la resuspensión del material remanente en el suelo, la actividad industrial y el uso de algunas pinturas y pigmentos. Es interesante destacar que se presentó un incremento importante en las concentraciones de plomo en las muestras de PST colectadas el 1 de enero de 2017, posiblemente asociado a la quema de material pirotécnico.

Es importante mencionar que la NOM-026-SSA1-1993 requiere la medición de plomo en las muestras de partículas suspendidas totales (PST), esta es la principal razón por la cual la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) mantiene el monitoreo de PST. De acuerdo con dicha norma la concentración máxima permitida para el plomo en PST es de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, reportada como el promedio aritmético de tres meses.

El análisis de las mediciones de plomo de 2017 indicó que los promedios aritméticos trimestrales fueron menores a los requeridos por la NOM, con un valor máximo de $0.038 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Xalostoc (XAL)(ver Tabla 1.9). En el Anexo 4 se muestran también los resultados para 2015 y 2016.

Tabla 1.7. Comparación de las concentraciones máximas de PM₁₀ con respecto a los valores límite de la NOM-025-SSA1-2014, el estándar de la US EPA y la recomendación 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
	75 µg/m ³	40 µg/m ³	50 µg/m ³	20 µg/m ³	150 µg/m ³
ZMCM	164 µg/m ³	70.3 µg/m ³	164 µg/m ³	70.3 µg/m ³	124 µg/m ³
Ciudad de México	101 µg/m ³	50.6 µg/m ³	101 µg/m ³	50.6 µg/m ³	85 µg/m ³
Área conurbada (EdoMéx)	164 µg/m ³	70.3 µg/m ³	164 µg/m ³	70.3 µg/m ³	124 µg/m ³

Tabla 1.8. Comparación de las concentraciones máximas de PM_{2.5} con respecto a los valores límite de la NOM-025-SSA1-2014, el estándar de la US EPA y la recomendación 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
	45 µg/m ³	12 µg/m ³	25 µg/m ³	10 µg/m ³	35 µg/m ³	12 µg/m ³
ZMCM	87 µg/m ³	29.5 µg/m ³	87 µg/m ³	29.5 µg/m ³	57 µg/m ³	27 µg/m ³
Ciudad de México	55 µg/m ³	23.1 µg/m ³	55 µg/m ³	23.1 µg/m ³	43 µg/m ³	22 µg/m ³
Área conurbada (EdoMéx)	87 µg/m ³	29.5 µg/m ³	87 µg/m ³	29.5 µg/m ³	57 µg/m ³	27 µg/m ³

Tabla 1.9. Comparación de las concentraciones máximas de plomo (Pb) con respecto a los valores límite de la NOM-026-SSA1-1993, el estándar de la US EPA y la recomendación de la OMS.

	NOM	OMS	US EPA
	Máximo promedio trimestral	Promedio anual	Máximo promedio trimestral en tres años
	1.5 µg/m ³	0.5 µg/m ³	0.15 µg/m ³
ZMCM	0.038 µg/m ³	0.027 µg/m ³	0.054 µg/m ³
Ciudad de México	0.037 µg/m ³	0.015 µg/m ³	0.037 µg/m ³
Área conurbada (EdoMéx)	0.038 µg/m ³	0.027 µg/m ³	0.054 µg/m ³



2. El tiempo

Comportamiento de las variables

Temperatura

El promedio de la temperatura ambiente incluyendo los registros de todas las estaciones de monitoreo fue de 16.8 °C, con un promedio horario máximo de 34.1 °C en la estación FES Acatlán (FAC), en el municipio de Naucalpan de Juárez, y un mínimo de -5.5 °C en la estación Ajusco (AJU) en la zona montañosa de la Sierra Ajusco-Chichinautzin, al sur de la Ciudad de México. El promedio anual fue mayor al promedio de 16.4 °C reportado por la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) en 2016. La estación con el mayor promedio anual fue San Agustín (SAG), en el municipio de Ecatepec de Morelos, con 18.3 °C; mientras que el mínimo se observó en AJU con 10.0 °C. En general, las estaciones ubicadas en áreas suburbanas o rurales reportaron las temperaturas menores, mientras que las estaciones ubicadas dentro del área urbana registraron mayores temperaturas. De igual manera, las estaciones suburbanas o rurales registraron un mayor contraste entre las temperaturas máxima y mínima diarias, que las estaciones urbanas. Las

estaciones localizadas dentro del territorio de la Ciudad de México reportaron una temperatura promedio anual de 16.4 °C (excluyendo la estación AJU el promedio fue de 16.8 °C). Los mayores promedios anuales se observaron en el centro de la zona urbana.

En la Figura 2.1 se presenta la distribución de los promedios diarios de temperatura en la Ciudad de México y su área metropolitana. En la serie de tiempo se observa la variación estacional típica de la temperatura a lo largo del año, con temperaturas cálidas entre abril y mayo, templadas durante la temporada de lluvia (mediados de mayo a principios de octubre) y mínimas durante el invierno. Mayo fue el mes más cálido del año con una temperatura promedio de 19.7 °C, mientras que diciembre fue el más frío con una temperatura promedio de 13.3 °C. En marzo, la presencia de varios frentes fríos provocó temperaturas menores a lo normal. La Figura 2.2 muestra la variación diurna de la temperatura, con máximas entre las 15:00 y 16:00, y mínimas alrededor de las 7:00.

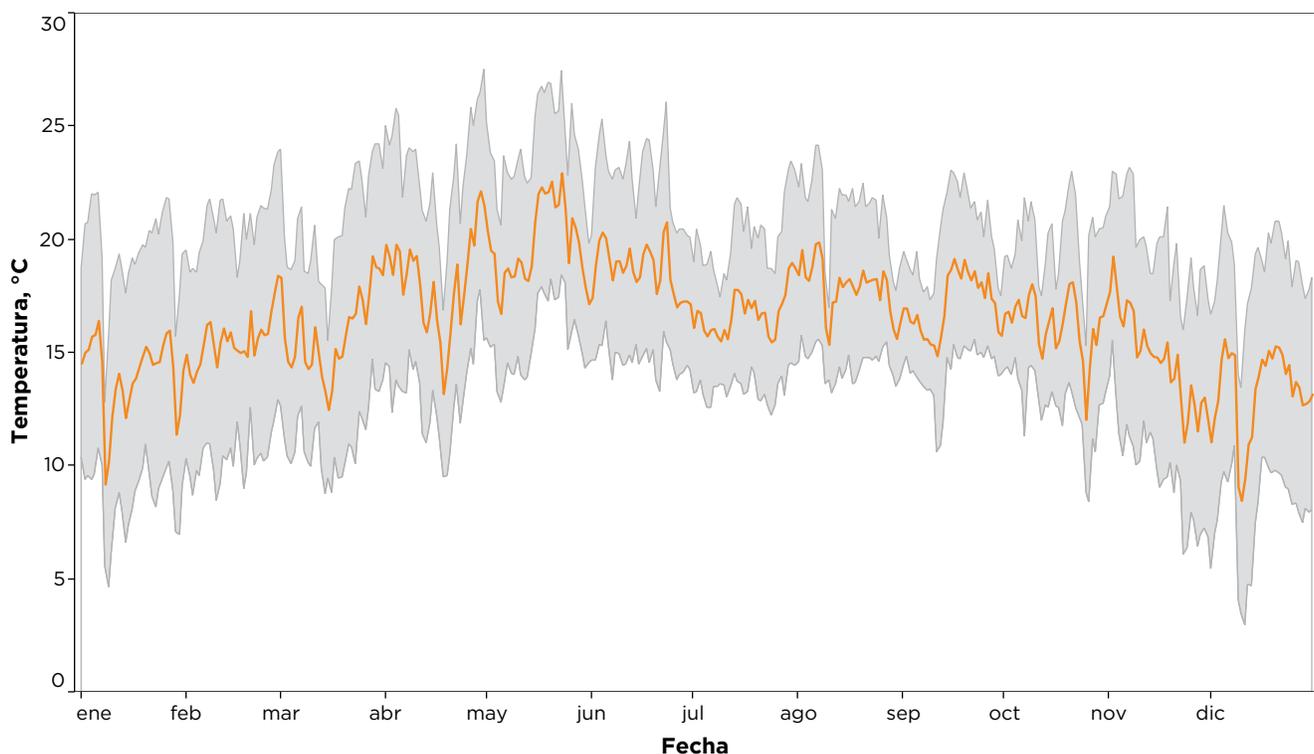


Figura 2.1. Serie de tiempo con los promedios diarios de la temperatura. La línea naranja indica el promedio aritmético de todas las estaciones, la región sombreada en gris corresponde a una desviación estándar.

De acuerdo con los registros históricos del periodo comprendido entre 2000 y 2017, este año fue uno de los más cálidos. En la Figura 2.3 se muestra la anomalía para las temperaturas mensuales de 2017, en ella es posible identificar que, con excepción de marzo, abril, julio y diciembre, el resto de los meses reportaron temperaturas mayores al promedio (calculado para el periodo comprendido entre enero de 2000 y diciembre de 2016). Mayo, junio y agosto tuvieron anomalías $\geq +1$ °C., donde agosto tuvo una anomalía máxima de +1.3 °C. En comparación con el año previo, cuando *El Niño* provocó cambios importantes en los patrones climáticos del planeta, este año fue aun más cálido.

El incremento en la temperatura en 2017 fue consistente con los reportes de temperatura a nivel global. De acuerdo con el *Reporte Global del Clima 2017* publicado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés), el año se caracterizó por condiciones cálidas a más cálidas que la

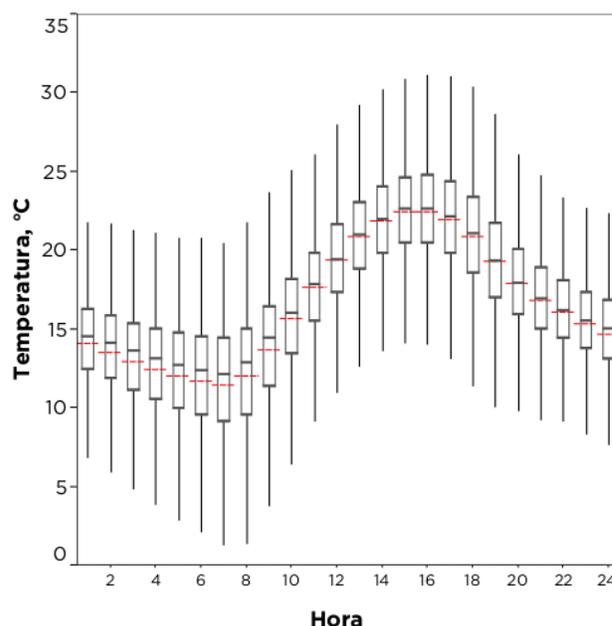


Figura 2.2. Variación horaria de la temperatura. La caja y la línea central indican el rango intercuartil (RI) y la mediana, respectivamente, los extremos de los bigotes 1.5 veces el RI, la línea roja el promedio aritmético.

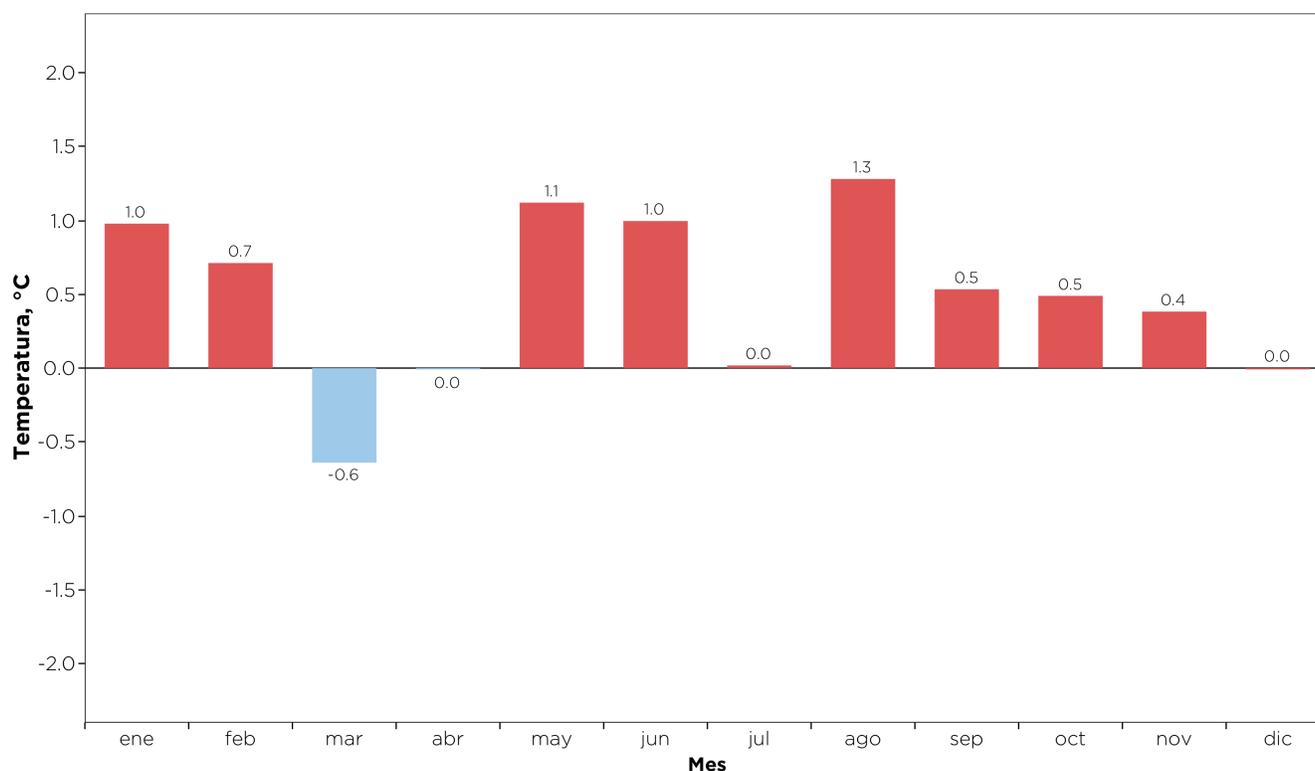


Figura 2.3. Anomalía de la temperatura ambiente en 2017. En la gráfica se comparan los promedios mensuales de 2017 contra los calculados para el periodo de 2000 a 2016. Los valores de cada barra corresponden a la diferencia de la temperatura en °C. En la construcción del gráfico se emplearon los datos históricos de las estaciones FAC, MER, MON, PED, SAG, TAH, TLA, VIF y XAL.

media en gran parte de las superficies terrestres y oceánicas del planeta (NOAA, 2018). A nivel planetario las temperaturas mensuales, terrestres y oceánicas, fueron extremadamente cálidas en los primeros meses de 2017, de hecho, los primeros cuatro meses fueron clasificados como los segundos más cálidos, solo detrás del año récord de 2016. América del Norte inició el año con condiciones muy cálidas en gran parte del continente. La temperatura continental en 2017 fue la sexta temperatura anual más alta registrada. A nivel nacional, se presentaron condiciones más cálidas que el promedio en gran parte del territorio durante casi todo el año. Entre enero y octubre la anomalía fue mayor a $+1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, los promedios para estos meses fueron de los mayores desde 1971. La temperatura promedio de enero a octubre fue de $23.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, la cual fue $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ superior al promedio entre 1981 y 2010. Este valor superó el récord anterior establecido en 2016 en $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Como se ha mencionado en los informes anuales

previos, el registro histórico sugiere un incremento continuo en la temperatura ambiente de la ciudad. En la Figura 2.4 se presentan los valores de los promedios diarios para un grupo de estaciones que reportaron información consistente desde el año 2000. A pesar de las variaciones estacionales, con máximos en la primavera y mínimos durante el invierno, es evidente una tendencia creciente en la temperatura local. De acuerdo con estos registros el promedio en 2017 fue $\sim 1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ mayor que la media aritmética del año 2000.

Además de los cambios de temperatura a nivel global, la urbanización contribuye también al calentamiento regional. Aún no se conocen con detalle las implicaciones que tendrá el incremento de la temperatura en la salud y el confort humano, en los ecosistemas regionales, en la meteorología regional y la micrometeorología, así como en los procesos físicos y químicos que dan origen a los principales contaminantes secundarios (ozono y aerosoles) que afectan a la Ciudad de México.

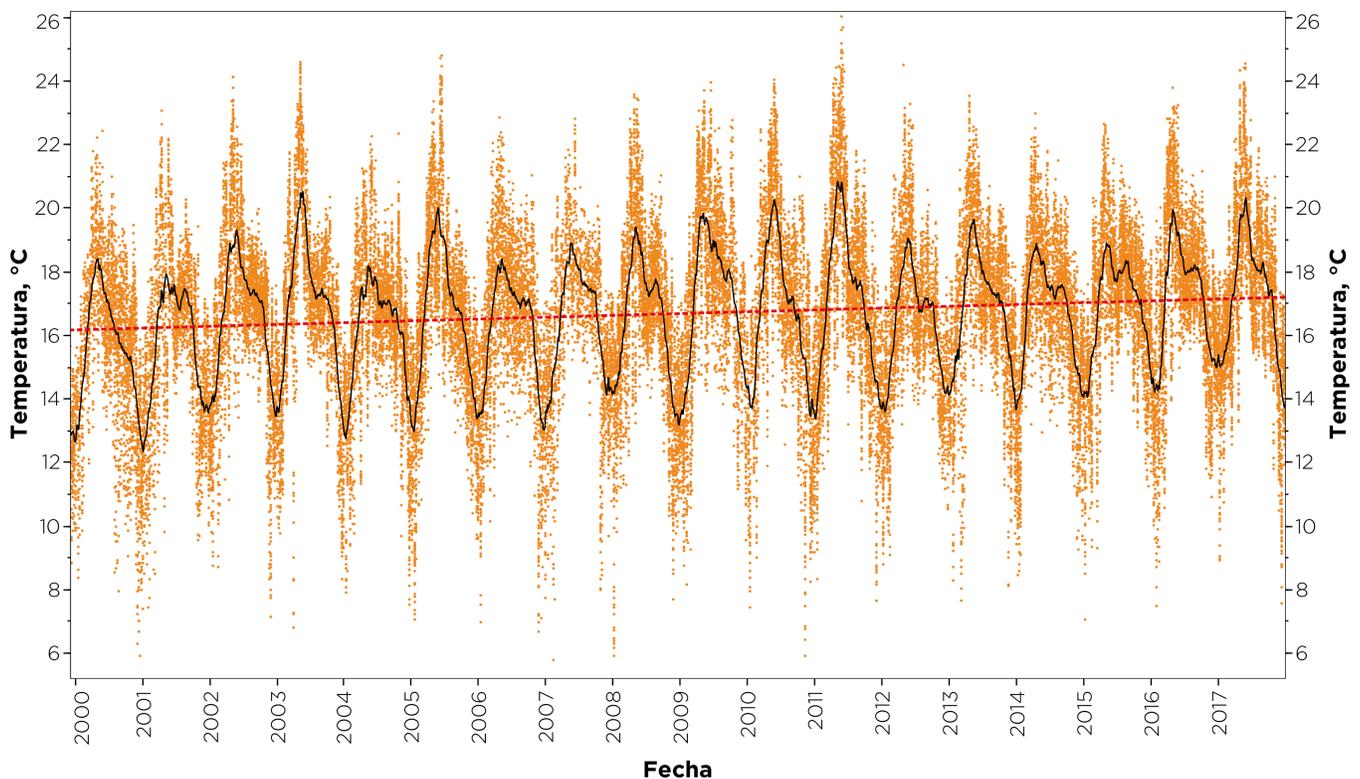


Figura 2.4. Serie de tiempo de la temperatura promedio diaria entre 2000 y 2017 en las estaciones FAC, MER, MON, PED, SAG, TAH, TLA, VIF y XAL. La línea negra muestra el promedio móvil (± 30 días) de todos los datos, la línea roja punteada indica la tendencia lineal de la temperatura.

Humedad relativa

El promedio de la humedad relativa fue de 54%, tres unidades menor que la reportada en 2016. Los sitios de monitoreo localizados en las zonas montañosas y en la periferia de la zona urbana fueron los que registraron los mayores promedios, con un máximo de 69% en las estaciones Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) y Ajusco (AJU). Mientras que los menores promedios de humedad correspondieron a las estaciones dentro del área urbana. El menor promedio anual se observó en la estación San Agustín (SAG), en Ecatepec de Morelos, con un valor de 43%. En las estaciones de monitoreo ubicadas dentro de la zona urbanizada de la Ciudad de México la media fue de 53%.

En la Figura 2.5 se muestra la variación temporal de los promedios diarios de humedad relativa para todas las estaciones de la REDMET. El comportamiento estacional estuvo definido por el régimen pluvial de la cuenca. El clima de la Ciudad de México se distingue por una temporada de lluvia que inicia en las últimas semanas de mayo y concluye durante las

primeras semanas de octubre, con un periodo relativamente seco durante el resto del año. El comportamiento de la humedad depende estrechamente del régimen pluvial, por ello, durante la temporada seca la humedad relativa promedio se encontraba entre 30 y 50%, mientras que los meses de lluvia estuvo entre 60 y 80%. El mes más seco fue febrero con una humedad promedio de 40%, mientras que el mes con mayor humedad fue julio con 70%. El incremento de la humedad relativa durante marzo estuvo asociado a varios episodios de lluvia frontal en la región. En la temporada seca la humedad en el ambiente desempeña un papel importante en la química atmosférica, tanto diurna como nocturna. En el periodo nocturno la humedad está relacionada con la formación de compuestos secundarios (aerosoles y gases) a través de reacciones heterogéneas que ocurren en la superficie de los aerosoles, en las superficies de la infraestructura urbana y de la vegetación, así como en el suelo. Durante el día, el agua participa en los procesos fotoquímicos de la atmósfera. Además tiene una influencia importante en las propiedades fisicoquímicas de los aerosoles atmosféricos.

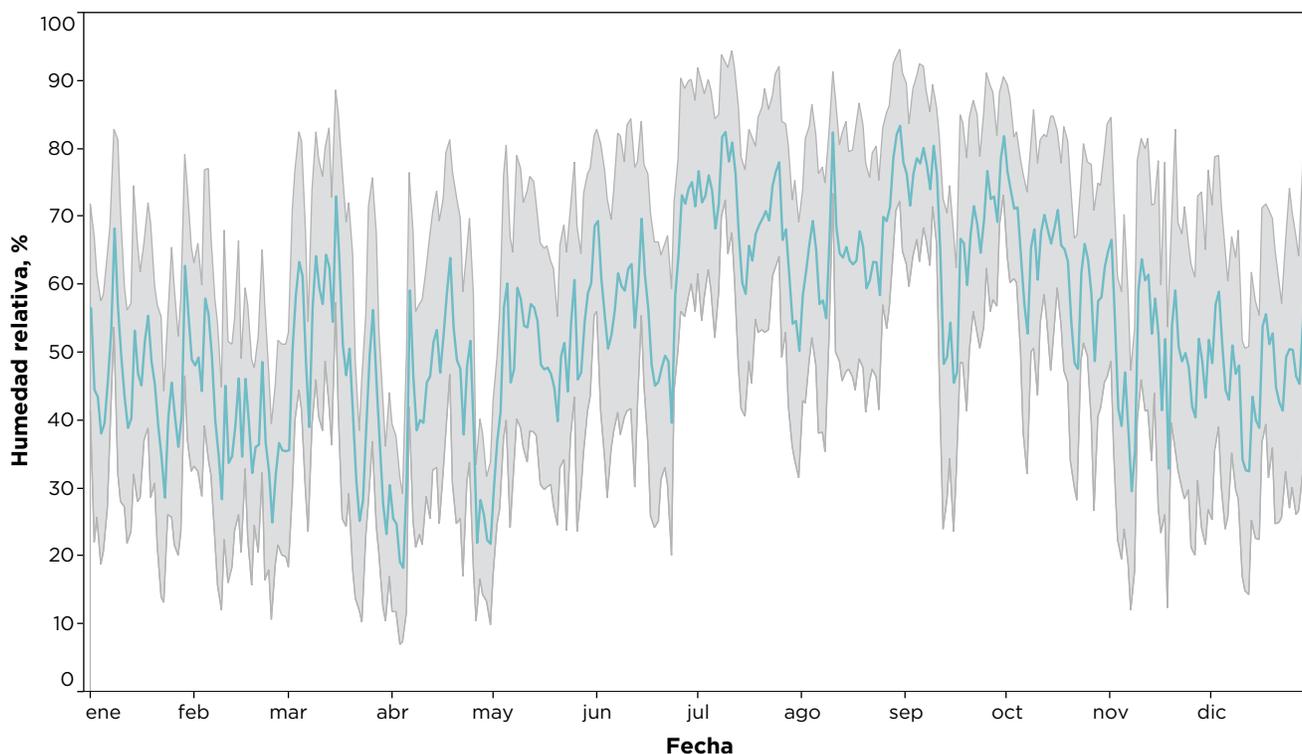


Figura 2.5. Serie de tiempo con los promedios diarios de la humedad relativa. La línea azul indica el promedio aritmético de todas las estaciones, la región sombreada en gris corresponde a una desviación estándar.

Presión barométrica

Este año se caracterizó por un descenso generalizado en la presión entre abril y junio por una mayor frecuencia de zonas de baja presión en el centro del país, así como cambios en la presión asociados con el paso de la corriente en chorro subtropical sobre la región norte y centro del país. El promedio anual de la presión en las estaciones que se ubicaron dentro de la cuenca fue de 585 milímetros de mercurio (mmHg). Mientras que en las estaciones localizadas en la parte montañosa fue significativamente menor por el efecto de la altitud. La estación Ajusco Medio (AJM), ubicada a una altitud de 2548 metros sobre el nivel del mar (msnm), registró un promedio anual de 560 mmHg, mientras que en la estación Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), a 3080 msnm, fue de 531 mmHg. Los valores mínimos se observaron el 26 de abril, 26 de septiembre y 8 de diciembre con 580 mmHg. Mientras que la máxima fue de 591 mmHg el 8 de enero por el avance de una masa de aire polar (Figura 2.6). En la Figura 2.7 se presenta la serie de tiempo de la presión en las estaciones ubicadas en la cuenca.

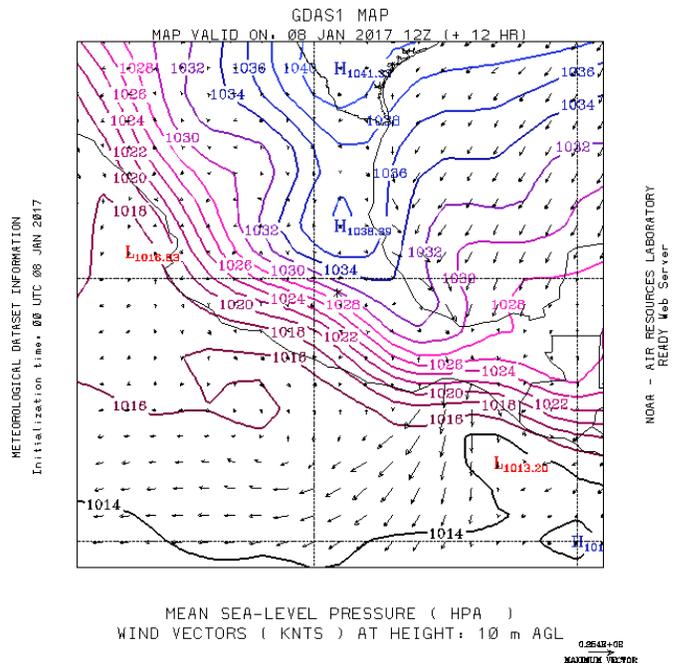


Figura 2.6. Avance de una masa de aire polar desde el norte del país el 8 de enero, las líneas corresponden a las isobaras, mientras que los vectores indican el flujo de viento (Fuente: NOAA, Air Resources Laboratory).

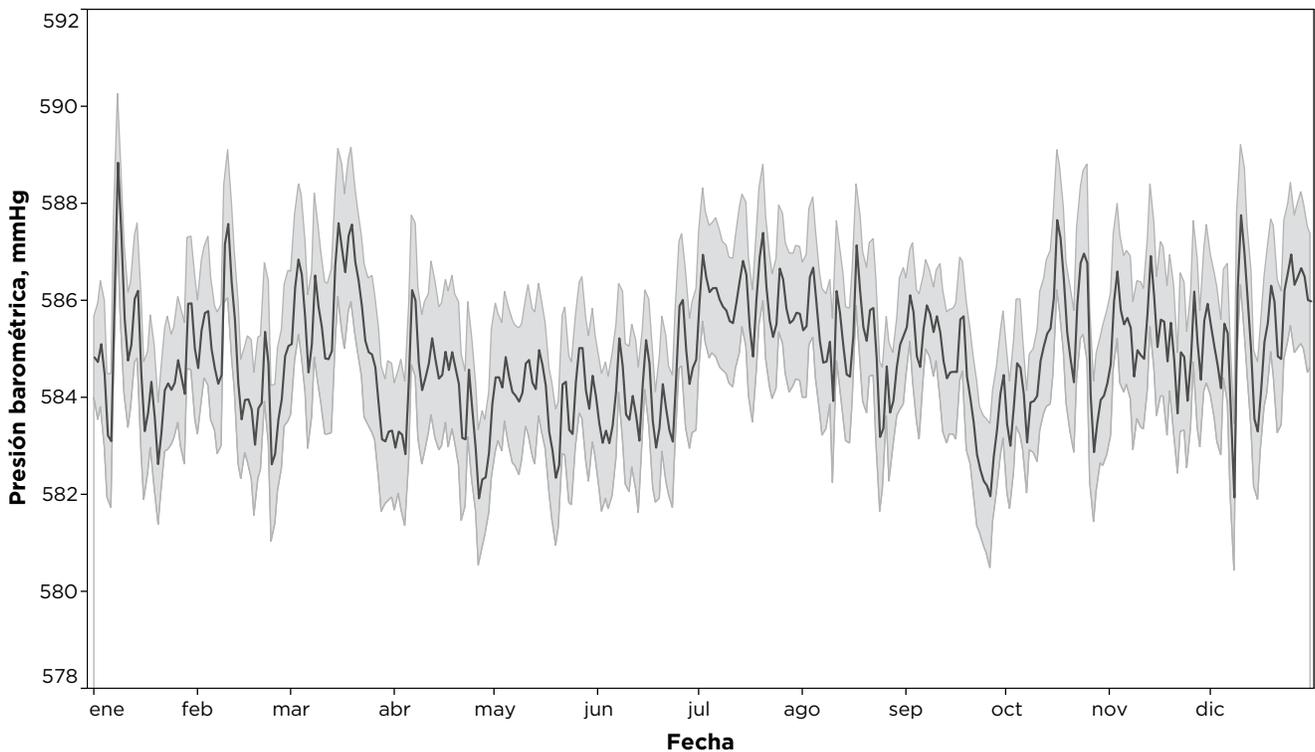


Figura 2.7. Serie de tiempo con los promedios diarios de la presión barométrica. La línea negra indica el promedio aritmético de todas las estaciones, la región sombreada en gris corresponde a una desviación estándar.

Viento

El viento tiene una influencia importante en la calidad del aire de la Ciudad de México. Mientras que en presencia de viento fuerte existe una mejor dispersión de la contaminación -independientemente de la dirección- el viento débil propicia la acumulación de los contaminantes sobre la ciudad al limitar su dispersión, situación que se puede agravar en presencia de una altura baja en la capa de mezclado y/o por la presencia de radiación solar intensa.

El promedio anual para la velocidad escalar del viento en 2017 fue de 2.1 m/s, similar a la reportada en 2016. Los meses con la mayor velocidad promedio fueron abril y octubre con 2.3 y 2.4 m/s, respectivamente. Julio y diciembre registraron el promedio mensual mínimo con 1.8 m/s. En la estación Ajusco Medio (AJM), ubicada en la delegación Tlalpan, se presentó el mayor promedio para la velocidad con 2.7 m/s, mientras que el menor promedio se observó en la estación San Agustín (SAG), en Ecatepec de Morelos, con 1.5 m/s.

En la Figura 2.8 se muestra la serie de tiempo para el promedio diario de la velocidad del viento en las estaciones de la REDMET.

En términos generales se observó un incremento en la velocidad del viento durante la mayor parte del año, lo cual tuvo un impacto importante en las condiciones de calidad del aire de la ciudad. El análisis de la anomalía del viento indicó que la velocidad fue mayor que la normal (2007-2016) con excepción de los meses de enero, mayo, julio y diciembre, la mayor anomalía se observó en octubre con un valor de +0.3 m/s. El incremento tuvo un impacto favorable en la calidad del aire, principalmente durante el periodo en el que se presenta la *temporada de ozono* (finales de febrero a principios de junio). Las mejores condiciones de ventilación (dispersión) contribuyeron a una disminución en las concentraciones máximas de ozono y aerosoles. Solo en la segunda quincena de mayo, cuando la presencia de un extenso sistema de alta presión favoreció estabilidad atmosférica, menor velocidad de viento y cielo despejado, se observaron concentraciones de ozono elevadas.

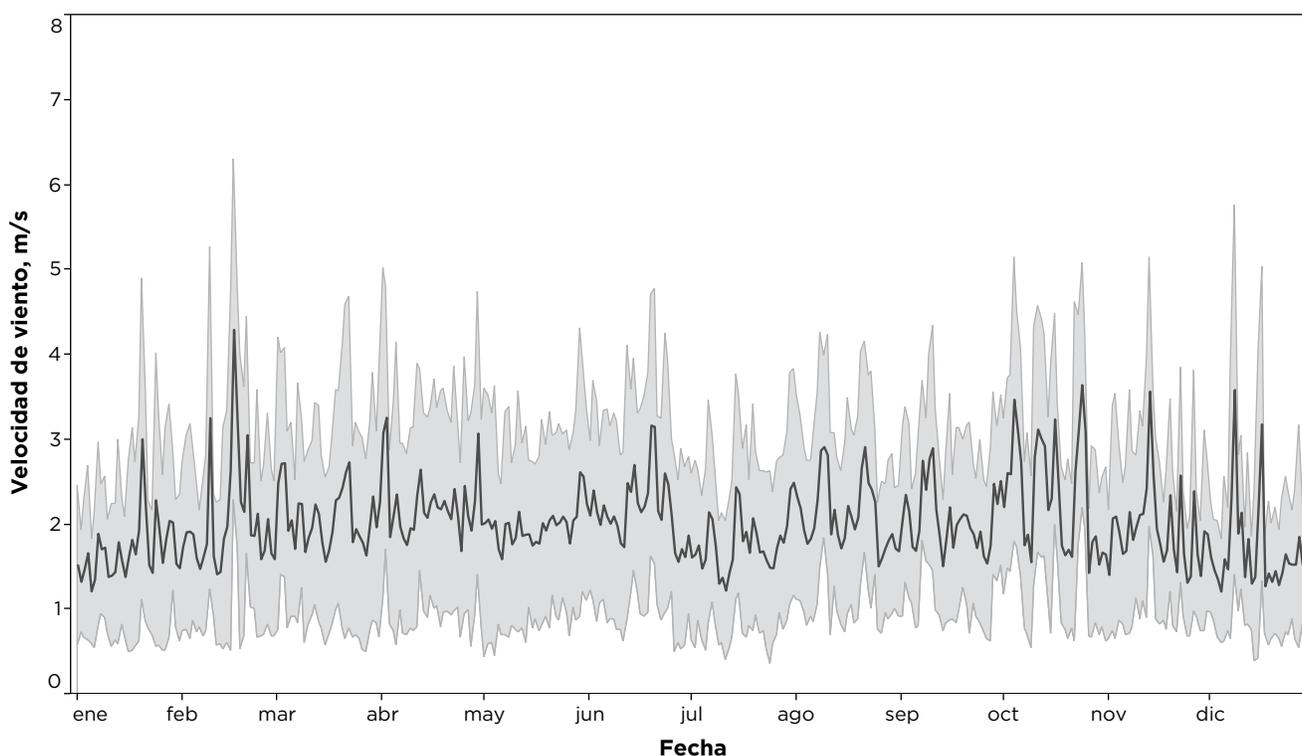


Figura 2.8. Serie de tiempo con los promedios diarios de la velocidad de viento. La línea negra indica el promedio aritmético en todas las estaciones, la región sombreada en gris corresponde a una desviación estándar.

El perfil horario del viento para las estaciones ubicadas en la región urbana se caracterizó por velocidades bajas durante la noche con incrementos graduales a partir de la salida del sol, aumentando rápidamente a medida que el sol calentaba la superficie del suelo durante la mañana y en las primeras horas de la tarde. Los valores máximos se presentaron entre las 17:00 y 19:00. Las estaciones ubicadas en las laderas montañosas mostraron un incremento en la velocidad del viento durante la madrugada, pero con una intensidad significativamente menor al máximo observado por la tarde. El aumento del viento en el periodo nocturno fue provocado por el enfriamiento de las laderas montañosas (brisa de montaña). Esta brisa se observó principalmente en las estaciones Ajusco (AJU), Milpa Alta (MPA), Santa Fe (SFE) y Cuajimalpa (CUA).

En la Figura 2.9 se presentan los campos de viento superficial promedio para cada mes, separados en tres periodos del día: matutino (7:00 a 14:00), vespertino (15:00 a 20:00) y nocturno (21:00 a 6:00). El periodo matutino comprende las horas en las que generalmente se presentan las concentraciones máximas de los contaminantes primarios y ocurre el crecimiento de la capa límite. El periodo vespertino corresponde a las horas en las que usualmente se registran las concentraciones máximas de ozono y el periodo en el que se presenta la mayor dispersión de los contaminantes. Durante los meses de la temporada seca, en el periodo matutino predominaron flujos de viento de baja intensidad provenientes del noreste, mientras que en la temporada de lluvia prevalecieron los flujos del norte. En los meses de enero y febrero, la presencia de flujos sinópticos del oeste y el descenso de la corriente en chorro subtropical hacia latitudes menores, favorecieron vientos vespertinos de superficie con una componente predominante del sur favorable para la dispersión de la contaminación. En marzo, el avance de sistemas frontales provenientes del norte del continente favoreció vientos de intensidad moderada con una componente norte, que mantuvieron una buena ventilación sobre la cuenca durante las tardes, además, la interacción de las masas de aire polar con masas de aire tropical generó lluvia y condiciones de inestabilidad atmosférica favorables para la dispersión. Durante abril, el predominio de flujos sinópticos del oeste y la presencia frecuente de sistemas de baja presión en la región

central del país propiciaron condiciones de inestabilidad atmosférica con viento de superficie predominantemente del oeste y sur, favorable para la dispersión de la contaminación a través del noreste de la cuenca. En mayo durante las primeras semanas se mantuvieron condiciones similares a las observadas en marzo. Durante la tercera semana de mayo, la presencia de un extenso sistema de alta presión en la atmósfera media, el cual abarcaba gran parte del centro del país, generó condiciones de subsidencia en la atmósfera baja, la ausencia de vientos sinópticos significativos permitió el predominio de los flujos térmicos en superficie provenientes de la meseta central y caracterizados por viento débil por la mañana y tarde, además de presencia del flujo canalizado del sureste de la cuenca a través del paso natural entre las sierras Nevada y Ajusco-Chichinautzin, que generalmente provoca zonas de convergencia en el suroeste y centro de la Ciudad de México. Estas condiciones se mantuvieron durante casi 10 días consecutivos. La conjunción de estabilidad atmosférica ocasionada por la subsidencia, la acumulación de contaminantes al sur de la cuenca y la intensa radiación, fue favorable para la formación y acumulación de ozono en mayores concentraciones. Por otra parte, durante la temporada de lluvia el viento se caracterizó por una importante componente norte propiciada por los alisios húmedos, propios de la temporada. Octubre y noviembre se caracterizaron por viento predominante del norte durante la mayor parte del día, con mayor intensidad en el periodo vespertino. Mientras que durante diciembre se observó una disminución significativa en la velocidad de viento, por el aumento en la estabilidad atmosférica asociado a la presencia de inversiones térmicas de superficie durante la mayor parte del periodo matutino. Finalmente, durante los meses de la temporada seca el comportamiento del viento en el periodo nocturno (21:00 a 6:00) estuvo dominado por los flujos de aire frío que escurrían por las laderas montañosas circundantes (flujo de montaña), lo que generó con frecuencia zonas de confluencia de los flujos de viento sobre el centro y norte de la Ciudad de México, favorables para la acumulación de los contaminantes emitidos durante el periodo nocturno. Durante la temporada de lluvia los patrones de viento en los tres periodos del día evaluados estuvieron caracterizados por vientos con una dirección predominante del norte.

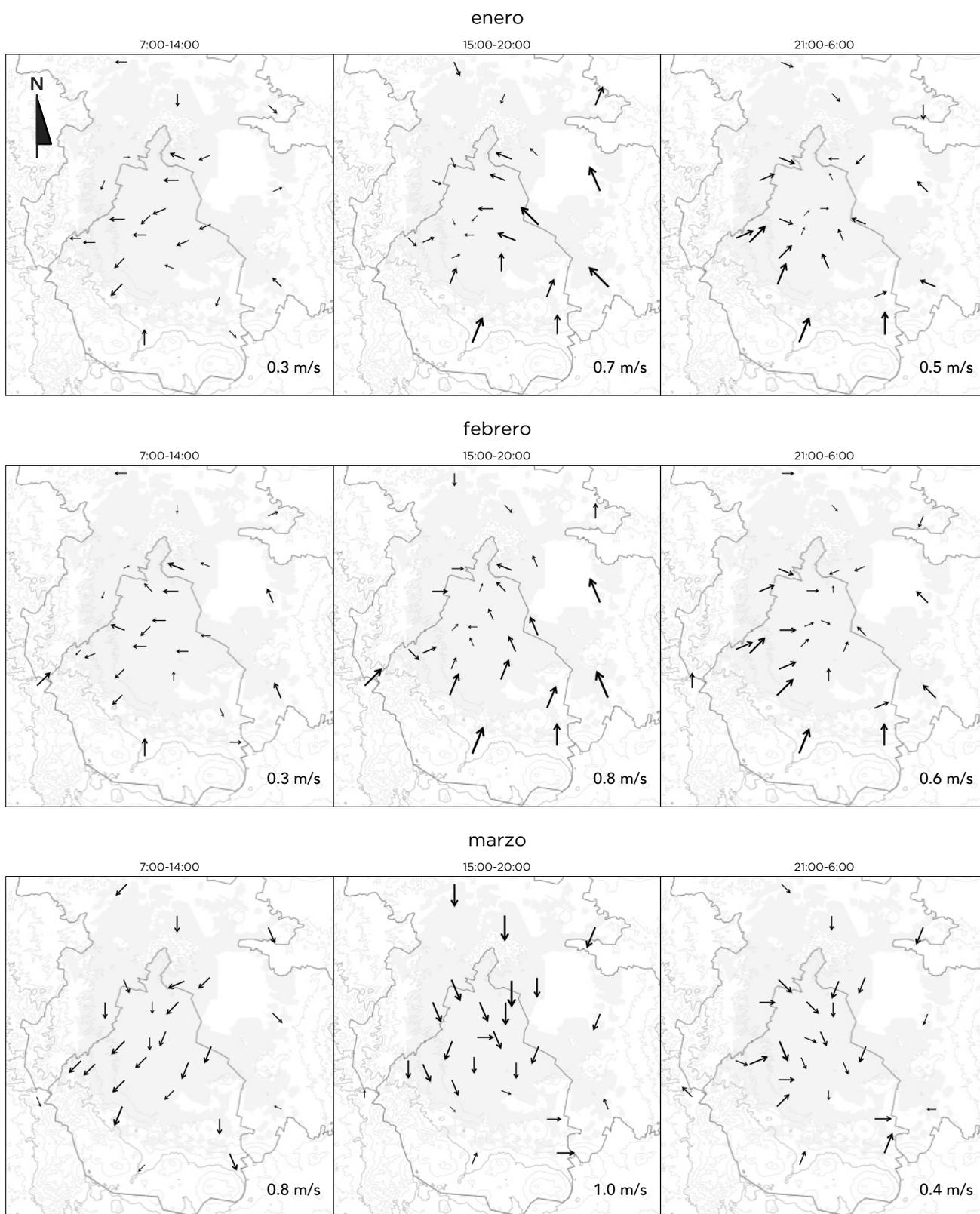


Figura 2.9. Campos de viento en la Ciudad de México y su área metropolitana. Para cada mes se indica el campo promedio de los periodos matutino (7:00 a 14:00), vespertino (15:00 a 20:00) y nocturno (21:00 a 6:00). Las flechas corresponden al vector de flujo (hacia donde sopla el viento), el tamaño del vector es proporcional a la velocidad.

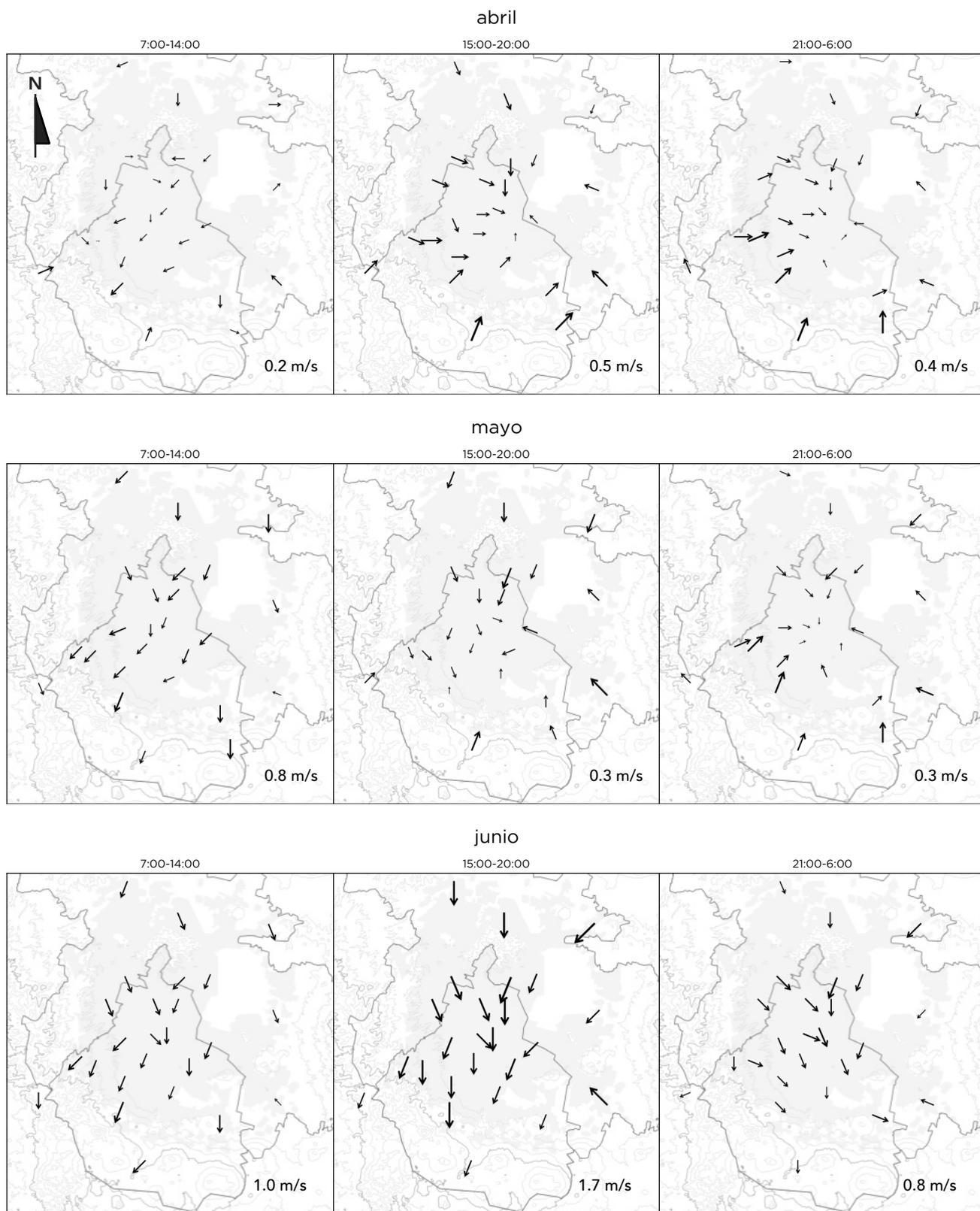


Figura 2.9 (continuación). Campos de viento en la Ciudad de México y su área metropolitana.

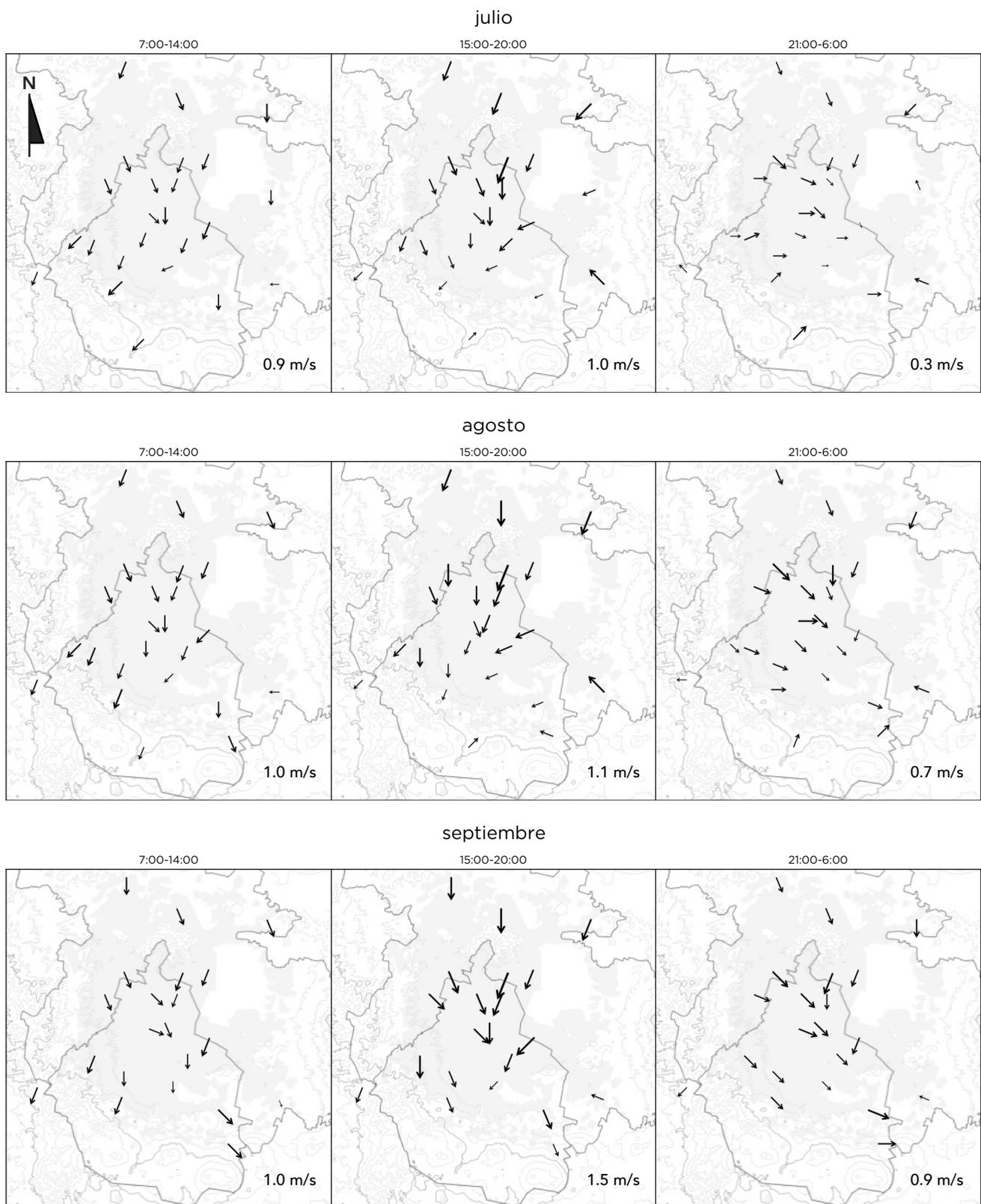


Figura 2.9 (continuación). Campos de viento en la Ciudad de México y su área metropolitana.

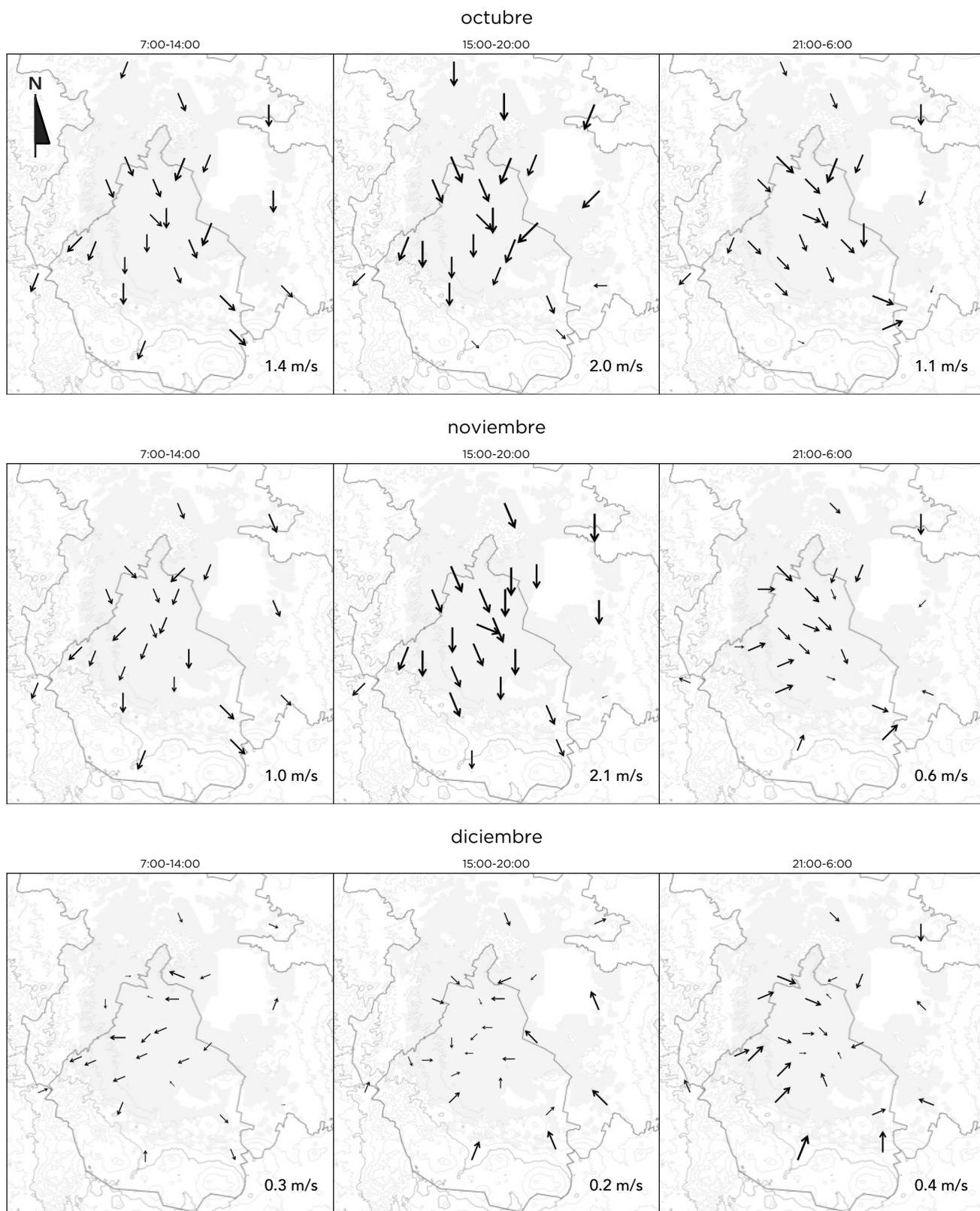


Figura 2.9 (continuación). Campos de viento en la Ciudad de México y su área metropolitana.

Altura de mezcla

El comportamiento diurno de la capa límite atmosférica (CLA) está determinado por la evolución de la capa límite convectiva (CLC), la cual se encuentra directamente en contacto con la superficie y se desarrolla con la salida del sol, hasta su puesta. Se caracteriza por una fuerte variabilidad diurna que va de unos cientos de metros en la mañana, hasta varios kilómetros en la tarde. La intensidad y características de la turbulencia convectiva, que es el proceso más importante en la evolución de la CLA, depende fuertemente de la distribución y evolución del calor dentro de la CLC.

La CLA integra las emisiones de especies químicas provenientes de las actividades humanas, y de procesos en el suelo y la vegetación. Su altura determina el volumen de dilución de los compuestos presentes en ella, esta altura es generalmente representada por la *altura de mezcla* o *altura de mezclado*. La presencia de la radiación solar y el mezclado turbulento proporcionan las condiciones necesarias para las transformaciones químicas involucra-

das en la formación de compuestos secundarios, como el ozono. De acuerdo con la definición de Seiber *et al.*, (2000) la altura de mezcla «es la altura de la capa adyacente al terreno sobre la cual los contaminantes o cualquier otra sustancia emitida dentro de ella o que ingresa desde fuera, termina siendo dispersada verticalmente por convección o turbulencia mecánica en una escala temporal del orden de una hora». La altura de mezcla es un parámetro fundamental para entender los procesos de dispersión en la CLA, en la Ciudad de México alcanza una altura máxima entre las 14:00 y 16:00, y mínima durante la noche. En la Figura 2.10 se presenta la variación diaria de la altura máxima de la capa de mezcla estimada a partir de los perfiles de temperatura del radiómetro de microondas ubicado en la Subdirección de Monitoreo (latitud: 19.4838, longitud: -99.1473, altitud: 2255 m), en ella se pueden observar los cambios en la altura de mezcla a lo largo del año. Las mayores alturas se observaron en abril y mayo, mientras que las menores ocurrieron en la temporada de lluvia. El promedio de la altura máxima de mezcla fue de 2390 msns, con un intervalo de 729 a 4352 msns.

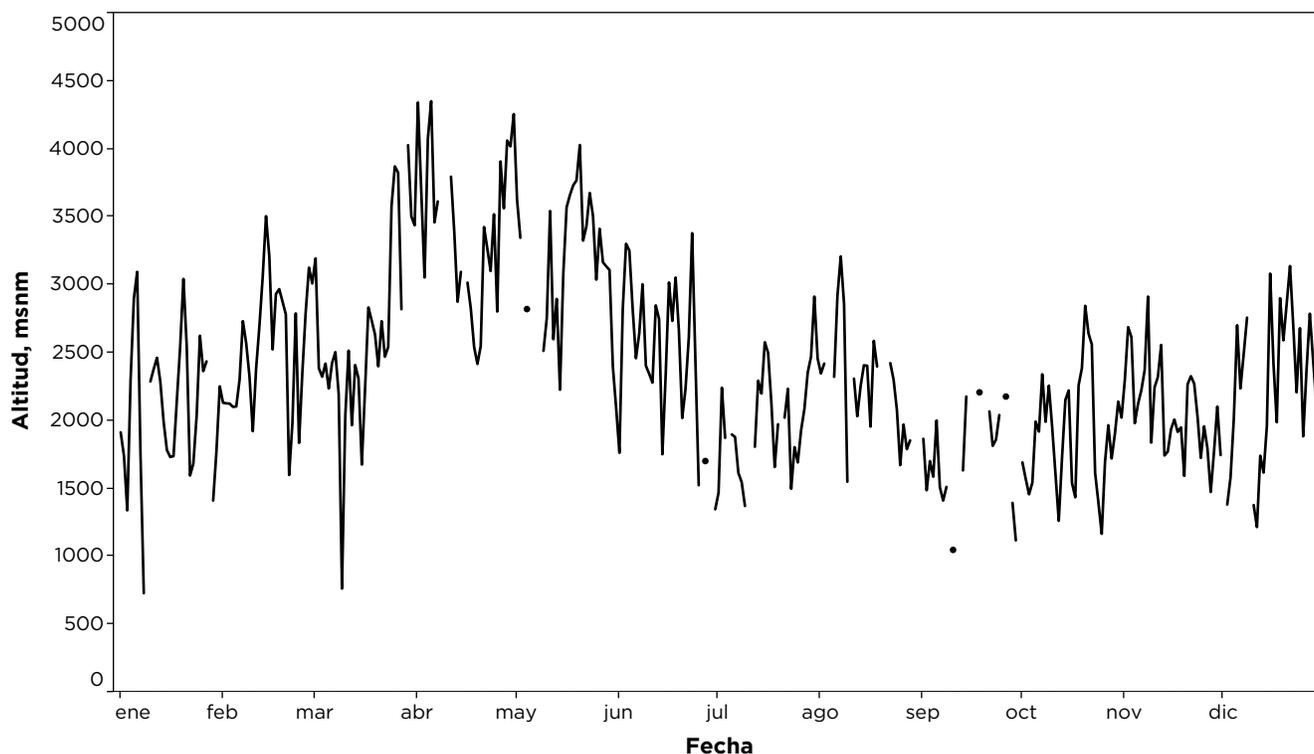


Figura 2.10. Altura máxima diaria de la capa de mezcla en la Ciudad de México.

Radiación solar global

La radiación solar es un parámetro meteorológico importante que requiere de una medición continua y precisa, por las implicaciones que tiene en la química atmosférica, la disponibilidad energética y el calentamiento global. En términos de contaminación atmosférica, la radiación solar juega un papel importante en la iniciación de los procesos fotoquímicos. Además, la medición del haz solar directo es útil para determinar la turbiedad atmosférica. La radiación solar global se mide comúnmente con *piranómetros*, que son instrumentos que cuantifican la irradiancia total, en un intervalo espectral entre 328 y 3000 nanómetros (nm), que incide sobre una superficie plana, en unidades de watt por metro cuadrado (W/m^2).

En colaboración con el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (IG-UNAM), a partir de 2015 la Dirección de Monitoreo Atmosférico opera un conjunto de sensores para el monitoreo continuo de la radiación solar global como parte de la REDMET. Actualmente se encuen-

tran instalados piranómetros en diez de las principales estaciones de monitoreo, sin embargo, durante el periodo comprendido por este informe solo siete sitios reportaron información suficiente ($\geq 75\%$ de datos).

Por su latitud, la Ciudad de México está expuesta a periodos de radiación solar que van de once horas en invierno a trece horas en verano. Además, por su altitud recibe una mayor intensidad de radiación al atravesar un menor espesor de la atmósfera. En la Figura 2.11 se presentan los valores máximos diarios de la radiación solar global en las diferentes estaciones de monitoreo. En noviembre se observó una ausencia importante de datos, esto por que los sensores fueron enviados para su calibración al Observatorio de Radiación Solar del IG-UNAM.

Los máximos diarios de irradiancia se presentaron entre las 12:00 y las 14:00, cuando el sol se encontraba en el punto más alto. Durante los meses de la temporada seca predominaron los días despejados, por lo tanto, se observó una menor variabilidad entre los sitios de medición, mientras que en la

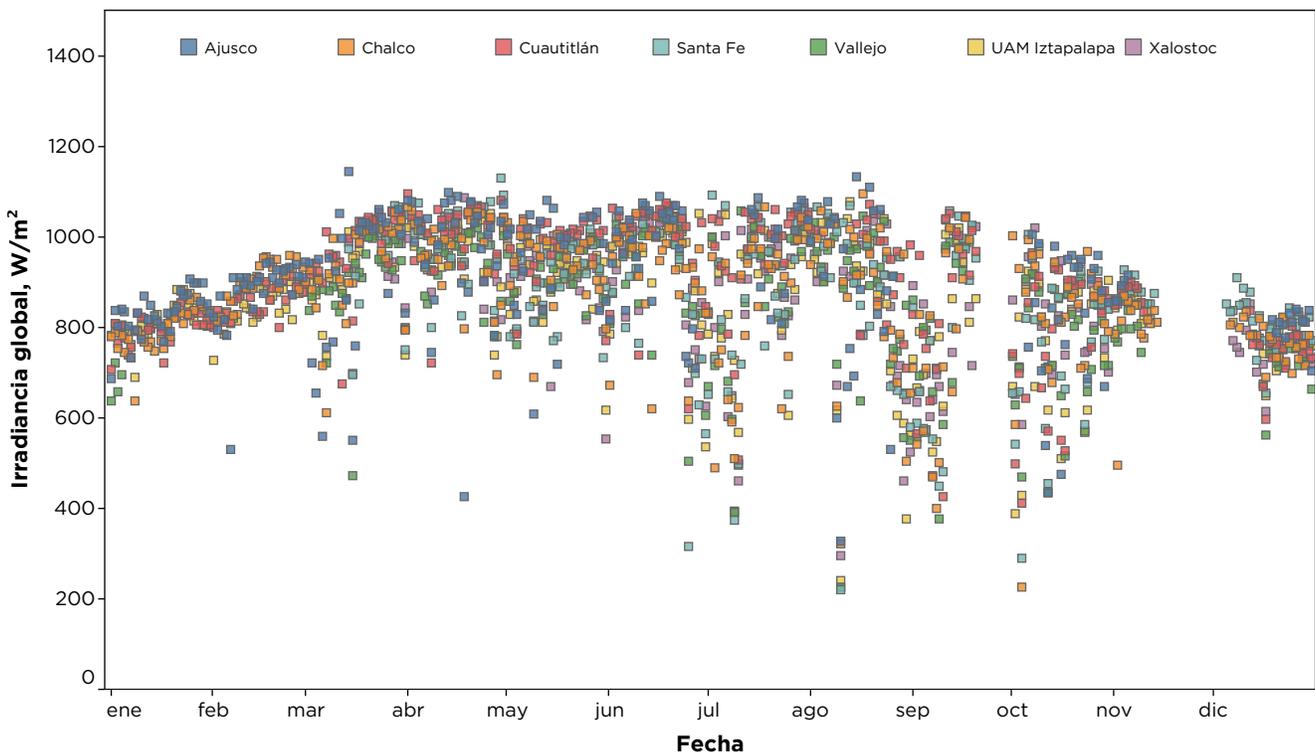


Figura 2.11. Valores de la irradiancia máxima diaria en las diferentes estaciones de monitoreo durante 2017.

temporada de lluvia la mayor variabilidad fue ocasionada por la distribución poco uniforme de la nubosidad sobre la cuenca. El promedio anual de los valores máximos de radiación fue de 880 W/m^2 , el cual fue mayor a los promedios anuales reportados en 2015 y 2016 con valores de 845 W/m^2 , respectivamente.

En términos de la disponibilidad del recurso energético, la Ciudad de México recibió una irradiancia promedio de 19.7 MJ/m^2 . Con una mayor intensidad entre febrero y junio ($>20 \text{ MJ/m}^2$), y una disminución significativa a partir de septiembre con valores promedio alrededor de 17 MJ/m^2 (ver Figura 2.12a). Estos resultados son consistentes con los reportados para los dos años previos. La mayor disponibilidad se observó en las estaciones ubicadas en la periferia urbana y en aquellas que se encuentran en las montañas (Cuautitlán, Ajusco y Santa Fe), donde los niveles de contaminación fueron menores. Como se puede observar en la Figura 2.12b, la estación Cuautitlán (CUT), ubicada en el límite urbano al norte de la zona metropolitana, reportó el mayor valor de irra-

diancia con 20.9 MJ/m^2 , seguida de la estación Ajusco (AJU), ubicada a 3080 msns en la región serrana al sur de la ciudad, que registró un valor de 20.1 MJ/m^2 . Los sensores ubicados dentro del área urbana reportaron menores intensidades debido al efecto que tiene la contaminación en la radiación solar, en donde a mayor contaminación menor será la cantidad de radiación que alcanza el suelo. El sensor ubicado en el supersitio (SS1) de la Dirección de Monitoreo Atmosférico (que es un sitio con niveles elevados de contaminación) registró la menor irradiancia con un promedio de 18.9 MJ/m^2 .

Se observó también una relación directa entre la radiación solar y la temperatura ambiente, en los días con mayor intensidad en la radiación solar, se registró también una mayor temperatura. De igual manera se identificó un patrón en la irradiancia por día de la semana, en donde los mayores valores ocurrieron durante el fin de semana. Ambas observaciones son importantes en términos del impacto de la contaminación, no solo en la disponibilidad de la energía solar también en el clima urbano, tal como lo describen Jáuregui y Luyando (1999).

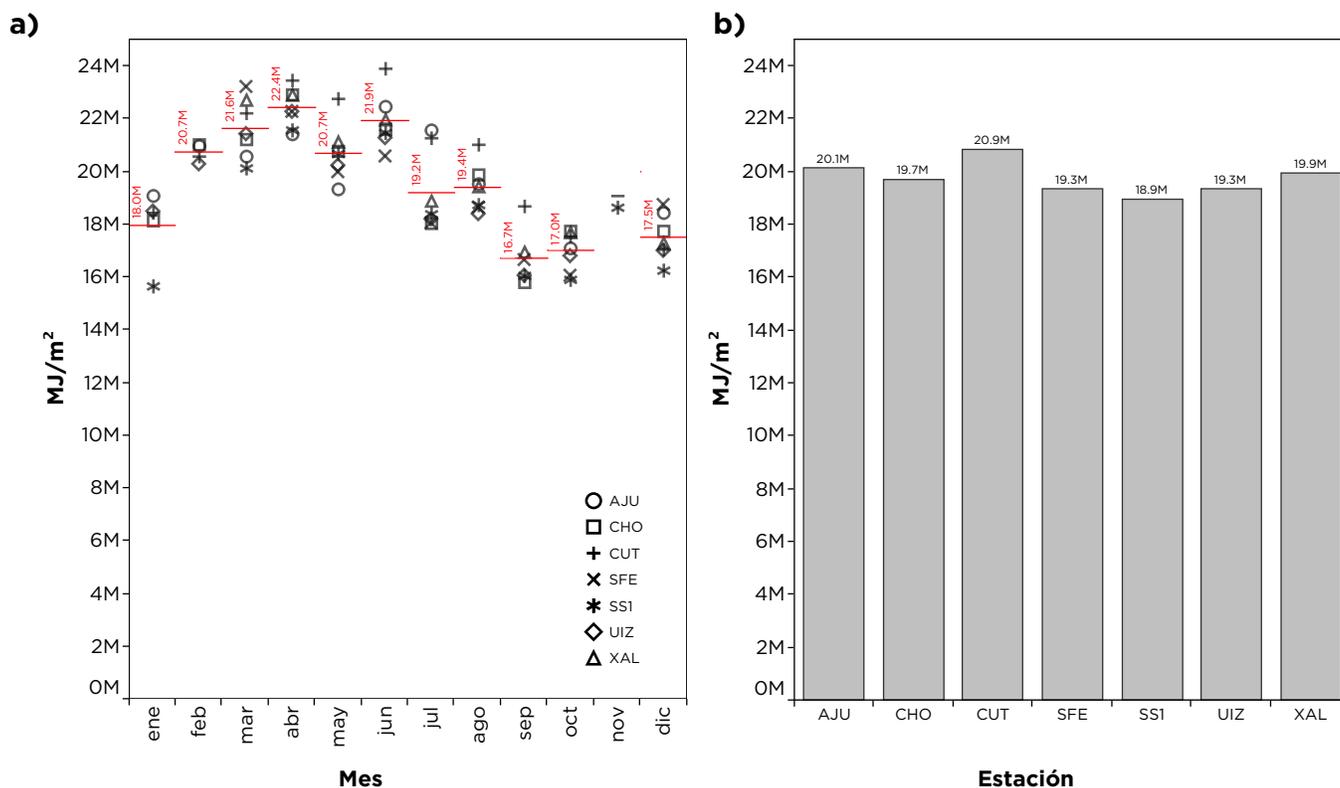


Figura 2.12. Promedio mensual de la irradiancia por estación de monitoreo (a) y promedio anual por sitio de monitoreo (b).

Radiación solar ultravioleta

El sol es la fuente más importante de radiación solar ultravioleta (R-UV), la intensidad de la radiación se modifica a medida que pasa a través de la atmósfera, gran parte es absorbida en la capa de ozono y otra es dispersada por las moléculas de oxígeno, nitrógeno y por los aerosoles. En la tropósfera la contaminación atmosférica dispersa y absorbe parte de esta radiación. Las nubes atenúan también la radiación solar, aunque su efecto sobre la radiación infrarroja es mayor que con la radiación UV. La irradiación total y las contribuciones relativas de diferentes longitudes de onda varían con la altitud. La exposición a la R-UV tiene beneficios para la salud humana, principalmente por la síntesis de vitamina D y la prevención de enfermedades como la osteoporosis, diabetes tipo 1, algunos tipos de cáncer y enfermedades autoinmunes (Holick, 2016). Sin embargo, la exposición excesiva puede provocar trastornos de la piel entre los que se encuentran las quemaduras solares, el envejecimiento prematuro y los cánceres de piel no melanoma, así como trastornos oculares como cataratas y pte-

rigión (Amaro-Ortiz, et al. 2014; Yam y Kwok, 2014). La REDMET realiza la medición en dos intervalos de longitud de onda UV-A (320 a 400nm) y UV-B (280 a 320 nm), esta última es la que provoca un mayor daño y se utiliza en el cálculo del índice UV (I-UV).

Este año la intensidad promedio para los valores máximos de radiación solar fueron 4.6 y 0.22 W/m² para UV-A y UV-B, respectivamente (estimado a partir de las estaciones que tuvieron mayoría de datos durante el año). En las figuras 2.13 y 2.14 se muestran las series de tiempo de los promedios máximos diarios. Las mayores intensidades de R-UV se observaron entre abril y septiembre, mientras que las mínimas en enero y diciembre. Con respecto al índice UV, durante todo el año se observaron valores de riesgo para la salud humana, principalmente en los meses de mayor intensidad. El periodo de mayor riesgo fue entre las 12:00 y las 15:00. El valor máximo reportado para el índice UV fue de 14 el día 29 de abril. Durante el año los niveles máximos de I-UV alcanzaron una intensidad ALTA en 41 días, MUY ALTA en 158 días, y EXTREMADAMENTE ALTA en 163 días.

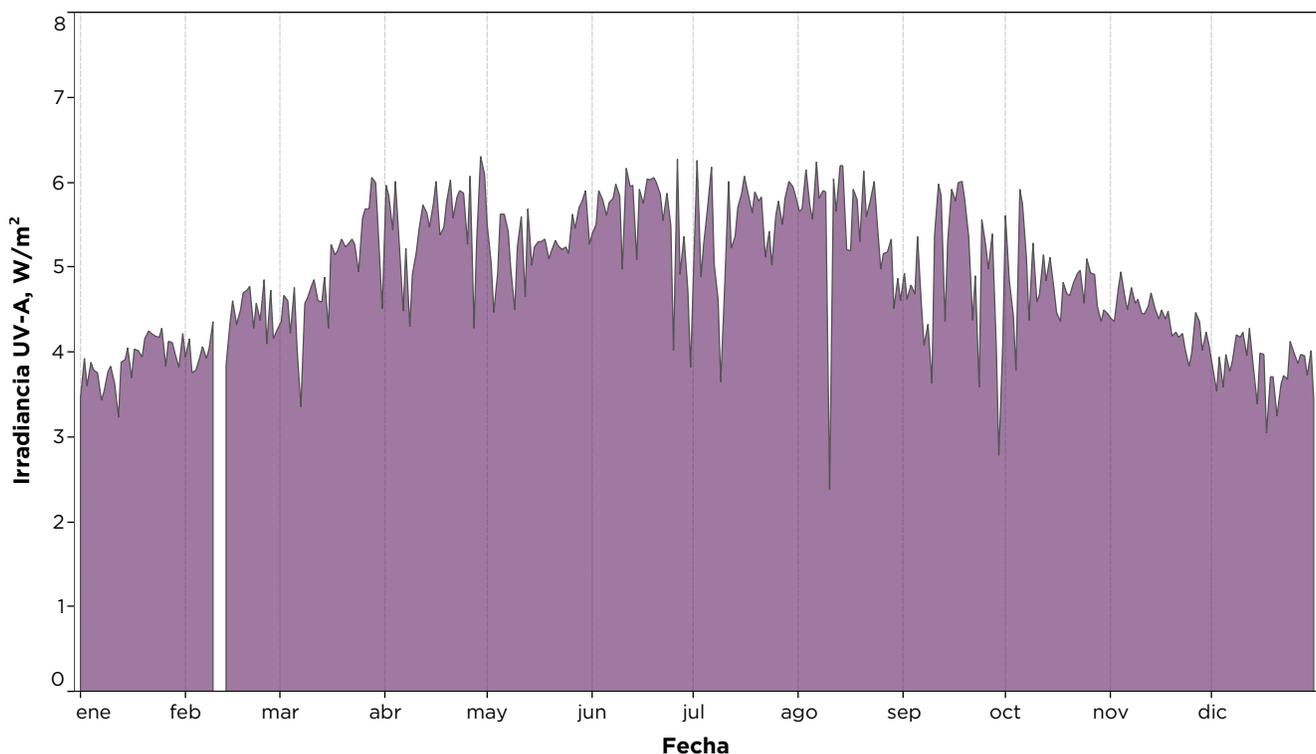


Figura 2.13. Serie de tiempo para el promedio de los valores máximos diarios de radiación ultravioleta A.

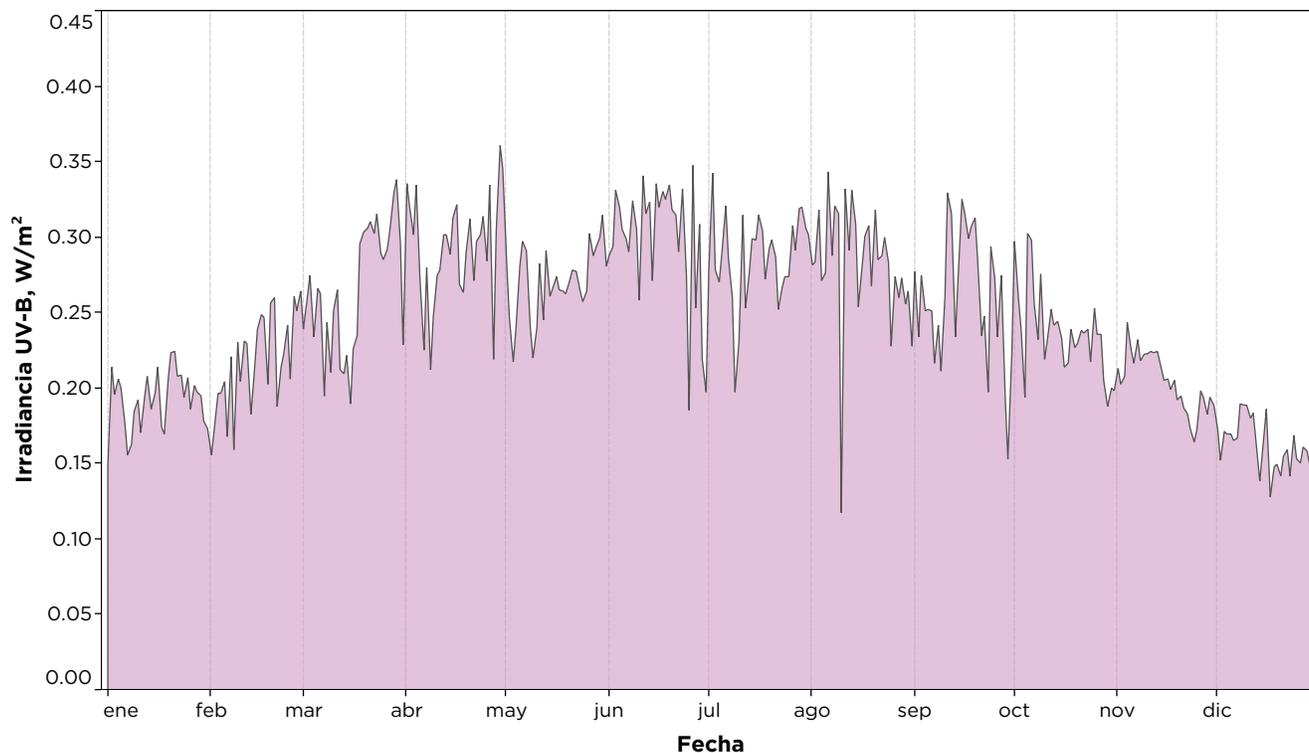


Figura 2.14. Serie de tiempo para el promedio de los valores máximos diarios de radiación ultravioleta B.

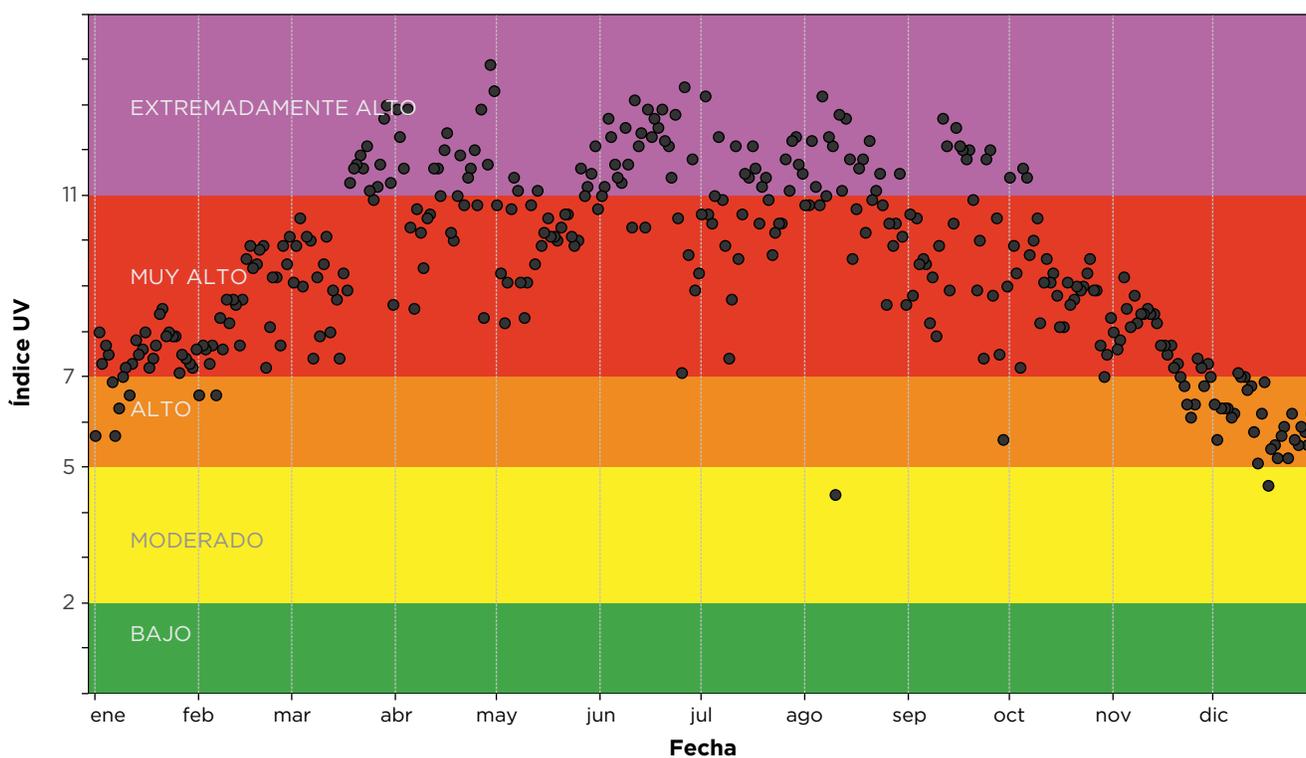


Figura 2.15. Máximos diarios del índice de radiación solar ultravioleta.



3. Calidad del aire

Distribución temporal, espacial y tendencias

Antecedentes

La variabilidad temporal de las concentraciones de los contaminantes está determinada principalmente por los patrones de la actividad urbana y las variaciones en la meteorología de escalas local, regional y sinóptica. La actividad urbana y sus emisiones presentan pocas diferencias durante los días laborales, el mayor contraste ocurre en los fines de semana, principalmente el domingo cuando la actividad industrial y vehicular se reduce drásticamente. Por otra parte, las condiciones meteorológicas exhiben una mayor variabilidad en diferentes escalas de tiempo y espacio. Mientras que la micrometeorología está determinada por los flujos locales y la hora del día, las condiciones meteorológicas de escala regional están fuertemente influenciada por la interacción entre los fenómenos locales y aquellos de escala sinóptica e incluso global.

Como se describió en la sección previa, los ciclos diurnos de los contaminantes están fuertemente influenciados por el comportamiento de los flujos locales de viento (por ejemplo, los flujos catabáticos) y la evolución de la capa límite atmosférica. Mientras en el periodo nocturno existe una acumulación de contaminantes en la región central de la cuenca por la acción de los vientos débiles que descienden de las montañas circundantes y por la presencia de una capa límite estable con una altura de algunos cientos de metros, en el día los vientos impulsados por el contraste térmico y el crecimiento de la capa límite provocado por la actividad convectiva en la superficie, favorecen procesos de mezclado, dispersión y dilución de los contaminantes en la atmósfera. La influencia de sistemas de escala sinóptica (como los sistemas de alta presión, la corriente en chorro, tormentas tropicales, etc.) influyen directamente en la estabilidad de la atmósfera baja, por ejemplo, la presencia de un sistema de alta presión en la atmósfera media o baja permite el predominio de los flujos térmicos e inhibe el desarrollo de la nubosidad y el intercambio vertical, creando las condiciones que permiten la acumulación de los contaminantes sobre toda la extensión de la cuenca y favorecen la formación del *smog* fotoquímico, incrementando el riesgo para la salud humana por la intensa producción de contaminantes como el ozono y los aerosoles secundarios.

La disponibilidad de series de tiempo para los principales contaminantes durante periodos relativamente largos, ofrece la oportunidad de evaluar la influencia que los fenómenos meteorológicos de gran escala (espacial y temporal) tienen o tendrán en la contaminación del aire de la Ciudad. Un ejemplo de esto se puede encontrar en el estudio de Barrett y Raga (2017), que analiza el efecto de las anomalías en la convección tropical provocadas por los cambios en la *oscilación de Madden-Julian*, en la variabilidad intraestacional de las concentraciones de ozono en la Ciudad de México, durante los periodos invernal y estival. Al analizar los niveles de ozono entre 1986 y 2014 encontraron evidencia de una posible relación entre la variabilidad intraestacional en las concentraciones superficiales de ozono y las anomalías en la nubosidad y radiación UV-B, en donde las fases con mayor concentración de ozono presentaron la mayor radiación UV-B y la menor nubosidad, mientras que las fases con menor concentración de ozono presentaron la menor radiación UV-B y la mayor cobertura de nubes, tanto en invierno como en verano. La importancia que tienen los fenómenos meteorológicos de escalas sinópticas y de mesoescala, así como las variaciones climáticas requieren que la gestión de la calidad del aire se plantee nuevas preguntas científicas y escenarios de gestión que coloquen el problema de la contaminación de la Ciudad de México en una dimensión más allá de los límites de la cuenca atmosférica. El estudio de los posibles impactos de las variaciones de la Oscilación del Sur-El Niño, el comportamiento de la corriente en chorro y el calentamiento global, son temas que tienen una importancia relevante en la mejora de la calidad del aire.

En esta sección se describe el comportamiento temporal y espacial de los contaminantes reportados por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México durante 2017, haciendo énfasis en las variaciones de las diferentes escalas de tiempo. Además se describen las posibles causas y consecuencias de estas variaciones. En la parte final se actualizan las series de tiempo con datos recientes y se presenta un análisis especial de las tendencias entre 2000 y 2017.

Dióxido de azufre

El dióxido de azufre es uno de los contaminantes primarios cuyas concentraciones se redujeron notablemente durante la década de 1990 y desde entonces continúan disminuyendo. Además, sus concentraciones máximas se han mantenido por debajo de los límites de la NOM. En la Figura 3.1 se muestra la serie de tiempo de los promedios diarios del contaminante para todas las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) en donde se realizó su monitoreo. La variabilidad diaria se caracterizó por la presencia de picos de concentración a lo largo del año, pero con una mayor frecuencia durante los meses de la temporada seca. Como se ha comentado en informes previos, la presencia de estos picos está asociada con las contribuciones regionales originadas en el corredor industrial de Tula-Tepeji, localizado a ~60 kilómetros al noroeste de la Ciudad de México.

En 2017 la concentración promedio anual del contaminante fue de 4.7 ppb, comparativamente en

2013 fue 5.9 ppb y de 4.6 ppb en 2016. Es importante mencionar que el promedio (aritmético) está fuertemente influenciado por los valores extremos de concentración. Un valor de 9.5 ppb en la desviación estándar confirma la variabilidad inducida por la presencia de los valores extremos. Para evitar el efecto de los picos de concentración es recomendable usar el promedio geométrico o la mediana para estimar los niveles medios del contaminante. Tomando esto en cuenta, el promedio geométrico fue de 2.6 ppb y la mediana de 2 ppb, ambos valores menores al promedio aritmético.

Las mayores concentraciones se observaron en las estaciones ubicadas al norte de la zona metropolitana, en el área conurbada del Estado de México. La concentración horaria máxima fue de 400 ppb en la estación Cuautitlán (CUT), en el extremo noroeste de la zona metropolitana, ubicada en el trayecto habitual de la pluma proveniente de Tula. Por otra parte, el mayor promedio anual se observó en la estación Tlalnepantla, en el municipio del mismo nombre, con un valor de 8.2 ppb (promedio geométrico=4.7 ppb, mediana=4 ppb).

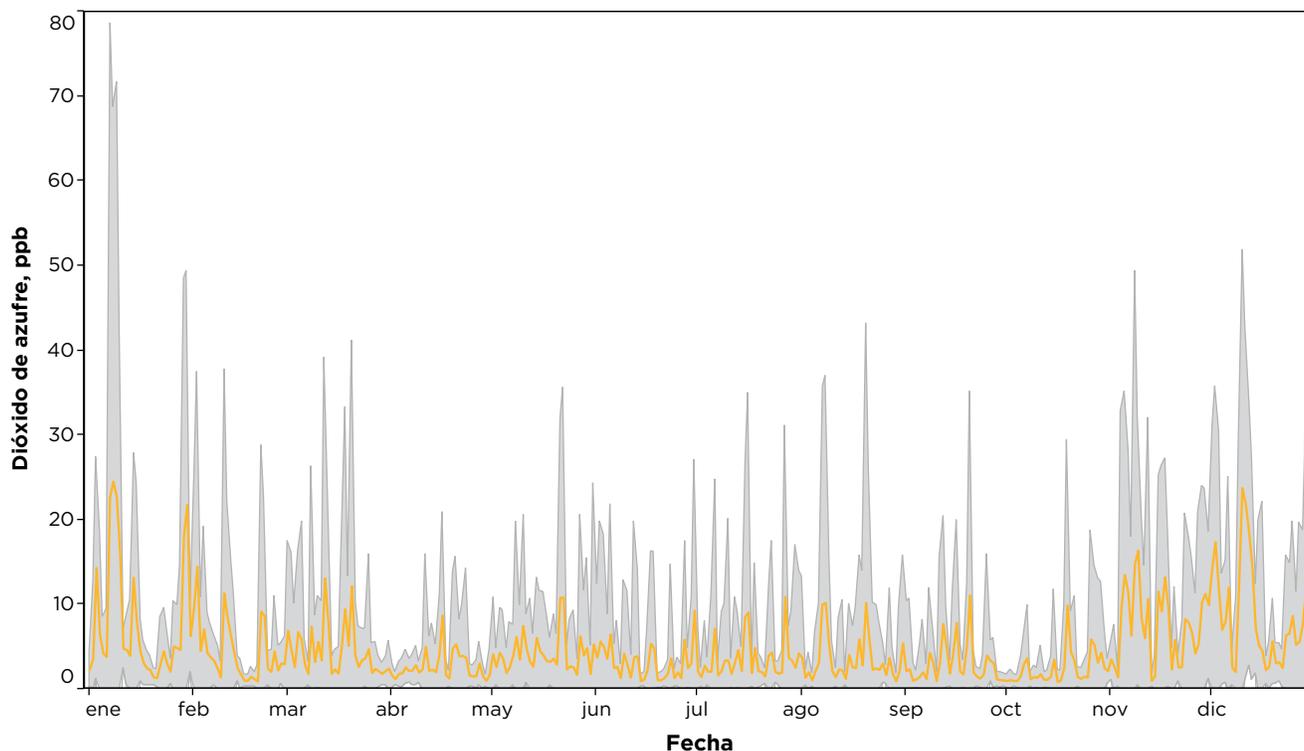


Figura 3.1. Serie de tiempo con los promedios diarios de dióxido de azufre. La línea amarilla indica el promedio aritmético de todas las estaciones, la región sombreada en gris corresponde a una desviación estándar.

Las estaciones localizadas al sur de la zona metropolitana, con una menor influencia de las contribuciones regionales de dióxido de azufre, registraron menores concentraciones del contaminante. La estación Chalco (CHO), ubicada en el extremo sureste registró el menor promedio anual con 2.0 ppb (promedio geométrico=1.7 ppb, mediana=1 ppb). Las estadísticas básicas por estación de monitoreo se muestran en el Anexo 4.

En la Figura 3.2 se presenta la variabilidad del contaminante por hora del día y por día de la semana. De acuerdo con la Figura 3.2a los mayores promedios horarios del contaminante se presentan durante el periodo nocturno, pero esto se debe a que los picos de concentración se presentan generalmente por las noches, esto por la disminución de la altura de la capa de mezcla y la dirección del viento predominante del norte. Sin embargo, al observar el comportamiento de la mediana para cada hora, se observa que a partir de las 8:00 existe un incremento en el contaminante con un máximo alrededor de las 10:00. Al analizar las distribuciones por estación de monitoreo, se observó que en las esta-

ciones ubicadas cerca de vialidades altamente transitadas, el valor de la mediana se incrementa a partir de las 6:00 con un máximo entre las 8:00 y 9:00, indicando una posible contribución proveniente de las fuentes móviles. Las estaciones ubicadas al norte de la zona metropolitana, presentaron concentraciones de fondo relativamente elevadas y más de un pico de concentración durante el día. Con respecto a la variabilidad por día de la semana, los promedio máximos del contaminante se observaron el fin de semana con un valor de 5.2 ppb en sábado (promedio geométrico=2.8 ppb, mediana=2.0 ppb) y de 5.5 ppb en domingo (promedio geométrico=2.8 ppb, mediana=2.0 ppb). Mientras que el viernes el promedio fue de 4.0 ppb (promedio geométrico=2.4 ppb, mediana=2 ppb). Este comportamiento fue distinto al observado en otros contaminantes de origen primario, donde las concentraciones en los días del fin de semana fueron generalmente menores. La variabilidad por día de la semana también fue distinta a la observada el año previo. Es interesante apreciar que entre sábado y lunes se presentaron con mayor frecuencia los picos regionales.

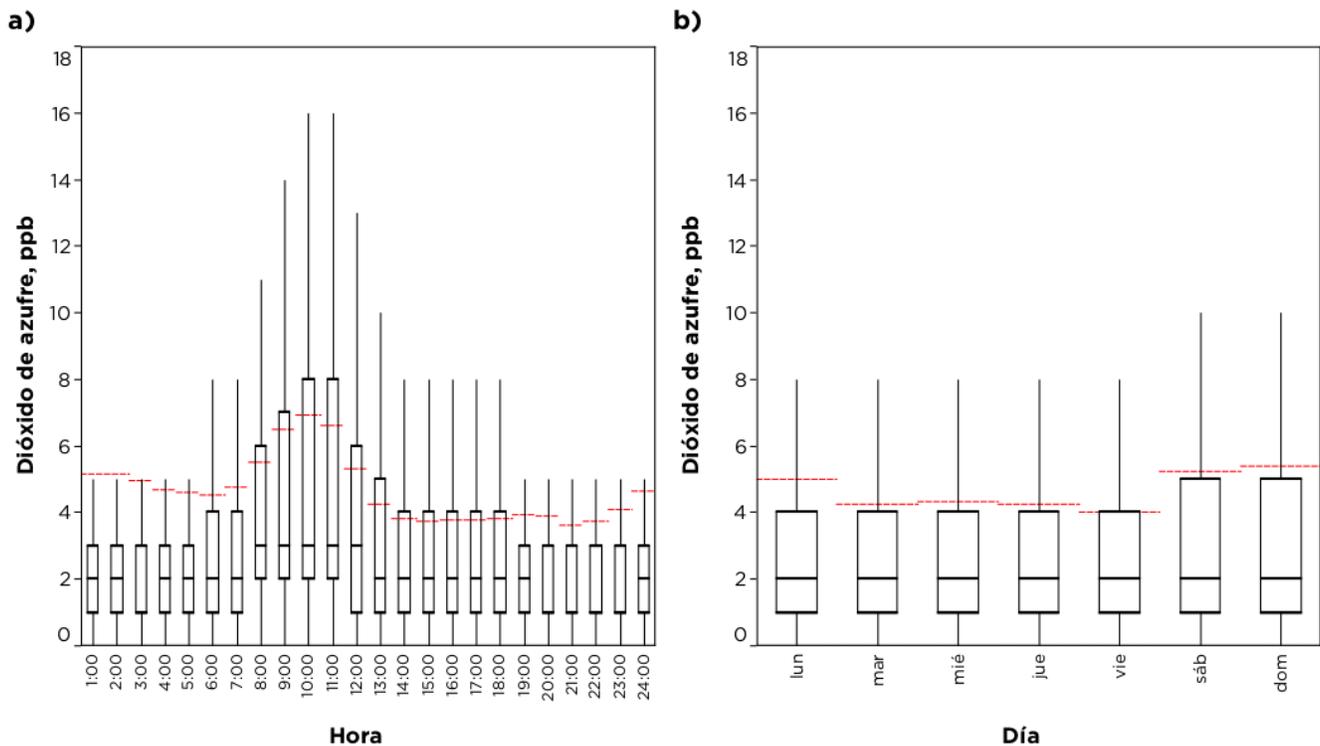


Figura 3.2. Variabilidad horaria y por día de la semana de la concentración de dióxido de azufre. Los extremos de la caja muestran el rango intercuartil (RI), la línea central la mediana, los extremos de los bigotes indican 1.5 veces el RI, la línea roja el promedio aritmético.

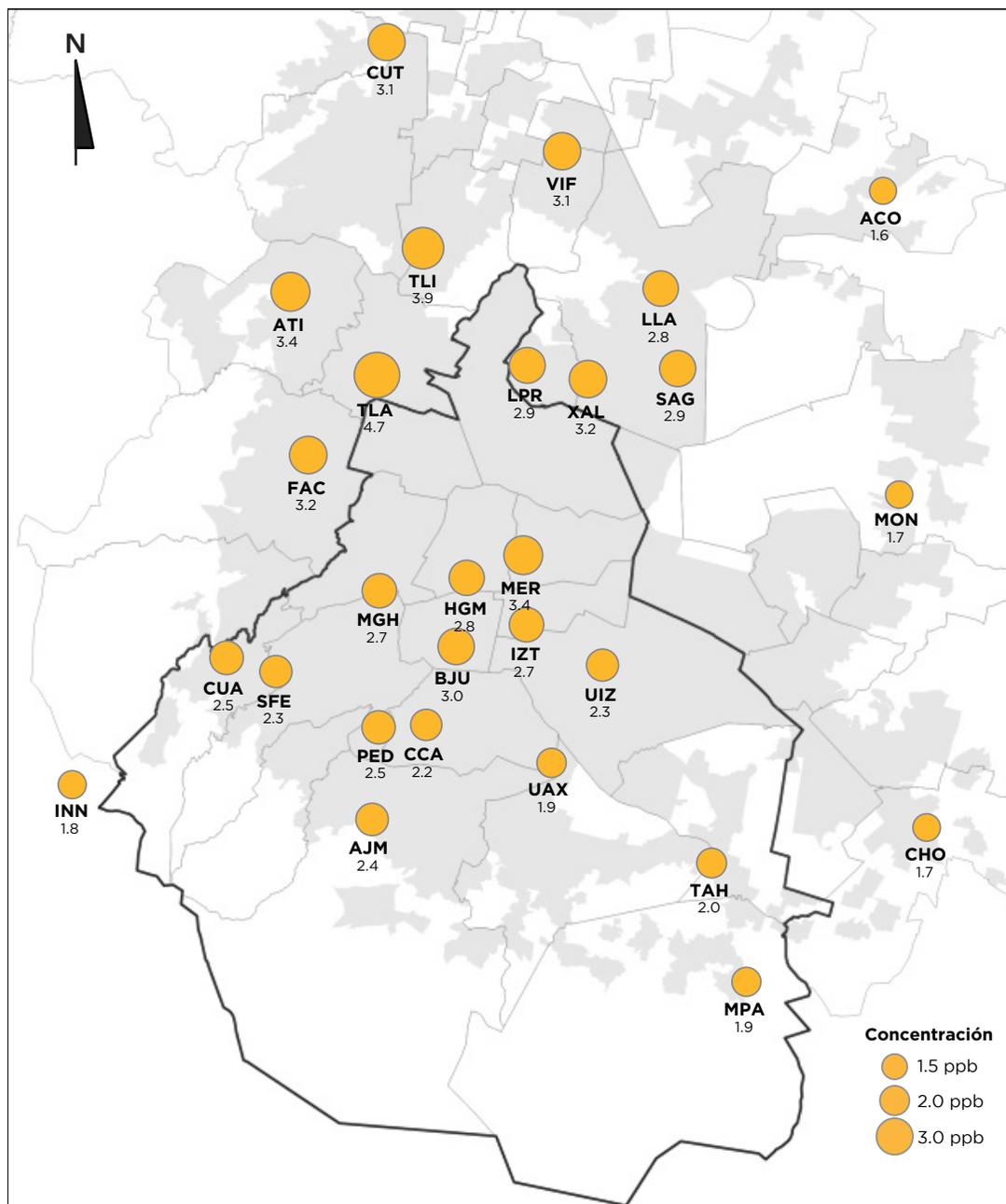


Figura 3.3. Promedio geométrico de la concentración anual de dióxido de azufre en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

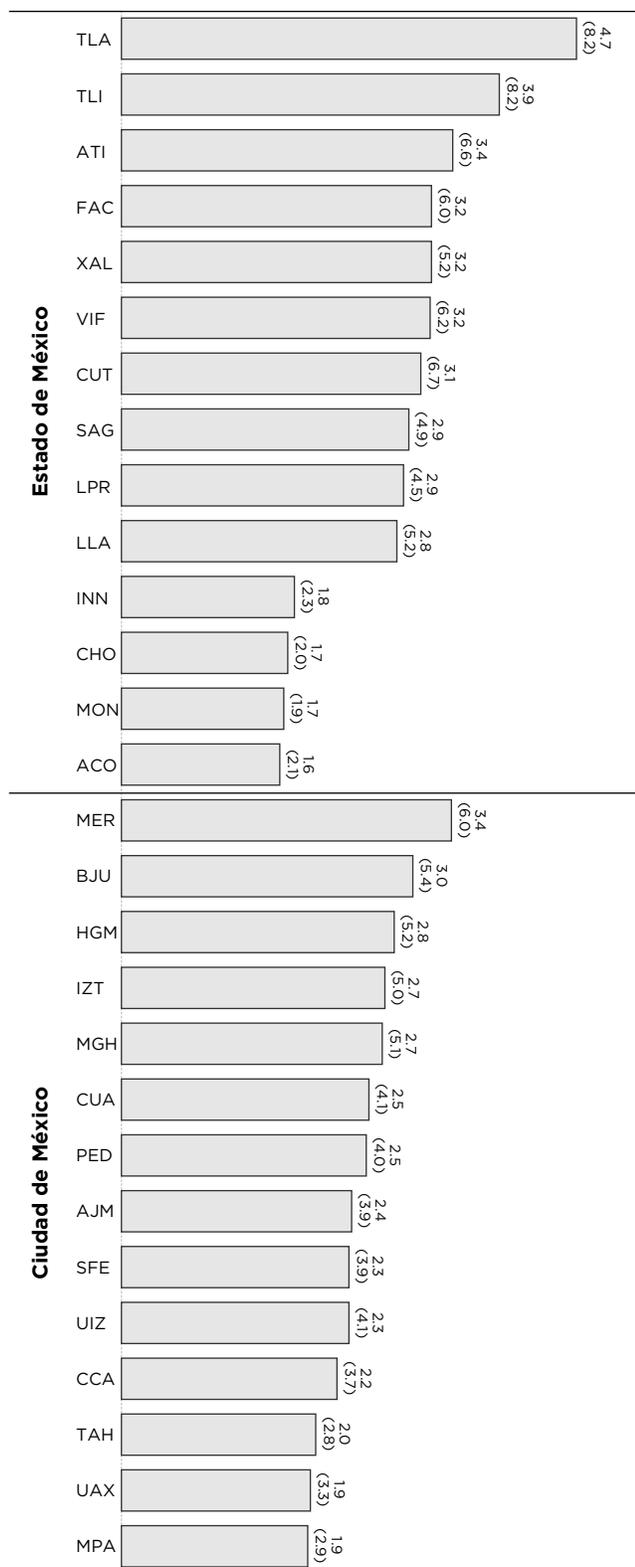


Figura 3.4. Comparación del promedio geométrico de las concentraciones de dióxido de azufre, para cada estación de monitoreo se indica entre paréntesis el valor del promedio aritmético.

La Figura 3.3 muestra el promedio geométrico de la concentración anual de dióxido de azufre en cada una de las diferentes estaciones de monitoreo. Los mayores valores se observaron en las estaciones ubicadas en el territorio del Estado de México, al norte de la zona metropolitana. En la Figura 3.4 se presenta la comparación de los promedios geométrico y aritmético para las diferentes estaciones. Aquellas ubicadas al sur de la zona metropolitana o en la región montañosa, registraron consistentemente los menores promedios.

En seguimiento a la evaluación que se realizó en el informe previo sobre la contribución del dióxido de azufre regional, este año se confirmó nuevamente su presencia y aporte a los niveles del contaminante en la Ciudad de México. En la Figura 3.5 se muestra el mapa de la zona metropolitana con las rosas de dióxido de azufre de algunas de las estaciones, elaboradas con los promedios horarios de todo el año. La rosa de la estación Cuautitlán (CUT), al noreste de la zona metropolitana, muestra concentraciones elevadas provenientes del noroeste (NO). Las rosas para las estaciones Tlalnepantla (TLA) y San Agustín (SAG) indican una contribución a las concentraciones máximas del NO en la primera, y del nor-noreste (NNE) en la segunda. Los patrones de ambas estaciones confirman que el macizo que forma la Sierra de Guadalupe es un obstáculo para la masa compacta de aire que se desplaza dentro de la capa límite nocturna, impulsada por el viento débil. El ingreso de la pluma a la Ciudad de México puede ocurrir por dos rutas: 1) acompañando el flujo acanalado que ingresa por el paso natural que se forma entre las sierras de Guadalupe y de las Cruces, o 2) por el este (E), bordeando la Sierra de Guadalupe e ingresando a la ciudad por el NNE. El arribo ocurre con mayor frecuencia por el NO, bordeando la ladera E de la Sierra de las Cruces, donde los flujos de montaña la impulsan hacia el centro de la Ciudad, como lo muestran las estaciones Merced (MER) y Miguel Hidalgo (MGH). El flujo que ingresa por el NNE generalmente alcanza la Ciudad de México a la altura de la estación Neza-hualcóyotl (NEZ). Además de incrementar los niveles de dióxido de azufre, esta contribución regional tiene contribuciones importantes a la concentración de aerosoles con aportes en PM₁ de hasta 16% en el norte de la ciudad y de 24 % en el sur (Guerrero et al., 2017; Salcedo et al., 2018).

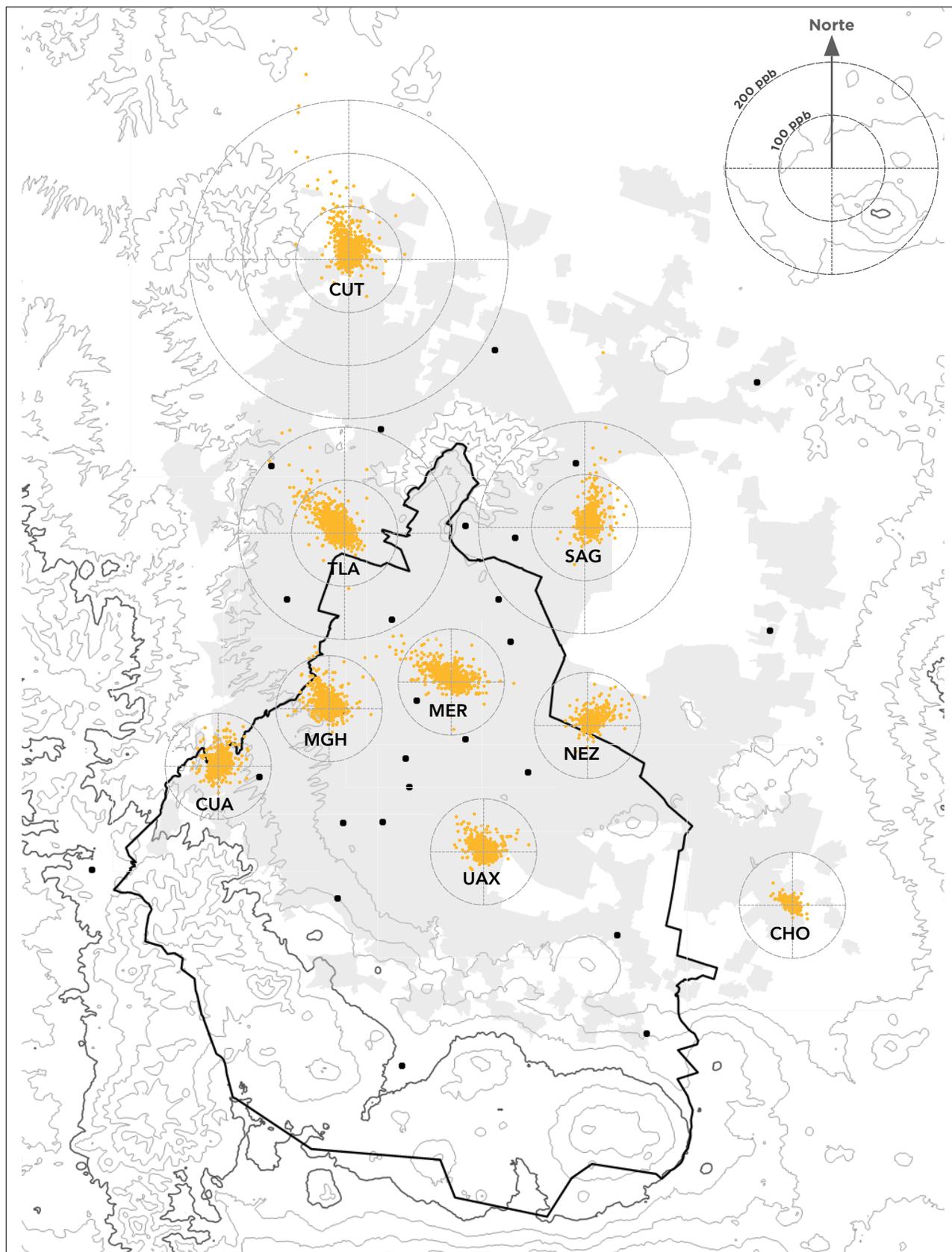


Figura 3.5. Rosas de concentración para el dióxido de azufre en algunas de las estaciones de monitoreo de la RAMA, los gráficos se construyeron con los valores horarios del contaminante para todo el año.

Óxidos de nitrógeno

Los promedios anuales de óxidos de nitrógeno total (NO_x), dióxido de nitrógeno (NO_2) y óxido nítrico (NO) fueron 42, 25 y 16 ppb, respectivamente. Comparativamente en 2013 fueron 49, 26 y 21 ppb, mientras que en 2016 fueron 45, 36, y 19 ppb, respectivamente. Debido a que la fuente más importante de este contaminante son los motores de combustión interna, las estaciones ubicadas en las zonas con mayor tránsito vehicular continuaron registrando las mayores concentraciones del contaminante, por ejemplo, Xalostoc (XAL), Merced (MER), Tlalnepantla (TLA) y Miguel Hidalgo (MGH). La concentración máxima del contaminante durante este periodo fue de 542 ppb y ocurrió el 7 de diciembre en la estación Xalostoc, ubicada en el corredor industrial Xalostoc, en Ecatepec de Morelos. Ocasionalmente se registraron concentraciones mayores a los 400 ppb, principalmente en las estaciones Merced, Miguel Hidalgo y Xalostoc. En el caso del dióxido de nitrógeno, cuya concentración en el aire ambiente se encuentra regulada

por la NOM-023-SSA1-1994, el valor máximo del promedio horario fue de 130 ppb, muy por debajo de los 210 ppb del límite permisible para el promedio de 1 hora. En las Figuras 3.5 a 3.8 se presenta la serie de tiempo de las concentraciones diarias de los óxidos de nitrógeno, el dióxido de nitrógeno y el óxido nítrico. En los tres parámetros se observó una marcada estacionalidad con concentraciones máximas durante los meses de la temporada seca fría, ocasionadas por las condiciones de estabilidad atmosférica, la disminución en la altura de la capa de mezcla y un aumento en la frecuencia e intensidad de las inversiones térmicas de superficie. Durante los meses de la temporada de lluvia, que coinciden además con las vacaciones de verano, las concentraciones disminuyeron considerablemente. De acuerdo con el inventario de emisiones más reciente (Secretaría del Medio Ambiente, 2018), los vehículos fueron la fuente principal de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, esto explica la fuerte asociación que se observó en aquellas estaciones en donde se realizó la medición de ambas especies, con valores de R^2 entre 0.57 y 0.92.

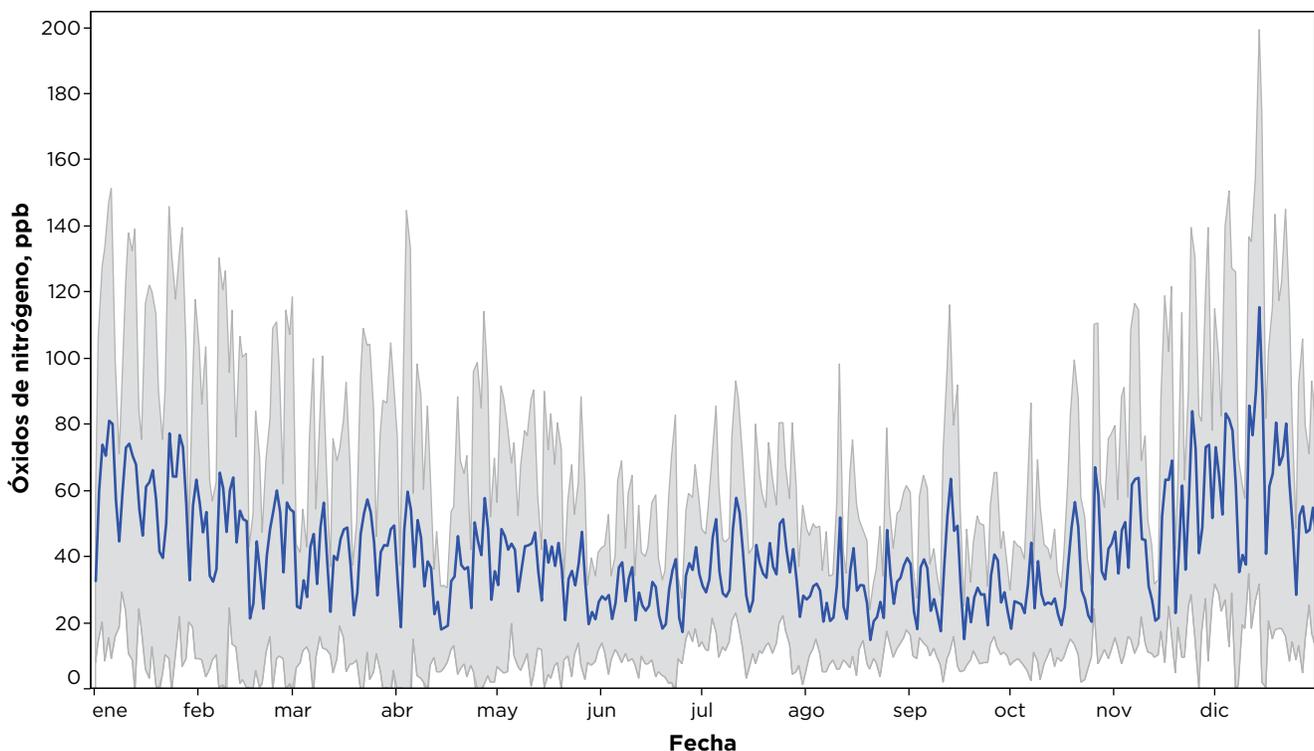


Figura 3.6. Serie de tiempo con los promedios diarios de óxidos de nitrógeno. La línea azul indica el promedio aritmético de todas las estaciones, la región sombreada en gris corresponde a una desviación estándar.

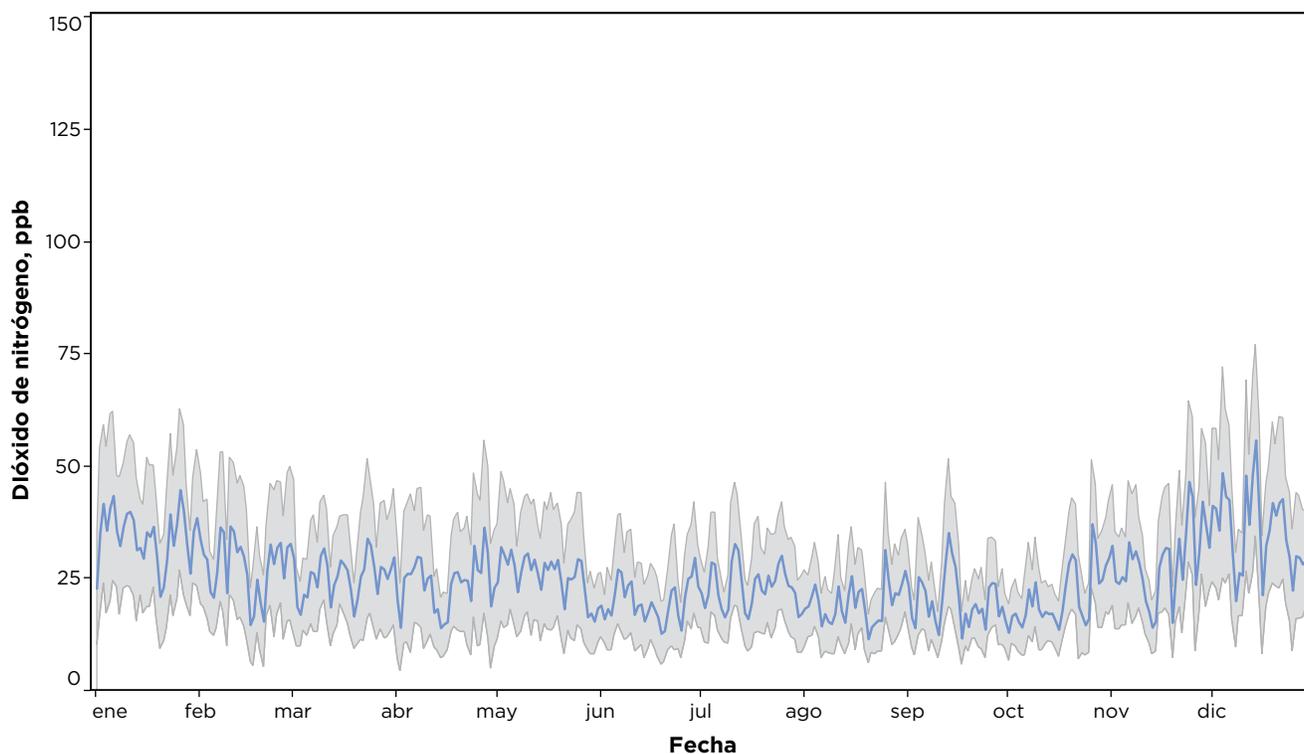


Figura 3.7. Serie de tiempo con los promedios diarios de dióxido de nitrógeno. La línea azul indica el promedio aritmético de todas las estaciones, la región sombreada en gris corresponde a una desviación estándar.

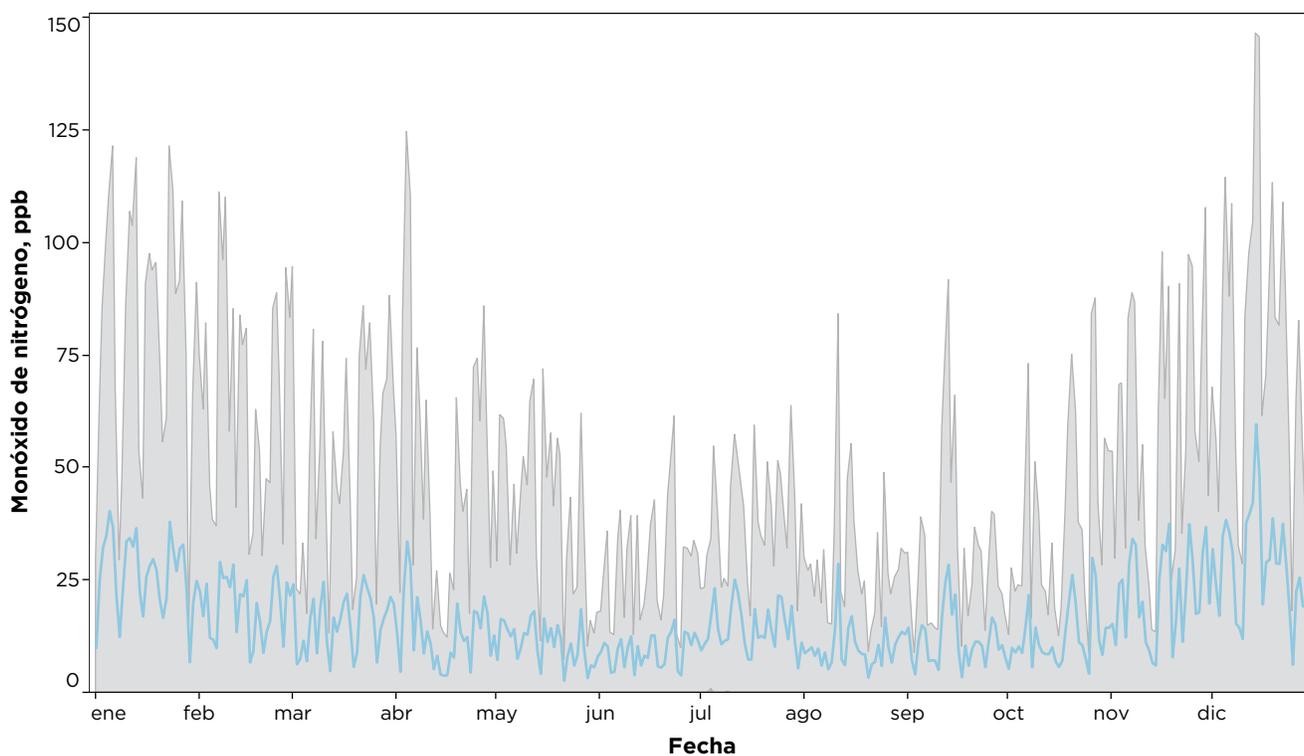


Figura 3.8. Serie de tiempo con los promedios diarios de monóxido de nitrógeno. La línea azul indica el promedio aritmético de todas las estaciones, la región sombreada en gris corresponde a una desviación estándar.

A pesar de que los vehículos emiten una mayor cantidad de monóxido de nitrógeno (también se le conoce como óxido nítrico) con respecto al dióxido de nitrógeno, los resultados del monitoreo indican que el dióxido de nitrógeno es la especie más abundante, contribuyendo con alrededor del 60% (NO_2/NO_x) a la concentración total de óxidos de nitrógeno. En los sitios ubicados al sur de la Ciudad, en donde predominaron los contaminantes secundarios, esta proporción fue de ~80%. En los sitios en donde prevalecieron las emisiones del tránsito vehicular la proporción fue menor que 60%. La relación NO_2/NO_x presentó también una variación diurna con los menores valores (~30%) entre 7:00 y 8:00, cuando predominaron las emisiones primarias y las mayores concentraciones de óxidos de nitrógeno; mientras que por la tarde, cuando predominaron las contribuciones secundarias, la proporción alcanzó un máximo de ~80 % alrededor de las 19:00. Es importante mencionar que aun cuando el método de quimiluminiscencia tiende a sobrestimar las concentraciones de dióxido de nitrógeno (Dunlea *et al.*, 2007), la relación NO_2/NO_x podría emplearse como un indicador del envejecimiento que experimentan las masas de aire, ya que como se ha observado, a medida que transcurre el tiempo, la proporción de dióxido de nitrógeno en las masas de aire incrementa por la oxidación en la atmósfera del monóxido de nitrógeno.

En las Figuras 3.9a-c se presentan los ciclo diurnos de las diferentes especies que componen los óxidos de nitrógeno. Mientras que el óxido nítrico presentó un pico máximo de concentración a las 8:00, relacionado con el periodo matutino de máxima actividad vehicular, la concentración de dióxido de nitrógeno presentó dos picos, el primero alrededor de las 10:00 y el segundo entre las 22:00 y 23:00. El primero relacionado con la oxidación fotoquímica y el segundo con procesos de química nocturna, estos últimos son importantes por su contribución a la formación de especies reactivas que desempeñarán un rol importante en la formación de contaminantes secundarios durante la noche y tendrán una contribución importante en la fotoquímica del día siguiente.

Como se puede observar en las Figuras 3.10a-c, la variabilidad por día de la semana se caracteriza por concentraciones mayores durante los días laborales

(lunes a viernes) en el caso de óxidos de nitrógeno y óxido nítrico, en donde el lunes reportó menores concentraciones y el viernes las mayores, mientras que entre martes y jueves no se observó diferencia estadísticamente significativa (prueba de Kuskral-Wallis, $\alpha=0.05$) en la mayoría de las estaciones de monitoreo. Estos cambios están relacionados directamente con las características del tránsito vehicular en los diferentes días de la semana, en donde el viernes generalmente experimenta un incremento en la tarde y noche, asociado con una mayor actividad nocturna; mientras que el fin de semana, cuando disminuye el número de vehículos en la mañana y tarde, se observó una disminución significativa en las concentraciones de ambas especies, con el menor promedio en domingo. Este patrón fue consistente en la mayoría de las estaciones de monitoreo, principalmente en aquellas en donde las emisiones provenientes de los escapes de los vehículos fueron la fuente más importante. En el caso del dióxido de nitrógeno se observó un patrón similar, pero con un menor contraste entre martes y jueves, en donde no se encontró una diferencia significativa. Estos resultados fueron consistentes con lo reportado para 2016.

La distribución espacial de las especies nitrogenadas se puede observar en las Figuras 3.11 a 3.13. Como se comentó previamente, las mayores concentraciones de estos contaminantes se presentaron en las estaciones ubicadas dentro de la región urbana en las zonas con mayor tránsito vehicular, mientras que las menores se observaron en las estaciones periféricas. El sitio ubicado en la zona industrial de Xalostoc, en Ecatepec de Morelos, registró los promedios anuales máximos de óxidos de nitrógeno y óxido nítrico con valores de 66 y 35 ppb, respectivamente. Los menores promedios se observaron en la estación Acolman (ACO), en el municipio del mismo nombre con valores de 27 y 10 ppb, respectivamente. En la Ciudad de México los promedios anuales máximos se observaron en la estación Merced (MER), en la delegación Venustiano Carranza, con 62 y 26 ppb, respectivamente, mientras que el menor promedio se registró en la estación Ajusco Medio (AJM), en la delegación Tlalpan, con 22 y 4 ppb, respectivamente. El promedio anual máximo para dióxido de nitrógeno se presentó en la estación Merced, en el centro de la ciudad, con 35 ppb.

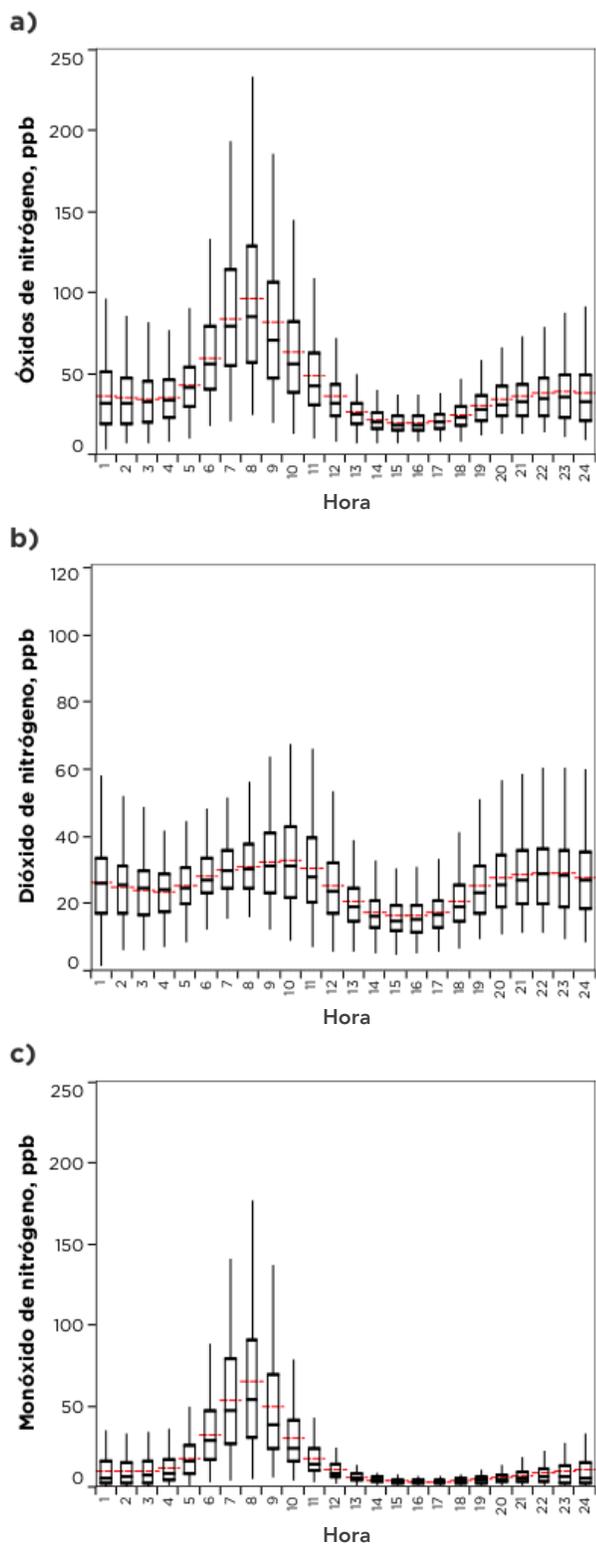


Figura 3.9. Distribución de los datos de óxidos de nitrógeno (a), dióxido de nitrógeno (b) y monóxido de nitrógeno (c) ,por hora del día.

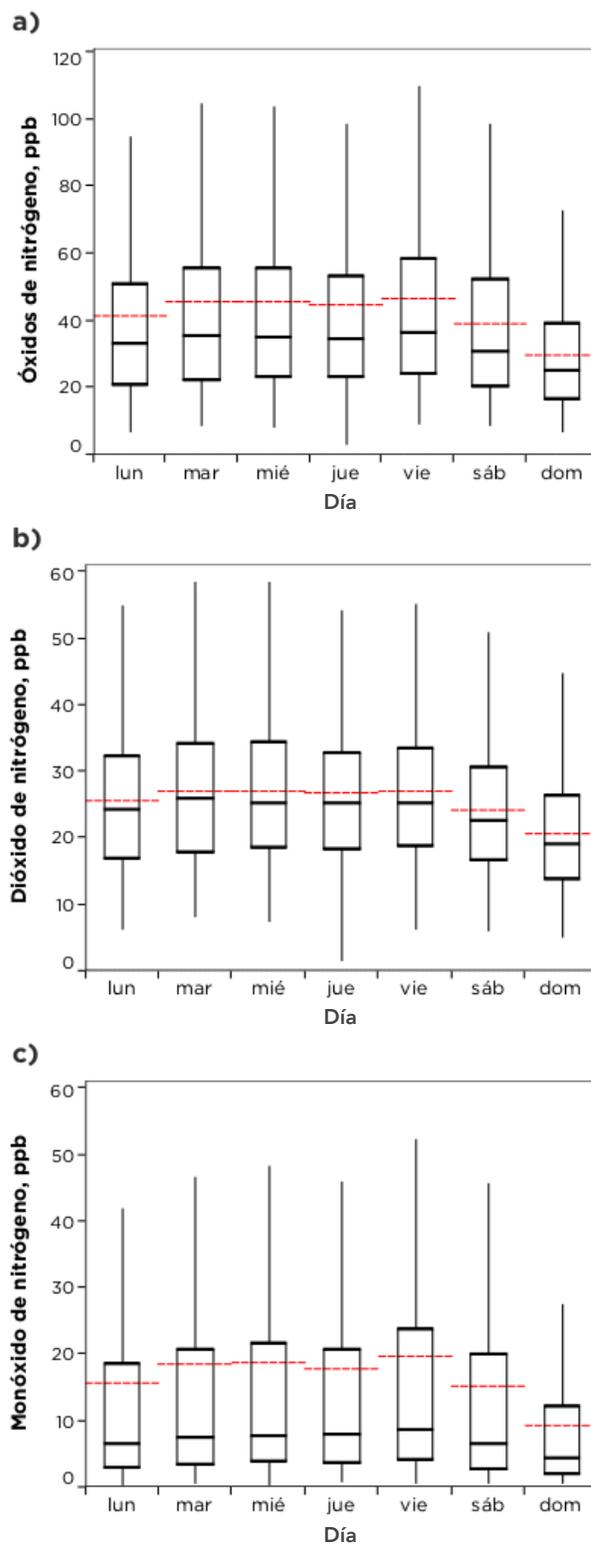


Figura 3.10. Distribución de los datos de óxidos de nitrógeno (a), dióxido de nitrógeno (b) y monóxido de nitrógeno (c) ,por día de las semana.

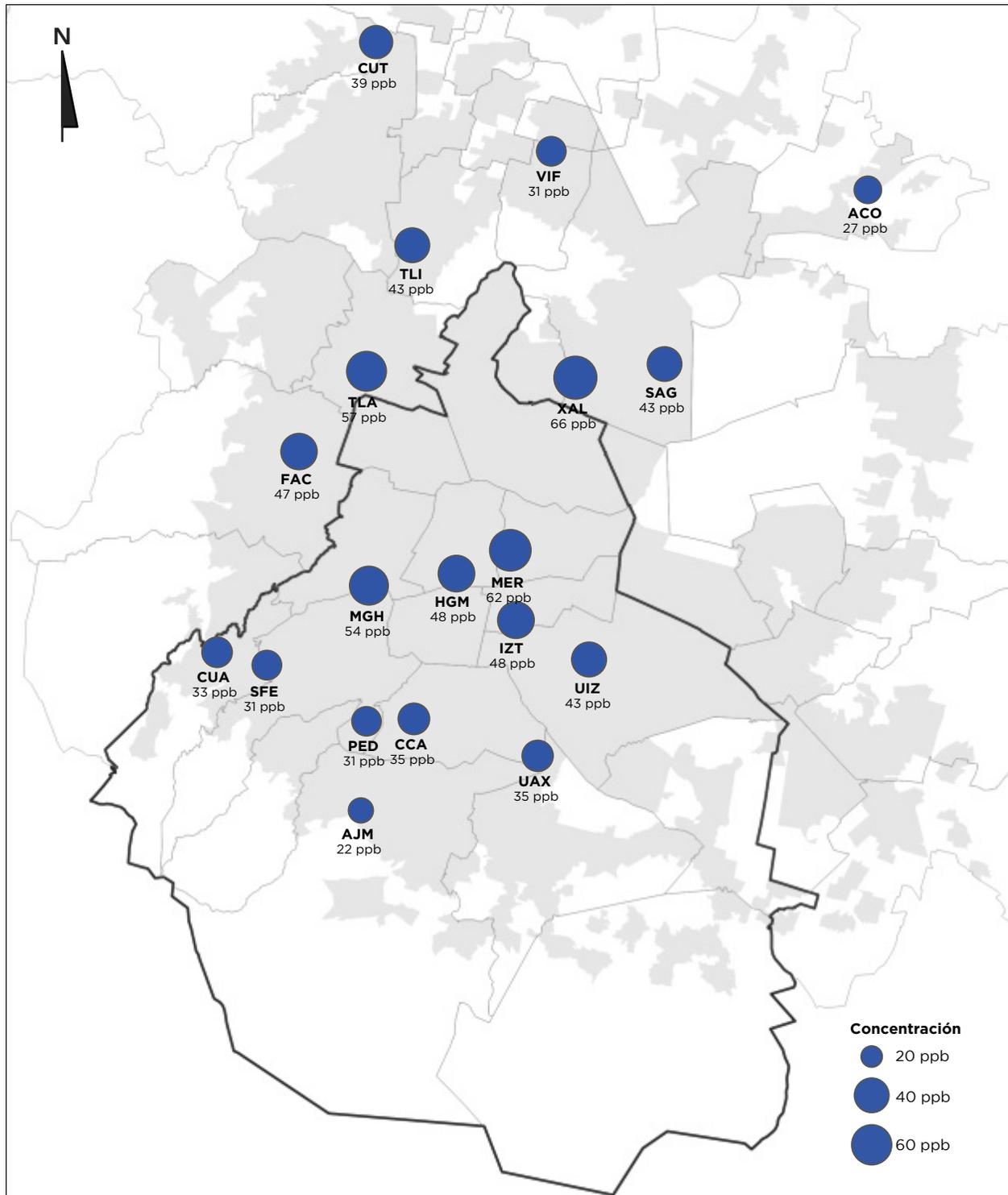


Figura 3.11. Promedio aritmético anual de la concentración de óxidos de nitrógeno totales por estación de monitoreo.

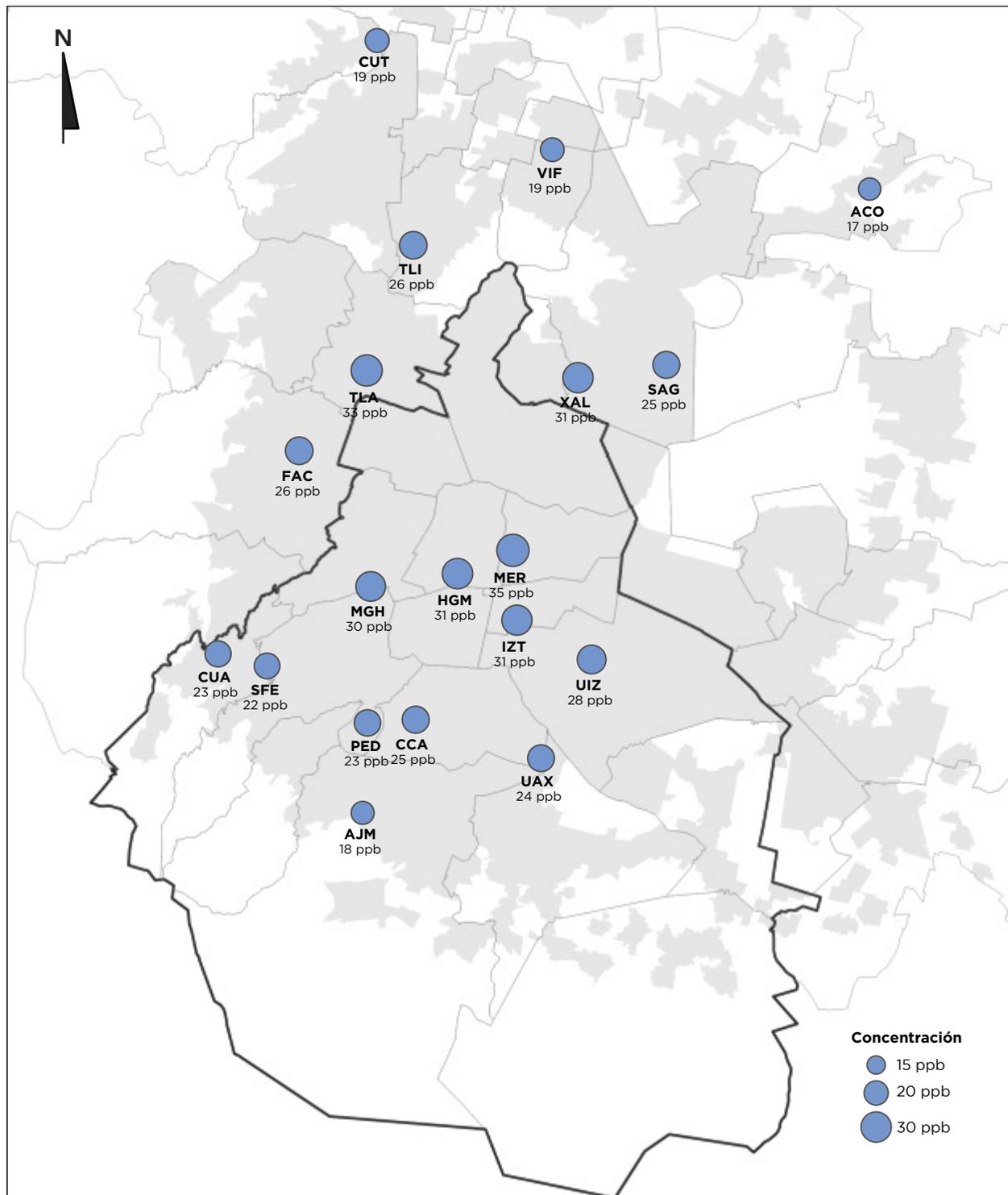


Figura 3.12. Promedio aritmético anual de la concentración de dióxido de nitrógeno por estación de monitoreo.

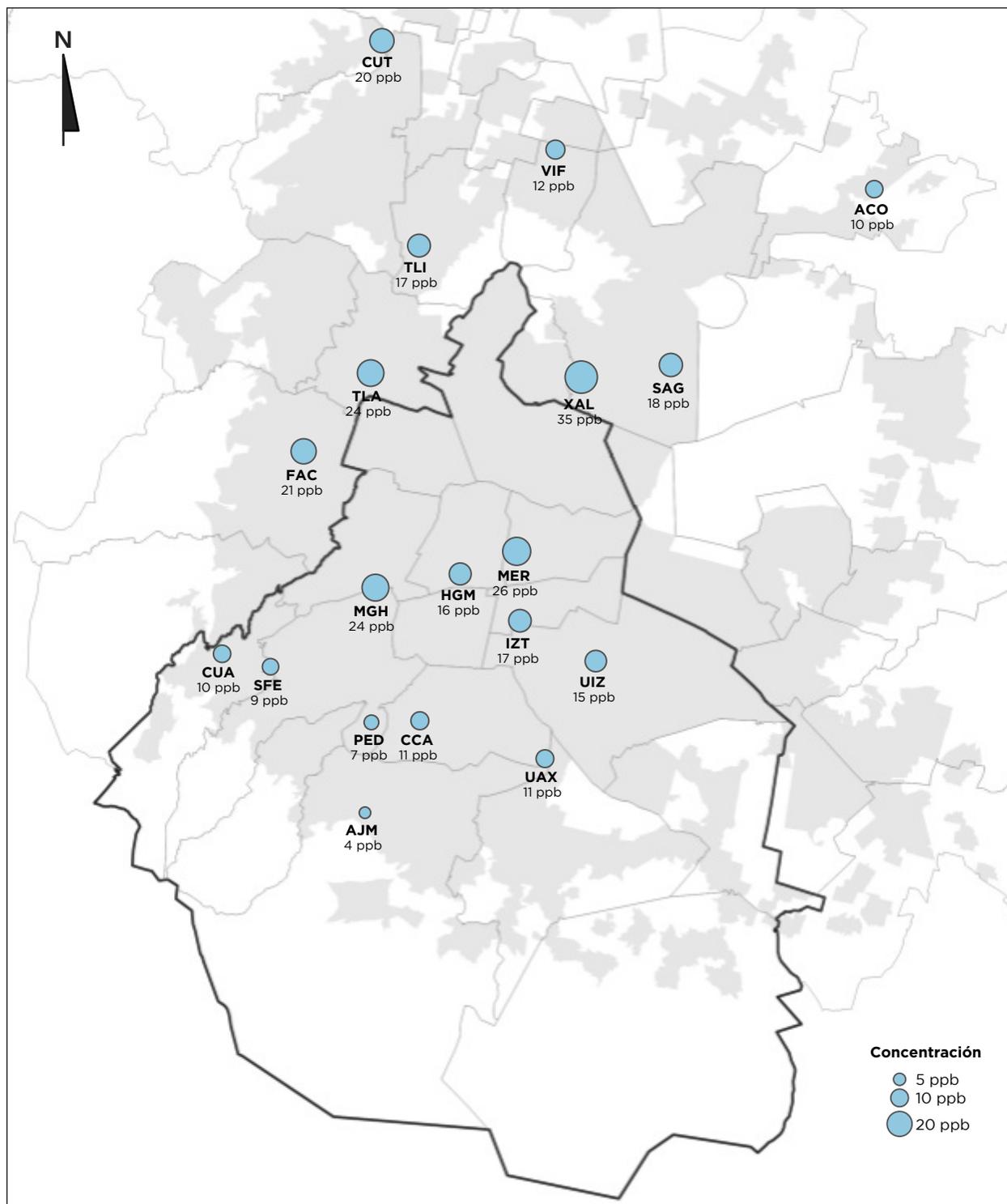


Figura 3.13. Promedio aritmético anual de la concentración de monóxido de nitrógeno por estación de monitoreo.

Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) es un contaminante producto de la quema incompleta de los combustibles fósiles y de la biomasa. En la Ciudad de México la fuente más importante de este compuesto es la quema de combustibles fósiles en los automóviles (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2018), por lo tanto se considera como un buen indicador de emisiones vehiculares. Debido a que reacciona lentamente con otras especies su presencia en una masa de aire es útil para evaluar los procesos de transporte y dilución en la atmósfera.

Dentro de la red de monitoreo las estaciones ubicadas en zonas con una mayor densidad de tránsito vehicular son las que generalmente reportan las mayores concentraciones. El promedio del contaminante este año fue de 0.6 ppm, menor a los promedios de 2013 y 2016 con valores de 0.8 y 0.7 ppm, respectivamente. El máximo para el promedio de 1 hora fue de 6.0 ppm en la estación La Presa

(LPR), mientras que para el promedio móvil de 8 horas fue de 3.8 ppm, en Xalostoc (XAL), ambas al noreste de la zona metropolitana. Esa zona se caracterizó por un intenso tránsito vehicular durante la mayor parte del día, con un pico de mayor actividad durante la mañana. La región central de la Ciudad de México usualmente reporta elevadas concentraciones por la confluencia de tránsito durante la mañana.

En la Figura 3.14 se presenta la serie de tiempo para los promedios diarios del contaminante. Debido a que el comportamiento del tránsito vehicular es similar durante la mayor parte del año, con excepción de los periodos vacacionales, su variabilidad a lo largo del año depende fuertemente de la meteorología local, lo que explica su comportamiento estacional. Las mayores concentraciones del contaminante se presentaron durante los meses de invierno, cuando son más frecuentes los días con estabilidad atmosférica, aumenta el número e intensidad de las inversiones térmicas de superficie y la altura de capa límite atmosférica es menor. Mien-

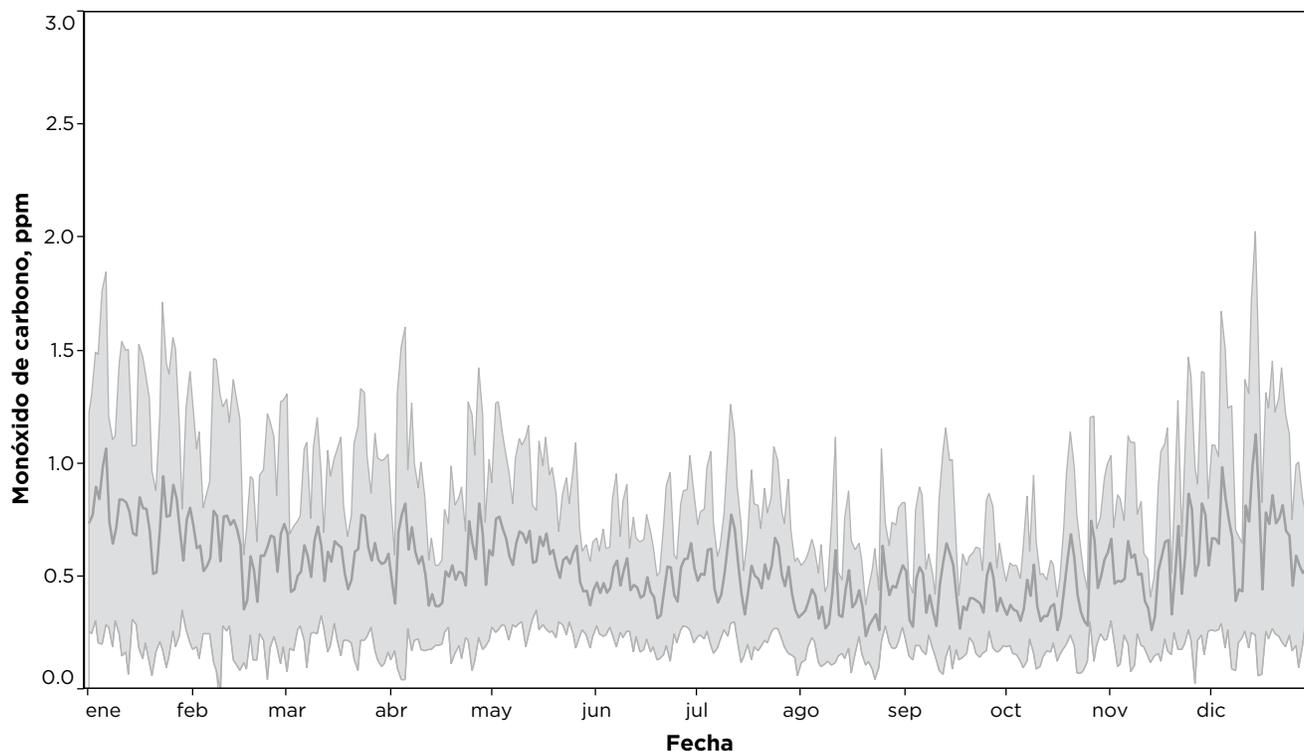


Figura 3.14. Serie de tiempo con los promedios diarios de monóxido de carbono. La línea gris oscuro indica el promedio aritmético de todas las estaciones, la región sombreada en gris corresponde a una desviación estándar.

tras que las menores concentraciones se observaron durante los meses de la temporada de lluvia cuando las condiciones fueron favorables para la dispersión/remoción de la contaminación. Al igual que para el resto de los contaminantes, la presencia de una mayor inestabilidad atmosférica durante marzo provocó una disminución en las concentraciones de monóxido de carbono en la ciudad.

En cuanto a la variación diurna la Figura 3.15a muestra el perfil típico de este contaminante, con un pico agudo de concentración alrededor de las 8:00 y otro de menor intensidad entre las 21:00 y 23:00. El pico matutino se asoció con el intenso tránsito vehicular y la baja altura de la capa límite, mientras que el nocturno se relacionó con una menor altura de la capa límite y mayor velocidad del viento. La rápida disminución en las concentraciones después de las 8:00 se explica por el rápido crecimiento de la capa límite convectiva (CLC). Después de las 18:00 la CLC da paso a una capa estable de menor altura. Las estaciones de monitoreo ubicadas en la parte central de la ciudad, como Hospital General de México (HGM) o Benito Juárez (BJU), generalmente reportan el pico máximo una hora después

que las estaciones de la periferia, mientras que las estaciones ubicadas viento abajo de la zona urbana, como Milpa Alta (MPA), reportan su máximo de concentración hasta dos horas más tarde con menor magnitud. La variación por día de la semana del monóxido de carbono fue similar a la observada para los óxidos de nitrógeno (ver Figura 3.15b), con mayores concentraciones en los días laborales y menores el fin de semana. Los promedios máximos se registraron en viernes, mientras que los mínimos en domingo. En Atizapán (ATI), Cuajimalpa (CUA), La Presa (LPR), Montecillo (MON), Tultitlán (TLI), UAM Xochimilco (UAX) y Xalostoc (XAL) no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los días laborales y el fin de semana.

En la Figura 3.16 se muestra la distribución espacial de los promedios anuales. Las mayores concentraciones se registraron en Xalostoc y en el centro de la Ciudad de México esto por el intenso tránsito vehicular durante el día. Los menores promedios se observaron en las estaciones ubicadas en los límites urbanos, como Milpa Alta y Acolman (ACO), la primera en el extremo sureste de la zona metropolitana y la segunda al noreste.

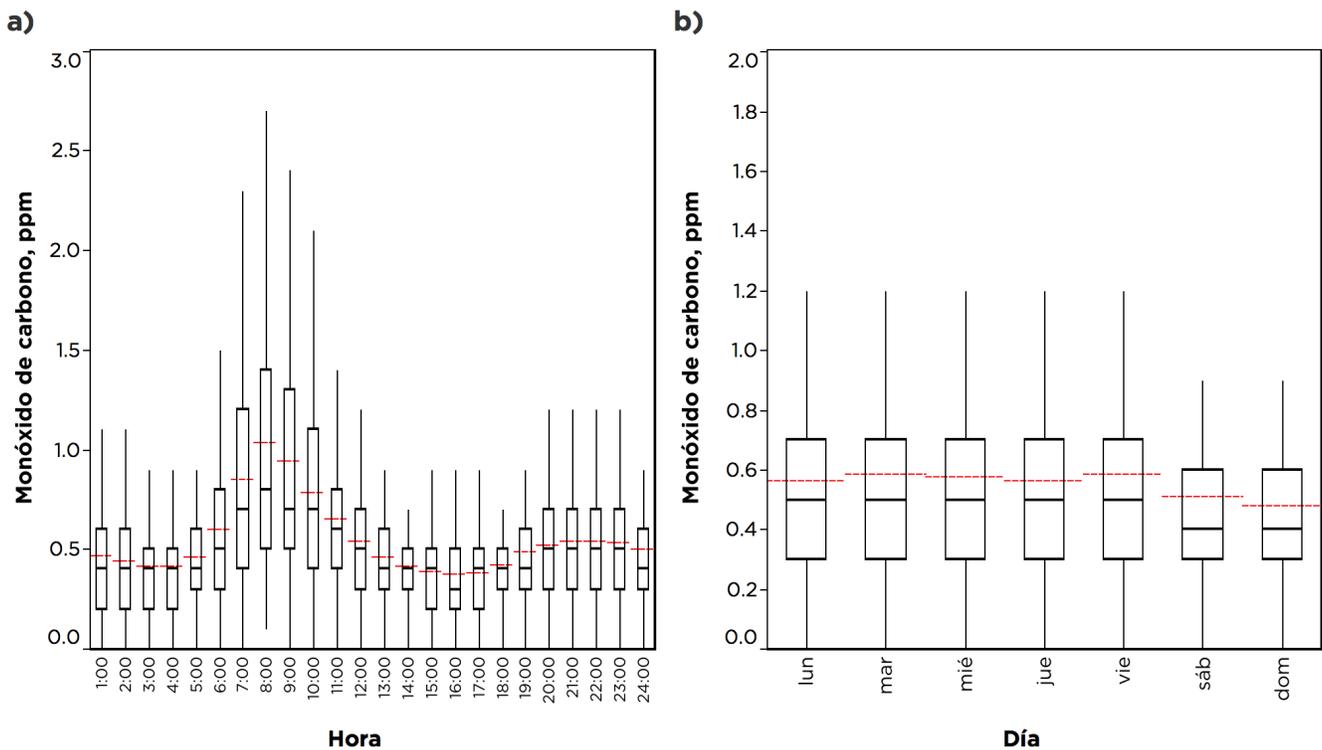


Figura 3.15. Variabilidad horaria (a) y por día de la semana (b) de la concentración de monóxido de carbono.

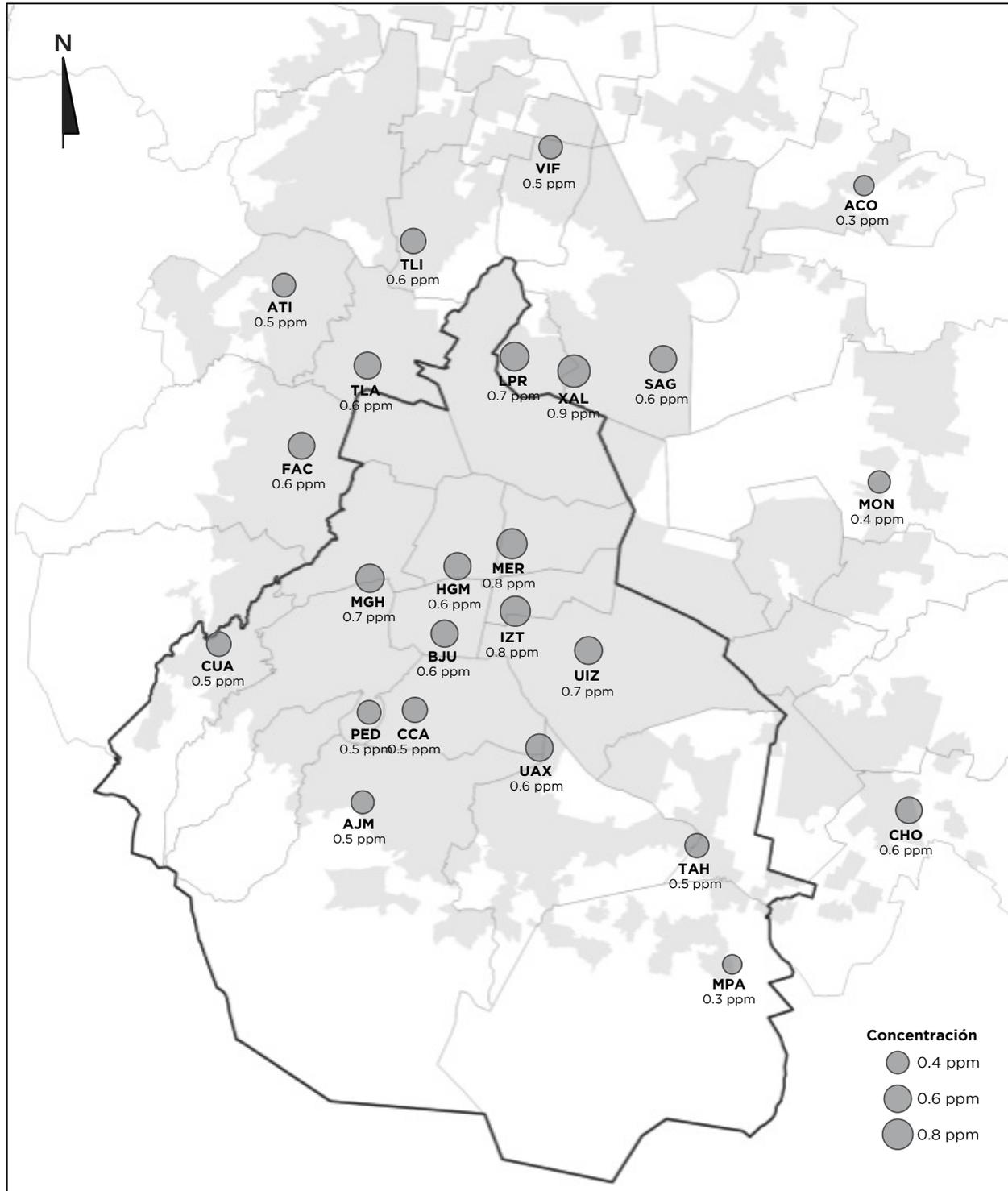


Figura 3.16. Promedio aritmético anual de la concentración de monóxido de carbono por estación de monitoreo.

Ozono

Como se comentó en la Sección 2 las condiciones meteorológicas particulares que se presentaron durante los primeros meses del año tuvieron un efecto positivo en la calidad del aire, el cual fue evidente durante la *temporada de ozono*. En términos generales se identificaron tres aspectos meteorológicos que contribuyeron a una mejor calidad del aire: 1) la influencia de la corriente en chorro subtropical; 2) anomalías positivas en la velocidad de viento en febrero (+0.12 m/s), marzo (+0.06 m/s) y abril (+0.23); y 3) la presencia de lluvias tempranas en marzo y abril.

Se ha observado que el paso de la corriente en chorro (*jet stream*) sobre la región central del país puede provocar la disminución de la presión atmosférica y un ligero aumento de la velocidad de viento en la atmósfera baja. Sobre la cuenca de México genera un flujo constante de viento en superficie del sur u oeste, favorable para la dispersión de la contaminación. Un ejemplo extremo del efecto de

la corriente en chorro ocurrió en marzo de 2016, cuando generó velocidades en superficie mayores a 30 km/h que provocaron, además de una excepcional calidad del aire, daños en la infraestructura urbana por el derribo de árboles, postes y espectaculares (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2017). En 2017 se observó la posible influencia de dicha corriente en los siguientes periodos: 15 al 21 de febrero, 11 al 15 de marzo, 21 a 23 de marzo, 31 de marzo al 3 de abril. Se sabe que el incremento en la velocidad de viento, aumenta la inestabilidad atmosférica e influye positivamente en la dispersión y dilución de los contaminantes. Del análisis de los datos se observó una relación inversa entre la velocidad del viento y las concentraciones de ozono en las primeras horas de la tarde, principalmente en las estaciones del centro y sur de la Ciudad de México. Por otra parte, este año ocurrieron varios episodios de lluvias frontales durante marzo y abril con un efecto positivo en la calidad del aire. La lluvia aumenta la inestabilidad atmosférica y es un mecanismo eficiente para la remoción de los contaminantes de la atmósfera.

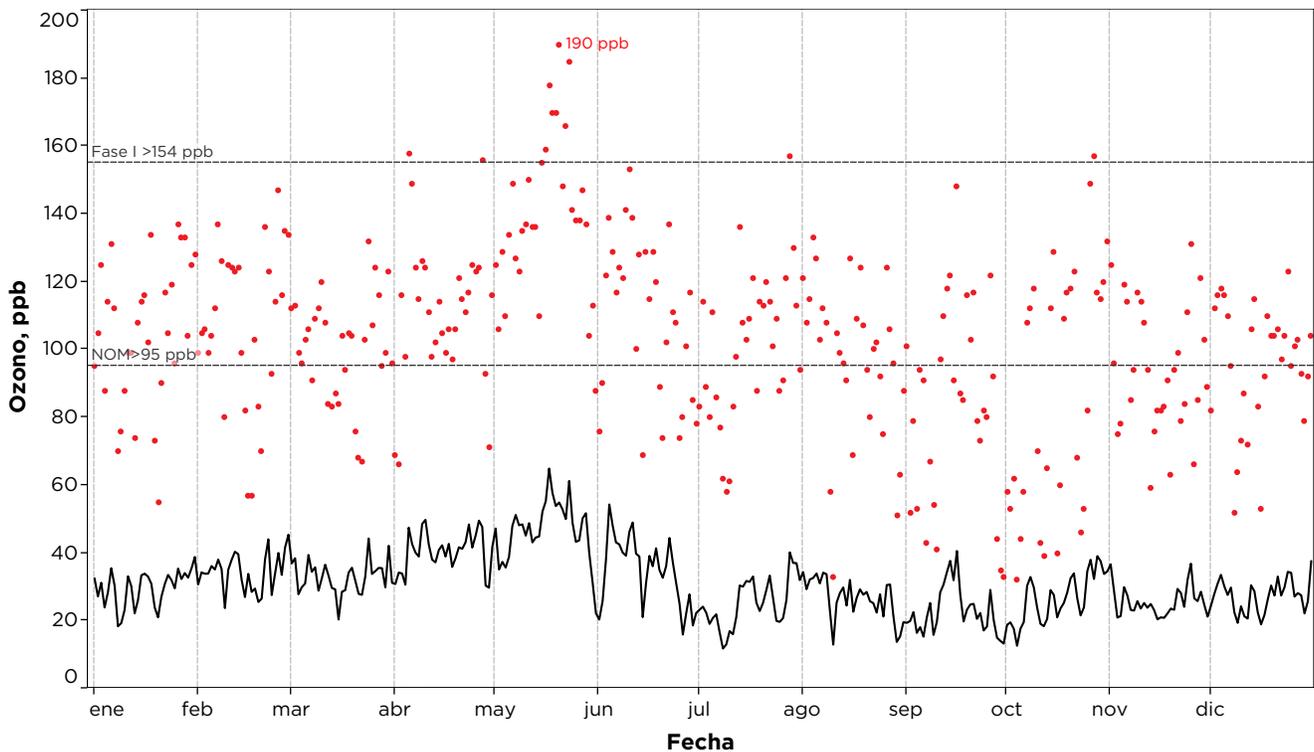


Figura 3.17. Serie de tiempo para las concentraciones de ozono, la línea negra continua corresponde al promedio diario del contaminante, los puntos rojos indican las concentraciones máximas diarias registradas en la red. En la gráfica se indican el valor límite para el promedio de 1 hora de la NOM y el umbral de la Fase I de Contingencia.

Lo anterior explica porque en los meses de febrero a abril, en los que suelen presentarse episodios de contaminación fotoquímica, los niveles de ozono no alcanzaron concentraciones tan elevadas como en años previos (p. ej. 2014), además de un menor número de eventos en los que se activó el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.

En la Figura 3.17 se presenta la serie de tiempo para el promedio global de la concentración de ozono, así como las concentraciones máximas registradas. En ella se aprecia un incremento gradual en las concentraciones promedio del contaminante a partir de marzo y hasta mayo, pero en menor intensidad que la observada en años previos. En junio las concentraciones disminuyeron drásticamente por la temporada de lluvia. A pesar de la mejora de la calidad del aire en este periodo, las concentraciones máximas continuaron superando los valores límite recomendados por la norma (ver Figuras 3.18 y 3.19). En la Figura 3.18 es notoria la disminución en las concentraciones de ozono durante la temporada de ozono.

El promedio de la concentración de ozono fue de 31 ppb, mientras que el promedio de las concentraciones máximas diarias fue de 76 ppb. Comparativamente en 2013 estos valores fueron 29 y 75 ppb, y en 2016 de 30 y 76 ppb, respectivamente. A diferencia del año previo, cuando se presentaron concentraciones superiores a 200 ppb, la concentración máxima del año para el promedio horario fue de 190 ppb el 20 de mayo en la estación Benito Juárez (BJU), en la delegación del mismo nombre, el máximo para el promedio móvil de 8 horas fue de 140 ppb en la estación Pedregal (PED). Las estaciones PED, Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y Ajusco Medio (AJM), localizadas al sur de la ciudad, registraron el mayor valor para el promedio de los máximos diarios con 89 ppb; mientras que Villa de las Flores (VIF), ubicada el norte en el municipio de Coacalco, reportó el menor con 64 ppb.

Este año no se aplicaron acciones o medidas de control extraordinarias para mitigar los niveles de contaminación durante la temporada de ozono, como ocurrió en el segundo trimestre de 2016.

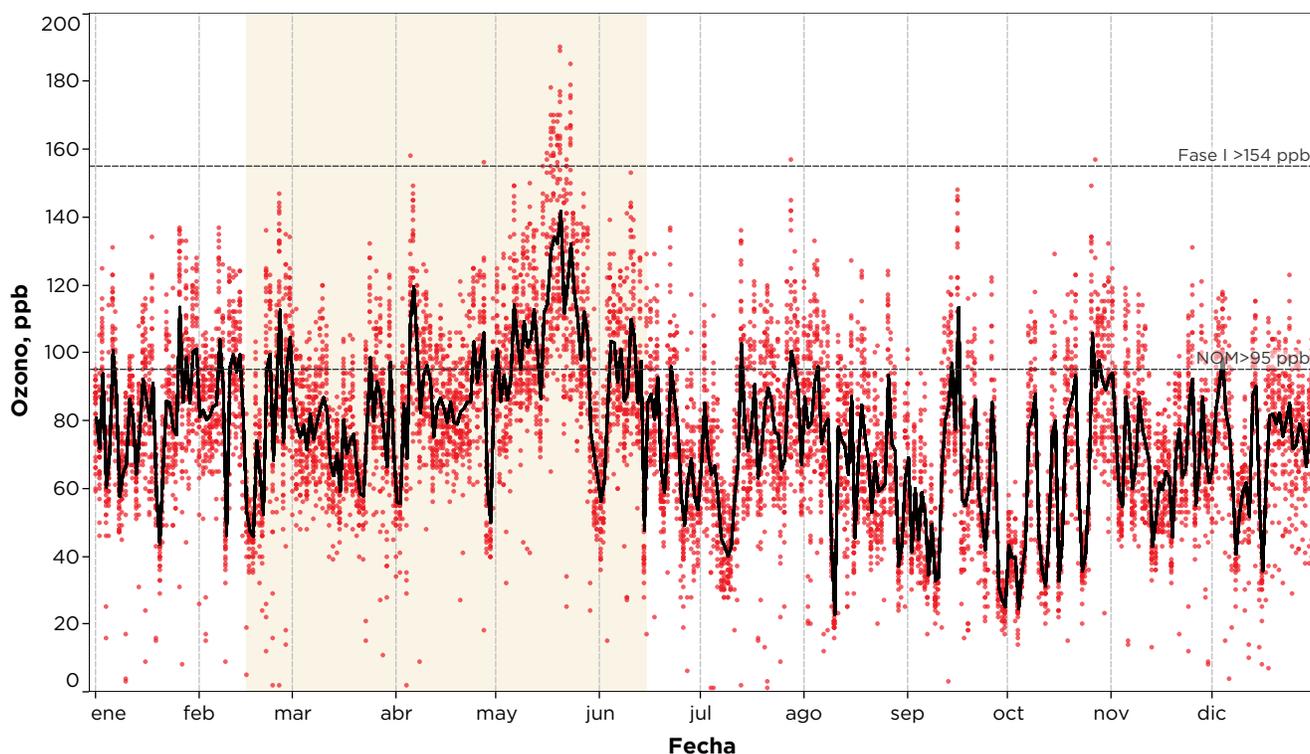


Figura 3.18. Serie de tiempo de la concentración máxima diaria de ozono. La línea negra indica el promedio de los máximos mientras que los puntos rojos las concentraciones máximas de cada una de las estaciones de monitoreo. En la figura se destacan el valor límite de la NOM y el umbral de la Fase I, la franja naranjada indica la temporada de ozono.

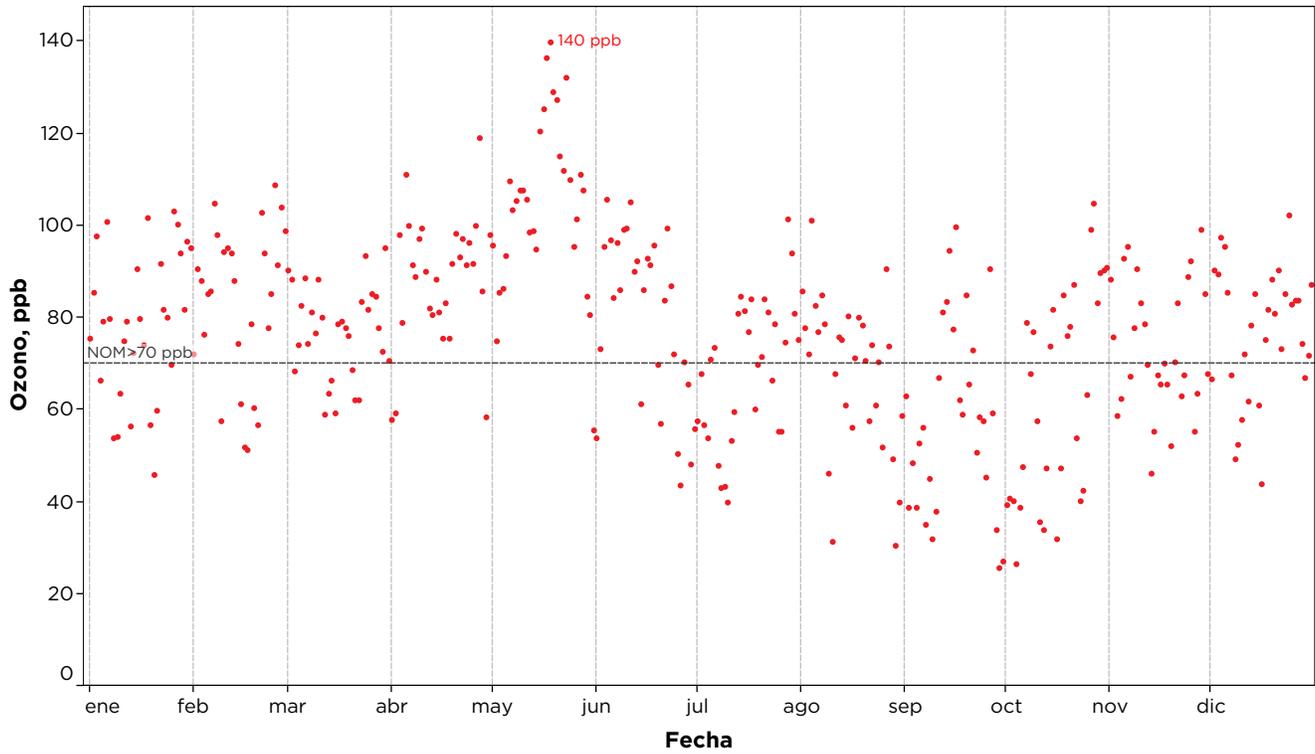


Figura 3.19. Serie de tiempo para la concentración máxima del promedio móvil de 8 horas para cada día del año. El valor máximo corresponde al máximo de todas las estaciones de monitoreo.

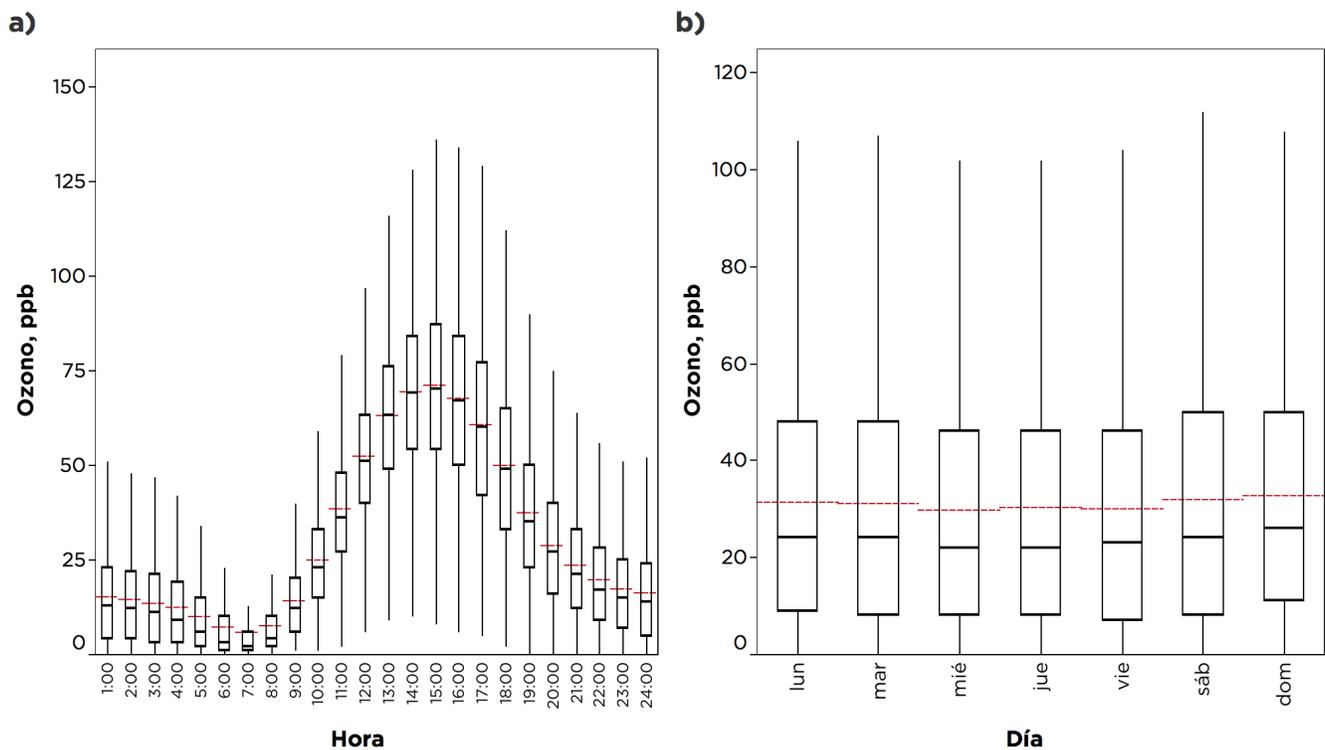


Figura 3.20. Variabilidad horaria (a) y por día de la semana (b) de la concentración de ozono.

La variabilidad diurna del ozono se caracterizó por una concentración máxima entre las 14:00 y 16:00, que correspondió al periodo en el que la actividad fotoquímica alcanza su máximo. Mientras que la concentración mínima se observó alrededor de las 7:00 cuando las emisiones vehiculares frescas reaccionan con el ozono remanente. En las estaciones ubicadas en la región montañosa se observaron concentraciones nocturnas elevadas, las cuales pueden ser atribuidas a las contribuciones del ozono residual de origen diurno y de la concentración natural de fondo, como se describe en el informe anual de 2016 (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2017)

La distribución por día de la semana (ver Figura 3.20b) muestra mayores concentraciones el fin de semana (sábado y domingo), que durante los días laborables (lunes a viernes). Tanto la concentración promedio, como los máximos son mayores en sábado y domingo en comparación con el resto de la semana, con diferencias estadísticamente significativas. Este fenómeno se ha observado en otras ciudades con problemas de contaminación por ozono, en donde el régimen de producción es sensible a compuestos orgánicos volátiles y se conoce como *efecto de fin de semana* (Stephens et al., 2008). Este efecto se identificó principalmente en las estaciones que se encuentran dentro del área urbana. En las estaciones ubicadas en la periferia el efecto es menor o está ausente, en ellas no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para los diferentes días de la semana. La variación semanal en las estaciones urbanas fue inversa a la que se observó entre los contaminantes primarios, en donde las concentraciones fueron menores el fin de semana.

En el mapa de la Figura 3.21 se indica el número de horas en las que se superó el valor horario de la NOM-020-SSA1-2014 en las diferentes estaciones de monitoreo. Como se puede observar, las estaciones del sur y sureste registraron el mayor número de horas con concentraciones >0.095 ppm (95 ppb). Las estaciones Pedregal (PED) y Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) registraron un total de 388 horas. Las estaciones con el menor número de horas por debajo de la concentración límite de la norma son las que se ubicaron al norte de la zona metropolitana. La estación Villa de las Flores (VIF),

en el municipio de Coacalco de Berriozábal, reportó 28 horas con concentraciones >95 ppb durante el año, mientras que la estación Nezahualcóyotl (NEZ), ubicada en el municipio del mismo nombre, solo reportó tres horas mayores a la NOM, lamentablemente tuvo una captura de datos menor al 75% de los datos esperados. En el caso del promedio móvil de 8 horas de la NOM que fija la concentración límite en 0.070 ppm (70 ppb), el mayor número de horas se observó en las estaciones localizadas al sur y sureste de la Ciudad de México, con un máximo en Milpa Alta (MPA) de 1021 horas, seguida de Ajusco Medio (AJM) con 975 horas. Es importante mencionar que el número de horas para el promedio móvil de 8 horas fue mayor que para el promedio de 1 hora, debido a que la forma del estándar requiere el uso de promedios móviles, en donde un valor extremo de concentración afecta el bloque de datos en los que se encuentre incluido, entonces, un valor extremo puede afectar el promedio móvil reportado para periodos superiores a una hora.

Este año se destacan dos aspectos interesantes del monitoreo de ozono. El primero es el caso de la estación Gustavo A. Madero (GAM), ubicada en las instalaciones de la Escuela Nacional Preparatoria no.3 *Justo Sierra* en la delegación Gustavo A. Madero al noreste de la ciudad, ya que desde su instalación se han registrado valores elevados similares a los observados en las estaciones del sur de la ciudad. Durante los eventos en los que la concentración de ozono superó el umbral de activación de la Fase de Contingencia, generalmente se observó un rápido incremento en esa estación. Aún se desconoce la razón por la cual las concentraciones de ozono son elevadas en esa zona, lo que requerirá de mediciones con instrumentos adicionales para determinar las características de la química atmosférica. Por otra parte, en la estación Merced (MER) se ha identificado que las concentraciones de ozono son significativamente menores a las registradas en las estaciones que la rodean, esto se puede explicar por una posible *titulación* del ozono por las emisiones frescas de óxidos de nitrógeno generadas por la gran cantidad de vehículos que circulan en los alrededores. Es recomendable que en las evaluaciones futuras de la estación se analice el impacto de estas emisiones en las concentraciones de ozono.

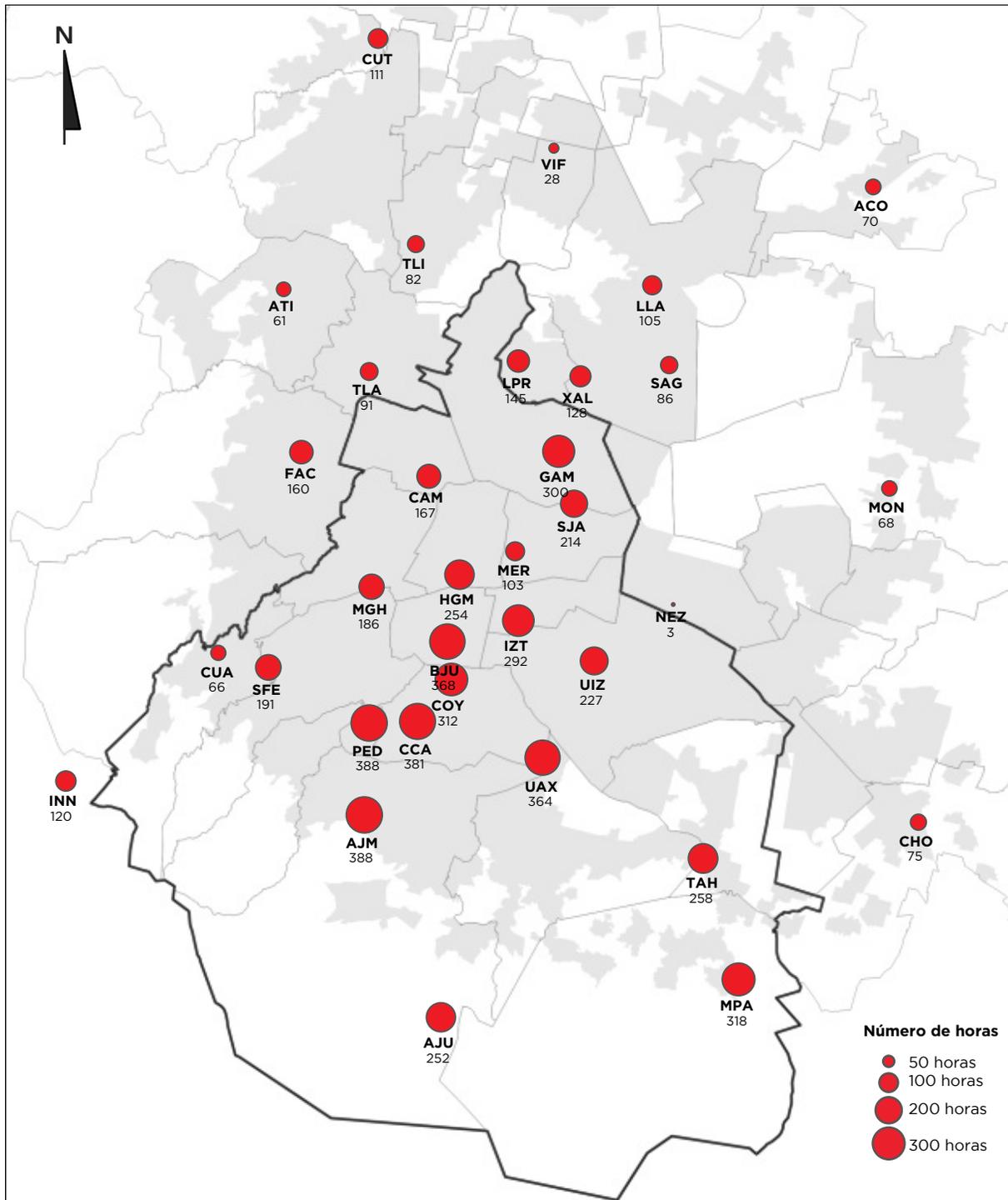


Figura 3.21. Número de horas con concentraciones de ozono mayores al valor de la NOM-020-SSA1-2014 para el promedio de 1 hora (>95 ppb), por estación de monitoreo. El tamaño del círculo es proporcional al número de horas. En cada estación se indica la clave y el número total de horas.

Partículas suspendidas

Los promedios anuales de las concentraciones de las diferentes fracciones de partículas que se miden de manera continua en la RAMA fueron 47, 23 y 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , $\text{PM}_{10-2.5}$ y $\text{PM}_{2.5}$, respectivamente. Comparativamente fueron menores a las reportadas en 2013 que registró promedios de 49, 26 y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente; pero mayores a los observados en 2016 con 43, 20 y 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El mayor incremento en la concentración de PM_{10} se observó en las estaciones localizadas en la zona conurbada del Estado de México, ya que los promedios para la Ciudad de México fueron similares a los de 2016 con 38, 17 y 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. La diferencia en las concentraciones entre la Ciudad de México y la zona conurbada del Estado de México se debe a la presencia de una mayor cantidad de fuentes de emisiones primarias en esta última. La estación Xalostoc (XAL), localizada en el corredor industrial en el municipio de Ecatepec de Morelos, registró el promedio anual máximo para PM_{10} con 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, así como las concentraciones máximas para el promedio de 24 horas con valores de 229 y 227 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ los días 6 de enero y 14 de diciembre, respectivamente. Ambas fueron 3 veces más altas que el valor límite de la NOM-025-SSA1-2014 para el promedio de 24 horas de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y fueron responsables de la activación de la Fase I de Contingencia Ambiental Atmosférica. Los detalles de estos eventos se presentan en la Sección 4 correspondiente al Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas. En la Ciudad de México, la estación Hospital General de México (HGM) registró el promedio anual máximo de 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la concentración máxima de 24 horas con 105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 14 de diciembre. En el caso de las fracciones $\text{PM}_{10-2.5}$ y $\text{PM}_{2.5}$ los promedios anuales máximos se registraron también en las estaciones XAL y HGM con 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{10-2.5}$, y 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$, respectivamente.

En las Figuras 3.22a-c se muestran las series de tiempo para las tres fracciones de las partículas suspendidas. Al igual que en años previos, se observó una marcada estacionalidad en las concentraciones de las tres fracciones, con las menores concentraciones durante la temporada lluviosa y mayores en la temporada seca. En los meses fríos de la temporada seca los niveles de partículas generalmente

incrementan como consecuencia de un aumento en las condiciones de estabilidad atmosférica y la disminución de la altura de capa de mezclado, mientras que durante los meses más calientes de la temporada seca, el incremento en la concentración de partículas suele producirse por una mayor actividad fotoquímica en la atmósfera que contribuye a una mayor producción de aerosoles secundarios. Los promedios mensuales máximos de PM_{10} se presentaron en diciembre y enero con valores de 68 y 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, destacó un aumento en mayo con un valor promedio de 57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso de $\text{PM}_{2.5}$ el promedio mensual máximo se observó en mayo y diciembre con valores de 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los promedios mensuales mínimos para PM_{10} se presentaron en agosto y septiembre con un valor de 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para $\text{PM}_{2.5}$ el menor promedio mensual se registró en septiembre con 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las variaciones horaria y por día de la semana se presentan en la Figura 3.23. Como se ha observado en años previos, el ciclo diurno de las fracciones PM_{10} y $\text{PM}_{10-2.5}$ en la mayoría de las estaciones se caracterizó por dos picos de concentración, el primero entre las 8:00 y 9:00, y el segundo alrededor de las 19:00. Ambos dominados por las contribuciones provenientes de las emisiones vehiculares, en donde destacan la suspensión de polvos y las emisiones primarias del escape (p. ej., carbono negro). Por la tarde, el polvo levantado por el viento tuvo una aportación adicional, principalmente en la fracción gruesa. En las estaciones localizadas en zonas con patrones distintos en el tránsito vehicular (p. ej., Benito Juárez, Hospital General de México) o en áreas impactadas por el acarreo de contaminantes por el viento (p. ej., Ajusco Medio, Milpa Alta, Santa Fe) este perfil fue diferente y se caracterizó por menores concentraciones en el pico vespertino. En el caso de $\text{PM}_{2.5}$, el perfil promedio se caracterizó por un pico único entre las 10:00 y las 12:00, el cual estuvo asociado principalmente a la formación secundaria de aerosoles inorgánicos (como los nitratos y sulfatos) y orgánicos (principalmente compuestos de baja presión de vapor con diversos grados de oxidación). En algunas estaciones como Xalostoc (XAL), que está dominada por las emisiones primarias provenientes principalmente de vehículos, el pico de concentración se observó a las 9:00; mientras que en Ajusco Medio

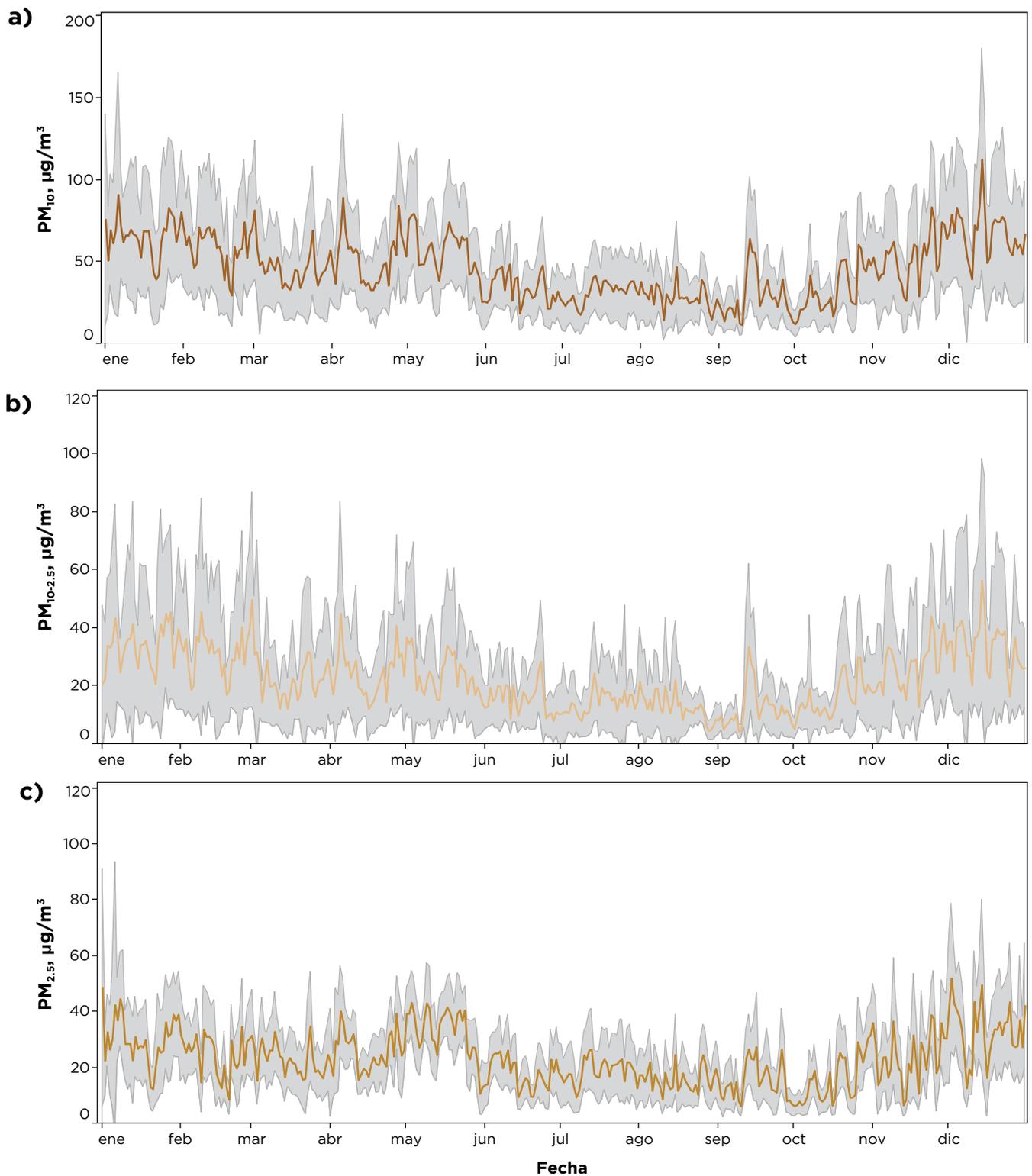


Figura 3.22. Serie de tiempo para los promedios diarios de PM_{10} (a), $PM_{10-2.5}$ (b) y $PM_{2.5}$ (c). La línea continua en cada serie corresponde al promedio aritmético diario para todas las estaciones, la región sombreada en gris corresponde a una desviación estándar alrededor del promedio.

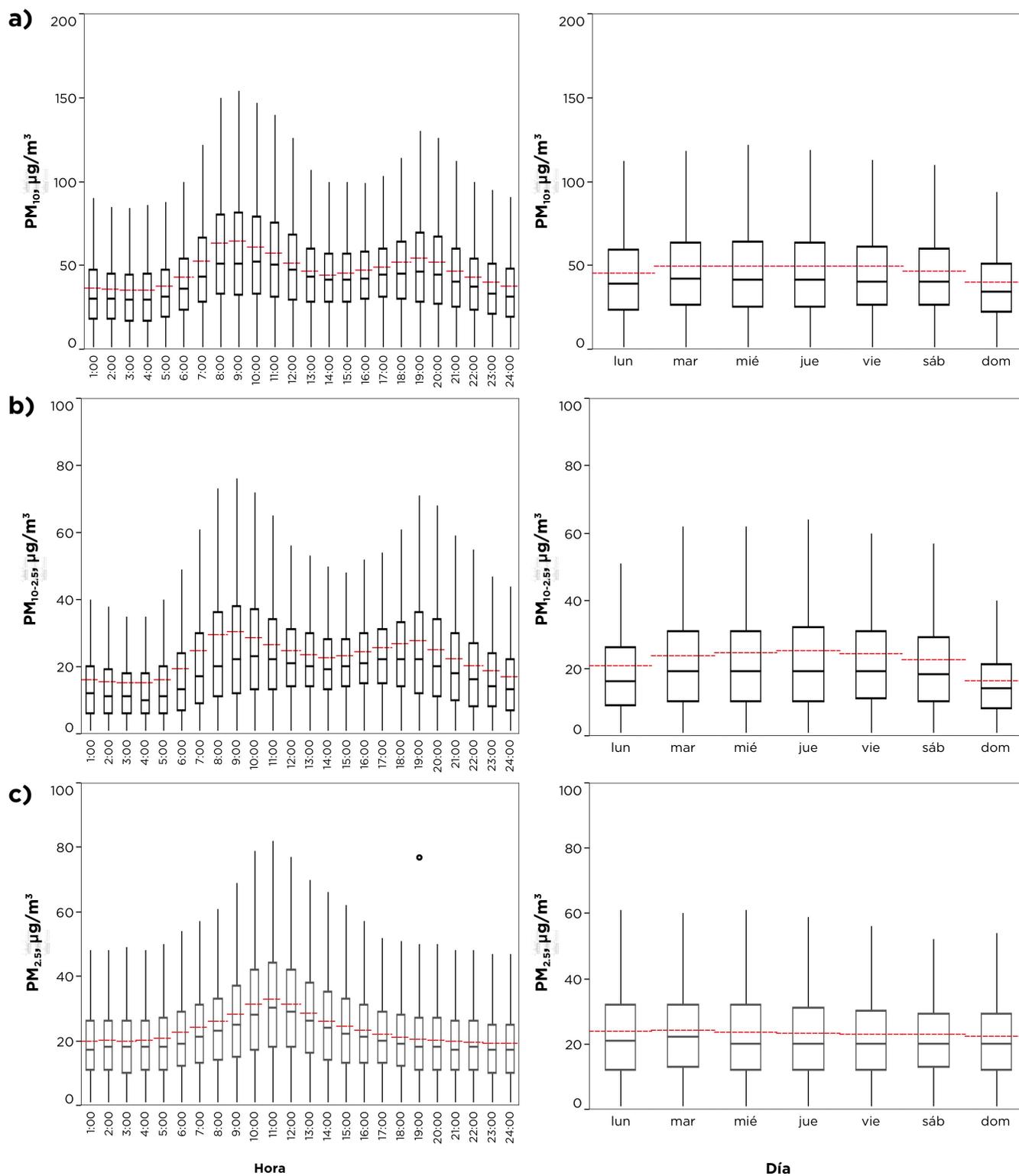


Figura 3.23. Variabilidad horaria (izquierda) y por día de la semana (derecha) de las concentraciones horarias de PM₁₀ (a), PM_{10-2.5} (b) y PM_{2.5} (c). La línea roja indica el promedio aritmético.

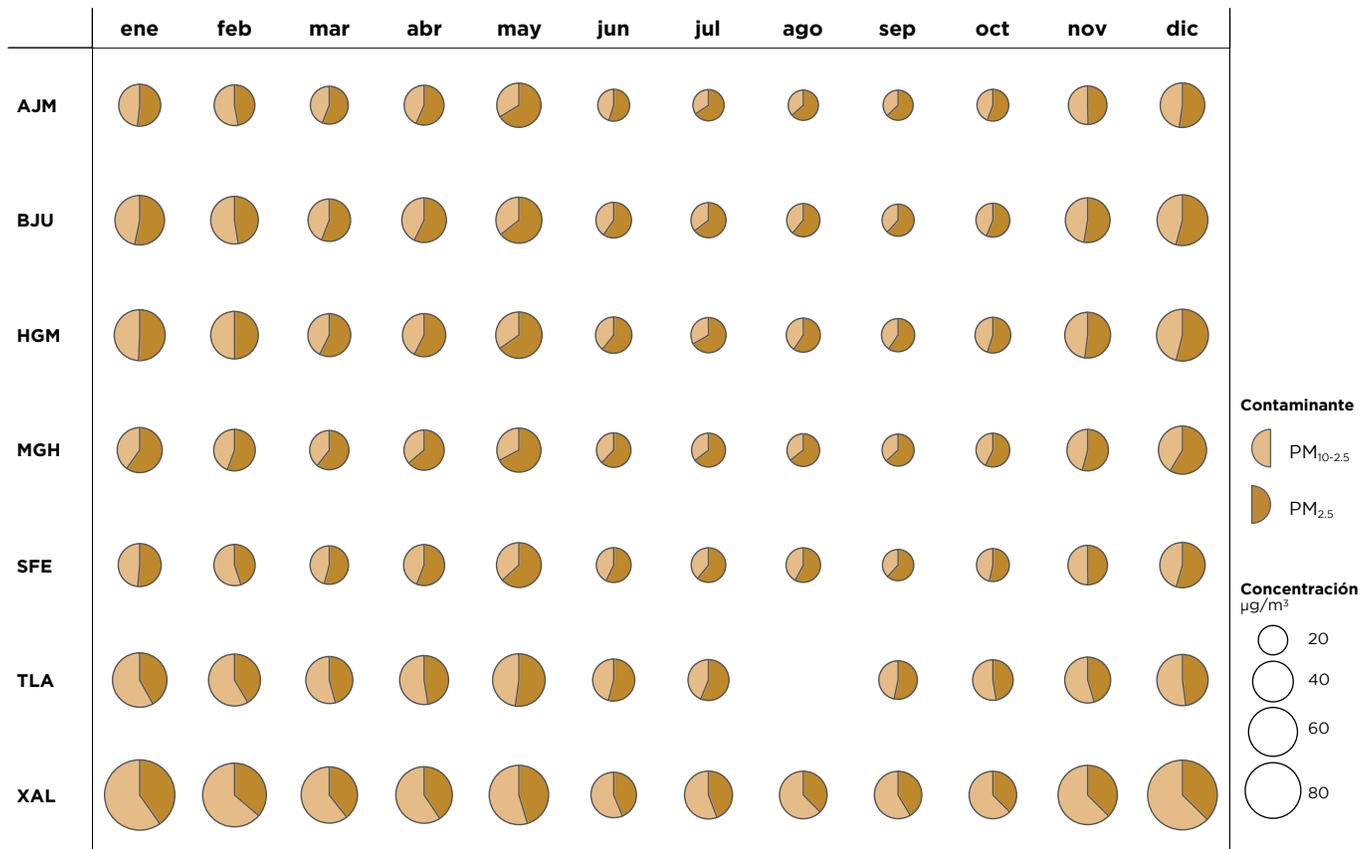


Figura 3.24. Variabilidad mensual de las contribuciones de las fracciones gruesa ($PM_{10-2.5}$) y fina ($PM_{2.5}$) a la concentración total de PM_{10} en las diferentes estaciones de monitoreo de la RAMA.

(AJM), dominada por la contribución secundaria, el pico se observó entre las 13:00 y las 14:00. En las estaciones donde la principal fuente es el acarreo por el viento desde zonas más contaminadas (p. ej., Ajusco, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares), el pico se presentó generalmente durante la tarde.

Con respecto a los días de la semana, las concentraciones de PM_{10} y $PM_{10-2.5}$ mostraron un perfil similar al de los contaminantes gaseosos monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, con concentraciones máximas durante los días laborables y mínimas en fin de semana. Lo anterior se puede explicar por las contribuciones de fuentes comunes a estos contaminantes. Mientras que en el caso de $PM_{2.5}$, aun cuando las concentraciones fueron similares para los diferentes días de la semana, se observaron diferencias estadísticamente significativas en la mayoría de las estaciones de monitoreo. La mayor

concentración promedio se registró el lunes y martes, mientras que la menor se presentó el domingo. El comportamiento de las $PM_{2.5}$ observado este año fue distinto al identificado comúnmente en años previos, en donde se evidenciaba un incremento gradual durante los días laborables.

La concentración de PM_{10} estuvo dominada por la masa de $PM_{2.5}$ en la mayoría de las estaciones de monitoreo en las que se realizó la medición simultánea de las tres fracciones. La contribución promedio de las fracciones gruesa ($PM_{10-2.5}$) y fina ($PM_{2.5}$) a la concentración de PM_{10} fue de 49 y 51%, respectivamente. La contribución de $PM_{2.5}$ a la masa total de PM_{10} fue ligeramente menor a la observada en 2016 cuando reportó 54%. Se observaron dos periodos en los que la contribución de $PM_{2.5}$ fue mayor: durante la temporada seca caliente, por la formación de aerosoles secundarios durante el día; y en la temporada de lluvia, cuando la humedad del

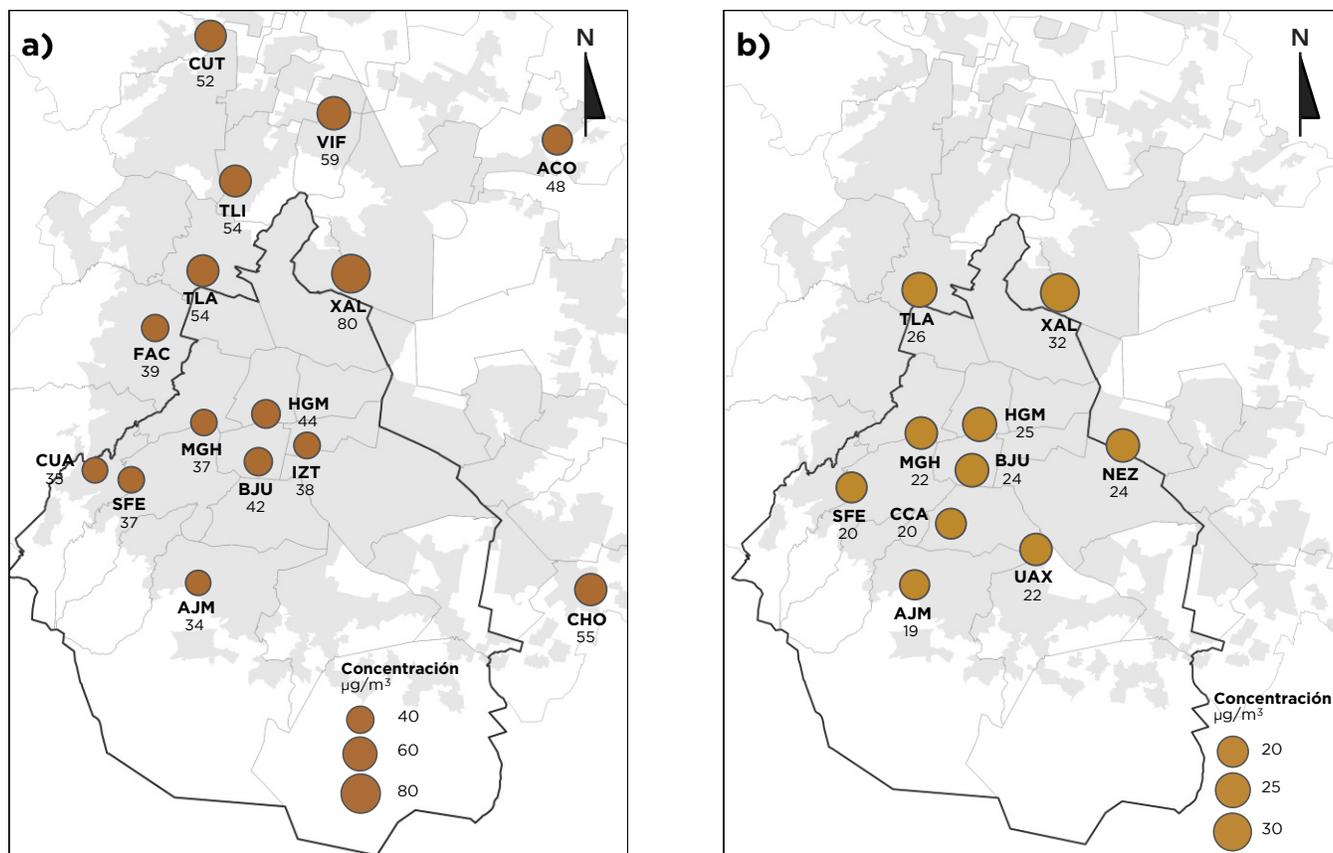


Figura 3.25. Promedio anual de la concentración de PM₁₀ (a) y PM_{2.5} (b) en las estaciones de la RAMA que tuvieron suficiencia durante 2017.

suelo y la lluvia tienden a remover de la atmósfera las partículas gruesas. En la Figura 3.24 se presentan las contribuciones promedio de las fracciones gruesa y fina a las concentraciones totales de PM₁₀ para cada una de las estaciones de monitoreo, por mes. En términos generales, las estaciones ubicadas al sur de la Ciudad de México tienen una mayor aportación de la fracción fina, mientras que en las estaciones ubicadas al norte (p. ej., Xalostoc) la contribución de la fracción gruesa fue mayor.

En la Figura 3.25 se muestra la distribución espacial de las concentraciones promedio anual de PM₁₀ (a) y PM_{2.5} (b). En términos generales las estaciones ubicadas en la zona conurbada del Estado de México registraron los mayores promedios de PM₁₀, con un máximo en Xalostoc (XAL) de 80 µg/m³, seguida de Villa de las Flores (VIF) con 59 µg/m³. Mientras que los menores promedios anuales se observaron al sur de la Ciudad de México, con un mínimo de 34

µg/m³ en la estación de Ajusco Medio (AJM). En el caso de PM_{2.5}, la cobertura de la RAMA está limitada principalmente al territorio de la Ciudad de México, sin embargo, se cuenta con mediciones en algunas estaciones cercanas. Los promedios del año en las estaciones de la Ciudad de México estuvieron en el intervalo de 19 a 25 µg/m³, que contrasta con el promedio de 32 µg/m³ reportado por la estación Xalostoc (XAL). Al igual que en el caso de PM₁₀ el valor mínimo se registró en la estación Ajusco Medio (AJM) con 19 µg/m³.

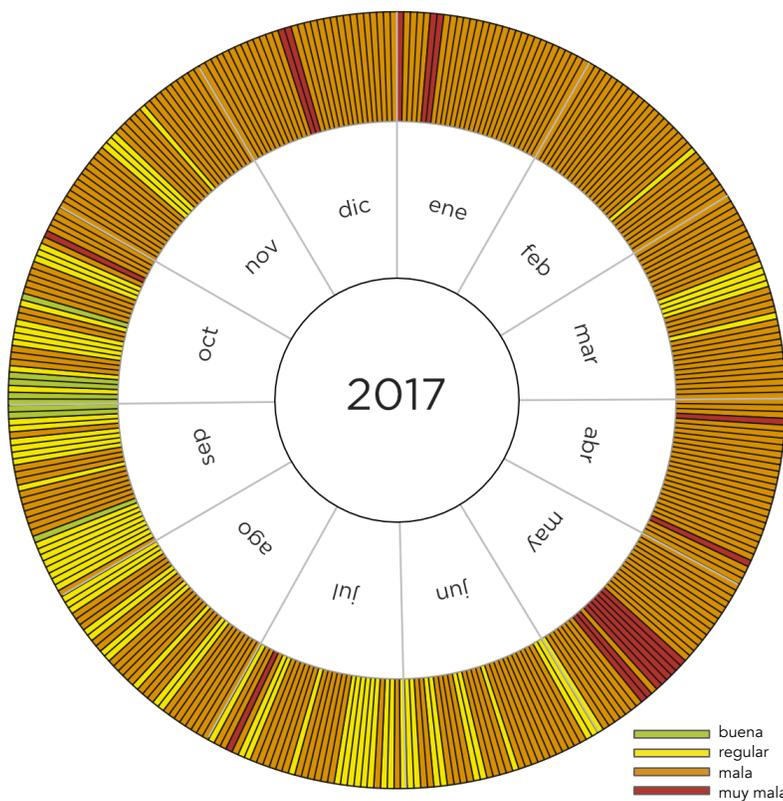
Por la importancia de los efectos que tienen las partículas en la salud humana, la visibilidad y el clima, en el futuro será necesario ampliar la cobertura del monitoreo a otras zonas del área conurbada del Estado de México, así como a zonas de la ciudad en donde se esperaría un mayor impacto de las contribuciones secundarias por el transporte de contaminantes.

Índice de calidad del aire

Con respecto al Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), que es la herramienta para informar a la población sobre el estado de la calidad del aire, se observó que al igual que como ha ocurrido en los últimos años, solo tres contaminantes alcanzaron concentraciones que implicaban un mayor riesgo para la salud, con categorías MALA o MUY MALA en la escala del índice: ozono, PM₁₀ y PM_{2.5}. De acuerdo con la metodología para el cálculo y reporte del índice se utilizó el valor máximo del día sin importar en que estación ocurrió, si bien esto no toma en cuenta la distribución espacial del contaminante, la duración del evento, ni los posibles efectos sinérgicos, sí tiene un carácter preventivo al mantener una situación de alerta para la región. Por ejemplo, si una estación registra una calidad del aire MALA o MUY MALA, el reporte del índice indica que esta situación para la ciudad sin mencionar el número de estaciones en las que se presenta o si el valor deriva de un promedio de una hora o 24

horas. Es un reto crear e implementar un índice que refleje el comportamiento espacial, el tipo de contaminantes y el riesgo potencial por grupo de población. No se descarta que en revisiones futuras pudiera diseñarse un índice capaz de tomar en cuenta las características temporales y espaciales de los contaminantes, así como su potencial de riesgo para la salud.

Durante 2017 se registraron 76 días con una calidad del aire en donde las concentraciones fueron ≤100 puntos en el índice para todos los contaminantes (Figura 3.26). Un total de 289 días registraron concentraciones máximas >100 puntos en el índice para uno o más contaminantes, de estos, en 273 días la calidad del aire fue MALA y en 16 MUY MALA. A diferencia del año previo, no se registraron concentraciones máximas con una calidad del aire EXTREMADAMENTE MALA. En 233 días el ozono superó los 100 puntos, mientras que PM₁₀ los superó en 207 y PM_{2.5} en 100 días.



De los días en los que observó una calidad del aire desfavorable, 82 correspondieron únicamente a ozono y 37 a PM₁₀, mientras que en 70 días la calidad del aire fue MALA por ozono y PM₁₀, 19 por la combinación de PM₁₀ y PM_{2.5}, y en 81 días las concentraciones de los tres contaminantes ozono, PM₁₀ y PM_{2.5} fueron mayores a los 100 puntos en el índice.

En la Figura 3.27 se muestran las series de tiempo con los valores máximos en el índice para ozono (a), PM₁₀ (b) y PM_{2.5} (c). En el caso de ozono, durante la mayor parte del año se observó una calidad del aire MALA, con los mayores niveles durante la temporada de ozono, cuando también se registró la mayoría de los días con una calidad EXTREMADAMENTE MALA. En el caso de PM₁₀ y PM_{2.5} la mayoría de los días con una calidad del aire favorable (BUENA a REGULAR) se concentraron en la temporada de lluvia. Los días en los que la concentración de estas fracciones de partículas alcanzaron la categoría de EXTREMADAMENTE MALA se presentaron entre enero y diciembre.

Figura 3.26. Calidad del aire por categoría del índice Metropolitano de la Calidad del Aire durante 2017.

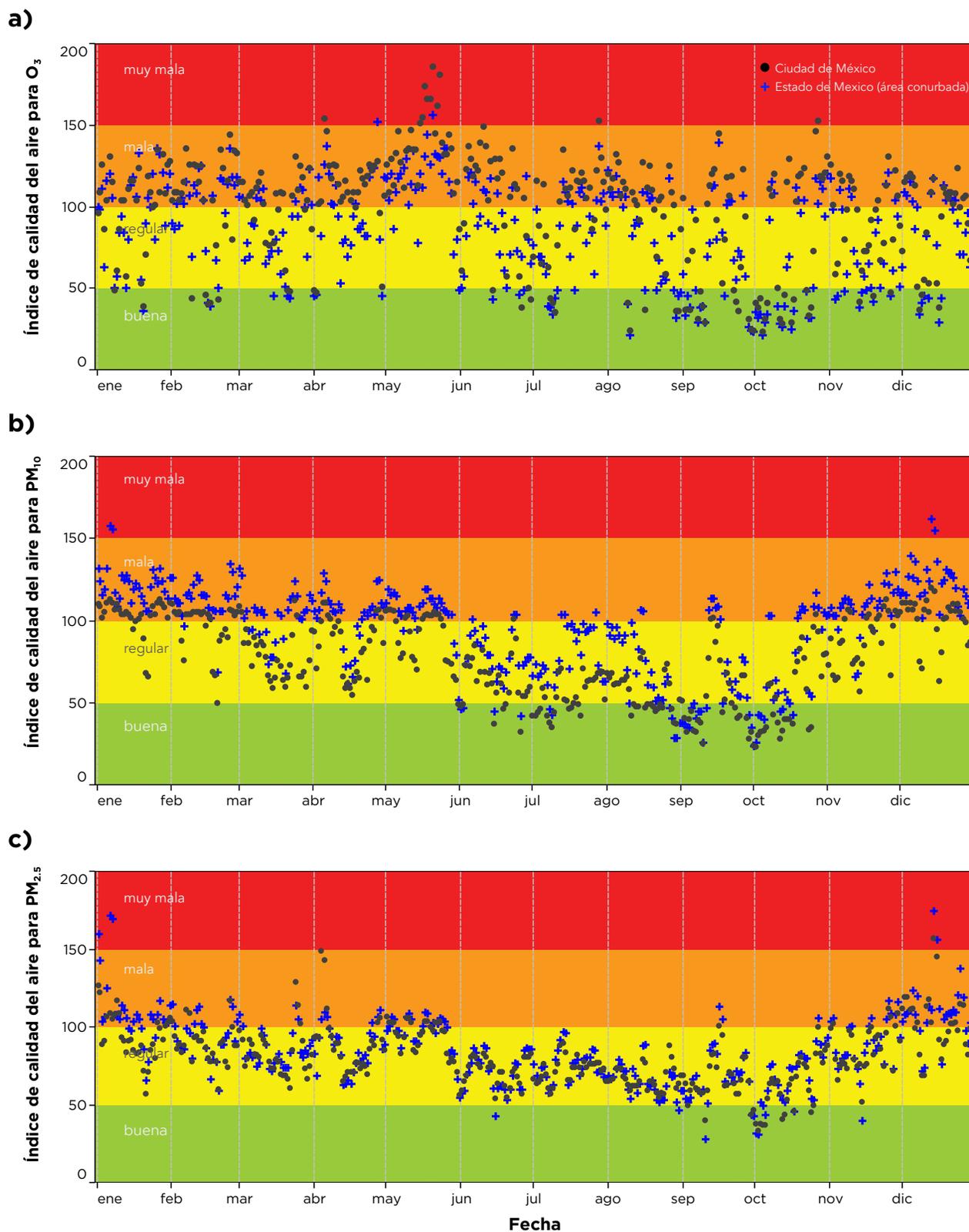


Figura 3.27. Máximos del índice de calidad del aire para ozono (a), PM_{10} (b) y $PM_{2.5}$ (c), diferenciados por entidad.

Carbono negro

La concentración promedio del carbono negro equivalente (CNe) determinado en las muestras de 24 horas de $PM_{2.5}$ fue de $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (mediana= $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Este promedio fue mayor al registrado en 2016 de $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Como se puede observar en la Figura 3.28a, el mayor promedio anual se registró en la estación Xalostoc (XAL), en la que también se registraron las mayores concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, con un valor de $5.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, este sitio registró también la concentración máxima para el promedio de 24 horas con $21.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 1 de enero, asociado a las actividades de quema de juegos de pirotecnia y fogatas durante las festividades del Año Nuevo. La estación Pedregal (PED), localizada en la delegación Alvaro Obregón al sur de la Ciudad de México, reportó el menor promedio anual con un valor de $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El análisis de CNe se realizó como se describe en la sección correspondiente del Informe 2015 (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2016).

Las Figura 3.29a y 3.29b presentan las series de tiempo de los promedios de 24 horas de las con-

centraciones de CNe y de $PM_{2.5}$ en las estaciones de monitoreo de la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA). En promedio la fracción de CNe contribuyó con un 12% a la concentración total de $PM_{2.5}$, el mayor aporte se observó en la estación Xalostoc con un promedio de 17%, mientras que la menor contribución se observó en Pedregal (PED) con un valor de 9% (ver Figuras 3.26b y 3.27c).

De acuerdo con el inventario de emisiones la fuente más importante de CNe en la Ciudad de México y su área metropolitana son los motores de combustión interna (Secretaría del Medio Ambiente, 2018) tanto a *diesel* como a gasolina, así como la quema de biomasa durante la temporada seca (Tzompa-Sosa *et al.*, 2016). La quema de residuos, los incendios dentro del área urbana y las fogatas pueden emitir grandes cantidades de carbono negro en periodos cortos de tiempo (minutos a horas), pero con un impacto menor en el promedio anual. Como se muestra en la Figura 3.29 se encontró una fuerte asociación entre las concentraciones promedio de 24 horas de monóxido de carbono y de óxidos de nitrógeno con el CNe ($R^2=0.74$ y 0.76 , respectivamente), confirmando su principal origen en

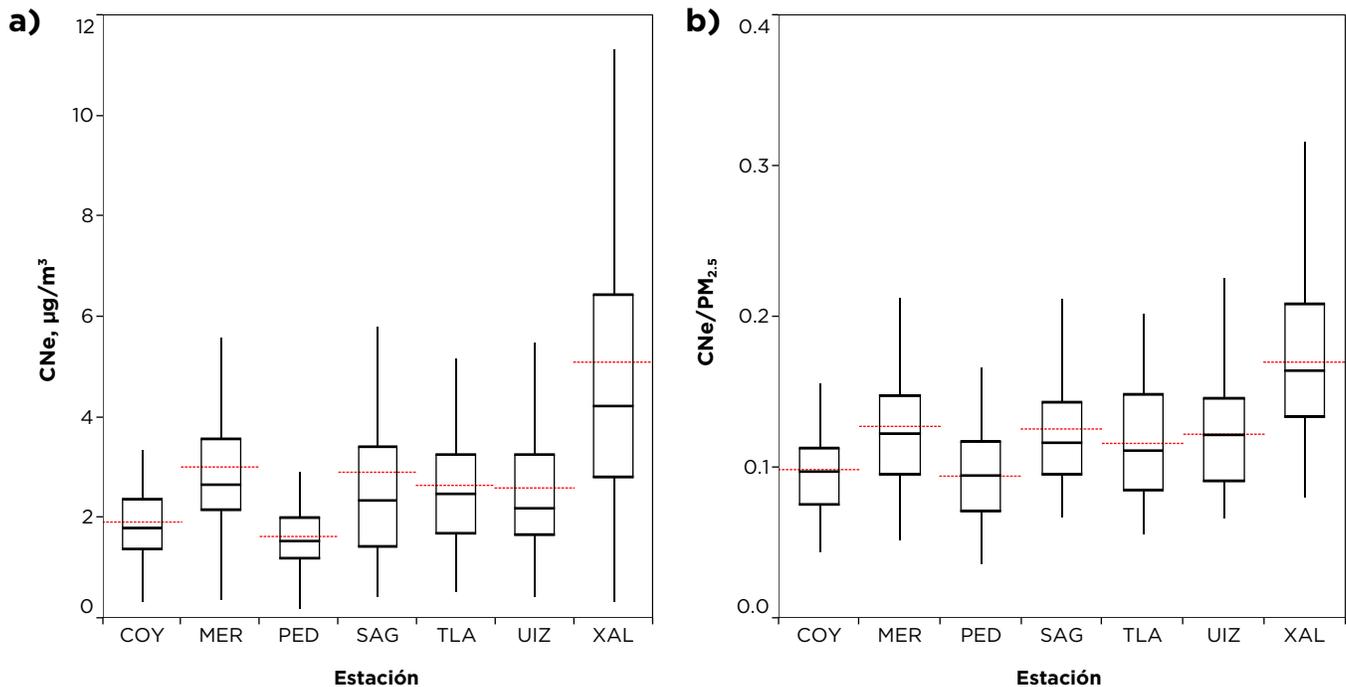


Figura 3.28. Distribución de las concentraciones de 24 horas de CNe (a) y de la proporción de CNe en $PM_{2.5}$ (b) por sitio de monitoreo. La línea roja corresponde al promedio aritmético.

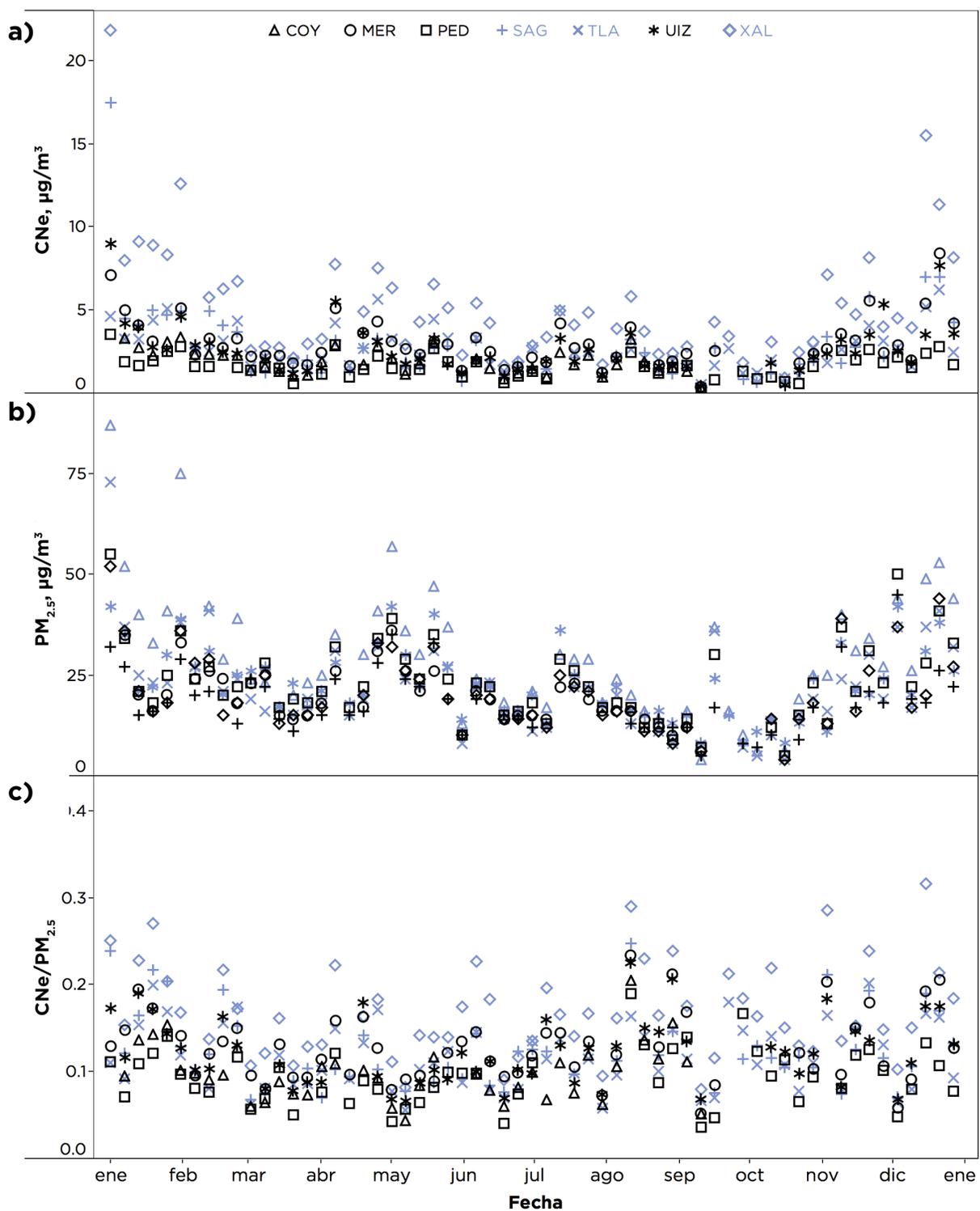


Figura 3.29. Promedio de 24 horas de la concentración de CNe (a), $\text{PM}_{2.5}$ manual (b) y la proporción de CNe en $\text{PM}_{2.5}$ (c), por estación de monitoreo. En el gráfico se indican las estaciones ubicada en la Ciudad de México en color negro y las ubicadas en la zona conurbada del Estado de México en color azul.

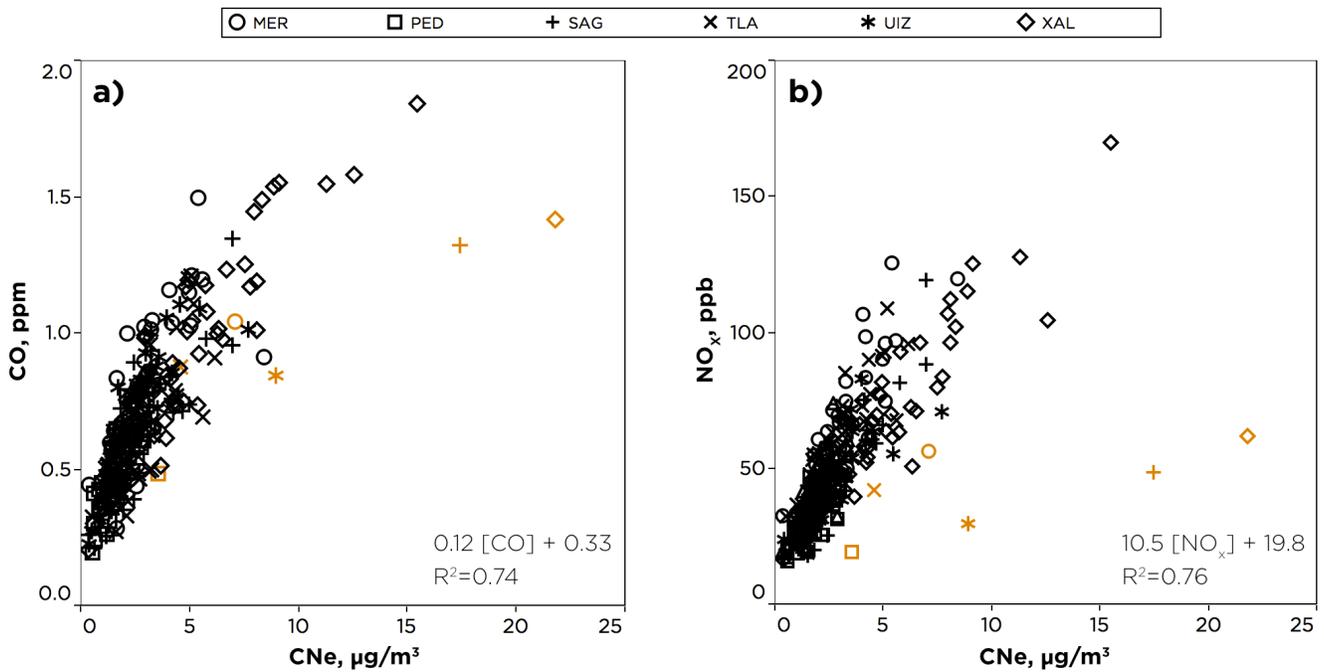


Figura 3.30. Correlación entre las concentraciones de CNe y el promedio de 24 horas de la concentración de monóxido de carbono (a) y de óxidos de nitrógeno (NO_x) para las diferentes estaciones de monitoreo. Los símbolos en color naranja corresponden a las muestras del 1 de enero de 2018.

las emisiones vehiculares. En la misma figura se puede ver algunos datos atípicos (los cuales se destacan en color naranja) y que correspondieron al 1 de enero. El cambio en la proporción del monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno con respecto al CNe fue indicio de una fuente distinta. Estas concentraciones elevadas de CNe fueron provocadas por el uso de juegos pirotécnicos y la quema de fogatas durante las celebraciones del Año Nuevo.

Con el propósito de identificar la presencia de otras fuentes de CNe y en el contexto de una de las campañas de monitoreo realizadas para la caracterización de aerosoles, se evaluó la posible contribución de la quema de biomasa aprovechando las mediciones de absorción de luz de diferentes longitudes de onda, las cuales pueden relacionarse con la composición de los aerosoles. Diversos estudios han demostrado que los compuestos orgánicos presentes en el humo proveniente de la quema de madera presentan una mayor absorción para longitudes de onda cercanas al ultravioleta, en comparación con la absorción en longitudes de onda correspondientes al infrarrojo (Fuller *et al.*, 2014; Harrison *et al.*, 2012). Se ha reportado que en ambientes

urbanos, en donde los vehículos son la principal fuente de emisiones de carbono negro, la absorción para longitudes de onda cercanas al ultravioleta es similar a la del infrarrojo. Aplicando el método del *aethalómetro* descrito por Sandradewi *et al.* (2008) se determinó la posible contribución de la quema de biomasa de origen regional en las concentraciones de CNe medidas en el norte de la Ciudad de México durante mayo. Como ya se mencionó, mayo se caracterizó por una anomalía positiva en la temperatura, además, durante las primeras semanas se presentó una corriente sinóptica desde el oeste que generó viento ligero a moderado del suroeste en el centro del país, predominando días despejados con baja humedad. En este periodo se observó la presencia de múltiples anomalías térmicas en el centro y sur del país (posiblemente quemadas agrícolas o incendios forestales), muchas de ellas en las entidades que rodean a la Ciudad de México, principalmente Michoacán, Guerrero, Morelos y Estado de México. Estudios previos han demostrado que estos incendios regionales pueden tener una aportación importante a las concentraciones de aerosoles y carbono negro en la Ciudad de México (Tzompa-Sosa *et al.*, 2016). En la Figura 3.31a se muestra una serie de tiempo que

indica las contribuciones de CNe provenientes de la quema de combustibles fósiles y de biomasa durante abril. Las aportaciones provenientes de la quema de biomasa fueron evidentes para los días 3 a 5 y 25 a 30 de abril. Mediante el análisis de trayectorias utilizando el modelo HYSPLIT (Stein et al., 2015), se estimaron las posibles trayectorias de las masas de aire las cuales se muestran en la Figura 3.31b. En este periodo se observó el arribo a la ciudad de masas de aire provenientes del oeste con trayectorias sobre áreas con potenciales incendios, sugiriendo un aporte de quema de biomasa a la

concentración de CNe. Estos resultados muestran que el modelo aethalómetro tiene potencial para realizar una evaluación cualitativa de la contribución de otras fuentes de carbono negro. La comparación de este método con trazadores específicos de quema de biomasa permitiría definir una relación cuantitativa de gran utilidad para conocer el aporte de fuentes regionales de carbono negro en tiempo real, pero también para identificar masas de aire que podrían contribuir a las concentraciones de precursores de ozono y de aerosoles originados en la quema de biomasa.

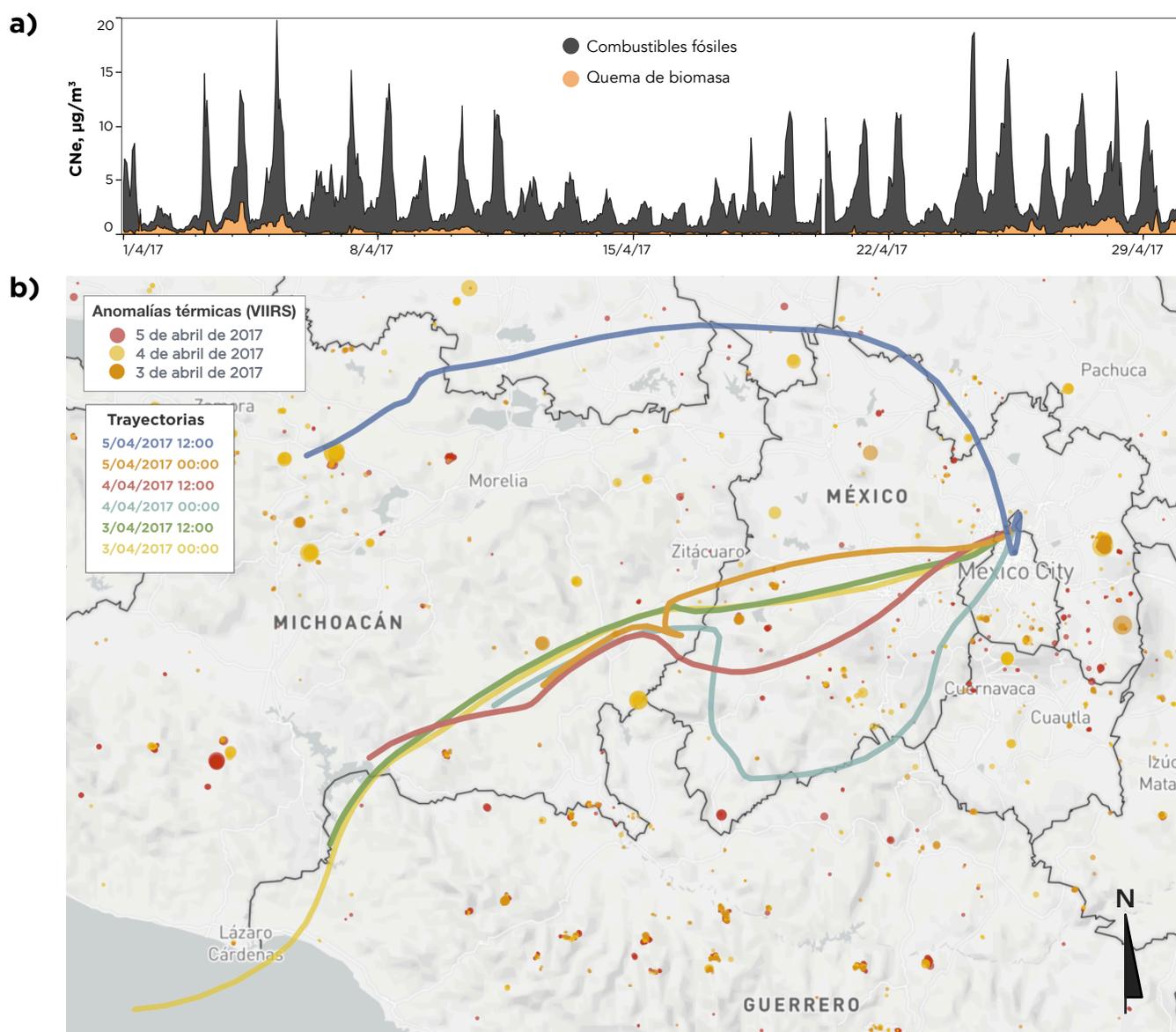


Figura 3.31. a) Contribuciones a la concentración de CNe de combustibles fósiles y quema de biomasa estimadas a partir de los datos del aethalómetro para mayo 2017. b) El mapa muestra las anomalías térmicas e intensidad obtenidas del sensor VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) así como las trayectorias de 36 horas de las masas de aire producidas con HYSPLIT cada 12 horas entre el 3 y 5 de abril.

Tendencias

Los cambios en los niveles de contaminación a lo largo del tiempo son el principal indicador para evaluar la eficacia de los programas y las políticas públicas para mejorar la calidad del aire, esta evolución temporal es descrita por la tendencia. En la Ciudad de México y su área metropolitana se mantiene una tendencia decreciente en los principales contaminantes desde la segunda mitad de la década de 1990, con grandes reducciones en los primeros años y una tasa de decremento moderado pero sostenido en la última década, lo cual es meritorio porque los niveles de contaminación continúan descendiendo a pesar del desarrollo de la ciudad y su área metropolitana. La comparación entre los promedios de 2013 con respecto a los resultados de 2017 indica reducciones del 26, 17, 4, 33, 4 y 9 % para dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente. Solo el promedio de las concentraciones máximas de ozono indicó un incremento de 1%.

En las Figuras 3.32 a 3.39 se presentan las series de tiempo con los promedios mensuales para el periodo comprendido entre enero de 1990 a diciembre de 2017 para dióxido de azufre, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno totales, dióxido de nitrógeno, ozono, PST, PM_{10} (manual) y $PM_{2.5}$ (manual), respectivamente. En todos los casos se observó una tendencia descendente en los 27 años que comprenden los gráficos. Para todos los contaminantes se identificó una fuerte variación estacional, con ciclos anuales determinados por el contraste meteorológico entre las temporadas seca y húmeda. Para los contaminantes primarios los picos se presentaron durante el invierno, mientras que en los contaminantes secundarios ocurrieron en la primavera, en todos los casos la parte baja de los ciclos correspondió con la temporada de lluvia.

En la última década la tasa de reducción en los niveles de contaminación fue menor que en las décadas previas, lo que dificulta la identificación de las variaciones atribuibles a las políticas de gestión, de aquellas atribuibles a las variaciones climáticas locales (p. ej., cambios en el régimen pluvial, isla de calor urbano), regionales (p. ej., cambios en los sistemas sinópticos) y globales (p. ej., Oscilación del Sur El Niño). En la Figura 3.40 se muestran las series

de tiempo a partir del año 2000 elaboradas con los datos provenientes de las estaciones que tienen mayoría de datos en ese periodo. En cada serie se muestra una línea de tendencia en la cual se ha removido la variación estacional a través de un análisis de series de tiempo, utilizando el método de descomposición de series de tiempo STL (siglas en inglés para *Seasonal-Trend decomposition procedure based on loess*) descrito por Cleveland *et al.* (1990). La línea de tendencia obtenida expone variaciones que no son obvias en la serie de tiempo original y que podrían estar relacionadas con eventos de mayor alcance temporal como los episodios de El Niño o con cambios importantes en la ciudad (p. ej., la construcción de los segundos pisos en la Ciudad de México y el Estado de México).

En la mayoría de los contaminantes mostrados en la Figura 3.40 es claro el patrón descendente, por ejemplo, en los casos de monóxido de carbono, dióxido de azufre o PST; mientras que en otros, como los óxidos de nitrógeno, ozono y $PM_{2.5}$, es difícil identificar algún cambio en el largo plazo además de las variaciones estacionales. Con el propósito de identificar la presencia de tendencias y su dirección se aplicó la prueba de Mann-Kendall a las series de tiempo (Gilbert, 1987). Esta prueba se emplea para detectar tendencias en series de datos ambientales, climatológicos o hidrológicos, en donde la hipótesis nula, H_0 , asume que los datos provienen de una población con muestreos independientes y distribuciones similares, es decir, no poseen una tendencia; la hipótesis alterna, H_A , indica la existencia de una tendencia (monótona). La prueba de Mann-Kendall se aplicó después de identificar la presencia o no de autocorrelación en las series de datos. Los resultados indicaron que las series de tiempo de 2000 y 2017 para ozono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, PST y PM_{10} la tendencia es decreciente. Mientras que para los óxidos de nitrógeno totales, dióxido de nitrógeno y $PM_{2.5}$ no se encontró evidencia estadísticamente significativa de una tendencia durante el periodo analizado. En los casos para los que se detectó tendencia se estimó el valor de la pendiente mediante la prueba de Sen (Sen, 1968; Gilbert, 1987). Los valores del estimador de la pendiente de Sen para ozono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, PST y PM_{10} fueron: -0.037, -0.005, -0.046, -0.506 y -0.119, respectivamente.

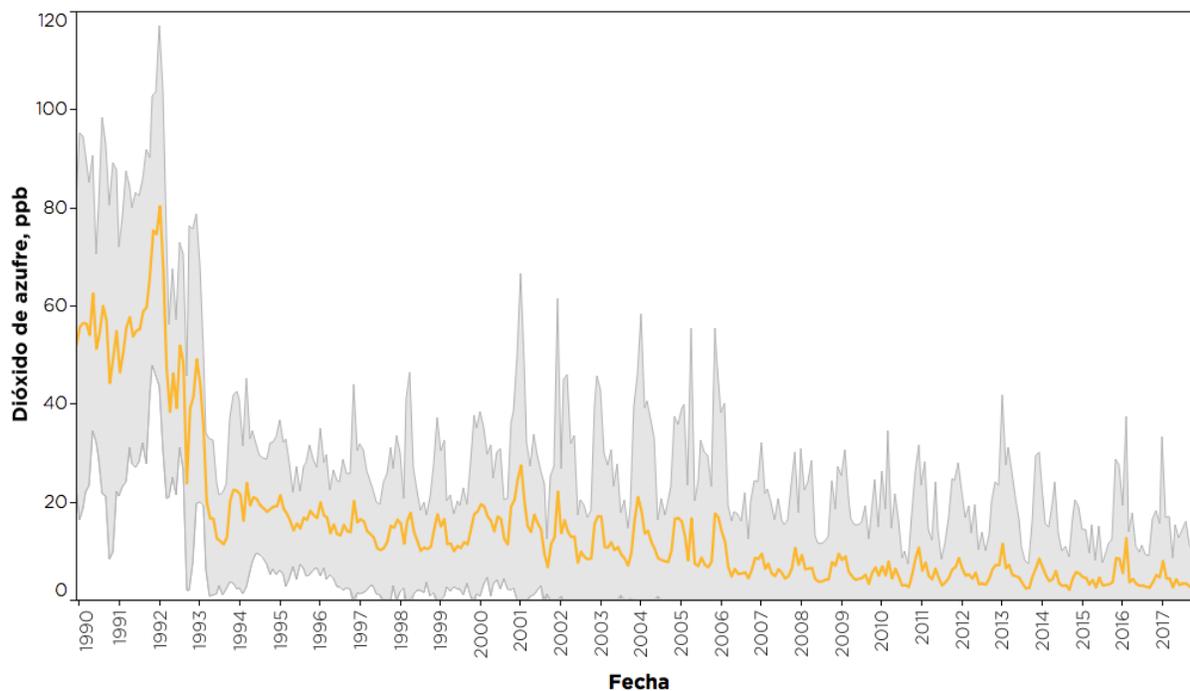


Figura 3.32. Serie de tiempo con los promedios mensuales de dióxido de azufre para el periodo 1990-2017. La línea amarilla corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio.

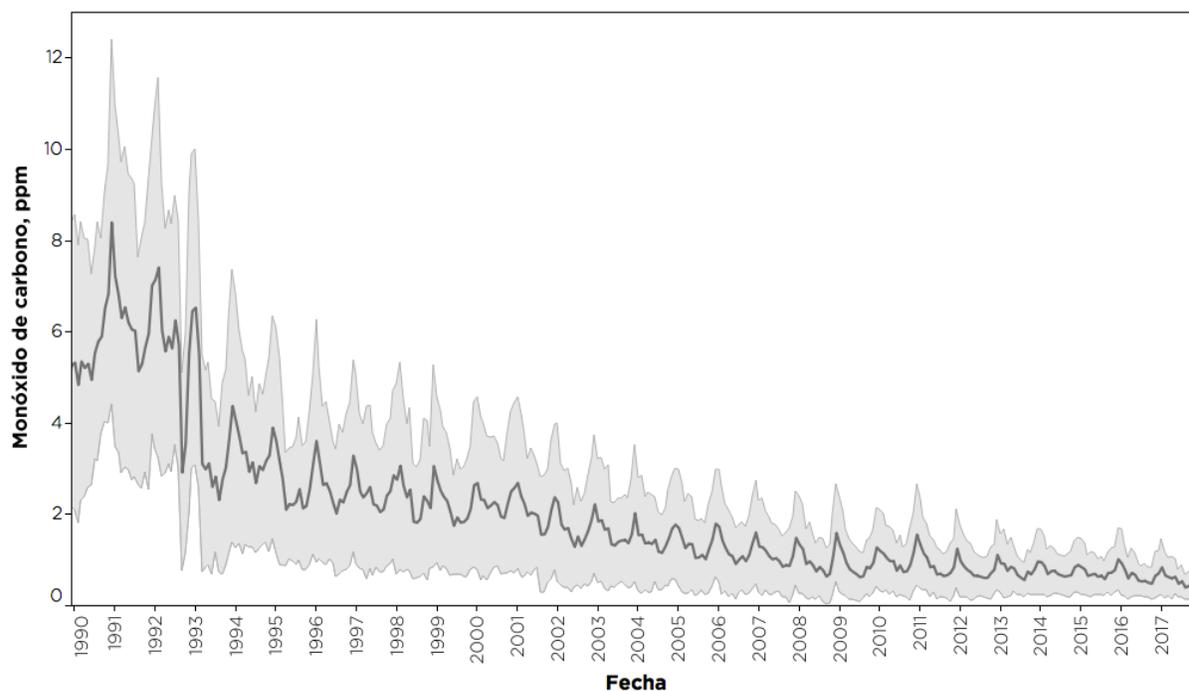


Figura 3.33. Serie de tiempo con los promedios mensuales de monóxido de carbono para el periodo 1990-2017. La línea gris oscuro corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio.

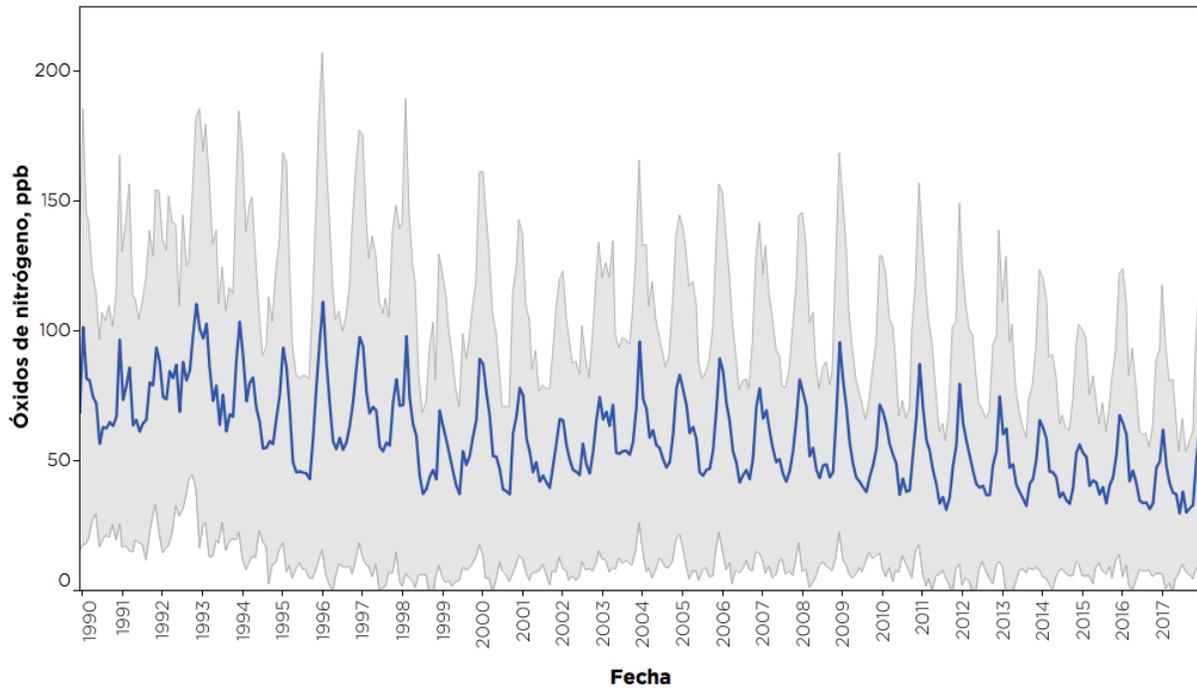


Figura 3.34. Serie de tiempo con los promedios mensuales de óxidos de nitrógeno para el periodo 1990-2017. La línea azul corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio.

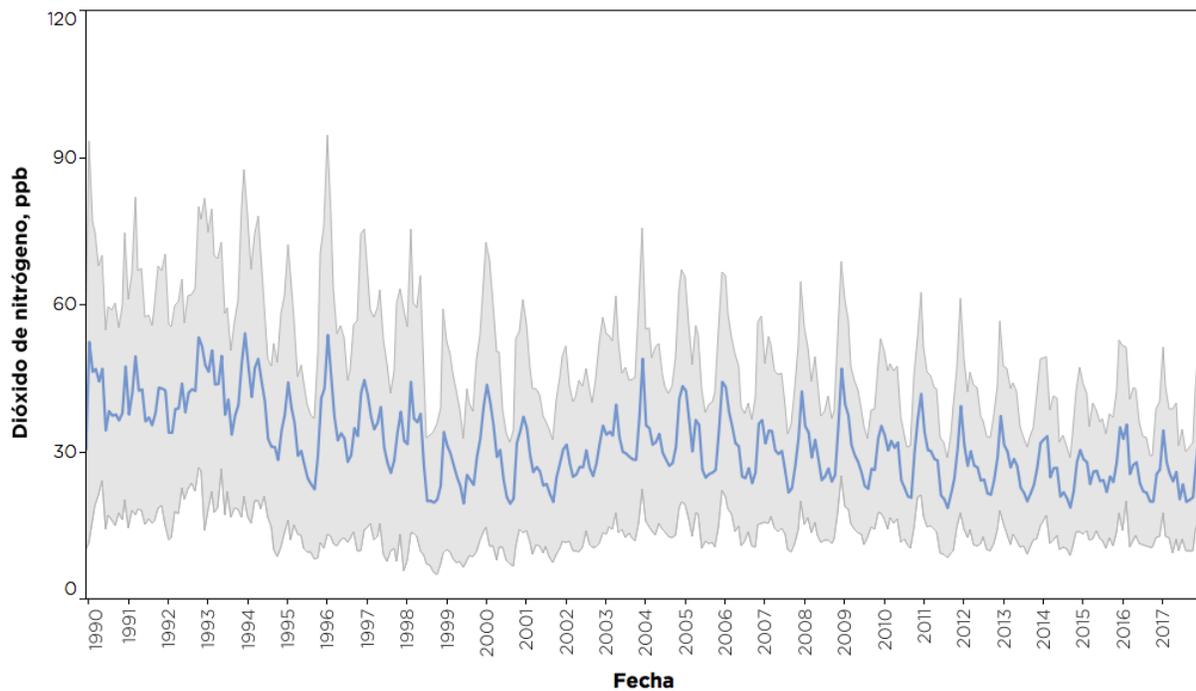


Figura 3.35. Serie de tiempo con los promedios mensuales de dióxido de nitrógeno para el periodo 1990-2017. La línea azul corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio.

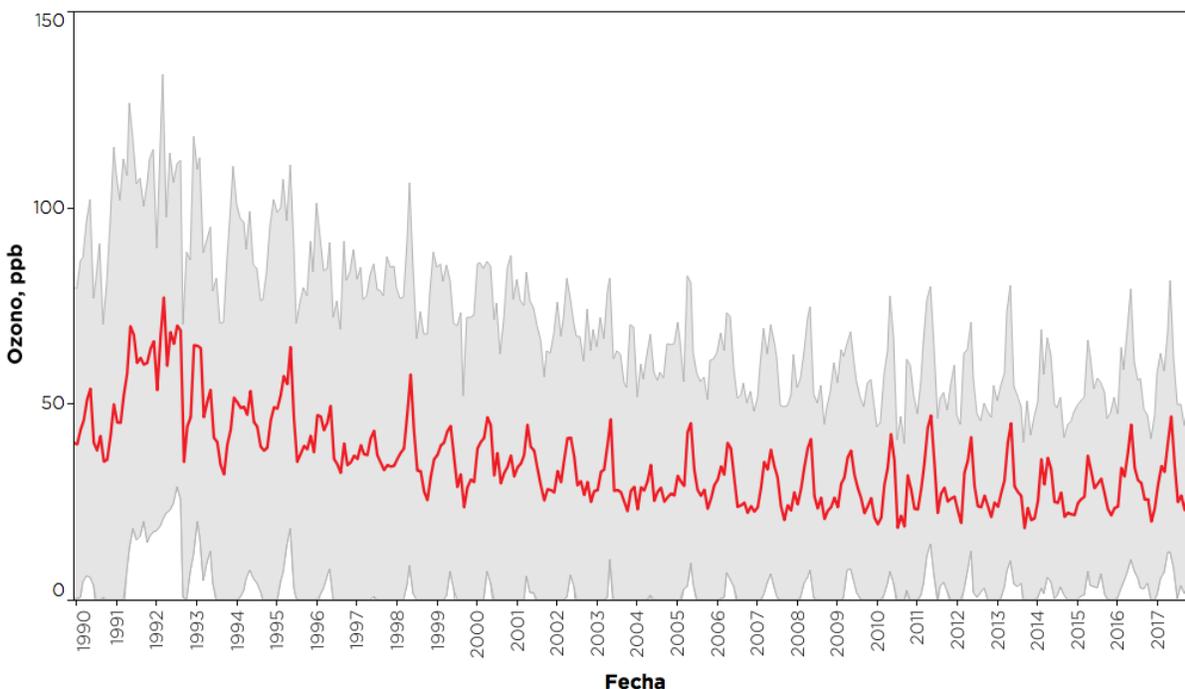


Figura 3.36. Serie de tiempo con los promedios mensuales de ozono para el periodo 1990-2017. La línea roja corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio.

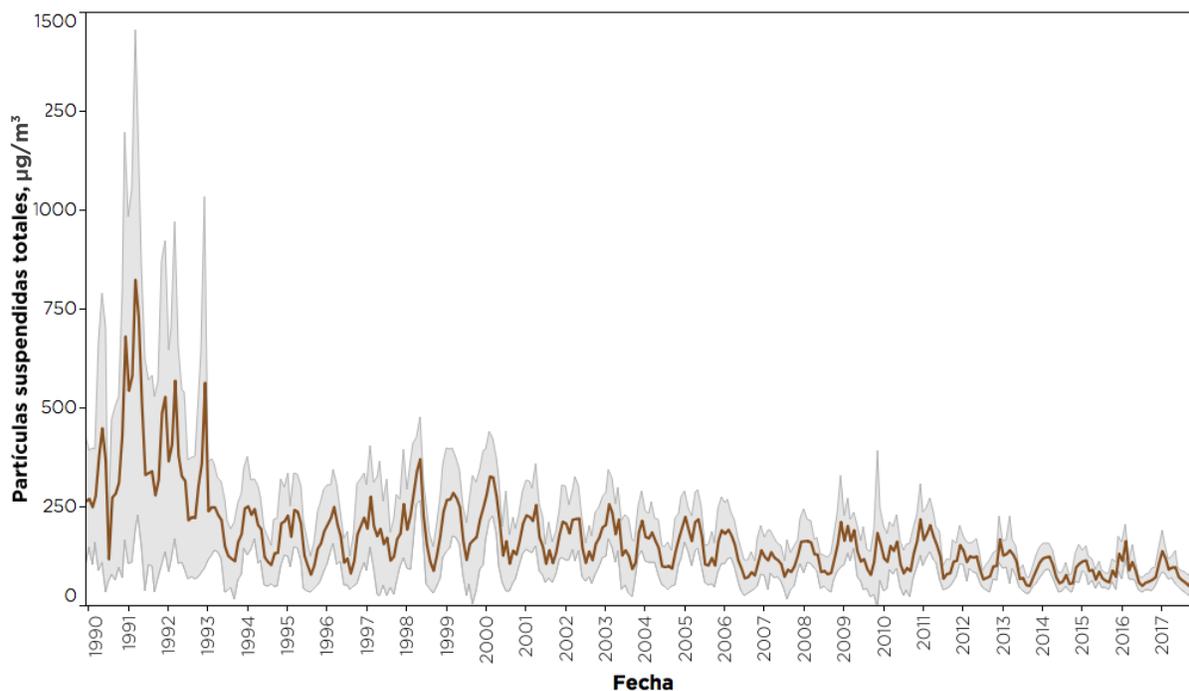


Figura 3.37. Serie de tiempo con los promedios mensuales de partículas suspendidas totales para el periodo 1990-2017. La línea café corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio.

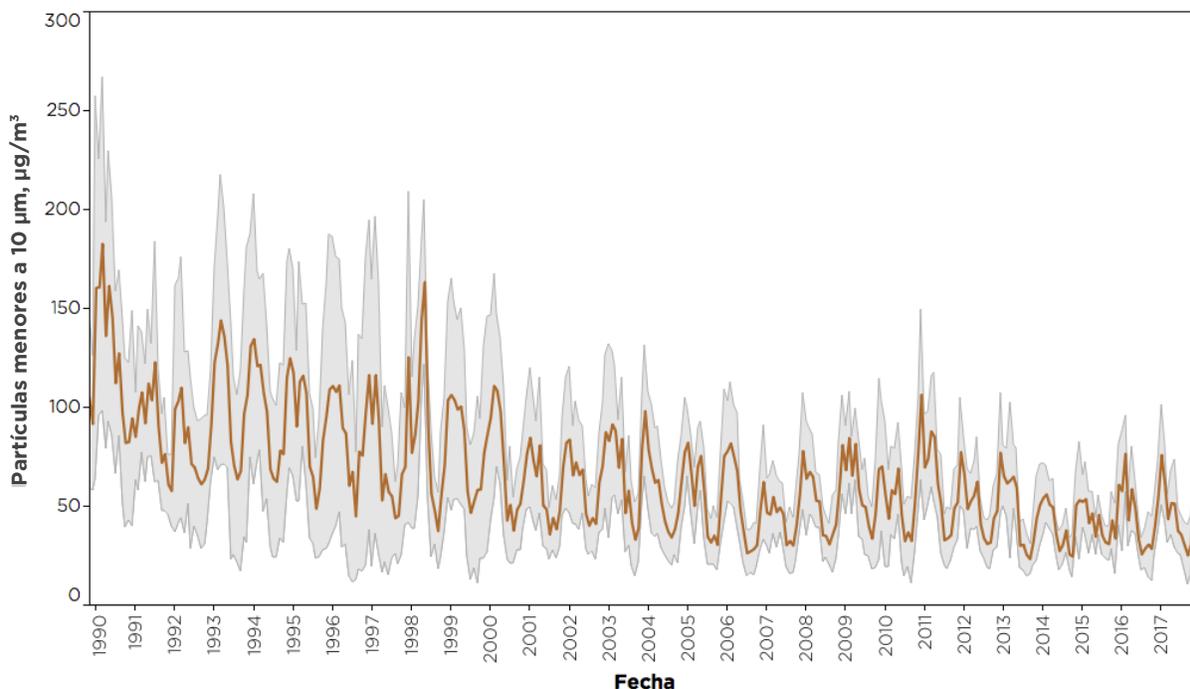


Figura 3.38. Serie de tiempo con los promedios mensuales de partículas menores a 10 µm para el periodo 1990-2017. La línea café corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio.

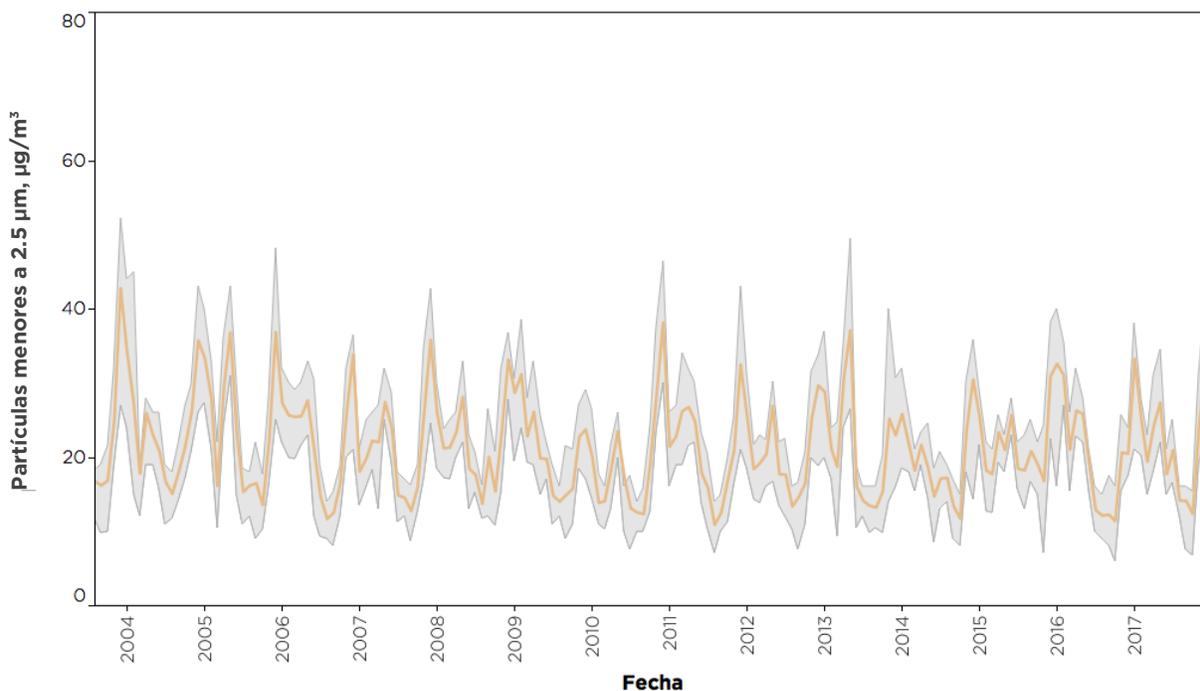


Figura 3.39. Serie de tiempo con los promedios mensuales de las partículas menores a 2.5 µm para el periodo agosto 2003-diciembre 2017. La línea café corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris corresponde a una desviación estándar.

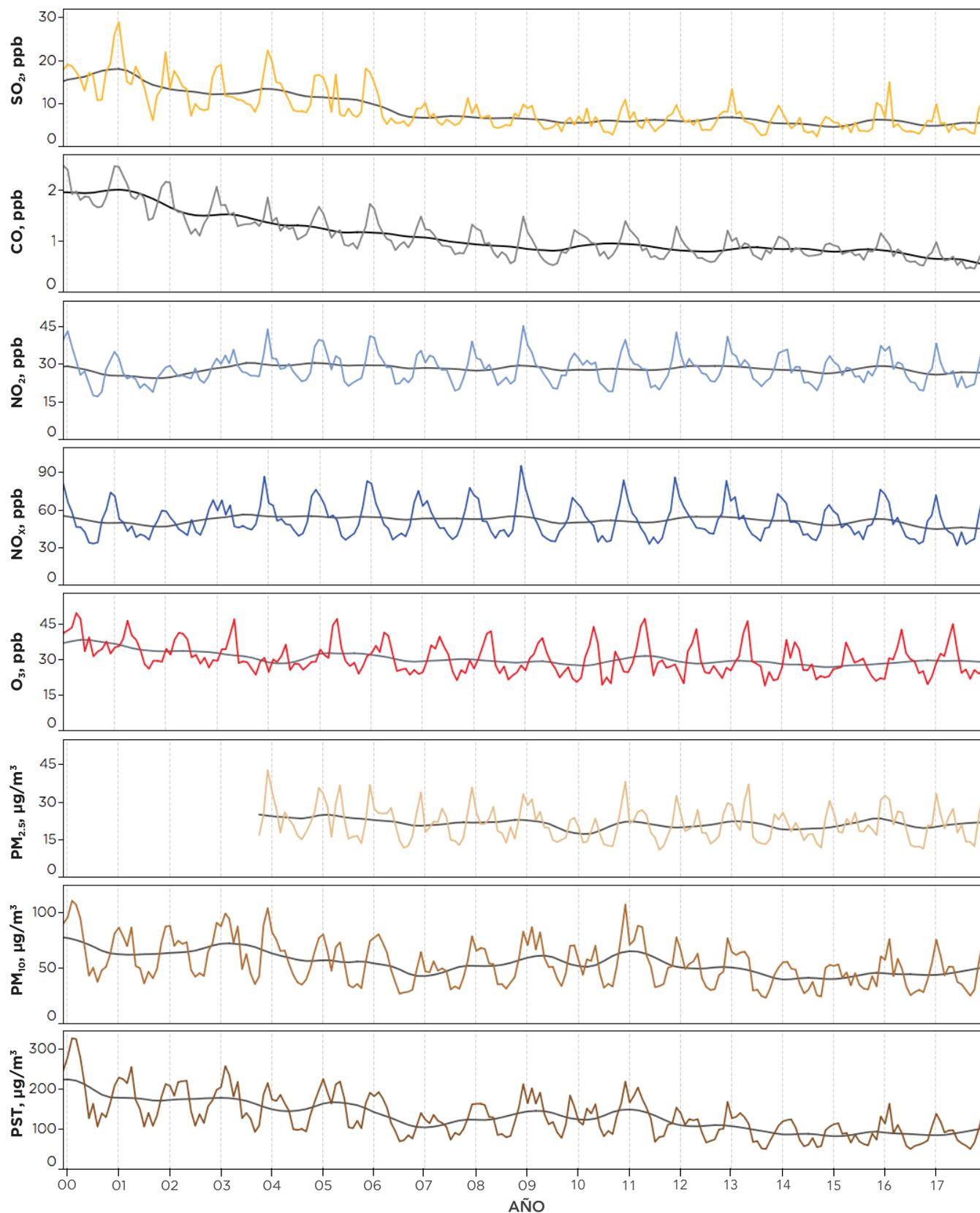


Figura 3.40. Series de tiempo con los promedios mensuales de dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), PM_{2.5}, PM₁₀ y PST, para el periodo 2000-2017. La línea negra corresponde a la serie de tiempo en la cual se removió la estacionalidad para cada contaminante.

La temporada de ozono de 2018

Durante el invierno 2017-2018 el clima se caracterizó por un invierno cálido y seco en la mayor parte del país. La frecuencia e intensidad de las masas de aire frío y sistemas frontales fueron menores, sin embargo, se registraron precipitaciones por arriba de lo normal. La presencia de lluvias frontales durante febrero y la segunda mitad de abril provocó precipitaciones mayores al promedio, incrementando también la humedad cuya media diaria reportó los mayores valores desde el año 2000. Durante la primera mitad de mayo se registró un incremento en la precipitación pluvial con respecto a los registros normales, con una precipitación promedio de 17.6 mm, por la entrada de aire cálido y húmedo proveniente del océano Pacífico. Por otra parte, durante mayo se observó una anomalía positiva en la velocidad de viento con respecto a los registros históricos entre 2000 y 2017. Durante el periodo que corresponde a la temporada de ozono (15 de febrero a 15 de junio) a nivel de superficie se observaron flujos de viento predominantes del norte en las horas previas a las concentraciones

máximas de ozono. A nivel global, el periodo marzo a mayo se ubicó como el cuarto más cálido, mientras que con respecto a la Oscilación del Sur se observó la presencia de *La Niña* débil en el primer trimestre del año, con condiciones neutrales durante los meses de primavera y verano. En resumen, los sistemas meteorológicos que predominaron en el centro del país durante el primer semestre de 2018 fueron decisivos para que, durante la temporada de ozono se presentaran pocos episodios con las condiciones meteorológicas necesarias para la formación de eventos severos de contaminación fotoquímica. Es importante mencionar que también se observaron reducciones importantes en las concentraciones para la mayoría de los contaminantes en este periodo.

En terminos generales, la temporada de ozono de 2018 fue de intensidad moderada, similar a las observadas en 2014 y 2015. En el periodo comprendido entre febrero y junio de 2018 se presentaron solo dos eventos con concentraciones superiores a 154 ppb (ver Figura 3.41). El primero el 4 de mayo, con una concentración máxima de 179 ppb en la

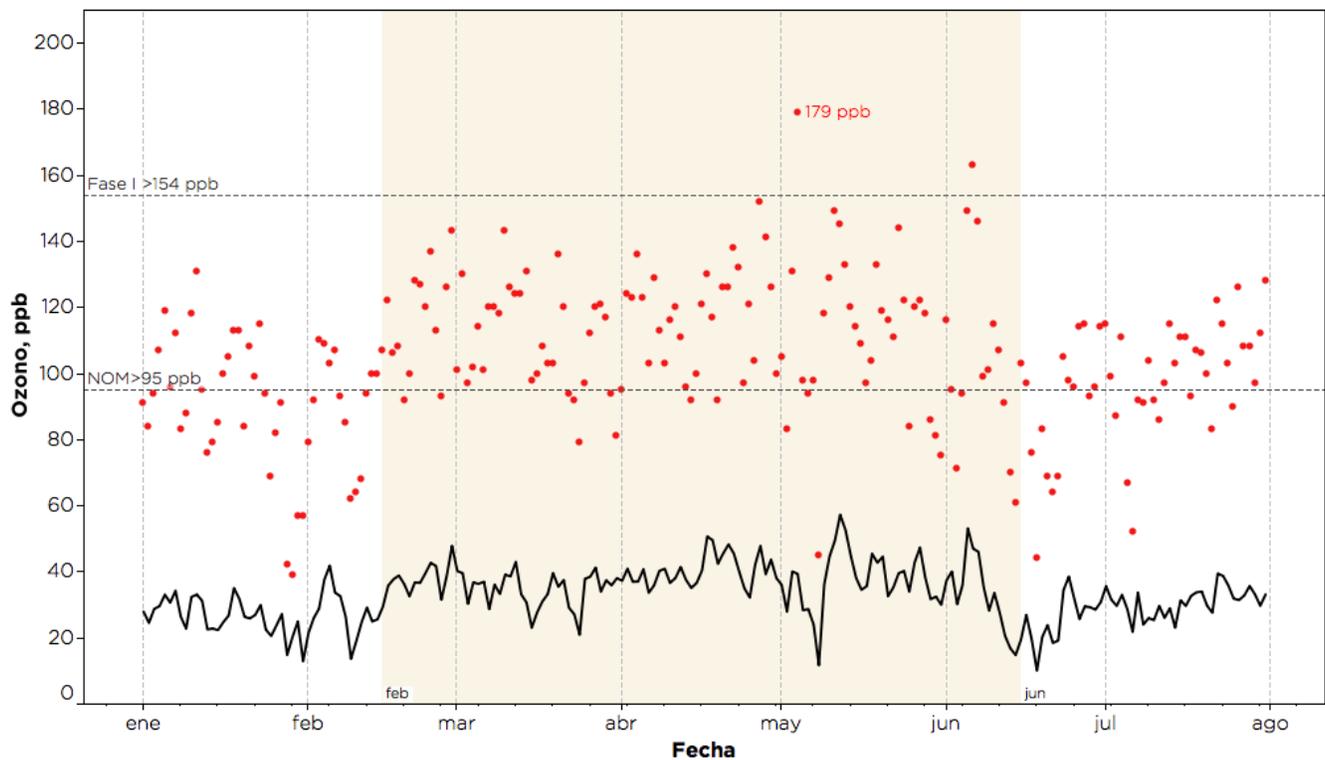


Figura 3.41. Concentraciones máximas (puntos) y promedio (línea) diarias de ozono entre el 1 de enero y el 31 de julio de 2018, el área sombreada corresponde a la temporada de ozono.

estación Hospital General de México (HGM); el segundo el 6 de junio con 163 ppb en la estación Pedregal (PED). Entre el 15 de febrero y el 15 de junio se registraron 382 horas, distribuidas en 95 días, con concentraciones superiores al valor de la NOM para el promedio horario de 95 ppb (ver Figura 3.41). Las mayores concentraciones se presentaron en las estaciones del centro y sur de la Ciudad de México. La estación ubicada en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), en Ciudad Universitaria al suroeste de la ciudad, registró el mayor número de horas superiores al valor de la NOM, con un total de 195; mientras que la estación Chalco (CHO), ubicada al sureste de la zona metropolitana registró el menor número con 7 horas.

La presencia de precipitación pluvial y viento en mayo contribuyó a una mejoría significativa en la calidad del aire. De hecho, mayo de 2018 alcanzó el menor número de horas con concentraciones superiores al límite de la NOM para el promedio horario desde 1990. En esta ocasión mayo registró un evento con concentraciones superiores a 154 ppb, solo comparable con mayo de 2012 cuando las condi-

ciones meteorológicas también fueron favorables para la calidad del aire.

En la temporada de ozono se concentran no solo los niveles máximos del contaminante, también la mayoría de las horas que superan el valor de la norma y el mayor número de eventos de activación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCCA). En la Figura 3.42 se presenta una comparación histórica del número de horas en las que se excedieron los valores de 95 y 154 ppb (umbrales actuales para la NOM y la Fase I, respectivamente) durante la temporada de ozono de cada año a partir de 1990. En ella se puede observar el contraste entre la situación actual contra el elevado número de eventos registrados en las décadas de 1990 y 2000. Es importante destacar que en 2018 se presentó una reducción importante en las concentraciones máximas con respecto a los dos años previos, con un total de 382 horas que superaron la NOM y sólo 2 horas con concentraciones mayores al umbral de la actual Fase I de Contingencia. Este último es el más bajo registrado históricamente durante una temporada de ozono.

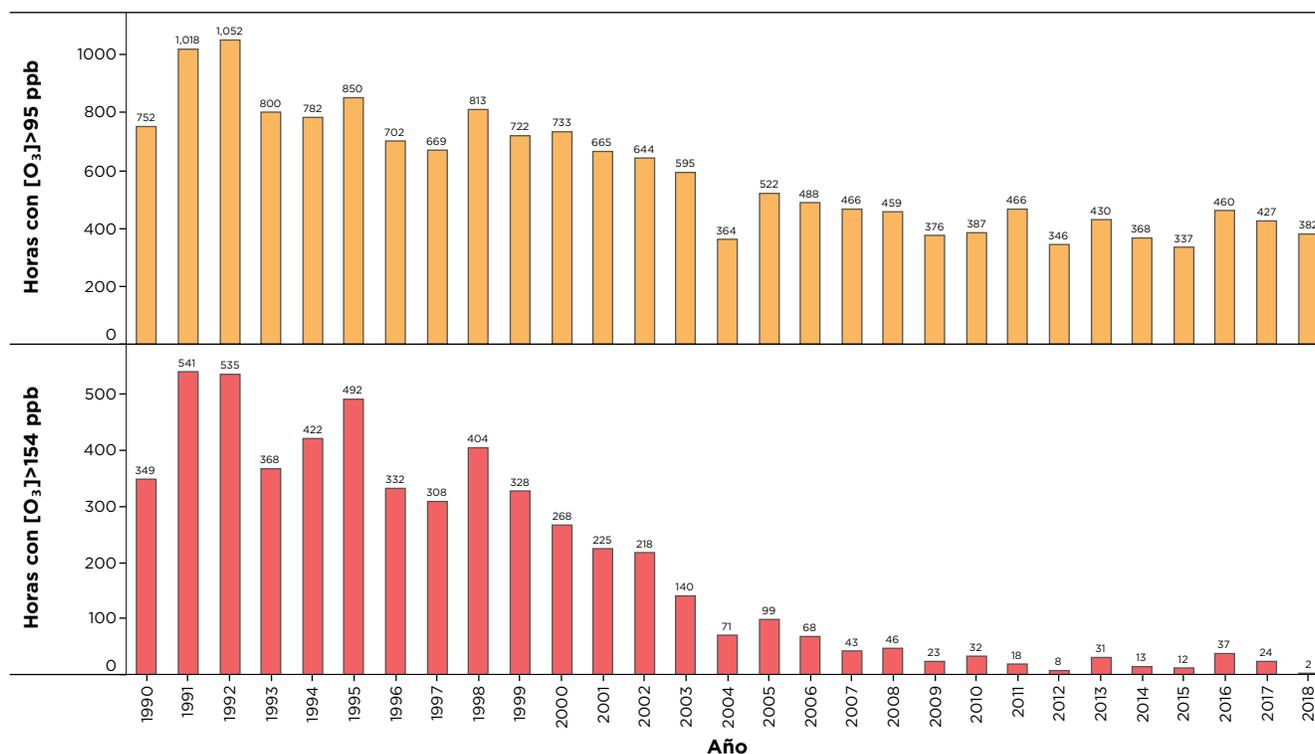


Figura 3.42. Comparación entre el número de horas con concentraciones máximas de ozono mayores a 95 ppb (superior) y a 154 ppb entre 1990 y 2018. En la elaboración del gráfico se emplearon los datos de todas las estaciones.



4. Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas

Eventos de activación

En marzo de 2016 una combinación inusual de eventos meteorológicos provocó una condición extrema de estabilidad atmosférica, que permitió el estancamiento de los contaminantes durante varios días consecutivos, provocando un episodio de contaminación por ozono que alcanzó concentraciones máximas de >200 ppb, mismas que no se observaban desde el año 2010. Como consecuencia de una interpretación parcial del fenómeno, las autoridades federales aplicaron un conjunto de medidas emergentes para intentar paliar la contaminación durante este episodio y en eventos posteriores. En el informe anual de 2016 se ofrece una reseña de lo anterior. Una de estas acciones fue la revisión del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA). Dentro de los cambios más importantes al PCAA se incluyeron la reducción de los niveles de activación de las fases I y II, además de la desaparición de las fases de Precontingencia y Combinada. En la Tabla 4.1 se presentan los valores vigentes del PCAA, estos niveles son los más bajos desde la creación del PCAA, lo que ha llevado a la activación de contingencias a concentraciones en las que anteriormente se activaba la Fase de Precontingencia, tanto para ozono como para PM₁₀.

Durante el periodo comprendido en este informe la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) activó la Fase I de Contingencia en cuatro ocasiones, dos por ozono y dos por PM₁₀. Como se ha mencionado a lo largo de este documento, este año se caracterizó por condiciones meteorológicas favorables para la calidad del aire, principalmente durante la temporada de ozono. Esto tuvo un impacto positivo en el número de contingencias por ozono. Las mayores concentraciones del contaminantes se registraron durante mayo, provocadas por la persis-

tencia de un sistema anticiclónico durante un periodo de diez días consecutivos (15 a 24 de mayo). Las dos activaciones de la Contingencia por ozono ocurrieron durante este episodio, el 15 y el 22 de mayo. En este punto es importante mencionar que los episodios de ozono que se suceden durante días consecutivos (multidía o *multiday*) ocurren con frecuencia en la temporada de ozono, esto por la naturaleza de los sistemas anticiclónicos responsables de la estabilidad atmosférica, que suelen ser de gran extensión y mantenerse por días. Un ejemplo de lo anterior se observa en el trabajo de Aguilar-Velázquez y Reyes-Ramírez (2018) quienes identificaron la presencia de episodios de contaminación multidía en la Ciudad de México, mediante el análisis de ondículas (*wavelet*) para los datos de 2015 y 2016.

Este año se presentaron también dos episodios de contingencia por PM₁₀. Al igual que para ozono, la reducción del umbral de activación de la Fase I a los niveles en los que anteriormente se encontraba la Fase de Precontingencia, aumentó el riesgo de activación de Contingencia por eventos extraordinarios de contaminación atmosférica, como ocurrió el 6 de enero cuando la Fase I se activó por incendios provocados intencionalmente. Mientras que el 14 de diciembre se activó la Fase I por la quema de pastizal en una pequeña reserva al noreste de la zona metropolitana. Ambos eventos tuvieron un carácter local y estuvieron confinados a una región específica.

En esta sección se realiza una descripción de cada uno de los eventos que activaron la Fase I del PCAA durante 2017, en el contexto meteorológico y de calidad del aire en el que ocurrieron.

Tabla 4.1. Fases vigentes del PCAA para ozono y PM₁₀ expresadas en unidades del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire y en unidades de concentración.

Contaminante	Fase de Precontingencia	Fase I	Fase combinada	Fase II	Suspensión
Ozono	Derogado	>150 >154 ppb	Derogado	>200 >204 ppb	≤150 ≤154
PM ₁₀	Derogado	>150 >214 µg/m ³	Derogado	>200 >354 µg/m ³	≤150 ≤214 µg/m ³

6 de enero, Fase I por PM₁₀

Los incrementos en los niveles de PM₁₀ que activan el PCAA generalmente ocurren por eventos naturales como las tolvaneras o por actividades intencionales. Un ejemplo de esto último, es la activación de alguna de las fases de PCAA por la quema de juegos de pirotécnica o de fogatas en algunas celebraciones, principalmente en los días de Navidad o Año Nuevo. Este año, la activación de la Fase I por PM₁₀ el 6 de enero fue la primera que se tiene documentada sobre el incremento en la concentración de partículas suspendidas a consecuencia de las acciones derivadas de una protesta social.

En diciembre de 2016 el gobierno federal anunció el aumento de un 20% en el precio de la gasolina y *diesel* a partir del primero de enero de 2017, así como la liberación del precio a partir del 18 de febrero. Este incremento, que se conoce como *el gasolinazo*, provocó acciones de rechazo por parte de la sociedad en varios estados del país, incluyendo la Ciudad de México y el Estado de México. Las protestas, que iniciaron el 1 de enero como manifestaciones públicas pacíficas, escalaron hasta ac-

tos de vandalismo y saqueos en varios puntos del país, como quedó documentado en los registros de diversos medios de comunicación. Durante la noche del jueves 5 de enero se registraron saqueos en supermercados, centros comerciales y tiendas de conveniencia en diversos municipios del Estado de México, y en algunas zonas del norte de la Ciudad de México.

Los incendios intencionales de algunos locales comerciales y la quema de fogatas en varias calles de los municipios del área conurbada provocaron un rápido incremento de la concentración de partículas durante la noche y madrugada. Las condiciones nocturnas, desfavorables para la dispersión, permitieron la acumulación gradual de los contaminantes, provocando que la concentración de PM₁₀ alcanzara un máximo de 611 µg/m³ y el índice de calidad del aire llegara a 153 puntos activando la Fase I del PCCA (ver Figura 4.1). Durante el resto del día mejoraron las condiciones de dispersión, reduciendo gradualmente las concentraciones del contaminante, además, la disminución de los actos violentos de protesta en los siguientes días evitó otro episodio similar.

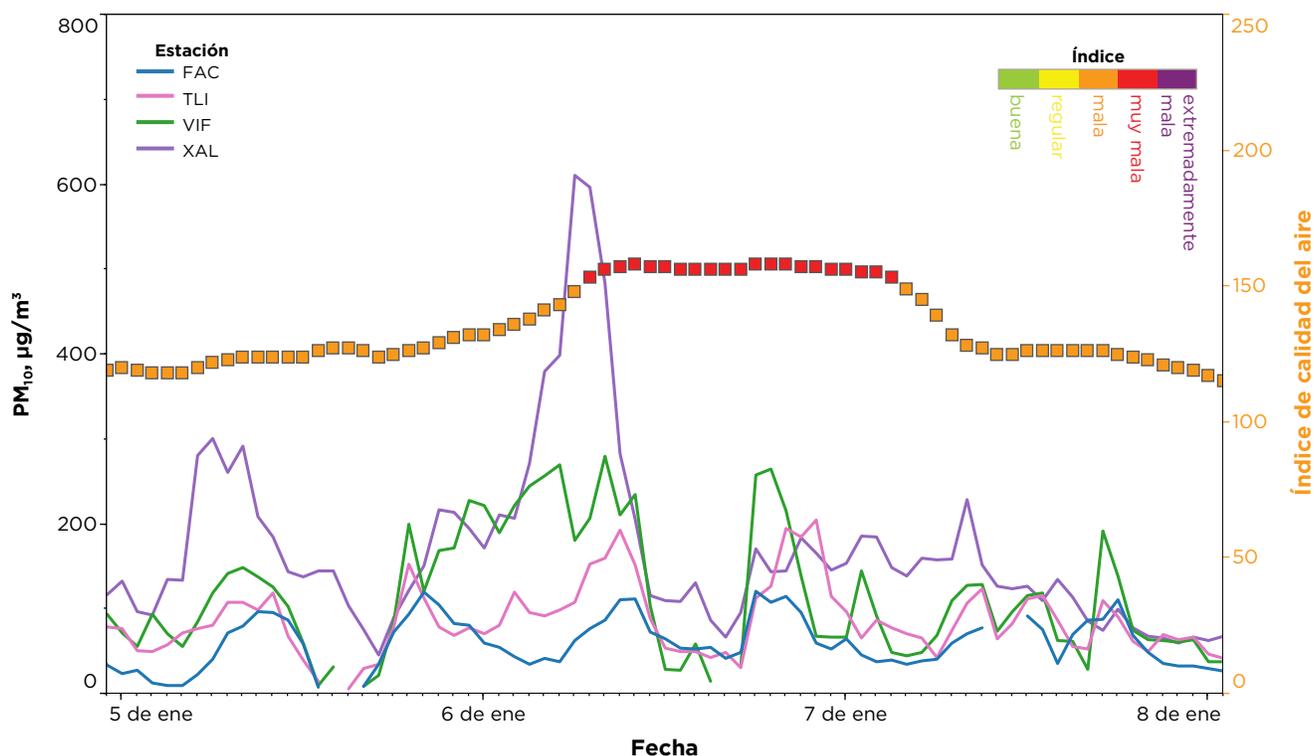


Figura 4.1. Concentraciones horarias de PM₁₀ entre el 5 y 8 de enero en cuatro estaciones de monitoreo ubicadas al norte de la zona metropolitana. La secuencia de cuadros indica el valor máximo del índice de calidad del aire.

15 y 22 de mayo, Fase I por ozono

El domingo 14 de mayo se observó el desarrollo de un sistema anticiclónico en la atmósfera media y baja al occidente del país. El lunes 15 de mayo la circulación anticiclónica afectaba los estados del centro y suroeste del territorio nacional mientras avanzaba hacia el centro. La tarde del martes 16 el sistema se posicionó directamente sobre el centro del país, en donde se mantuvo hasta el domingo 21. El sistema propició poco transporte de humedad, estabilidad atmosférica moderada a fuerte y cielo predominantemente despejado. Entre el 17 y 19 de mayo se observó una región de subsidencia alrededor de los 2 km de altura, provocando estabilidad atmosférica en las capas inferiores. Bajo estas condiciones, los vientos locales estuvieron determinados por los gradientes térmicos de la cuenca con un flujo diurno del norte proveniente de la meseta central, y un movimiento nocturno caracterizado por flujos de montaña. La evolución de la capa límite estuvo dominada principalmente por la turbulencia convectiva, asegurando

un mezclado relativamente homogéneo. La combinación de estas condiciones meteorológicas dificultaron un intercambio eficiente de las masas de aire dentro de la cuenca.

El domingo 21 de mayo el centro del sistema anticiclónico se desplazó hacia el océano Pacífico, frente a la costa de Michoacan, debilitando su efecto sobre la cuenca de México y permitiendo la entrada de una corriente de aire de intensidad moderada a través del paso natural entre las sierras Nevada y Ajusco-Chichinautzin. El 22 de mayo el sistema se posicionó frente a la costa de Jalisco, generando una corriente de flujo anticiclónico en la atmósfera media y baja que se desplazaba desde el noreste del país, el cual se combinó con otro flujo anticiclónico procedente del sureste. La combinación de estos sistemas provocó nuevamente condiciones de estabilidad atmosférica en el centro del país. A nivel de superficie se observó el desarrollo de una zona de convergencia sobre la cuenca de México, creando condiciones desfavorables para la dispersión de los contaminantes. Durante la tarde del 23

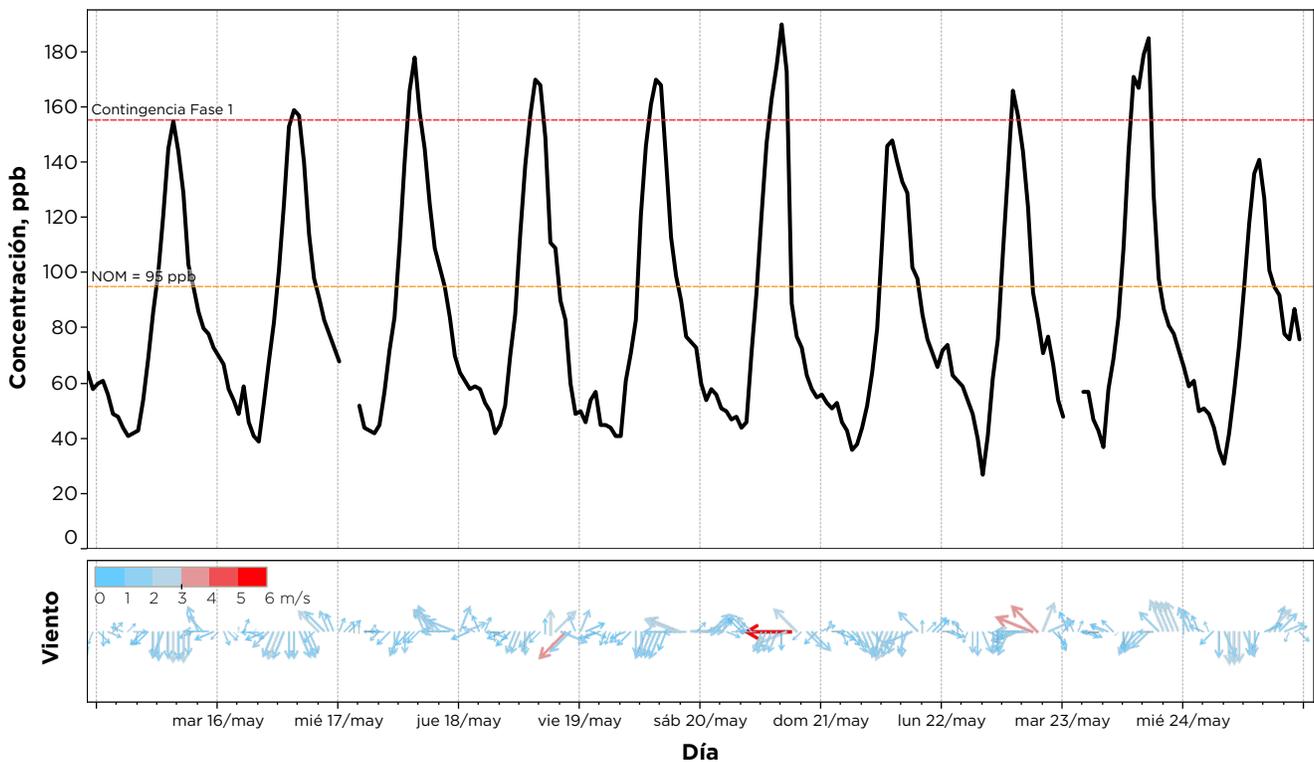


Figura 4.2. Serie de tiempo para las concentraciones horarias máximas de ozono registradas por la RAMA entre el 15 y 24 de mayo, los vectores en la parte inferior indican el flujo de viento y su intensidad.

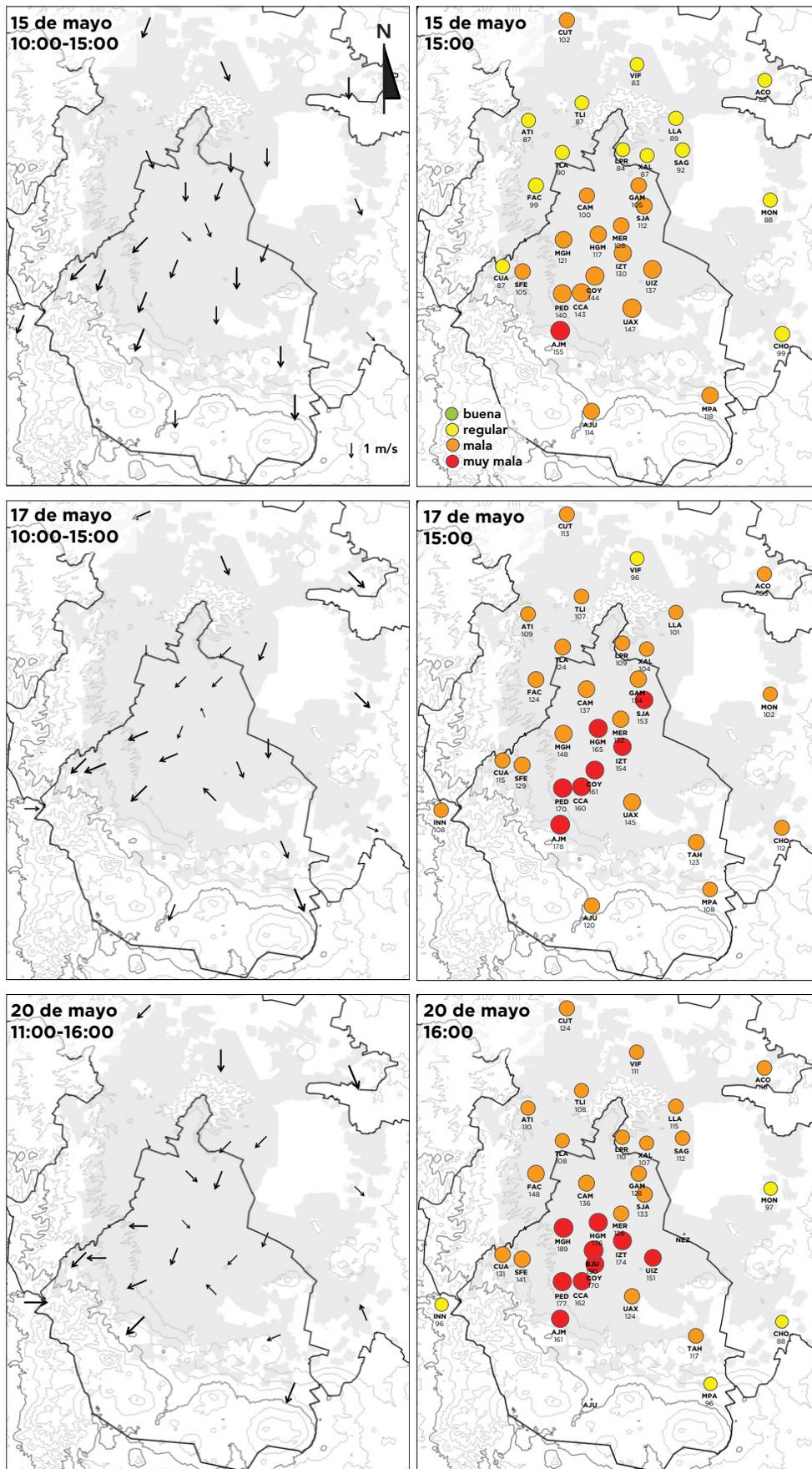


Figura 4.3. Campo de viento promedio durante las horas previas a la concentración máxima de ozono (columna de la izquierda) y distribución espacial de la concentración de ozono a la hora en que se registró el máximo (columna de la derecha), para los días 15, 17 y 20 de mayo. La Fase I se activó el 15 de mayo. La dirección del vector en el campo de vientos indica hacia donde se mueve el flujo de viento, su tamaño es proporcional a la intensidad. El color de cada círculo corresponde a las categorías del índice de calidad del aire, el tamaño es proporcional a la concentración, para cada círculo se indica la clave de la estación y la concentración en ppb.

de mayo el sistema continuó avanzando hacia el oeste adentrándose en el océano Pacífico, disminuyendo gradualmente su efecto sobre el centro del país, lo que permitió mejores condiciones para la ventilación de la cuenca.

El comportamiento del sistema anticiclónico provocó un episodio de contaminación que inició el 15 de mayo y se extendió hasta el 25 de mayo, causando la activación de la Fase I de Contingencia en dos ocasiones: el 15 y 22 de mayo. La Fase I del

lunes 15 de mayo se desactivó el domingo 21 de mayo, solo para activarse nuevamente al siguiente día extendiéndose hasta el 24 de mayo.

En la Figura 4.2 se presenta la serie de tiempo con las concentraciones máximas de ozono entre el 15 y 24 de mayo, así como los vectores promedio de viento durante la misma y en las horas previas a la activación. Como se describió previamente, el episodio se caracterizó por escasa ventilación y la acumulación progresiva de los contaminantes, como lo evidenció la presencia de una bruma persistente sobre la ciudad y el incremento gradual de las partículas finas durante el episodio. La acumulación progresiva en los siguientes días de los precursores de ozono impidió que, a pesar de la aplicación de restricciones a la circulación, los niveles de ozono en los días siguientes a la activación no disminuyeron. El 21 de mayo, el movimiento del sistema de alta presión hacia el océano Pacífico permitió la entrada de un flujo fresco de viento del sureste, favorable para la dispersión de la contaminación acumulada sobre la Ciudad, atenuando la severidad del episodio. El desplazamiento del sistema nuevamente hacia el este regresó la estabilidad a la cuenca.

Como lo evidenció la presencia de una bruma persistente sobre la ciudad y el incremento gradual de las partículas finas durante el episodio. La acumulación progresiva en los siguientes días de los precursores de ozono impidió que, a pesar de la aplicación de restricciones a la circulación, los niveles de ozono en los días siguientes a la activación no disminuyeron. El 21 de mayo, el movimiento del sistema de alta presión hacia el océano Pacífico permitió la entrada de un flujo fresco de viento del sureste, favorable para la dispersión de la contaminación acumulada sobre la Ciudad, atenuando la severidad del episodio. El desplazamiento del sistema nuevamente hacia el este regresó la estabilidad a la cuenca.

Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran las características del viento y de la concentración de ozono durante los eventos de la Fase I el 15 de mayo y del 22 de mayo, respectivamente.

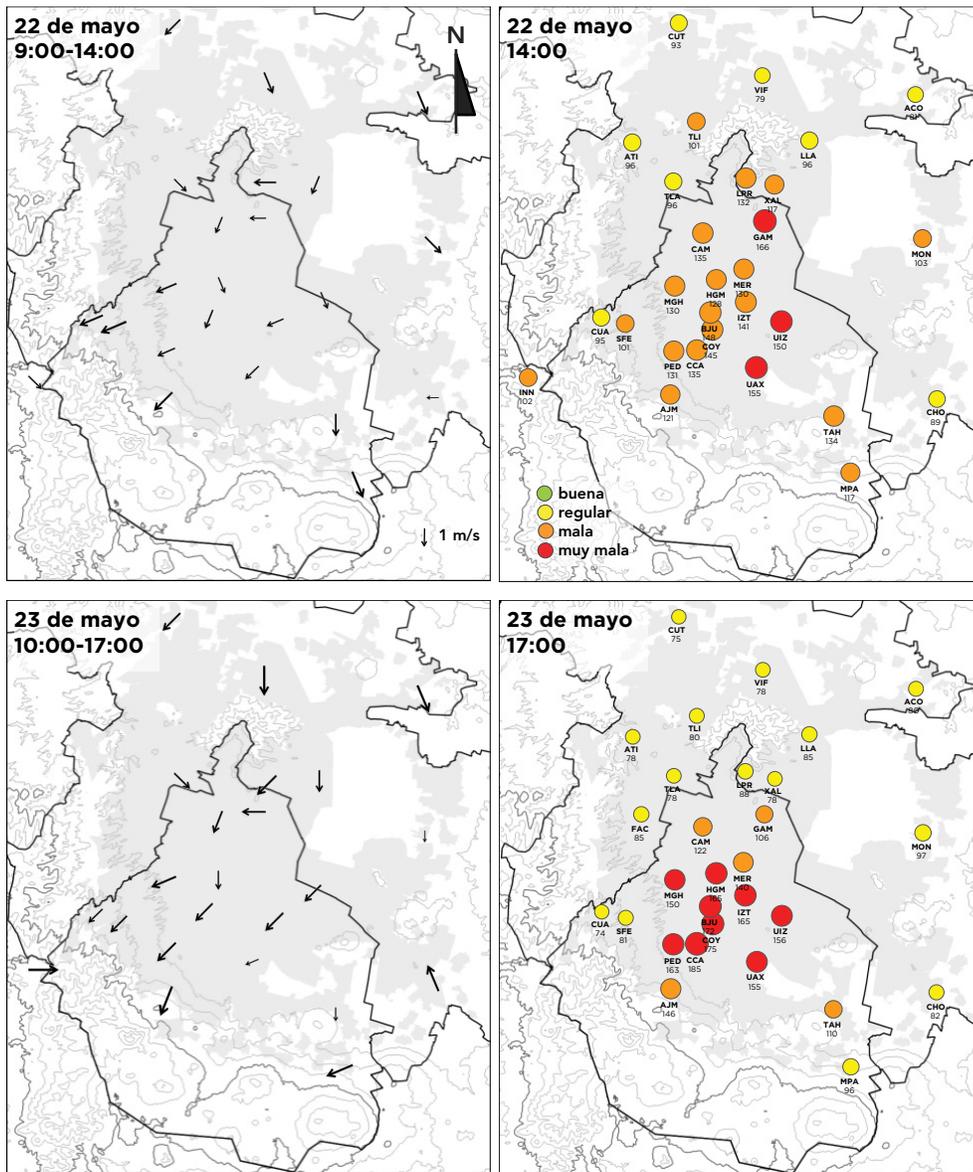


Figura 4.4. Campo de viento promedio durante las horas previas a la concentración máxima de ozono (columna de la izquierda) y distribución espacial de la concentración de ozono a la hora en que se registró el máximo (columna de la derecha), para los días 22 y 23 de mayo. La Fase I se activó el 22 de mayo.

14 de diciembre, Fase I por PM₁₀

Entre la noche del miércoles 13 de diciembre y la madrugada del jueves 14 de diciembre, los niveles de PM₁₀ registraron un incremento extraordinario en el noreste de la zona metropolitana, alcanzando una concentración máxima para el promedio horario de 694 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante la mañana del 14 de diciembre en la estación San Agustín (SAG), así como un máximo para el promedio móvil de 24 horas de 247 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Xalostoc (XAL), ambas estaciones en el municipio de Ecatepec de Morelos. Este incremento fue provocado por un incendio de pastizales en una pequeña reserva ecológica llamada El Salado, en el municipio de Atenco en el Estado de México, localizada a 6 km al noreste de la estación SAG y a 12 km de la estación Xalostoc. Debido a este episodio la CAME decidió activar la Fase I del PCAA.

Del análisis del evento se observó que durante la noche y madrugada la dirección predominante del viento en la zona fue del noreste. La escasa altura en la capa límite nocturna y la baja velocidad del vien-

to fueron factores importantes para una mala dispersión, permitiendo además que la pluma se desplazara hacia el suroeste, afectando directamente al municipio de Ecatepec de Morelos. Sin embargo, por la distancia la dilución fue suficiente para no afectar significativamente una región mayor o ni alcanzar a la Ciudad de México. La alta proporción de PM_{2.5} confirmó que durante el evento la masa de PM₁₀ estuvo dominada por partículas finas como las generadas en los procesos de combustión, y no de partículas grandes como las producidas por la re-suspensión del polvo. Durante la mañana, con el crecimiento de la capa límite y el cambio en la dirección del viento, las concentraciones en la zona disminuyeron. El incendio fue controlado por el H. Cuerpo de Bomberos de Atenco. Sin embargo, debido a que el cálculo del índice de calidad del aire utiliza el promedio móvil de 24 horas, los valores del índice se mantuvieron elevados hasta las primeras horas del 15 de diciembre. En la Figura 4.5 se puede observar la evolución de la concentración de PM₁₀ y del índice de calidad del aire durante el evento. La CAME suspendió la Fase I la mañana del 15 de diciembre.

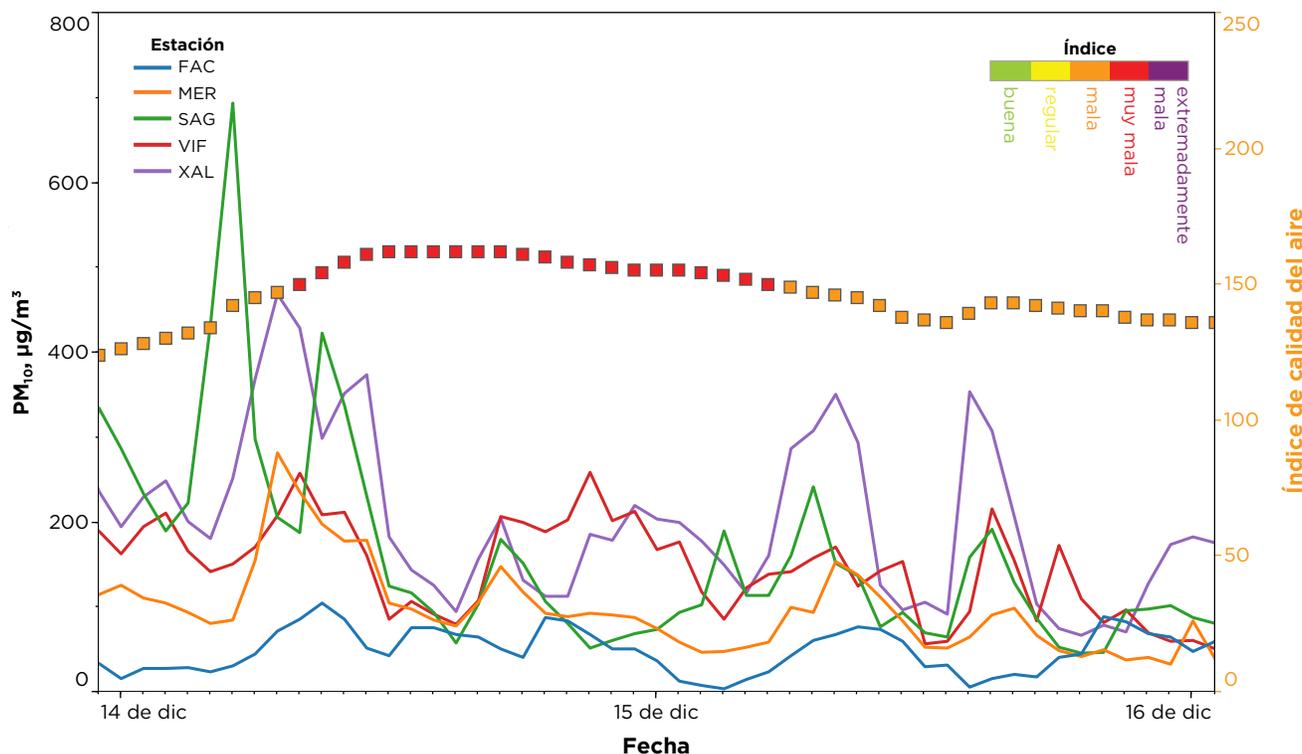


Figura 4.5. Concentraciones horarias de PM₁₀ entre el 14 y 15 de diciembre en cinco estaciones de monitoreo ubicadas al norte de la zona metropolitana. La secuencia de cuadros indica el valor máximo del índice de calidad del aire.



5. Depósito atmosférico

Composición, pH y lluvia ácida

Como se mencionó previamente, en 2017 se presentaron eventos tempranos de lluvia en marzo y abril, estos eventos de lluvia frontal ocurrieron fuera del periodo normal de la temporada de lluvia, por lo tanto no se tomaron en cuenta en el calendario del programa de recolección de muestras de la Red de Depósito Atmosférico (REDDA), que inició en la primera semana de mayo y concluyó en la última semana de octubre para obtener un total de 27 lotes de muestreo. Durante la campaña, con excepción de las estaciones CORENA (COR) y Exconvento Desierto de los Leones (EDL), en donde se obtuvieron el 62 y 65% de muestras válidas, en el resto se obtuvieron más del 70% de muestras válidas. En este análisis se emplearon las muestras válidas de todas las estaciones sin considerar la suficiencia.

El promedio de la precipitación pluvial acumulada calculado para la campaña de muestreo fue de 815 mm de lluvia (ver Figura 5.1). Las estaciones ubi-

cadas al suroeste captaron el mayor volumen de precipitación pluvial, mientras que las ubicadas al norte y este una menor cantidad. La estación EDL, localizada en la delegación Magdalena Contreras al suroeste de la ciudad, registró el volumen acumulado máximo de precipitación con un valor de 1307 mm; mientras que COR, ubicado al sureste en la delegación Xochimilco, colectó el menor volumen con un acumulado de 455 mm. Todas las muestras de depósito húmedo obtenidas durante la temporada fueron analizadas para la determinación de la composición iónica, pH y conductividad. Este análisis se realizó 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 la recolección de las muestras, el análisis químico y la interpretación de los datos se aplicaron las recomendaciones del Programa Nacional de Depósito Atmosférico (NADP, por sus siglas en inglés) de la US EPA.

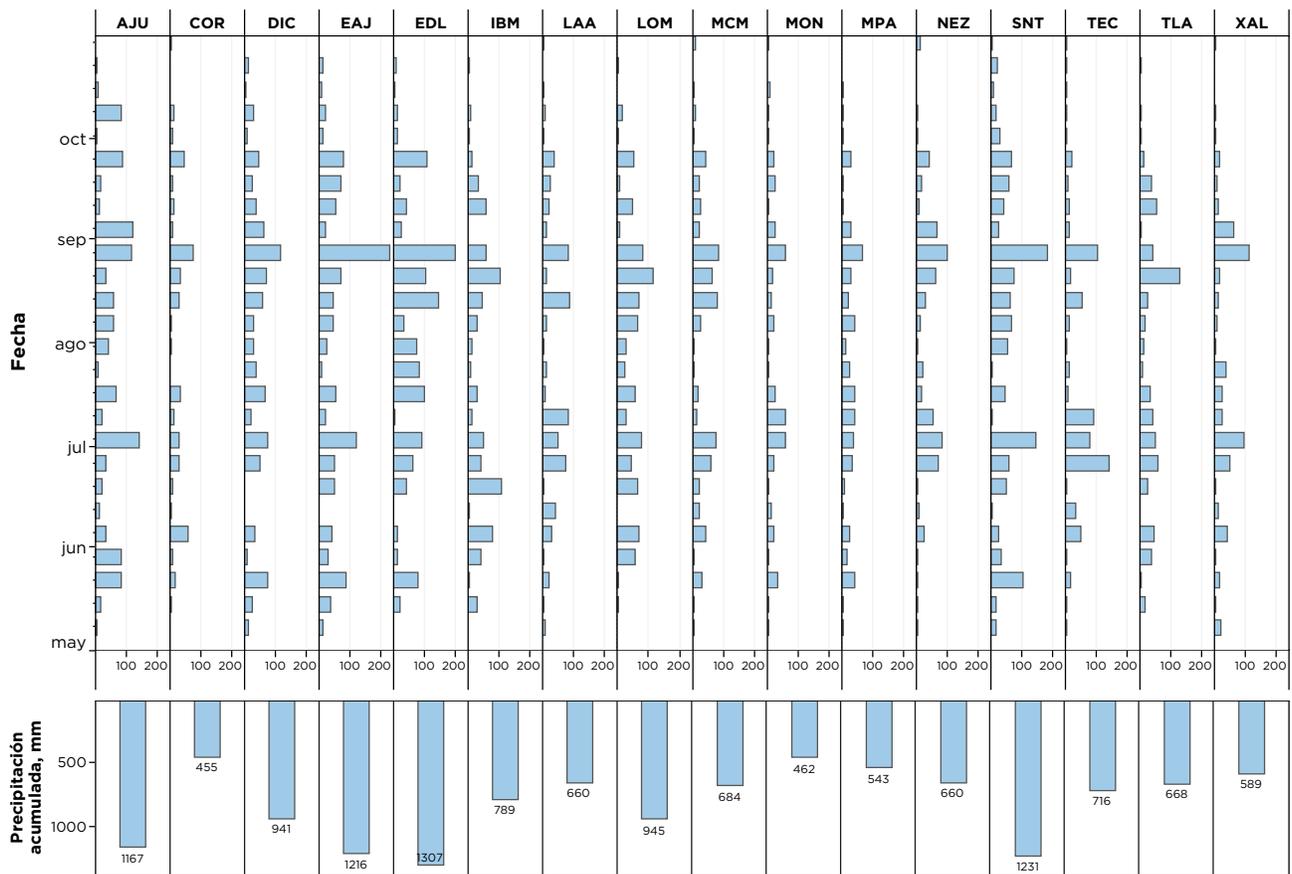


Figura 5.1. Volumen acumulado de precipitación pluvial en cada uno de los sitios de muestreo de la REDDA durante la temporada de lluvia de 2017. El gráfico superior indica los volúmenes de cada muestreo semanal, mientras que el inferior los volúmenes acumulados durante toda la temporada.

pH

La presencia de lluvia ácida es un problema que se presenta cada año asociado al deterioro de la calidad del aire, se observa con mayor frecuencia e intensidad sobre el suelo de conservación, al sur y oeste de la Ciudad de México. El cambio del pH es resultado de la incorporación al agua de lluvia de componentes ácidos presentes en la atmósfera emitidos por fuentes primarias locales y remotas, así como por compuestos formados por transformaciones secundarias. Dentro de estos compuestos se encuentran el ácido sulfúrico (H₂SO₄), el ácido nítrico (HNO₃) y el ácido clorhídrico (HCl), así como diversos ácidos orgánicos. Los precursores más importantes de la lluvia ácida son los óxidos de azufre y de nitrógeno.

Durante 2017, con excepción del sitio ubicado en el Museo de la Ciudad de México (MCM), en el resto se detectó la presencia de lluvia ácida en más de una muestra. En total el 22% de las 383 muestras reportaron valores de pH menores a 5.6 (ver Figura

5.2). Las estaciones Ecoguardas Ajusco (EAJ) y Ajusco (AJU) registraron el mayor número de muestras ácidas con el 46%, seguidas de Milpa Alta (MPA) con 42%, todas ellas ubicadas en la región serrana al sur de la Ciudad de México. Como se puede observar en la Figura 5.3, el mayor número de muestras con un pH ácido se obtuvo en los sitios ubicados al oeste y sur del territorio de la Ciudad de México, precisamente en donde se encuentra la mayor parte del suelo de conservación, así como las especies más sensibles a los cambios en los niveles de acidez del suelo y cuerpos de agua, provocados por la presencia de lluvia ácida.

El valor mínimo de pH (mayor acidez) fue de 4.1 detectado en muestras provenientes de tres estaciones: Cerro del Tepeyac (TEC), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), ambas en la delegación Gustavo A. Madero, y Milpa Alta (MPA), al sureste de la ciudad. Este valor mínimo fue similar al observado en 2016. Por otra parte, el valor máximo de pH (menor acidez) fue 7.5 y se registró en la estación Nezahualcóyotl (NEZ).

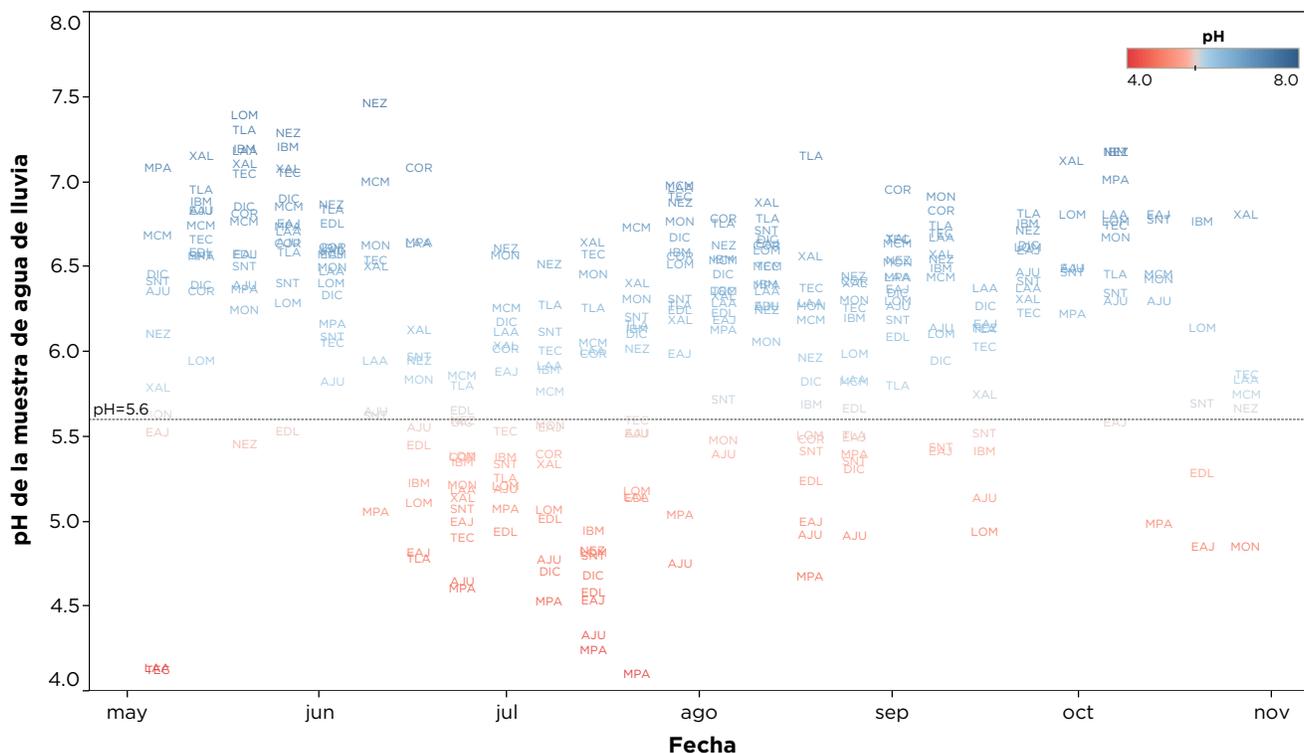


Figura 5.2. Valores de pH de las muestras de depósito húmedo colectadas en cada uno de los sitios de muestreo de la REDDA. En el gráfico se indica el valor nominal del pH del agua de lluvia, las muestras que corresponden a lluvia ácida (pH<5.6) se indican en tonos rojos mientras que las muestras con pH >5.6 se indican en tonos azules.

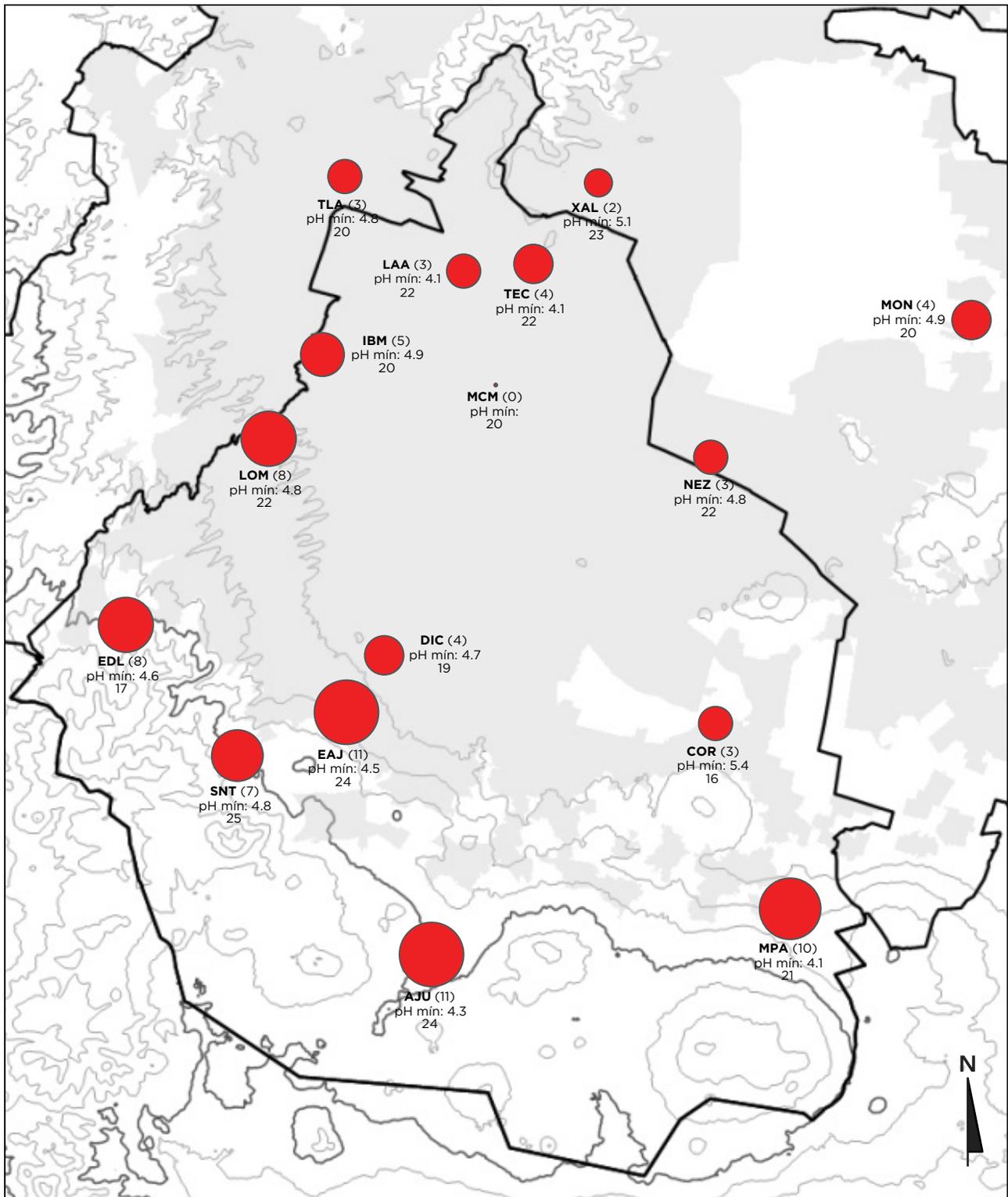


Figura 5.3. Distribución del número de muestras con $\text{pH} < 5.6$, el tamaño del círculo es proporcional al número de muestras consideradas como lluvia ácida. Para cada sitio se indica la clave, el número de muestras colectadas y entre parentesis las muestras que corresponden a lluvia ácida, así como el valor del pH mínimo.

Composición iónica

Las especies iónicas más abundantes en las muestras de agua de lluvia, expresadas en términos de la concentración equivalente, fueron amonio (NH_4^+), sulfato (SO_4^{2-}), calcio (Ca^{2+}) y nitrato (NO_3^-) con aportaciones del 30.3%, 24.2%, 21.0% y 15.2%, respectivamente. La suma de las concentraciones de las especies que se encontraron en menor concentración y que incluyen al cloruro (Cl^-), magnesio (Mg^{2+}), calcio (Ca^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+) e hidronio (H^+) representaron el 9.3% de la carga iónica total. Su abundancia relativa fue $\text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{H}^+$ (ver Figura 5.4). Los aniones amonio, sulfato y nitrato contribuyeron con el 54.5% de la carga iónica inorgánica, ambos tienen su origen en los procesos de oxidación de los óxidos de nitrógeno y de azufre emitidos a la atmósfera. Los sulfatos tienen una mayor contribución que los nitratos, a diferencia de lo que se ha observado en Estados Unidos, donde los nitratos son más abundantes que los sulfatos.

Por otra parte, el amonio y el calcio fueron los cationes más abundantes y también los responsables de la neutralización de las especies ácidas. El balance de electroneutralidad entre la suma de cationes y la de aniones mostró una correlación fuerte ($R^2=0.933$), sin embargo, se observó un déficit importante en la concentración de aniones (pendiente=0.771), mayor a la observada en años previos. Se observó también una fuerte correlación entre la conductividad y la suma total de las concentraciones equivalentes de los iones ($R^2=0.984$, pendiente=0.014).

Se observaron correlaciones importantes entre el calcio con: potasio ($R^2=0.609$), sodio ($R^2=0.583$), sulfato ($R^2=0.778$), magnesio ($R^2=0.692$) y nitrato (0.631); el calcio, magnesio y sodio se encuentran comúnmente en el suelo. El potasio mostró fuertes correlaciones con: magnesio ($R^2=0.783$), sodio ($R^2=0.618$), nitrato ($R^2=0.640$) y sulfato ($R^2=0.687$). Mientras que el nitrato estuvo correlacionado con amonio ($R^2=0.725$) y sulfato ($R^2=0.759$).

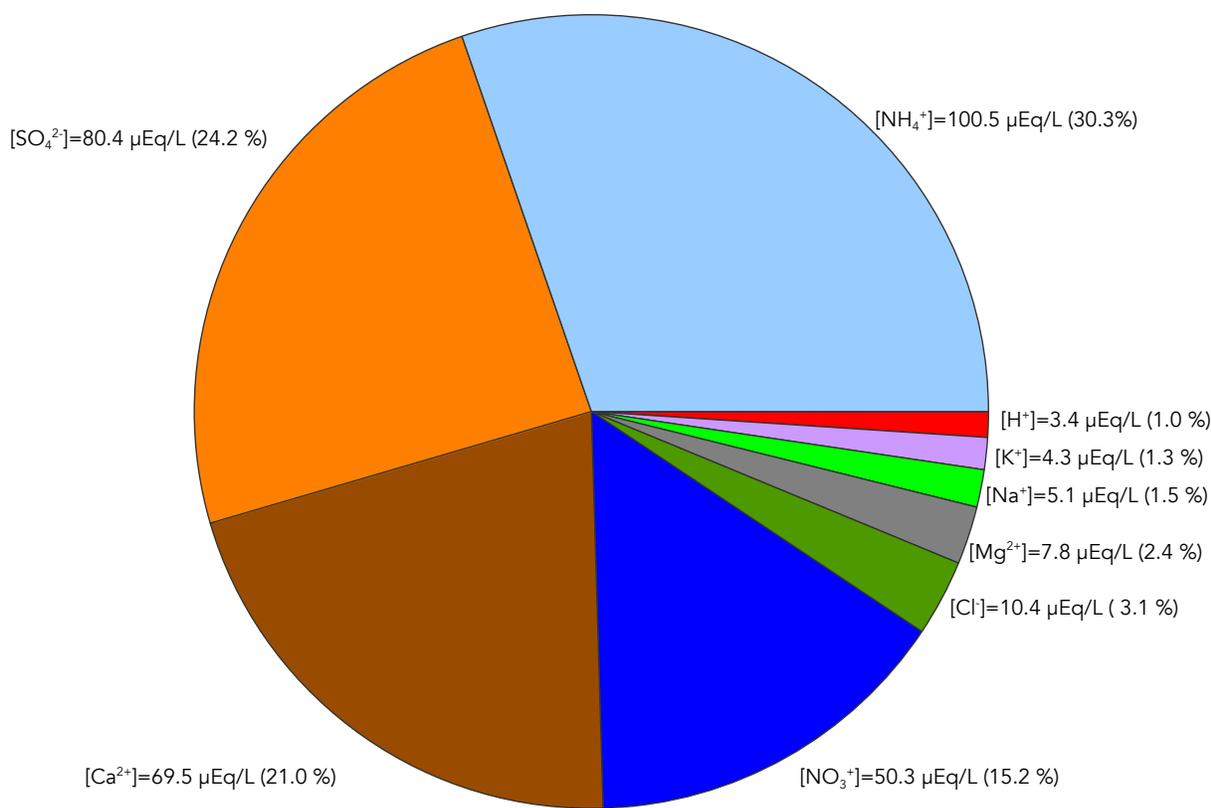


Figura 5.4. Contribución promedio y porcentual de cada una de las especies iónicas inorgánicas analizadas en las muestras de depósito húmedo.

Tabla 5.1. Promedio de la concentración de las diferentes especies iónicas analizadas en el agua de lluvia, las concentraciones están expresadas en microequivalentes por litro ($\mu\text{Eq/L}$).

	[H ⁺]	[Na ⁺]	[K ⁺]	[Mg ²⁺]	[Ca ²⁺]	[Cl ⁻]	[NH ₄ ⁺]	[NO ₃ ⁻]	[SO ₄ ²⁻]
AJU	6.8	4.2	3.3	5.4	44.9	10.9	74.5	37.7	59.7
COR	1.0	10.1	6.7	10.1	58.3	17.7	144.5	57.8	98.0
DIC	2.9	2.9	3.0	5.5	54.5	8.6	95.3	44.3	69.6
EAJ	4.3	1.9	2.7	5.2	47.3	7.2	84.7	40.2	62.0
EDL	4.7	4.0	2.8	6.3	38.8	7.6	67.0	37.1	53.3
IBM	1.9	4.9	3.2	6.5	61.1	8.2	95.7	48.9	70.1
LAA	4.5	4.3	3.7	7.6	57.0	10.6	94.4	42.8	71.7
LOM	3.2	2.7	2.9	5.9	69.3	7.2	91.7	53.2	69.6
MCM	0.6	8.7	5.1	9.0	86.4	11.9	132.2	61.6	98.4
MON	1.8	2.5	4.8	8.3	56.3	12.4	132.8	58.9	100.9
MPA	12.2	8.6	6.9	14.7	89.2	17.7	107.8	64.9	101.4
NEZ	1.4	9.7	6.0	10.0	126.8	12.0	115.8	61.6	118.7
SNT	2.3	1.8	4.6	6.0	49.4	7.1	76.4	45.5	59.1
TEC	4.6	4.0	4.2	6.7	56.0	8.8	100.5	42.4	73.3
TLA	1.7	3.5	3.3	6.7	66.8	7.3	91.9	42.1	72.4
XAL	1.0	9.2	5.9	12.1	145.5	12.7	119.9	70.2	118.9

En todos los sitios de muestreo la composición iónica estuvo dominada por las concentraciones de amonio, sulfato y nitrato, lo que sugiere una fuerte contribución proveniente de las transformaciones secundarias. En el caso del sulfato y el amonio no se descarta una importante contribución regional. Al igual que lo que se observó en el caso de dióxido de azufre y en la composición de los aerosoles, las emisiones industriales del corredor industrial Tula-Tepeji podrían tener una importante contribución a la formación de lluvia ácida en la ciudad. Mientras que en las zonas agrícolas que rodean la zona metropolitana el uso de fertilizantes y la ganadería pudieran tener un aporte a la concentración de amonio, que es el compuesto más importante para la neutralización de las especies ácidas.

En la Tabla 5.1 se presentan los valores promedio de la concentración equivalente de cada especie iónica analizada. En términos generales las mayores concentraciones se observaron en los sitios ubicados al noreste y este de la ciudad. Resulta intere-

sante observar los elevados niveles de calcio en Nezahualcóyotl (NEZ) y Xalostoc (XAL), con valores de 126.8 y 145.5 $\mu\text{Eq/L}$, respectivamente; la presencia de este catión se asocia con fuentes geogénicas, sugiriendo que la resuspensión del polvo del suelo tendría una contribución importante. En los sitios de CORENA (COR), localizado en el área lacustre de Xochimilco, y Montecillo (MON), ubicado en el área suburbana de Texcoco, las concentraciones de amonio fueron mayores al promedio con valores de 144.5 y 132.8 $\mu\text{Eq/L}$, respectivamente, se sabe que una de las fuentes más importantes de amonio es el uso de fertilizantes, por lo tanto su presencia en altas concentraciones en regiones en donde se practica la agricultura indica una importante contribución local de esta especie. Por otra parte, las muestras colectadas en la estación ubicada en el Museo de la Ciudad de México (MCM), en el centro de la ciudad, reportaron altas concentraciones de amonio comparables con las registradas en COR y MON lo cual es excepcional y sugiere la presencia de una fuente local.

Depósito atmosférico húmedo

En la Tabla 5.2 se presentan los valores promedio del depósito acumulado para cada una de las especies inorgánicas analizadas. La Tabla 5.3 muestra los valores de depósito acumulado por especie para cada una de las estaciones. Los resultados obtenidos este año fueron similares a los reportados durante el año previo. En términos generales los valores de depósito obtenidos en la Ciudad de México para los principales iones fueron mayores a los reportados por el *National Atmospheric Deposition Program* (NADP) de los Estados Unidos en su reporte más reciente (2017). A diferencia de lo que sucede en Estados Unidos y Canadá, en donde las concentraciones de sulfato continúan disminuyendo por los avances en la mitigación de las emisiones de óxidos de azufre de las principales fuentes, en la Ciudad de México el sulfato continúa como la especie predominante en el depósito atmosférico, esto a pesar de que en el área metropolitana se emplean combustibles con un bajo contenido de azufre, lo que sugiere una importante contribución regional. El sulfato junto con el nitrato contribuyen a la acidez del agua de lluvia. El promedio global de la proporción sulfato/nitrato fue de 1.26, con un intervalo entre 1.13 y 1.41.

Los sitios Ecoguardas Ajusco (EAJ) y San Nicolás Totolapan (SNT) registraron las mayores cantidades de depósito (expresado como la suma de los iones reportados) con 80.5 y 75.1 kg/ha, respectivamente; mientras que Montecillo (MON) registró el menor depósito con 33.7 kg/ha. En términos generales, la suma de los iones amonio, sulfato y nitrato contribuyeron en promedio con alrededor del 83% al depósito total, con aportaciones individuales de 18.3, 28.7 y 36.2%, respectivamente. La contribución del resto de iones fue de 16.9% donde el 10% correspondió al calcio. Los mayores valores de depósito para calcio, amonio, nitrato y sulfato se presentaron en EAJ con 7.7, 14.6, 23.5 y 28.5 kg/ha, respectivamente. El valor promedio para el depósito de nitrógeno inorgánico (estimado como la cantidad de nitrógeno presente en forma de amonio y nitrato) fue de 9.7 kg/ha, con un máximo de 14.7 kg/ha también en EAJ.

En la Figura 5.5 se muestra la distribución espacial de la precipitación pluvial, los iones inorgánicos, el nitrógeno total y el pH ponderado. La interpolación se realizó con el método de *kriging* para el territorio de la Ciudad de México, se emplearon los resultados de las estaciones ubicadas en el territorio de la zona conurbada para establecer las condiciones en

Tabla 5.2. Depósito total y porcentaje para las diferentes especies iónicas.

ión	Depósito kg/ha	%
H ⁺	0.03	0.1
Na ⁺	0.46	0.8
K ⁺	0.78	1.4
Mg ²⁺	0.47	0.9
Ca ²⁺	5.61	10.2
Cl ⁻	2.02	3.7
NH ₄ ⁺	10.11	18.3
NO ₃	15.79	28.6
SO ₄ ²⁻	19.94	36.1

la frontera. Como ya se comentó al inicio de esta sección, la mayor cantidad de lluvia se observó al suroeste de la Ciudad de México (ver Figura 5.5a), por lo tanto, el depósito de los principales iones tuvo una distribución similar con las mayores concentraciones al suroeste y las menores al noreste.

La Figura 5.5b muestra que los mayores valores de la concentración del ión hidronio se registraron al sur y sureste de la Ciudad de México, en un territorio que comprende una de las regiones de cultivo más importantes de la ciudad comprendida por las delegaciones Milpa Alta, Tláhuac, Xochimilco y Tlalpan. La Figura 5.5l, que muestra la distribución del pH ponderado, muestra un patrón de distribución espacial similar a la del ión hidrónico con los valores de mayor acidez al sureste de la ciudad. Un patrón de distribución similar al del hidrónico se observó para el ión cloruro, que como se comentó en

el informe 2016 podría tener alguna contribución a los niveles de acidez en el agua de lluvia. El centro de la ciudad, que concentra gran parte de las edificaciones y monumentos con valor histórico, presentó valores menores de pH y de otras especies que pudieran tener algún efecto en los materiales. En el caso del nitrógeno inorgánico total (Figura 5.5k) la mayor cantidad de depósito se observó al suroeste, en la zona de suelo de conservación, caracterizada principalmente por la presencia de importantes zonas boscosas. La zona chinampera de Xochimilco, que tiene importancia en términos ecológicos, turísticos y comerciales, continua expuesta a niveles de acidez que podrían afectar los cuerpos de agua y la producción chinampera; de igual manera, el depósito de nitrógeno inorgánico puede afectar los ya contaminados cuerpos de agua, pero también producir un efecto en las tierras de cultivo, el cual podría ser positivo o negativo.

Tabla 5.3. Promedio ponderado de pH, lluvia y depósito total para las diferentes especies analizadas. La lluvia acumulada está expresada en milímetros (mm), mientras que las unidades para el depósito son kilogramos por hectárea (kg/ha)

Sitio	pH ponderado	Precipitación acumulada	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
AJU	5.3	1167	0.090	0.8	1.0	0.5	6.5	3.2	12.1	18.6	24.7
COR	6	455	0.010	0.5	0.6	0.4	3.8	2.1	9.2	12.8	15.9
DIC	5.5	941	0.030	0.6	0.8	0.5	7.1	2.3	13.6	21.4	26.2
EAJ	5.4	1216	0.050	0.5	1.0	0.6	7.8	2.5	14.9	24.0	29.0
EDL	5.3	1307	0.070	0.5	1.0	0.6	7.6	2.3	11.9	20.7	26.1
IBM	5.6	789	0.020	0.5	0.7	0.5	6.4	1.7	9.9	15.1	21.2
LAA	5.6	660	0.020	0.3	0.5	0.5	4.3	1.3	7.5	11.2	14.3
LOM	5.5	945	0.030	0.4	0.8	0.6	7.4	2.1	11.3	19.5	24.5
MCM	6.2	684	0.000	0.6	0.7	0.4	5.2	1.8	10.4	14.2	19.1
MON	5.9	462	0.010	0.3	0.5	0.3	3.0	1.3	6.6	9.6	12.1
MPA	4.8	543	0.090	0.5	0.8	0.5	3.9	3.1	6.6	11.1	15.1
NEZ	6	660	0.010	0.3	0.5	0.3	4.0	1.7	8.6	10.6	13.4
SNT	5.5	1231	0.040	0.5	1.7	0.7	7.0	2.4	13.0	23.4	26.3
TEC	5.4	716	0.030	0.3	0.6	0.4	4.2	1.4	8.4	12.4	16.6
TLA	5.8	668	0.010	0.4	0.6	0.4	6.1	1.5	9.1	14.5	18.1
XAL	5.9	589	0.010	0.5	0.7	0.4	5.5	1.7	8.7	13.6	16.4

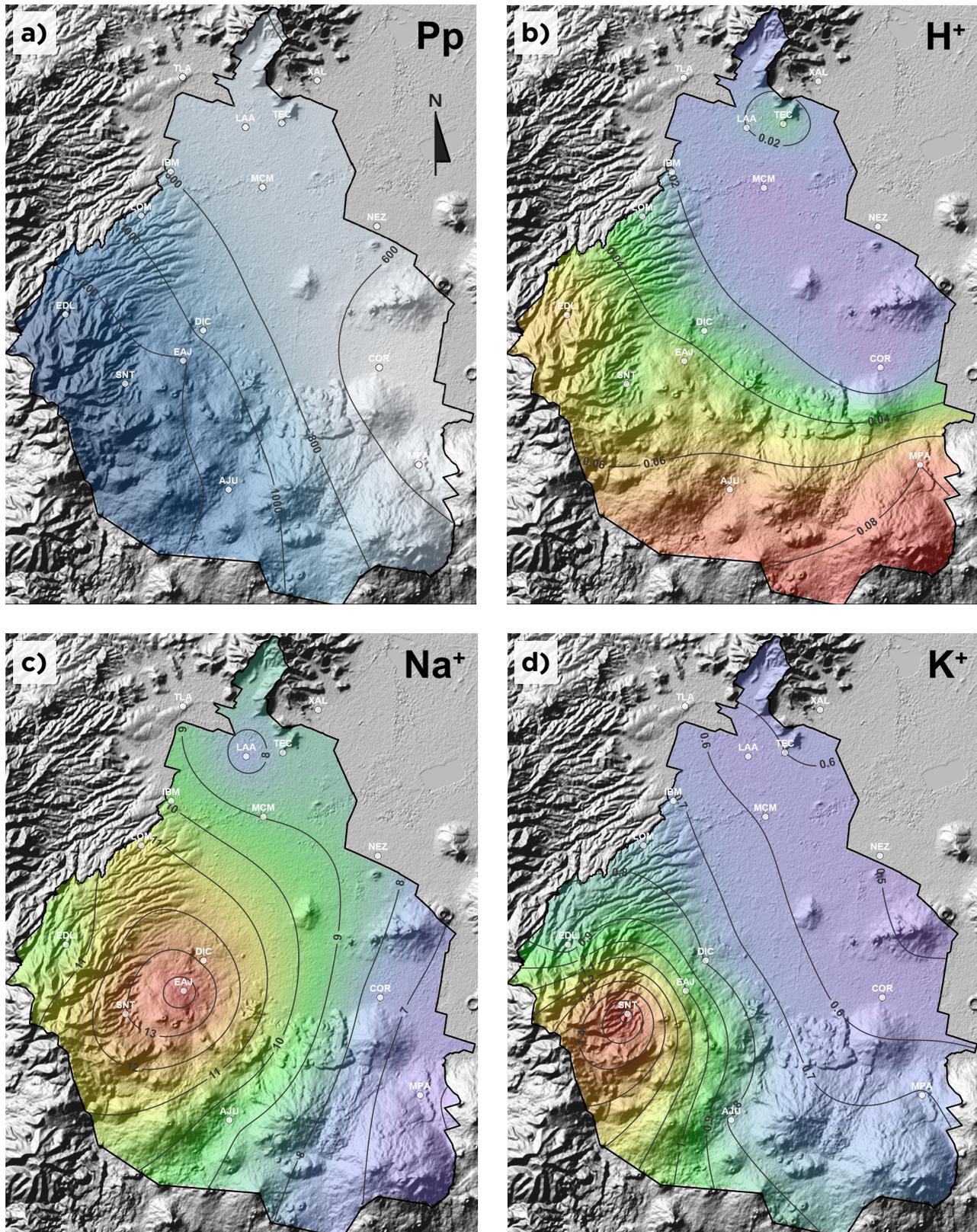


Figura 5.5. Mapas con la distribución espacial de la precipitación pluvial (a), iones analizados en el agua de lluvia (b-j), nitrógeno total (k) y pH ponderado (l).

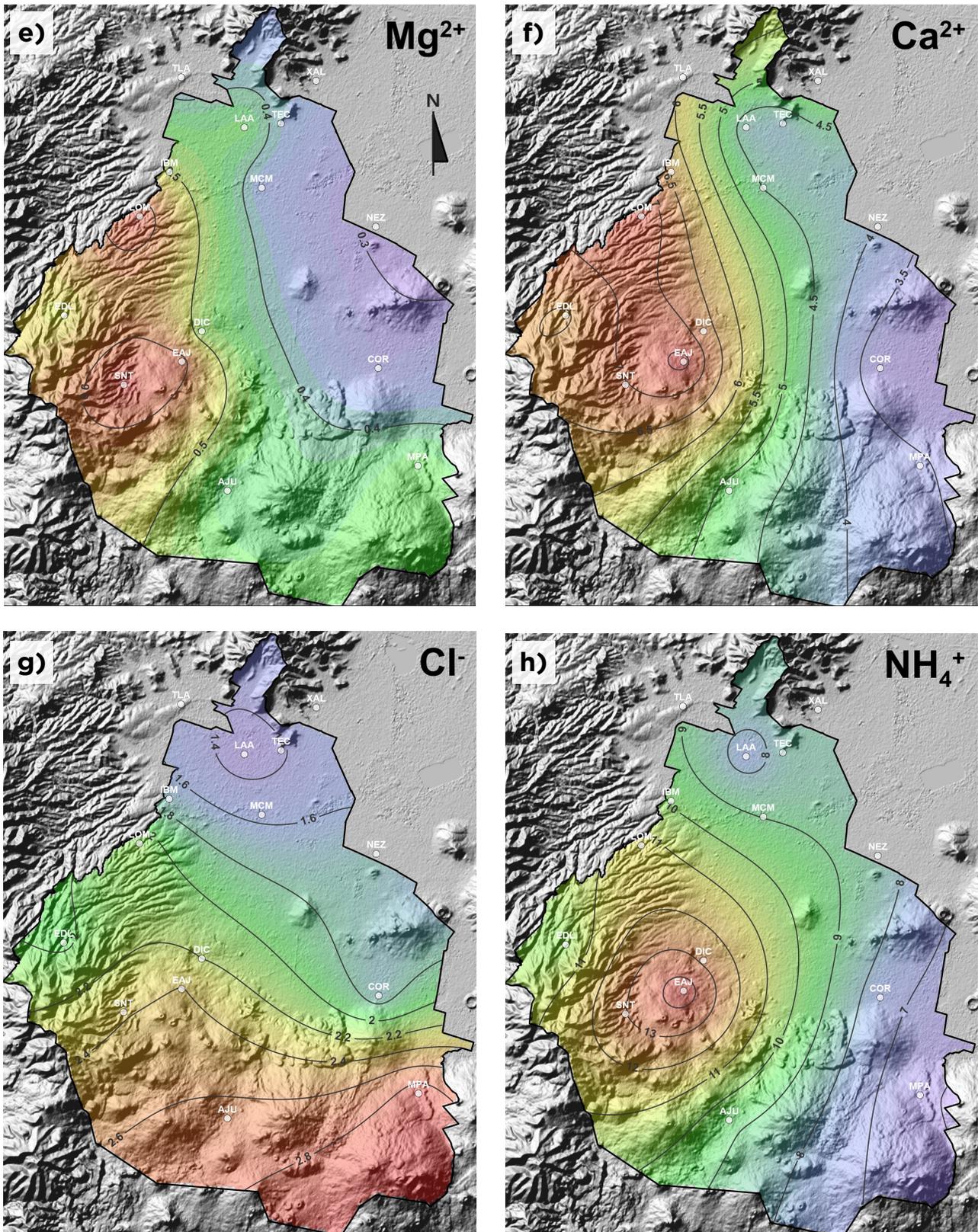


Figura 5.5 (continuación). Mapas con la distribución espacial de la precipitación pluvial (a), iones analizados en el agua de lluvia (b-j), nitrógeno total (k) y pH ponderado (l).

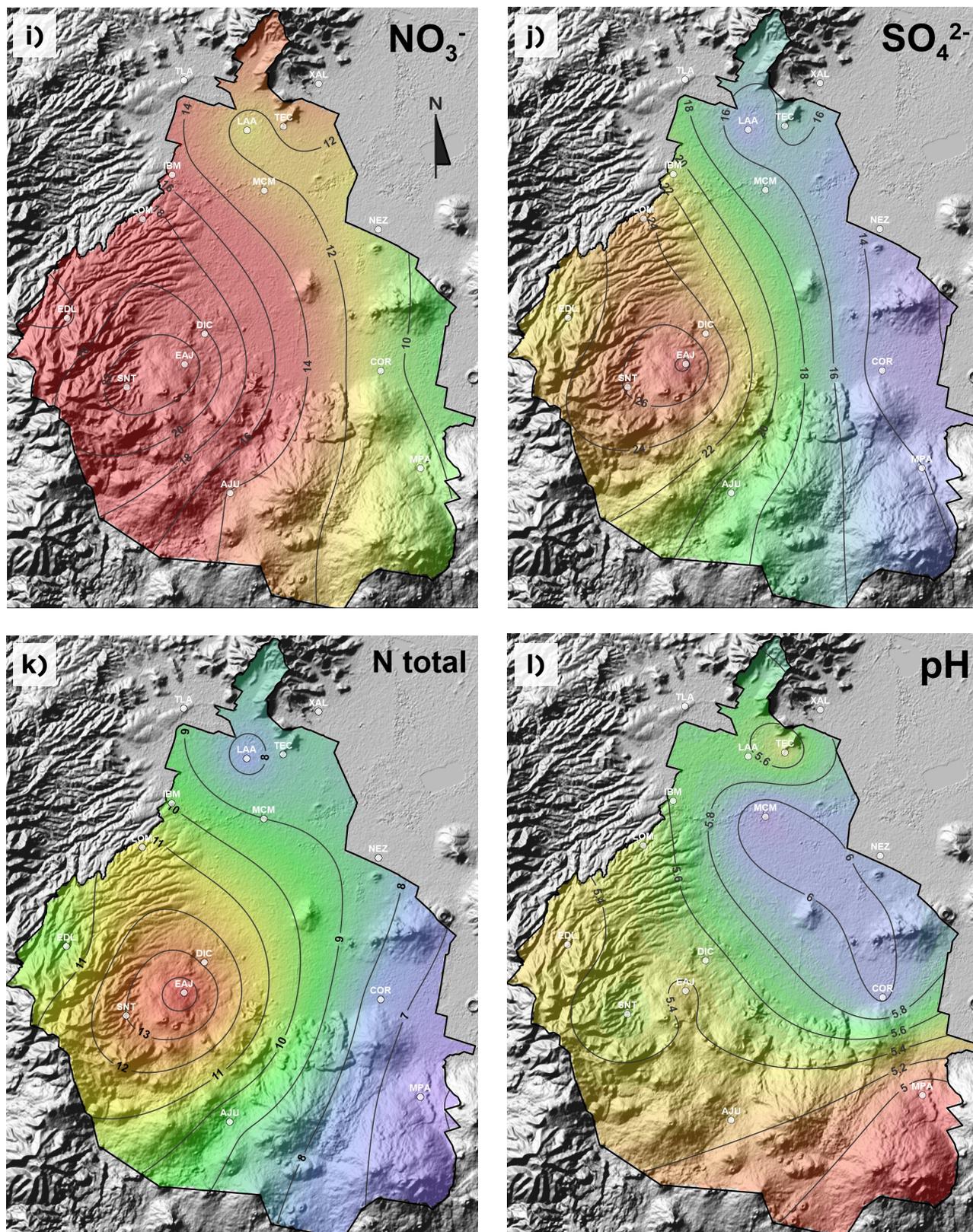


Figura 5.5 (continuación). Mapas con la distribución espacial de la precipitación pluvial (a), iones analizados en el agua de lluvia (b-j), nitrógeno total (k) y pH ponderado (l). (Continuación)



Area C

Area D

Area E

Area F

Area G

Area H

Area I

Area J

Area K

Area L

Area M

Area N

Area O

Area P

Area Q

Area R

Area S

Area T

Area U

Area V

Area W

Area X

Area Y

Area Z

MODES

KROFT

MARCA

Area A

Area B

Area C

Area D

Area E

Area F

Area G

Area H

Area I

Area J

Area K

Area L

Area M

Area N

Area O

Area P

Area Q

Area R

Area S

Area T

Area U

Area V

Area W

Area X

Area Y

Area Z

Area A

Area B

Area C

Area D

Area E

Area F

Area G

Area H

Area I

Area J

Area K

Area L

Area M

Area N

Area O

Area P

Area Q

Area R

Area S

Area T

Area U

Area V

Area W

Area X

Area Y

Area Z

6. Composición química de $PM_{2.5}$

Resultados de la campaña AERAS 2013

Antecedentes

La contaminación por partículas suspendidas es uno de los problemas de calidad del aire más importante que enfrentará la Ciudad de México. A diferencia de otros contaminantes, su presencia en concentraciones moderadas y altas es evidente por el efecto que tiene en la visibilidad, dada su capacidad de interactuar con la luz absorbiendo y/o dispersándola disminuyendo el rango visual. Diversos estudios de salud han demostrado que existe una asociación directa entre la morbi-mortalidad y el incremento en la concentración de las partículas suspendidas, con efectos mayores a medida que disminuye el tamaño de las partículas (Dockery, *et al.* 1993; WHO, 2003), por la capacidad que tienen las más pequeñas de ingresar a las regiones profundas del sistema respiratorio. Por otra parte, se ha demostrado que los aerosoles también tienen un impacto importante en el clima regional y global (IPCC, 2007).

Como se comentó en la Sección 3, las concentraciones de las diferentes fracciones de partículas suspendidas evaluadas por la red de monitoreo, continúan superando las concentraciones límite establecidas en la NOM-025-SSA1-2004. Después del ozono, las partículas son el contaminante responsable del mayor número de días con una mala condición de calidad del aire. En las décadas de 1990 y 2000 los niveles de partículas suspendidas totales y de PM_{10} disminuyeron drásticamente, sin embargo, en los últimos 17 años la tasa de reducción fue menor. En el caso de $PM_{2.5}$ no se observó tendencia en la información histórica, sugiriendo que las concentraciones se han mantenido relativamente estables desde 2004.

La complejidad en la mezcla de los compuestos que se encuentran presentes en las partículas suspendidas es reflejo de la multitud de fuentes y procesos atmosféricos que las generan. Estas incluyen no solo las fuentes antropogénicas típicas en los ambientes urbanos, como el tráfico, los procesos industriales y las actividades de construcción, las emisiones domésticas y residenciales, también fuentes naturales como el polvo del suelo, bioaerosoles, las emisiones volcánicas y los aerosoles generados por los incendios forestales. Las partículas emitidas a la atmósfera pueden transformarse a partir de interac-

ciones físicas o reacciones químicas con compuestos presentes de manera natural en el aire ambiente u otros contaminantes presentes en fase gaseosa o particulada, dependiendo de las condiciones ambientales (temperatura, contenido de humedad, radiación solar, etc.). La gran variabilidad y amplia distribución de las fuentes, los elevados volúmenes de emisión tanto de aerosoles como de contaminantes gaseosos, la complejidad en los procesos físico-químicos que ocurren en la atmósfera, así como el transporte regional de contaminantes, describen las dimensiones del reto que implica la gestión de este contaminante.

El estudio de la composición química de los aerosoles es necesario para entender sus propiedades y origen. En el pasado se han realizado esfuerzos importantes para la caracterización química de las partículas suspendidas principalmente durante las grandes campañas IMADA-AVER (Doran *et al.*, 1998; Edgerton *et al.*, 1999; Moya *et al.*, 2001), MCMA-2013 (Salcedo *et al.*, 2006; Molina *et al.*, 2007) y MILAGRO (Querol *et al.*, 2008; Aiken *et al.*, 2010; Molina *et al.*, 2010). Estas campañas se realizaron en la temporada de ozono, debido a que en este periodo se presentan los mayores niveles de contaminación de origen fotoquímico. Los principales resultados muestran una importante contribución de compuestos secundarios, orgánicos e inorgánicos, a la concentración de partículas finas. Recientemente los trabajos de Guerrero *et al.* (2017) y Salcedo *et al.* (2018) presentaron información actualizada sobre la composición química de los aerosoles para la Ciudad de México.

Con el propósito de contribuir al estudio de los aerosoles, la Dirección de Monitoreo Atmosférico diseñó la campaña AERAS (AERosoles AtmosféricoS). Durante esta campaña se desplegó un conjunto de instrumentos para la caracterización química y física de las partículas finas en los meses de la temporada seca fría (noviembre a febrero), que es el periodo en el que se presentan las mayores concentraciones de partículas. Algunos resultados de esta campaña se presentan en el trabajo de Guerrero *et al.*, (2017) donde describen el análisis de la fracción no-refractaria de PM_1 durante la campaña de 2013-2014. En esta sección se presentan los resultados del análisis de la composición iónica durante la campaña invernal 2013-2014.

Métodos

La campaña se realizó entre el 1 de noviembre y el 15 de febrero en las instalaciones del Laboratorio de Análisis Ambiental en donde se encuentra el supersitio de la Dirección de Monitoreo Atmosférico (latitud.: 19° 29' 01" N , longitud: 99° 08' 50" O, altitud: 2255 msnm). En este sitio se realizaron mediciones continuas de la concentración de $PM_{2.5}$ y su composición iónica. Adicionalmente se obtuvieron datos de la fracción no-refractaria de PM_1 (Guerrero *et al.*, 2017), carbono negro equivalente, contaminantes criterio y variables meteorológicas.

Para la cuantificación de la concentración de la masa total de $PM_{2.5}$ se empleó un monitor de microbalanza oscilatoria TEOM acoplado a un sistema FDMS para la recuperación de material

semi-volátil. La determinación de la composición iónica de la fracción $PM_{2.5}$ se realizó con un analizador MARGA (siglas en inglés para *Monitor for AeRosols and GAses in ambient air*) el cual consiste en un sistema de extracción de iones en fase gaseosa y particulada con el posterior análisis por cromatografía iónica (ver Figura 6.1). El equipo es capaz de proporcionar información horaria sobre la concentración de los iones sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), cloruro (Cl^-), amonio (NH_4^+), calcio (Ca^{2+}) magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y sodio (Na^+). La concentración de carbono negro equivalente se determinó utilizando un analizador fotoacústico (PAX). La medición de los contaminantes criterio se realizó con los analizadores continuos convencionales empleados en la RAMA para el análisis de ozono, dióxido de azufre, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Los datos de meteorología fueron obtenidos de la REDMET.

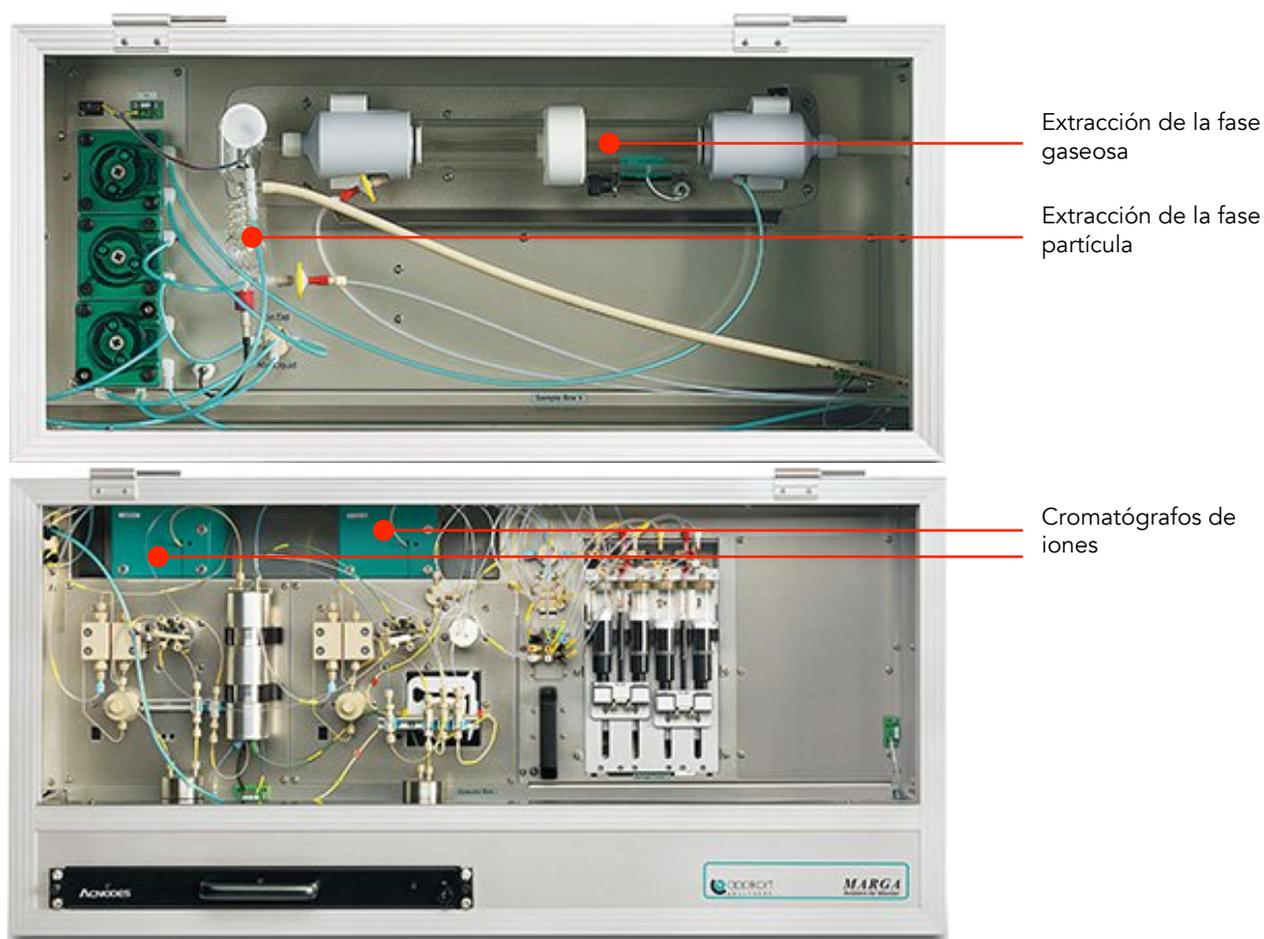


Figura 6.1. Analizador continuo de aerosoles MARGA (*Monitor for AeRosols and GAses*).

Resultados

En la Tabla 6.1 se muestran las estadísticas básicas para $PM_{2.5}$ y sus componentes. En la Figura 6.3 se presentan las series de tiempo con las concentraciones de $PM_{2.5}$ (6.3a) y las diferentes especies analizadas (6.3b-i), así como para carbono negro equivalente (6.3j). Los promedios horarios de la concentración de $PM_{2.5}$ presentaron una fuerte correlación con la suma de las concentraciones de los iones analizados y carbono negro equivalente, con un valor de R^2 de 0.883 (Figura 6.2). En promedio la suma de los iones orgánicos y carbono negro equivalente (CNe) representaron el 41% de la concentración de $PM_{2.5}$, la suma de los iones inorgánicos aportaron el 33% a la masa de las partículas finas, mientras que el CNe el 8% (ver Figura 6.4). Los iones más abundantes fueron nitrato, sulfato y amonio con contribuciones de 12.1, 11.3 y 6.5%, respectivamente. Por su origen los iones nitrato, sulfato y amonio se conocen como *aerosoles secundarios inorgánicos* (ASI o SIA por sus siglas en inglés) y juntos aportaron el 30% de la masa total de $PM_{2.5}$. Como se puede observar en la Figura 6.4, alrededor del 59% de la masa total de $PM_{2.5}$ no fue determinada en esta campaña, sin embargo, a través de estudios previos se sabe que podría estar constituido por compuestos orgánicos, biopartículas y metales (Salcedo et al., 2006; Querol et al., 2008; Aiken et al., 2009).

El nitrato y sulfato provienen de la oxidación en la atmósfera de los óxidos de nitrógeno y de azufre, respectivamente. Mientras que el amonio de la reacción de neutralización de los ácidos en la atmósfera en presencia de amoníaco. Las relaciones molares entre las concentraciones de amonio con el sulfato y nitrato sugieren que el amonio fue el principal responsable de la neutralización de los ácidos sulfúrico y nítrico, formando en primer lugar especies más estables con el sulfato y el resto reaccionando con el nitrato. El amoníaco es emitido a la atmósfera por las emisiones provenientes de los rellenos sanitarios, las emisiones vehiculares, los seres vivos, las plantas de tratamiento de aguas y los fertilizantes, entre las fuentes más importantes. Los iones calcio, magnesio y sodio están asociados principalmente al polvo del suelo, mientras que el potasio con la quema de biomasa; el cloruro puede provenir del

Tabla 6.1. Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de $PM_{2.5}$ y sus componentes.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar	Máximo	Mediana
$PM_{2.5}$	38.3	18.7	156.8	36.1
Iones inorgánicos	12.6	9.2	65.3	9.9
CNe	3.2	2.8	19.8	2.2
Amonio	2.5	2.2	15.8	1.9
Calcio	0.3	0.2	2.2	0.3
Cloruro	0.3	0.5	7.3	0.2
Magnesio	0.1	0.1	1.5	0.0
Nitrato	4.6	4.6	32.1	2.7
Potasio	0.2	0.4	6.3	0.1
Sodio	0.2	0.1	1.2	0.2
Sulfato	4.3	3.6	28.9	3.6

polvo del suelo pero también de la quema de basura a cielo abierto, quema de biomasa y algunas emisiones industriales. Estos iones se encontraron generalmente en bajas concentraciones durante toda la campaña, con excepción de los episodios de quema de juegos de pirotecnia durante las

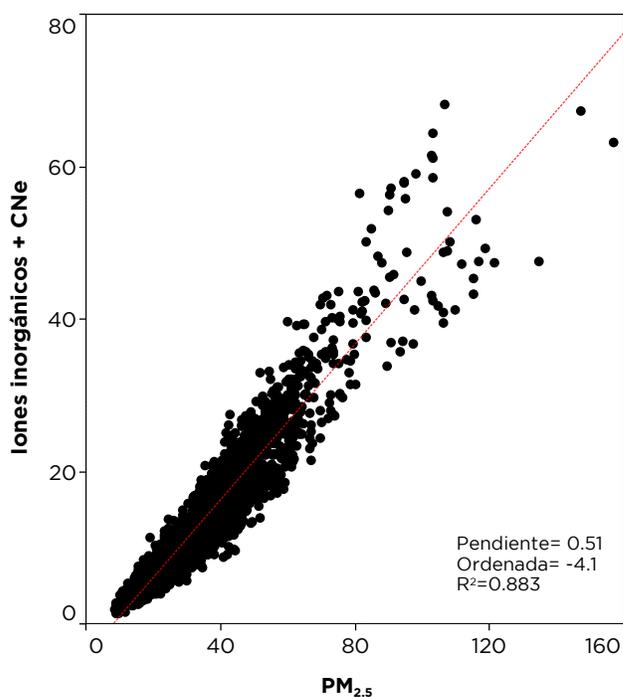


Figura 6.2. Relación entre la concentración de $PM_{2.5}$ medida con el TEOM-FDMS y la suma de los iones inorgánicos analizados con el MARGA y el carbono negro equivalente.

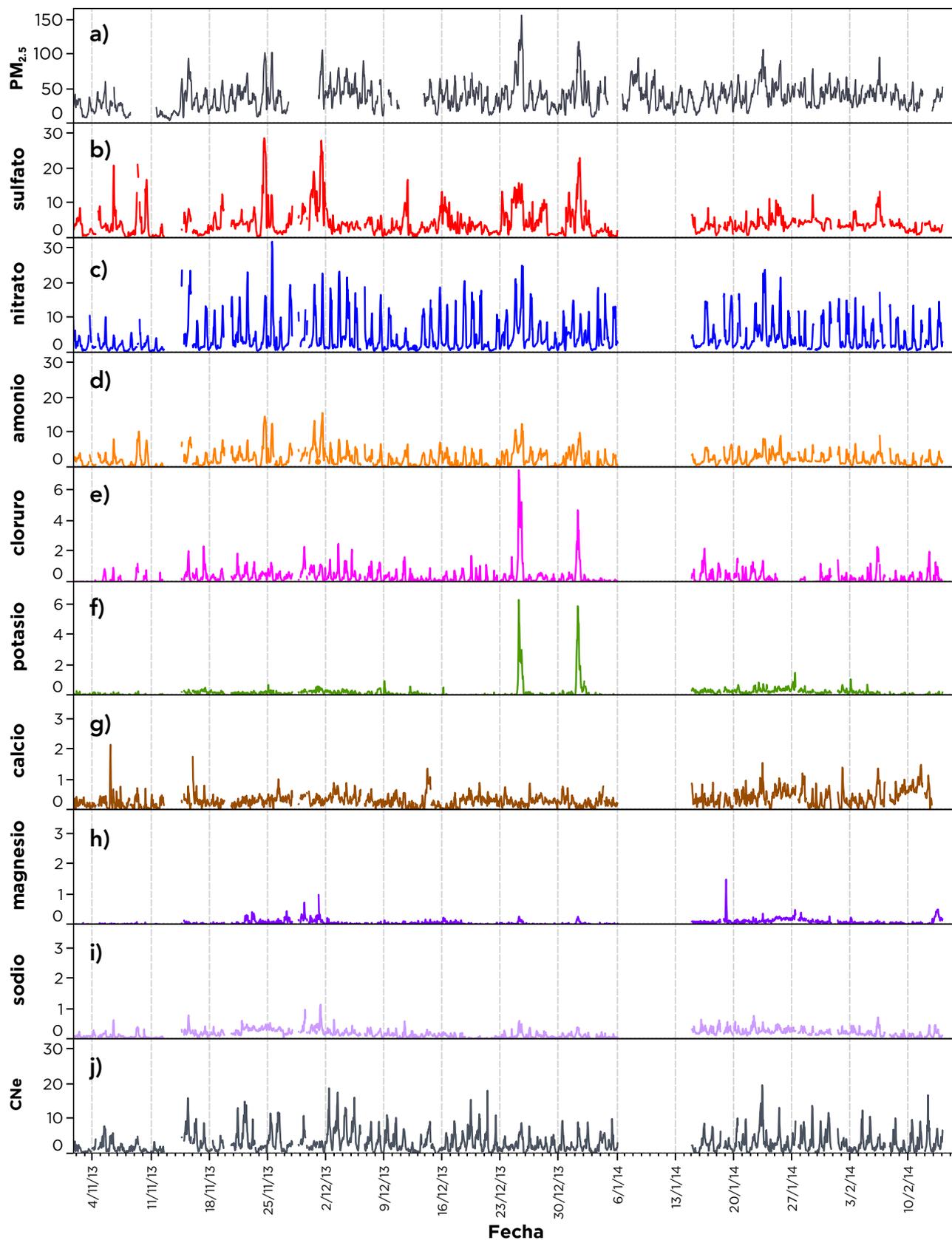


Figura 6.3. Series de tiempo para las diferentes especies iónicas analizadas en PM_{2.5} y carbono negro equivalente durante la campaña de monitoreo.

celebraciones de Navidad y Año nuevo, cuando los iones cloruro y potasio registraron incrementos significativos, como se puede ver en la Figura 6.3e y 6.3f. El promedio de suma de los iones calcio, cloruro, magnesio, potasio y sodio contribuyó con solo el 3% a la concentración total de $PM_{2.5}$. Por otra parte, como se comentó en la Sección 3, el CNe provino principalmente de las emisiones vehiculares y sus concentraciones estuvieron fuertemente correlacionadas con las concentraciones de los contaminantes generalmente asociados con las emisiones vehiculares monóxido de carbono ($R^2=0.778$) y dióxido de nitrógeno ($R^2=0.845$).

En comparación con los resultados obtenidos para $PM_{2.5}$ durante la campaña MCMA-2013 (Salcedo et al., 2006) y MILAGRO (Querol et al., 2008), las concentraciones de sulfato, nitrato y amonio obtenidos en este estudio fueron mayores debido posiblemente a una mayor estabilidad atmosférica favorecida por la presencia de inversiones térmicas durante las mañanas y una menor altura en la capa

de mezcla durante los días de invierno.

El balance electroquímico de los componentes iónicos de $PM_{2.5}$ sugirió que los aerosoles fueron predominantemente ácidos en concordancia con Guerrero et al. (2017) para PM_{1} . Lo anterior a pesar de que se ha identificado a la atmósfera de la ciudad como rica en amoníaco (Aiken et al., 2009).

La Figura 6.5a muestra la variación horaria de cada una de las especies durante el día. El perfil del nitrato refleja su origen fotoquímico por la oxidación en la atmósfera del dióxido de nitrógeno, con un máximo alrededor del mediodía, por la tarde la concentración del nitrato disminuyó por el aumento de la temperatura debido a la volatilidad del nitrato de amonio. Mientras que el sulfato presentó un perfil caracterizado por una elevada señal de fondo asociada principalmente con el transporte regional desde el corredor industrial Tula-Tepeji (Salcedo et al., 2006; Aiken et al., 2009). La variación del amonio es similar al nitrato sugiriendo que el nitrato se encontraba en forma de

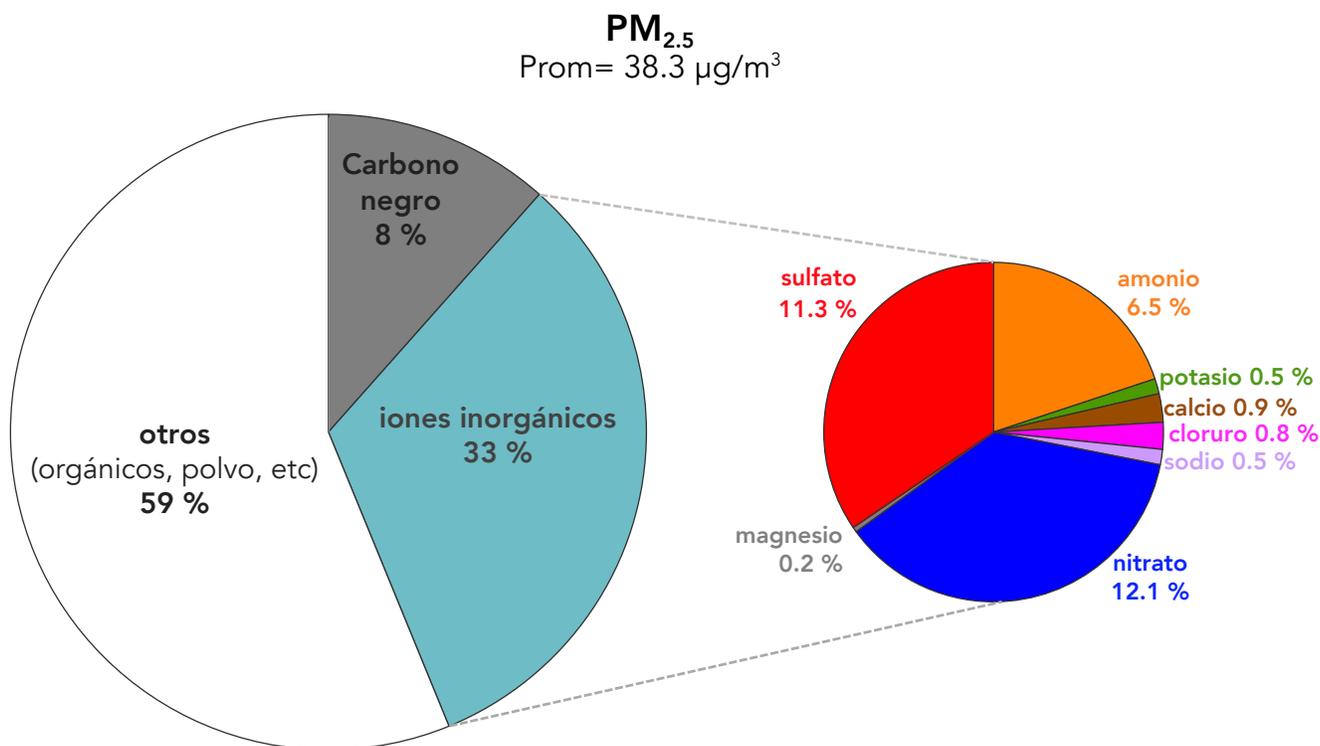


Figura 6.4. Contribución a la concentración de $PM_{2.5}$ de los iones inorgánicos y el carbono negro equivalente, para la fracción inorgánica se detalla la contribución individual de cada especie iónica.

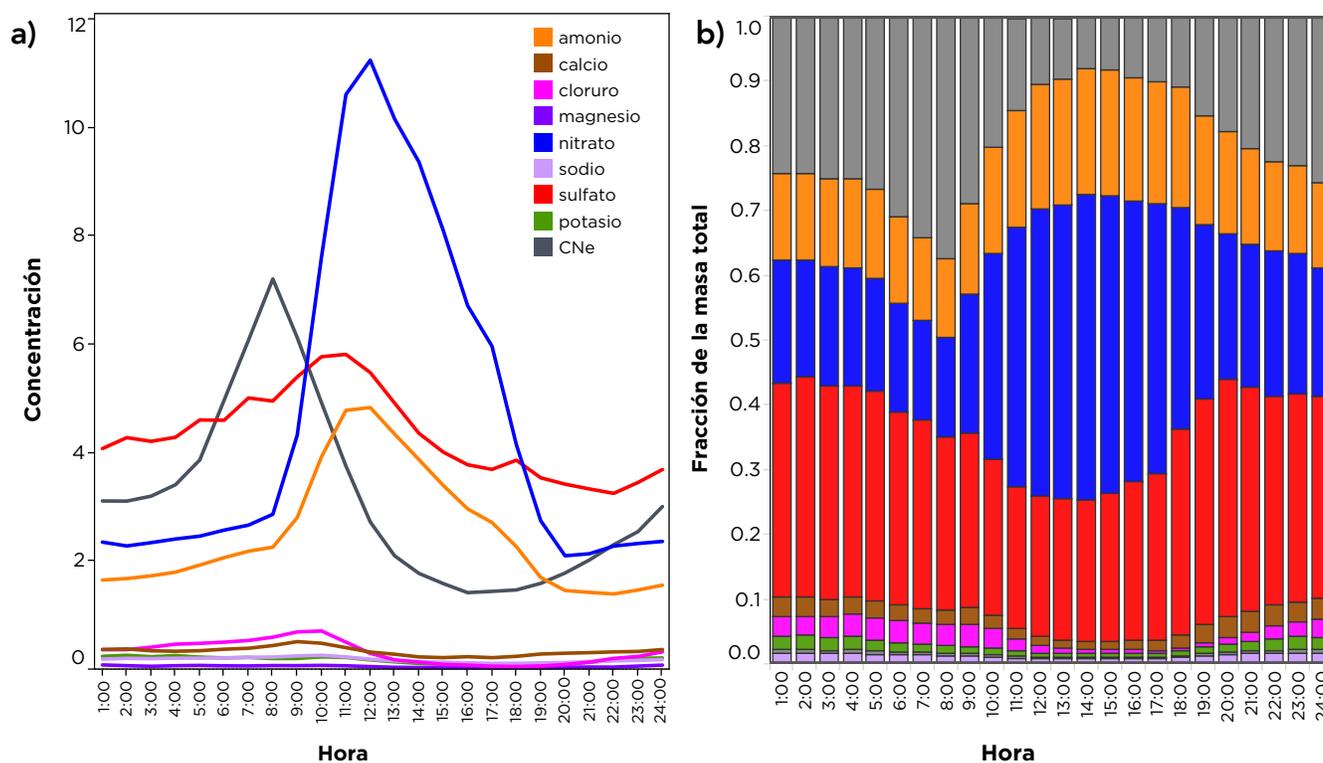
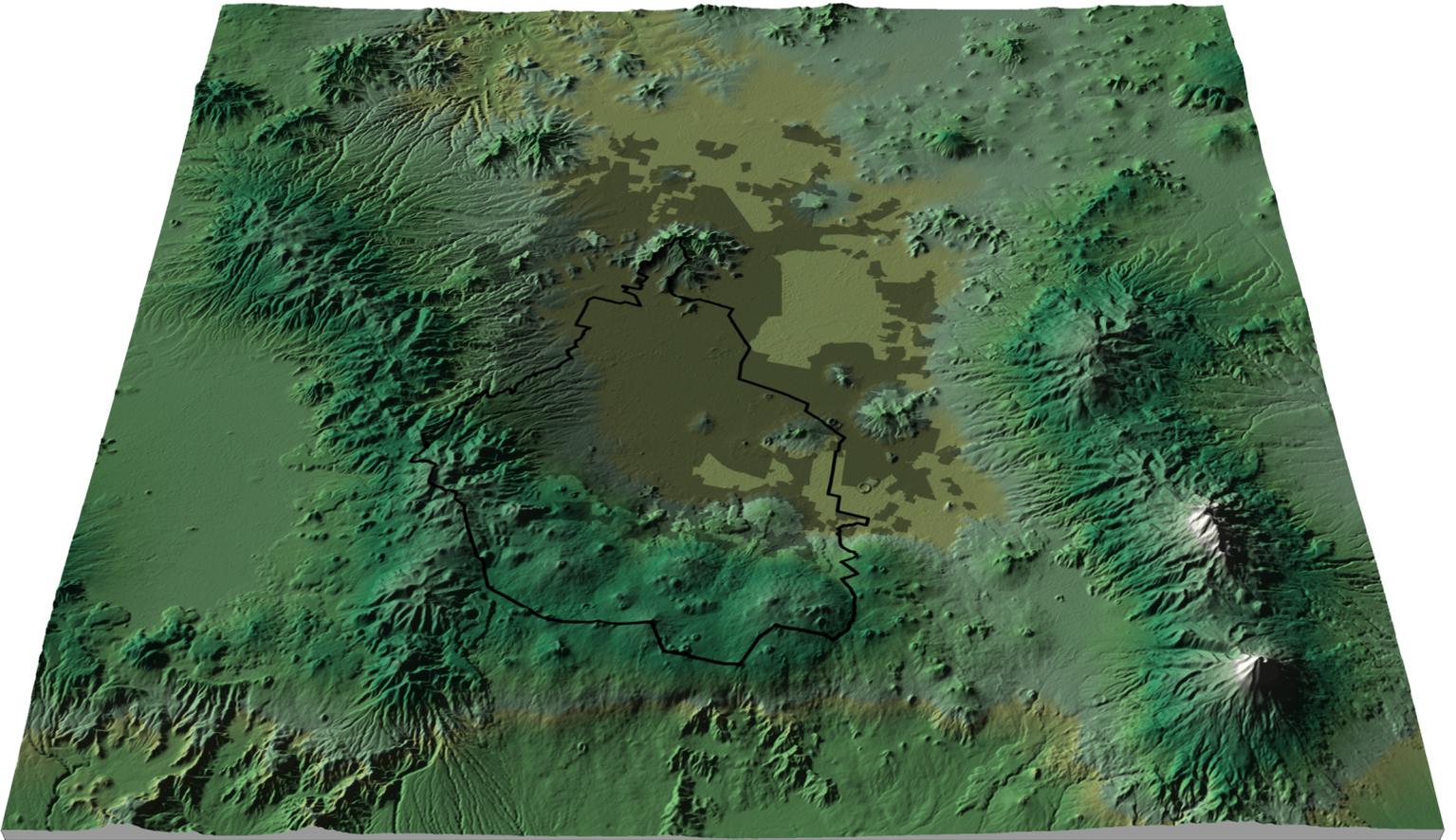


Figura 6.5. Evolución de las concentraciones promedio horarias de las diferentes especies iónicas y del carbono negro equivalente presentes en $PM_{2.5}$ (a) y de las contribuciones relativas de cada una de las especies analizadas a la concentración total de la fracción inorgánica (b) de las $PM_{2.5}$.

nitrate de amonio (NH_4NO_3) durante el día. El perfil del CNe fue similar al de los óxidos de nitrógeno y el monóxido de carbono (ver Figuras 3.9a y 3.15a), las elevadas concentraciones de los ASI entre las 9:00 y 12:00 explica el perfil de las $PM_{2.5}$ presentado en la Figura 3.23c descrito en la Sección 3. La Figura 6.5b muestra la variación diurna de las contribuciones de cada una de las especies determinadas, expresada como la fracción de la masa de cada especie con respecto a la suma de las especies iónicas y el CNe. Durante el periodo nocturno el sulfato fue el ión más abundante, mientras que durante el periodo diurno predominaron las contribuciones de nitrato y amonio. El incremento en la contribución de CNe coincidió con la hora de mayor actividad vehicular, con un máximo a las 8:00. Los perfiles reportados son similares a los descritos para los componentes de $PM_{2.5}$ en estudios previos. Las variaciones durante el día reflejaron el balance entre la producción de aerosoles, las variaciones de la altura de mezclado y las propiedades termodinámicas de las diferentes especies.

Discusión

Los resultados muestran que los compuestos secundarios representaron alrededor de la tercera parte de la masa de $PM_{2.5}$ y predominaron en la fracción inorgánica. La contribución primaria del carbono negro predominó en el periodo de mayor actividad vehicular. Los iones inorgánicos relacionados con fuentes primarias tuvieron una menor contribución en comparación con los iones de origen secundario. Dentro de los principales precursores gaseosos de las partículas inorgánicas se encuentran los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre y el carbono negro. Durante el periodo nocturno el sulfato fue la especie más abundante, mientras que en el día el nitrato y amonio dominaron la fracción inorgánica. Se encontró además que los aerosoles tenían un carácter predominantemente ácido. Los resultados obtenidos fueron consistentes con los reportados en estudios previos. Se espera que el análisis de estos resultados proporcione evidencia sobre las propiedades y origen de los aerosoles.



7. Modelación

Evaluación de los resultados del
pronóstico numérico
de ozono durante 2017

Antecedentes

A partir del 13 de febrero de 2017 la Dirección de Monitoreo Atmosférico implementó el Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire de la CDMX (*Air Quality Forecasting System-Ciudad de México, AQFS-CDMX*), desarrollado en colaboración con el Centro Nacional de Supercómputo de Barcelona (BSC). Las características y diseño de este modelo se describen en el Informe 2016. El AQFS-CDMX fue concebido como una herramienta indispensable para la gestión de la calidad del aire, dentro de los objetivos del sistema el más importante tiene que ver con la identificación anticipada de eventos de contaminación con un riesgo potencial para la salud pública mediante el pronóstico meteorológico y de calidad del aire. Otros usos del sistema tienen que ver con la simulación de escenarios y el diseño de políticas de gestión (ver Figura 7.1).

La evaluación de los resultados de pronóstico contra las observaciones derivadas de la medición de las concentraciones de los contaminantes, permite conocer el desempeño del modelo y estimar cuantitativamente el nivel de confianza de sus estimaciones. Del análisis de los resultados es posible identificar los procesos en donde se requieren mejoras para su optimización. En esta sección se muestran los resultados de la evaluación del desempeño del sistema de pronóstico durante la temporada de ozono comprendida entre el 15 de febrero y el 15 de junio de 2017, utilizando una serie de métricas estadísticas para la evaluación de modelos (Taylor, 2001; Willmott et al., 2012; Legates y McCabe, 2013). El objetivo fue evaluar la capacidad del modelo para reproducir la concentración máxima de ozono en cualquiera de las estaciones de monitoreo que miden este parámetro en la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA). La evaluación examina el desempeño del pronóstico de forma discreta (concentraciones observadas contra las simuladas) y categórica (observados contra simulados en cuanto a días sucios o limpios), para la concentración máxima horaria, utilizando como referencia el valor límite de 1 h (95 ppb, de acuerdo con la NOM) en cualquiera de las estaciones de monitoreo. Para la evaluación categórica, la ubicación espacial del máximo tiene una menor importancia ya que solo indica la condición máxima en el dominio de la red de monitoreo.

Métodos

Los modelos de pronóstico numérico para calidad del aire son deterministas por lo tanto, tienen dificultades para reflejar la aleatoriedad de los procesos que ocurren en la atmósfera. Poseen un nivel de incertidumbre asociado principalmente a la calidad de los datos de entrada (inventarios de emisiones, condiciones de frontera, etc.), en su capacidad de pronosticar las variables meteorológicas, y en los mecanismos y supuestos de la química de las transformaciones secundarias.

La evaluación exhaustiva de un modelo se realiza en términos científicos, estadísticos y operacionales. En el primer caso se examinan los algoritmos de cálculo, la física y la química, así como los supuestos que asume el modelo, para con ello determinar la precisión, sensibilidad y eficiencia. En términos estadísticos, las predicciones se examinan comparando contra las observaciones. Por último, en la operación del modelo se evalúa la facilidad de uso, la guía del usuario, la interfaz, la comprobación de errores en las entradas, el procesamiento y visualización de los resultados. Debido a que el sistema de pronóstico está basado en modelos revisados continuamente por la comunidad científica, en esta sección solamente se realiza la evaluación en términos estadísticos.

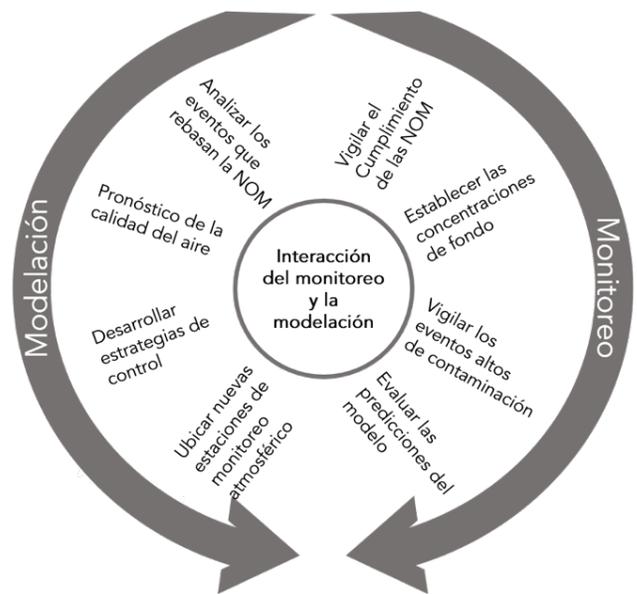


Figura 7.1. Relación entre el monitoreo atmosférico y la modelación de calidad del aire. (adaptado de Strimaitis D., et al. *Air Quality Modeling*, 1980, USEPA)

Evaluación con estadísticos discretos

El desempeño se evalúa utilizando el valor máximo pronosticado contra el valor máximo observado, para toda la red y por estación. En esta evaluación se emplea más de una métrica, en donde cada una describe una característica del comportamiento del modelo, los resultados permiten evaluar al modelo desde diferentes perspectivas. Las métricas utilizadas fueron:

Sesgo promedio (mean bias, MB): indicador de tendencia central sobre el sesgo que tienen los datos pronosticados (M_i) con respecto a los observados (O_i), si es positivo el modelo sobrestima, si es negativo subestima.

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N M_i - O_i$$

Error absoluto promedio (mean gross error, MGE): indicador de tendencia central de la diferencia entre los datos observados y los pronosticados, independientemente si el modelo sobreestima o subestima.

$$MGE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N |M_i - O_i|$$

Raíz del error cuadrático medio (root mean, RMSE): indicador de la desviación estándar de los errores de la predicción, es una medida de dispersión de los residuos. Indica la precisión de los datos pronosticados con respecto a los observados.

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n} \right)^{1/2}$$

Coefficiente de correlación (r): se refiere al grado de asociación entre dos variables, que puede tomar valores entre 0 y 1. Un valor de 0 corresponde a una falta de asociación entre las variables, mientras que de (\pm) 1 indica una estrecha relación entre ambas, la cual puede ser positiva o negativa. Este indicador permite identificar si el modelo sigue un patrón de comportamiento similar al de los datos observados, independientemente de la magnitud.

$$r = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i - \bar{M}}{\sigma_M} \right) \left(\frac{O_i - \bar{O}}{\sigma_O} \right)$$

Coefficiente de eficiencia (coefficient of efficiency, COE): este indicador mide el rendimiento del modelo de una forma sencilla, si el valor está entre 0.5 y 1 indica que el modelo es capaz de pronosticar adecuadamente las concentraciones de ozono (Legates y McCabe, 1999; Legates y McCabe, 2013); un valor entre 0 y 0.5 implica que el modelo es capaz de simular los patrones pero no las concentraciones, mientras que un valor menor a 0 indica que el modelo no es eficiente para el pronóstico.

$$COE = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |M_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}$$

Índice de coincidencia (index of agreement, IOA): este indicador desarrollado por Willmott et al., (2012) evalúa el modelo en una escala de 1 a -1, donde 1 corresponde a una simulación idéntica a las observaciones, 0.5 indica que el error es la mitad de la desviación observada, con un valor de 0 el error es igual a la desviación observada, -0.5 indica que el error es el doble de la desviación observada, y por último un valor de -1 indica una mala estimación.

$$IOA = \begin{cases} 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |M_i - O_i|}{c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}, & \text{cuando} \\ \sum_{i=1}^n |M_i - O_i| \leq c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \\ c \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}{\sum_{i=1}^n |M_i - O_i|} - 1.0, & \text{cuando} \\ \sum_{i=1}^n |M_i - O_i| > c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \end{cases}$$

Diagrama de Taylor: muestra gráficamente el grado de correspondencia entre los patrones modelados con los observados en términos de tres estadísticos: coeficiente de correlación de Pearson, error cuadrático medio (RMSE) y desviación estándar (Taylor, 2001). Un ejemplo de un diagrama de Taylor se muestra en la Figura 7.2.

Diagrama de cuantiles condicionales: se emplea para evaluar el rendimiento del modelo con respecto a las observaciones continuas (Wilks, 2005), el método consiste en la observación de la distribución de los datos por intervalos espaciados uni-

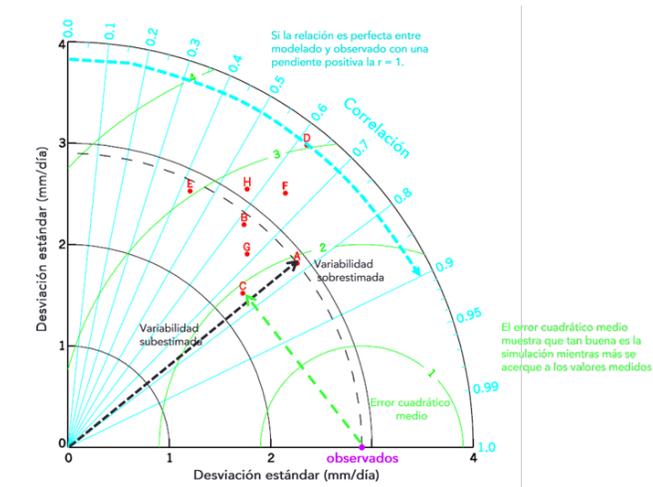


Figura 7.2. Ejemplo del diagrama de Taylor donde se muestra la comparación estadística entre 8 modelos y el patrón anual de la precipitación media anual.

formemente (histograma), los cuales se representan como barras en un gráfico, para cada intervalo se calcula la mediana, los percentiles 25-75 y 10-90, tanto para las observaciones como para los datos pronosticados. El diagrama de cuantiles condicionales junto con el de cuantiles Q-Q permite analizar que tan buena fue la predicción del modelo con respecto a las observaciones, a través de la distribución completa de los valores (ver el ejemplo de la Figura 7.3).

Rendimiento del modelo en porcentaje: esta métrica evalúa el desempeño de manera simple expresándolo en términos del porcentaje de la diferencia del valor del máximo diario observado comparado con el valor del máximo diario modelado siguiendo la fórmula:

$$\left(\frac{\text{máximo diario observado} - \text{máximo diario pronosticado}}{\text{máximo diario observado}} \right) \times 100$$

el desempeño del modelo se califica como *bueno* cuando la diferencia entre las observaciones y los valores pronosticados es $\leq 10\%$, *regular* cuando la diferencia es $> 10\%$ y $\leq 20\%$, y *malo* cuando la diferencia es $> 20\%$.

Evaluación cuantitativa

La evaluación cuantitativa o categórica del modelo se realiza a partir del análisis por cuadrante de la dispersión entre los datos modelados y las observaciones, como se muestra en la Figura 7.4, en donde se calcula la precisión (A), sesgo (B), tasa de aciertos (H), índice de falsa alarma (F) e índice de éxito crítico (EC) como se describe a continuación:

Precisión (A): indica el porcentaje de valores simulados que predicen adecuadamente las concentraciones de ozono > 95 ppb. El valor de A está fuertemente influenciado por el número de valores que se pronostican con concentraciones ≤ 95 ppb (el cuadrante c en la Figura 7.4).

$$A = \left(\frac{b+c}{a+b+c+d} \right) \times 100\%$$

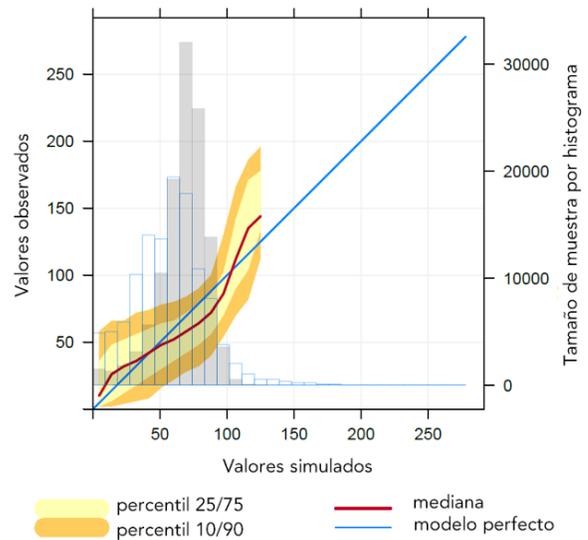


Figura 7.3. Ejemplo del diagrama de cuantiles condicionales. La línea azul corresponde a un pronóstico perfecto, la línea roja indica la mediana de los datos simulados, el sombreado amarillo y naranja muestra los intervalos de los cuantiles de los datos simulados (25/75 y 10/90). Un modelo perfecto se encontraría sobre la línea azul y la variabilidad de los cuantiles sería estrecha, la extensión de los cuantiles sobre la línea depende de la ubicación del valor máximo simulado. Los histogramas en el fondo de la gráfica corresponden a las distribución de los datos observados en líneas azules y de los datos del pronóstico en barras grises.

Sesgo (B): indica la subestimación (falso negativo) o sobreestimación (falso positivo) del pronóstico. Un valor de 1 indica que no hay sesgo, un valor <1 indica subestimación, mientras que un valor >1.0 corresponde a sobreestimación.

$$B = \left(\frac{a+b}{b+d} \right)$$

Índice de falsa alarma (F): indica el porcentaje de veces en las que se pronosticó una concentración de ozono >95 ppb y esta no ocurrió. Un $F=0$ indica que no hay falsa alarma, mientras que un $F=50\%$ indica que la mitad de los casos en los que se pronosticó una concentración >95 ppb no ocurrieron.

$$F = \left(\frac{a}{a+b} \right) \times 100\%$$

Índice de éxito crítico (IEC): indica que tan bien se pronostican los valores >95 ppb, con respecto al total de valores pronosticados y observados como >95 ppb. A diferencia de la precisión (A), el IEC no se afecta por el número de datos pronosticados correctamente. Un IEC de 50% indica que la mitad de los datos fueron pronosticados correctamente.

$$IEC = \left(\frac{b}{a+b+d} \right) \times 100\%$$

Tasa de aciertos (H): es similar al IEC e indica el porcentaje de aciertos en las concentraciones >95 ppb, también se denomina como probabilidad de detección (*probability of detection, POD*).

$$H = \left(\frac{b}{b+d} \right) \times 100\%$$

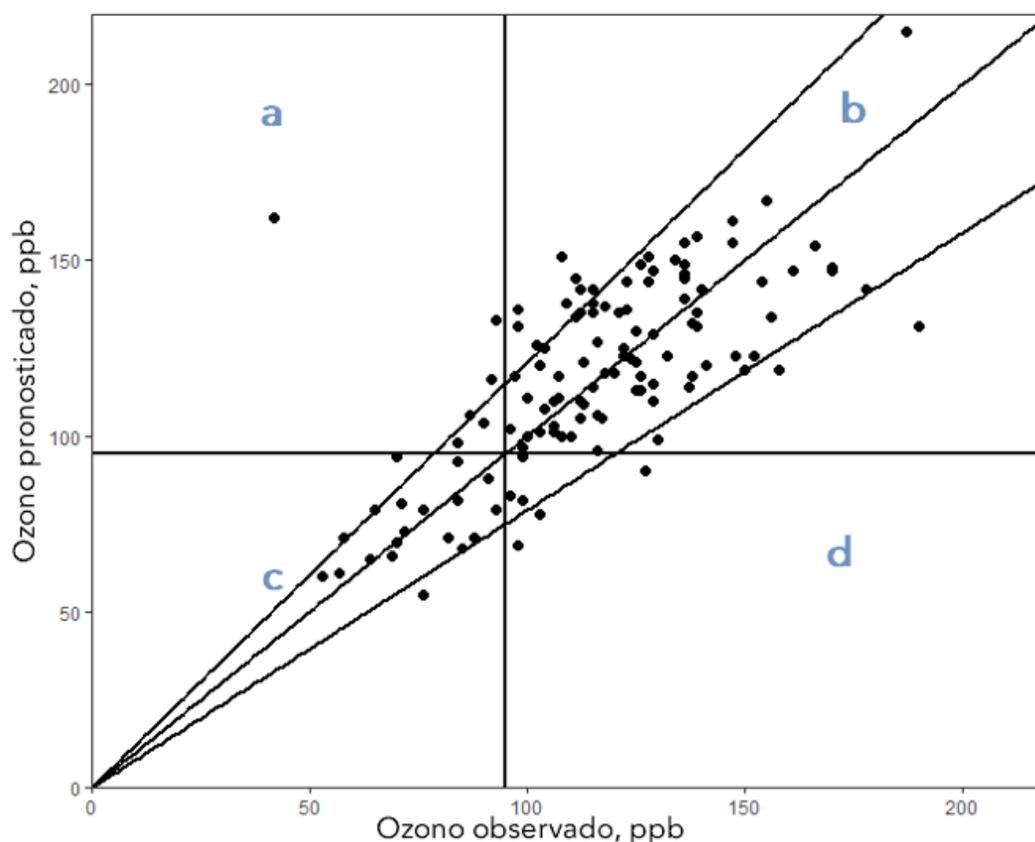


Figura 7.4. Ejemplo del gráfico de dispersión de los datos modelados y observados y los cuadrantes empleados en la evaluación categórica. En el cuadrante **a** se muestran los falsos positivos, que son datos pronosticados como >95 ppb cuando la observación fue ≤ 95 ppb; en el cuadrante **b** se muestran los datos pronosticados adecuadamente; en el cuadrante **c** se indican los datos pronosticados ≤ 95 ppb adecuadamente; mientras que en el cuadrante **d** se encuentran los falsos negativos, es decir, datos pronosticados ≤ 95 ppb, cuando las observaciones eran >95 ppb.

Resultados

La Figura 7.5 muestra la serie de tiempo con las concentraciones máximas registradas en la red, junto con los valores pronosticados para las 24 y 48 horas, durante la temporada de ozono. En términos generales el rendimiento del modelo, definido como el porcentaje de pronósticos categorizados como buenos y regulares, fue de 80% para el pronóstico de 24 horas y de 72% para el de 48 horas, en la Figura 7.5. En la Tabla 7.1 se presentan los resultados de la evaluación de las métricas discretas en

doce de las estaciones de la red en donde ocurrió la mayor frecuencia de eventos con concentraciones >95 ppb, y para todas las estaciones de la red. De acuerdo con los resultados de todas las estaciones, el modelo presentó un desempeño razonable para el pronóstico de 24 horas con un valor de 0.9 en el sesgo promedio (lo que sugiere que el modelo suele sobrestimar), así como un valor de 13.1 ppb para el promedio del error absoluto. La fuerte correlación entre los valores observados y el pronóstico ($R=0.86$), junto con el valor de 0.51 para el COE y de 0.76 para el IOA, indican que el modelo

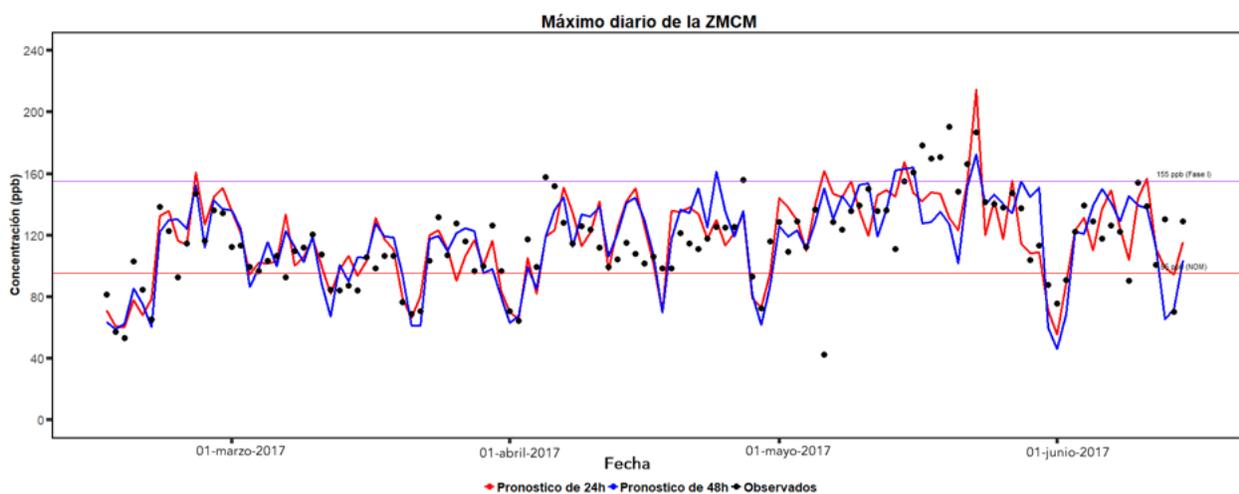


Figura 7.5. Comparación del valor máximo diario de la concentración horaria de ozono registrado entre el 15 de febrero al 15 de junio de 2017 y los datos obtenidos de la simulación de 24 y 48 horas.

Tabla 7.1. Indicadores estadísticos de la evaluación del modelo de 24 h con respecto a los datos observados.

Estación	MB	MGE	RMSE	r	COE	IOA
AJM	3.8	13.5	17.4	0.81	0.39	0.70
BJU	-0.1	12.4	16.8	0.87	0.55	0.78
CCA	1.5	13.0	17.2	0.87	0.54	0.77
COY	-0.7	13.1	17.0	0.87	0.53	0.77
GAM	-2.2	13.5	18.1	0.85	0.52	0.76
HGM	-1.9	12.2	16.4	0.87	0.54	0.77
IZT	-3.0	11.8	16.3	0.88	0.58	0.79
PED	3.1	13.2	17.4	0.85	0.50	0.75
SJA	-3.4	12.5	17.2	0.86	0.54	0.77
TAH	11.3	16.2	19.7	0.84	0.38	0.69
UAX	2.47	12.8	16.5	0.87	0.53	0.77
UIZ	-0.1	13.2	17.4	0.86	0.52	0.76
Todas	0.9	13.1	17.3	0.86	0.51	0.76

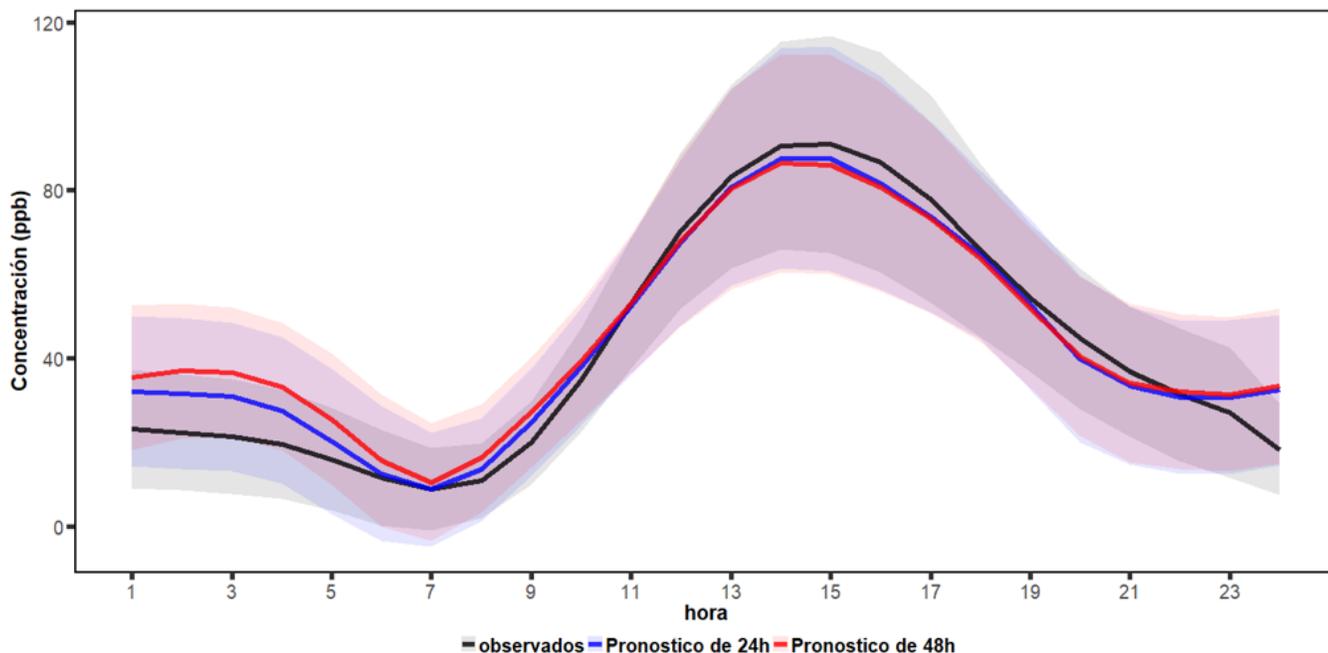


Figura 7.6. Comparación del valor máximo diario de la concentración horaria de ozono registrado entre el 15 de febrero y el 15 de junio de 2017 y los datos obtenidos de la simulación de 24 y 48 h.

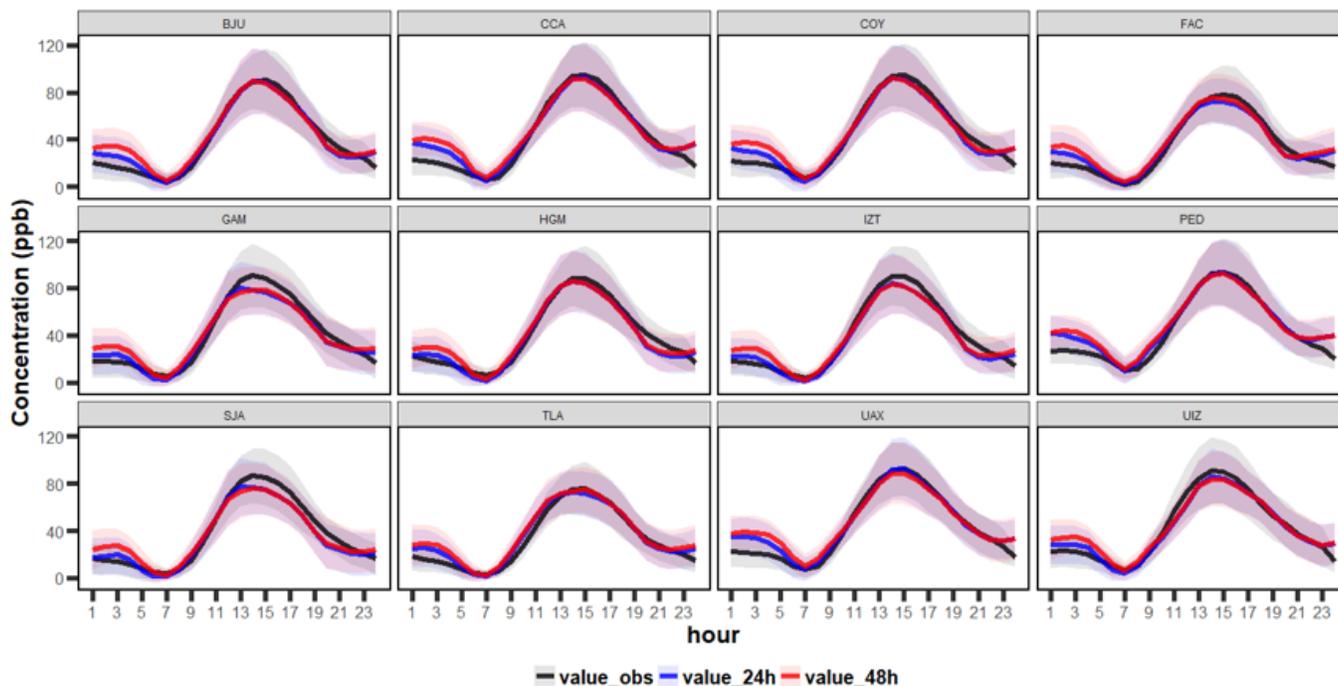


Figura 7.7. Perfil horario de las concentraciones horarias de ozono de las 12 estaciones seleccionadas y distribuidas por toda la ZMCM (15 de febrero al 15 de junio de 2017).

realizó un buen trabajo para predecir tanto las concentraciones máximas, como los patrones de ozono. Para el pronóstico de 48 horas los valores para los indicadores MB, MGE, RMSE, R, COE e IOA fueron 3.3 ppb, 14.5 ppb, 19 ppb, 0.83, 0.45 y 0.73, respectivamente. Estos resultados confirman una mayor variabilidad que para el pronóstico de 24 horas, pero mantiene un desempeño razonable, sin embargo, un menor valor en el COE indica que para el pronóstico de 48 horas el modelo tiene un desempeño pobre en la identificación de la variabilidad diurna. Evaluando individualmente el desempeño en las estaciones en donde se registró la mayor frecuencia de concentraciones máximas, se observó una mayor variabilidad asociada principalmente a la incertidumbre del modelo para estimar concentraciones puntuales, sin embargo, en términos generales el desempeño fue razonable. Con excepción de la estación Tláhuac (TAH) en donde el valor del sesgo promedio fue de 11.3 ppb, para el resto de los sitios estuvo entre -3.4 y 3.8 ppb. El error absoluto promedio estuvo entre 11.8 y 16.2 ppb, mientras que la precisión descrita por el RMSE estuvo entre 16.3 y 19.7 ppb. Los valores de R entre 0.81 y 0.87 muestran una buena concordancia entre las observaciones y el pronóstico. Los bajos valores para el COE en Ajusco Medio (AJM) y Tláhuac (TAH) de 0.39 y 0.38, indican que el modelo tiene un de-

sempeño pobre para simular la variabilidad diurna en estos sitios, mientras que los valores entre 0.5 y 0.58 para el resto de las estaciones sugieren que el modelo es capaz de identificar tanto las concentraciones máximas como la variabilidad diurna.

La Figura 7.6 muestra el perfil de la variabilidad horaria del ozono para los valores observados y los pronósticos de 24 y 48 h, la Figura 7.7 muestra los perfiles individuales de cada una de las 12 estaciones descritas en la Tabla 7.5. En ambas se observa que el pronóstico es capaz de simular la variabilidad diurna, la mejor concordancia se observa entre las 7:00 y 21:00, cuando se presentan los máximos y mínimos de ozono, sin embargo, es evidente una sobrestimación en el periodo nocturno. Durante el pronóstico operativo estos errores se compensan con la aplicación del filtro de Kalman lo que mejora notablemente el desempeño del pronóstico.

Los diagramas de Taylor de la Figura 7.8 para los pronósticos de 24 y 48 h confirman el buen desempeño del modelo en ambos casos. Los gráficos de los cuartiles condicionales para el pronóstico de 24 h (Figura 7.9) muestran una sobrestimación en las concentraciones menores a 40 ppb, que generalmente corresponden al periodo nocturno, y una mejor concordancia en concentraciones mayores,

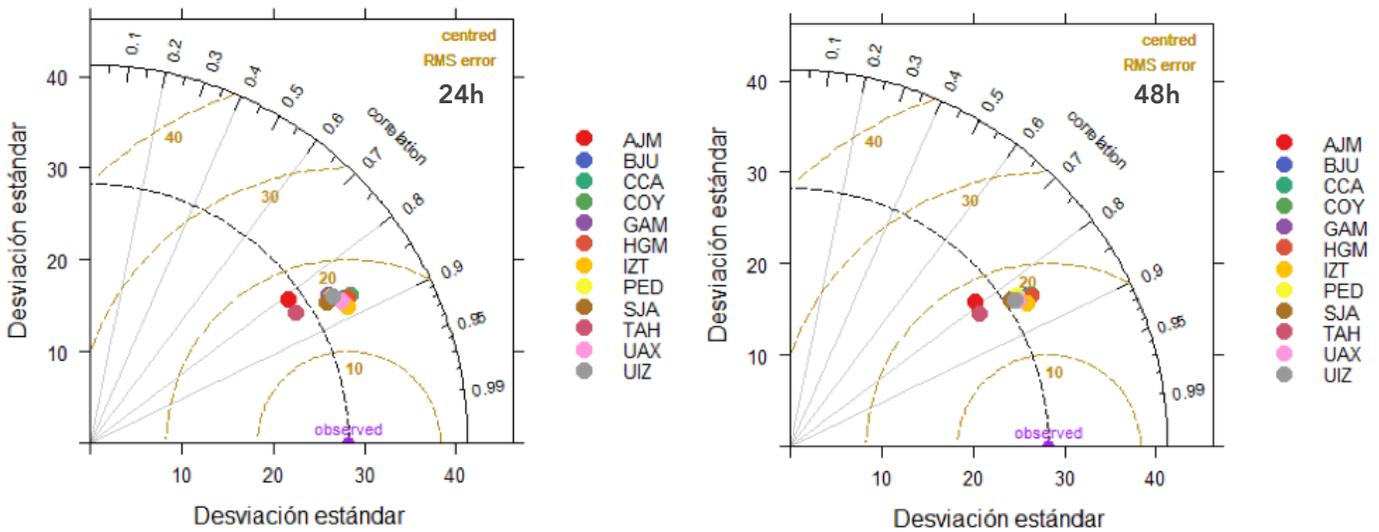


Figura 7.8. Diagrama de Taylor para las 12 estaciones de monitoreo considerando la concentración horaria de ozono.

con algunas sobrestimaciones en la mediana en las estaciones del norte caracterizadas por Gustavo A. Madero (GAM) y San Juan de Aragón (SJA). En cuanto a eventos con concentraciones máximas o atípicas, el pronóstico presentó una incertidumbre razonable. De las estaciones evaluadas en Tláhuac se observó el desempeño más pobre. Los resultados para el pronóstico de 48 h fueron similares a los observados para el de 24 h (ver Figura 7.10).

En cuanto a la evaluación cuantitativa la Figura 7.11 muestra los gráficos de dispersión entre los datos observados y los pronósticos de 24 y 48 horas, así

como los cuadrantes necesarios para esta evaluación; en la Tabla 7.2 se presentan los resultados de las métricas evaluadas para los pronósticos de 24 y 48 h. Los valores de precisión (A) mayores al 70% confirman el desempeño razonable de ambos pronósticos. Un sesgo (B) >1 confirma la sobrestimación del pronóstico, B fue ligeramente mayor para el pronóstico de 48 h con 10.7 ppb, que para el pronóstico de 24 h. La tasa de aciertos (H) fue cercana a 100 en ambos casos lo que indica que el pronóstico para concentraciones >95 ppb fue bueno. El índice de falsa alarma (F) fue bajo para ambos pronósticos, por lo tanto, el bajo número de

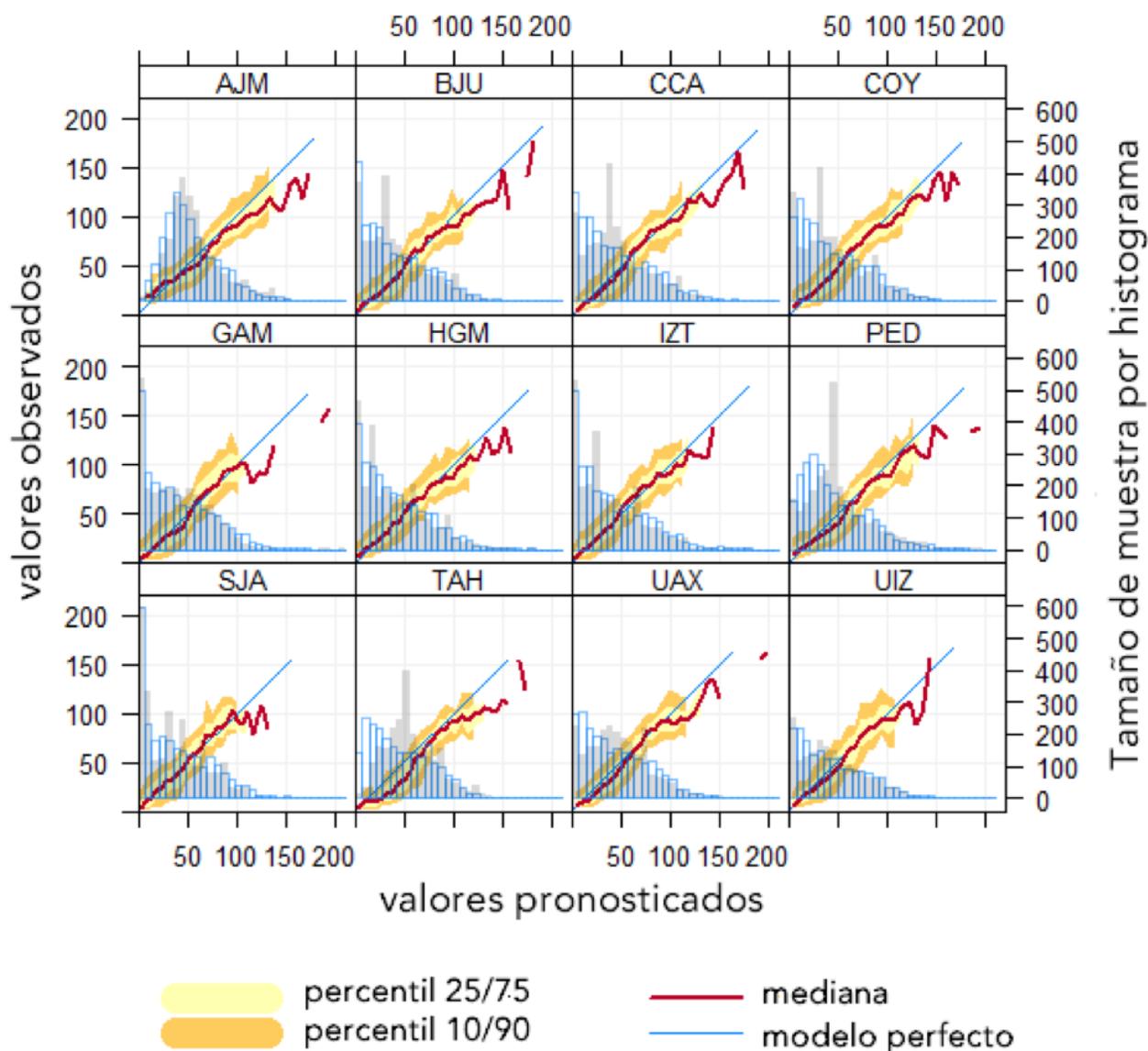


Figura 7.9. Diagrama de cuartiles condicionales para las 12 estaciones seleccionadas, considerando las concentraciones horarias de ozono para el periodo del 15 de febrero al 15 de junio de 2017.

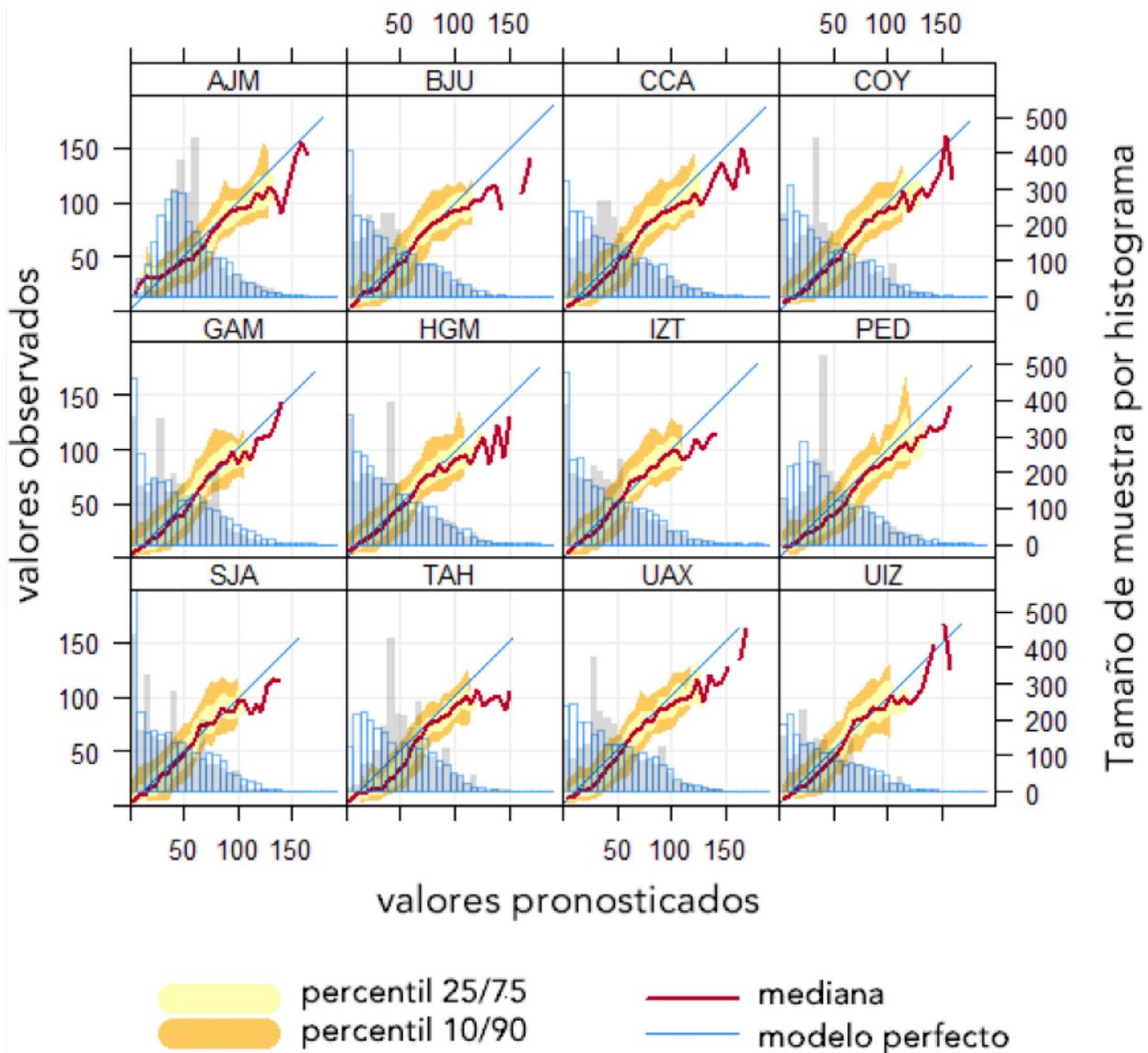


Figura 7.10. Diagrama de cuartiles condicionales para las 12 estaciones seleccionadas, considerando las concentraciones horarias de ozono para el periodo del 15 de febrero al 15 de junio de 2017.

Tabla 7.2. Resumen de la estadística categórica para el pronóstico del ozono de 1h

MODELO	A(%)	B	H(%)	F (%)	IEC (%)	a	b	c	d
24 horas	74.6	7.06	93.8	6.2	88.3	6	89	19	6
48 horas	72.1	10.7	90.7	6.4	88.0	6	88	18	9

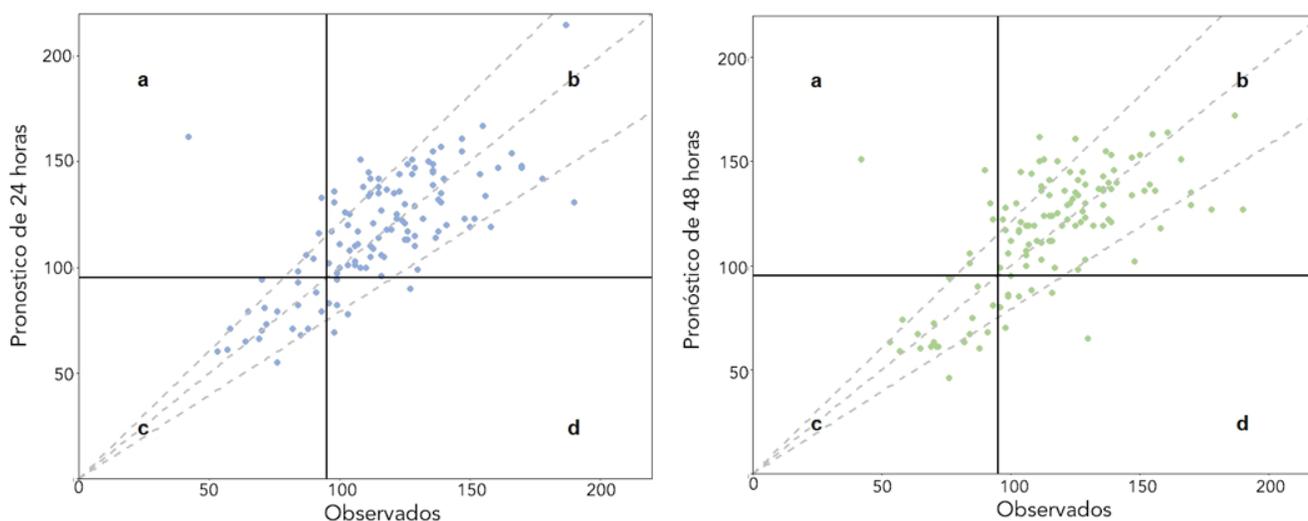


Figura 7.11. Gráfica de dispersión del máximo horario de ozono para el periodo del 15 de febrero al 15 de junio de 2017

falsos negativos permitió un índice de éxito crítico (IEC) de 88% en ambos casos. En términos generales los resultados de la evaluación confirman un desempeño adecuado del pronóstico para las concentraciones >95 ppb, con los mejores resultados en el pronóstico de 24 h.

Discusión

El análisis que se presentó en los párrafos anteriores muestra las propiedades estadísticas de los resultados del pronóstico meteorológico con respecto a las observaciones, durante la temporada de ozono. Sin embargo, existen variaciones que no pueden detectarse mediante una evaluación estadística, por lo tanto es necesaria una revisión de las condiciones meteorológicas y de calidad del aire en las que se generaron los datos. De esta evaluación se concluyó que el pronóstico generalmente sobrestima las concentraciones de ozono cuando los resultados del pronóstico meteorológico subestiman la velocidad de viento en la cuenca, principalmente para velocidades menores a 1 m/s. En consecuencia el modelo fotoquímico produce una mayor actividad fotoquímica derivada de condiciones de estabilidad atmosférica, incrementando la concentración de ozono estimada. Por otra parte, en los eventos en los que el pronóstico presentó subestimaciones importantes en la concentración de ozono, éstas estuvieron asociadas a la incapacidad

del modelo meteorológico para simular adecuadamente la corriente de flujo canalizado proveniente del paso de Chalco, entre las sierras de Ajusco-Chichinautzin y Nevada. Este flujo canalizado influye directamente en el movimiento de las masas de aire desde el sur hacia el norte, responsable de los episodios de O_3 -Norte descritos por de Foy et al. (2008). Por lo tanto, el modelo fotoquímico subestima las concentraciones de ozono en el oeste o noroeste de la Ciudad de México y su área metropolitana.

Si bien, los resultados presentados en esta sección muestran un desempeño razonable del modelo durante la temporada en la que suelen presentarse las concentraciones máximas de ozono, la meta de la Dirección de Monitoreo Atmosférico es incrementar la confiabilidad del modelo a más del 90%. Para ello será necesario mejorar el inventario de emisiones, la información de uso de suelo, mejorar el modelo meteorológico, optimizando las parametrizaciones y mejorar condiciones de frontera. Estas tareas ofrecen retos adicionales y demandarán de recursos económicos, técnicos y humanos adicionales para la producción de nueva información. Sin embargo, la necesidad de contar con un sistema de pronóstico con la menor incertidumbre posible ofrecerá una mayor protección para la salud de la población e incrementará las capacidades de gestión ambiental de la SEDEMA.

Referencias

- Aiken A.C., Salcedo, D., M.J. Cubison, J.A. Huffman, P.F. DeCarlo, I.M. Ulbrich, K.S. Docherty, D. Sueper, J.R., Kimmel, D.R. Worsnop, A. Trimborn, M. Northway, E.A. Stone, J.J. Schauer, R.M. Volkamer, E. Fortner, B. de Foy, J. Wang, A. Laskin, V. Shutthanandan, J., Zheng, R. Zhang, J. Gaffney, N.A. Marley, G. Paredes-Miranda, W.P. Arnott, L.T. Molina, G. Sosa and J.L. Jiménez, (2009). Mexico City aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0) – Part 1: Fine particle composition and organic source apportionment. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 6633-6653. doi: 10.5194/acp-9-6633-2009.
- Aguilar-Velázquez, D., Reyes-Ramírez, I. (2018). A wavelet analysis of multiday extreme ozone and its precursors in Mexico city during 2015–2016. *Atmospheric Environment*, 118, 112-119, doi:10.1016/j.atmosenv.2018.06.017.
- Amaro-Ortiz, A., Yan, B., D’Orazio, J.A. (2014). Ultraviolet Radiation, Aging and the Skin: Prevention of Damage by Topical cAMP Manipulation. *Molecules*, 19, 6202-6219.
- Barrett, B. S.; Raga, G. B. (2016). Variability of winter and summer surface ozone in Mexico City on the intraseasonal timescale. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 15359-15370, <https://doi.org/10.5194/acp-16-15359-2016>.
- Cleveland, R. B.; Cleveland, W. S.; McRae, J. E.; Terpenning, I. (1990). STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, 6(1):3–73.
- 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., and Molina, L. T. (2008) Basinscale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 1209–1224, doi:10.5194/acp-8-1209-2008.
- Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris, B. G., and Speizer, F. E.: An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities, *The New England Journal of Medicine*, 329, 1753–1759, 1993. Fitzgerald, NOAA National Centers for Environmental Information (2018) State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2017, published online January 2018, retrieved on May 15, 2018 from <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201713>.
- Doran, J. C., Abbott, S., Archuleta, J., Bian, X., Chow, J., Coulter, R. L., de Wekker, S. F. J., Edgerton, S., Elliott, S., Fernandez, A., Fast, J. D., Hubbe, J. M., King, C., Langley, D., Leach, J., Lee, J. T., Martin, T. J., Martinez, D., Martinez, J. L., Mercado, G., Mora, V., Mulhearn, M., Pena, J. L., Petty, R., Porch, W., Russell, C., Salas, R., Shannon, J. D., Shaw, W. J., Sosa, G., Tellier, L., Templeman, B., Watson, J. G., White, R., Whiteman, C. D., and Wolfe, D. (1998) The IMADA-AVER boundary layer experiment in the Mexico City area, *B. Am. Meteor. Soc.*, 79, 2497–2508.
- Edgerton, S. A., Bian, X., Doran, J. C., Fast, J. D., Hubbe, J. M., Malone, E. L., Shaw, W. J., Whiteman, C. D., Zhong, S., Arriaga, J. L., Ortiz, E., Ruiz, M., Sosa, G., Vega, E., Limón, T., Guzmán, F., Archuleta, J., Bossert, J. E., Elliot, S. M., Lee, J. T., McNair, L. A., Chow, J. C., Coutler, R. L., Doskey, P. V., Gaffney, J. S., et al. (1999) Particulate air pollution in Mexico City: a collaborative research project, *J. Air. Waste Manage.*, 49, 1221–1229.
- Fuller, G. W., Tremper, A. H., Baker, T. D., Yttri, K. E., Butterfield, D. (2014). Contribution of wood burning to PM10 in London. *Atmospheric environment*, 87, 87-94.
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Guerrero, F., Alvarez-Ospina, H., Retama, A., López-Medina, A., Castro, T., Salcedo, D. (2017). Seasonal changes in the PM1, chemical composition north of Mexico City. *Atmósfera* 30, 243–258. doi: 10.20937/ATM.2017.30.03.05
- Harrison, R. M., Beddows, D. C. S., Hu, L., and Yin, J. (2012) Comparison of methods for evaluation of wood smoke and estimation of UK ambient concentrations, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 8271-8283, <https://doi.org/10.5194/acp-12-8271-2012>.
- Holick, M. F. (2016). Biological effects of sunlight, ultraviolet radiation, visible light, infrared radiation and vitamin D for health. *Anticancer research*, 36(3), 1345-1356.
- IPCC: Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2007
- Jáuregui E., Luyando, E. (1999) Global Radiation attenuation by air pollution and its thermal climate in Mexico City. *Int. J. Climatol.* 19: 683–694.
- Legates, D. R., McCabe Jr, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness of fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1), 233-241.
- Legates, D. R., McCabe, G. J. (2013). A refined index of model performance: a rejoinder. *International Journal of Climatology*, 33(4), 1053-1056.
- 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., and 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, doi:10.5194/acp-7-2447-2007.
- 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., and Zavala, M. (2010) An overview of the MILAGRO 2006 campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 10, 7819–7983, doi:10.5194/acpd-10-7819-2010.
- Moya, M.; Ansari, A. S.; Pandis, S. N. (2001) Partitioning of nitrate and ammonium between the gas and particulate phases during the 1997 IMADA-AVER study in Mexico

- City, *Atmos. Environ.*, 35, 1791–1804.
- National Atmospheric Deposition Program (201). National Atmospheric Deposition Program 2016 Annual Summary. NADP Data Report 2017-01. Illinois State Water Survey, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL.
- NOAA National Centers for Environmental Information (2018) State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2017, published online January 2018, retrieved on June 15, 2018 from <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201713>.
- Querol, X.; Pey, J.; Minguillón, M. C.; Pérez, N.; Alastuey, A.; Viana, M.; Moreno, T.; Bernabé, R. M.; Blanco, S.; Cárdenas, B.; Vega, E.; Sosa, G.; Escalona, S.; Ruiz, H.; and Artano, B. (2008) PM speciation and sources in Mexico during the MILAGRO-2006 Campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 111–128, doi:10.5194/acp-8-111-2008.
- Salcedo, D., Onasch, T.B., Dzepina, K., Canagaratna, M.R., Zhang, Q., Huffman, J.A., DeCarlo, P.F., Jayne, J.T., Mortimer, P., Worsnop, D.R. and Kolb, C.E. (2006). Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA-2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: results from the CENICA Supersite. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(4), 925-946. doi: 10.5194/acp-6-925-2006.
- Salcedo, D.; Alvarez-Ospina, H.; Peralta, O.; Castro, T. (2018). PM₁ Chemical Characterization during the ACU15 Campaign, South of Mexico City. *Atmosphere*, 9. doi:10.3390/atmos9060232.
- Sandradewi, J., Prevot, A. S. H., Szidat, S., Perron, N., Alfarra, M. R., Lanz, V. A., Weingartner, E., and Baltensperger, U. (2008) Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter, *Environ. Sci. Technol.*, 42, 3316–3323, doi:10.1021/es702253m.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2016). Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2015. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. Julio, 2016. Disponible en <http://www.aire.cdmx.gob.mx>.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2017). 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. Disponible en <http://www.aire.cdmx.gob.mx>.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2018) Inventarios de emisiones de la Ciudad de México 2016. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventarios de Emisiones. Ciudad de México. Septiembre, 2018. Disponible en <http://www.aire.cdmx.gob.mx>.
- 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, 1001–1027.
- Sen, P. K. (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63:1379–1389.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2059-2077. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1
- 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, 5313-5325, <https://doi.org/10.5194/acp-8-5313-2008>.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192..
- Tzompa-Sosa, Z. A., Sullivan, A. P., Retama, A., Kreidenweis, S. M. (2016) Contribution of Biomass Burning to Carbonaceous Aerosols in Mexico City during May 2013, *Aerosol Air Qual. Res.*, 16, 114–124, doi:10.4209/aaqr.2015.01.0030.
- U.S. EPA. Integrated Science Assessment (ISA) for Lead (Final Report, Jul 2013). 2013. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-10/075F.
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., Matura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), 2088-2094.
- Wilks, D. S. (2005). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Volume 91, Second Edition (International Geophysics). 2nd ed. Academic Press.
- Yam, J. C., Kwok, A. K. (2014). Ultraviolet light and ocular diseases. *International ophthalmology*, 34(2), 383-400.

Anexos

ANEXO 1

Configuración del Sistema de Monitoreo Atmosférico

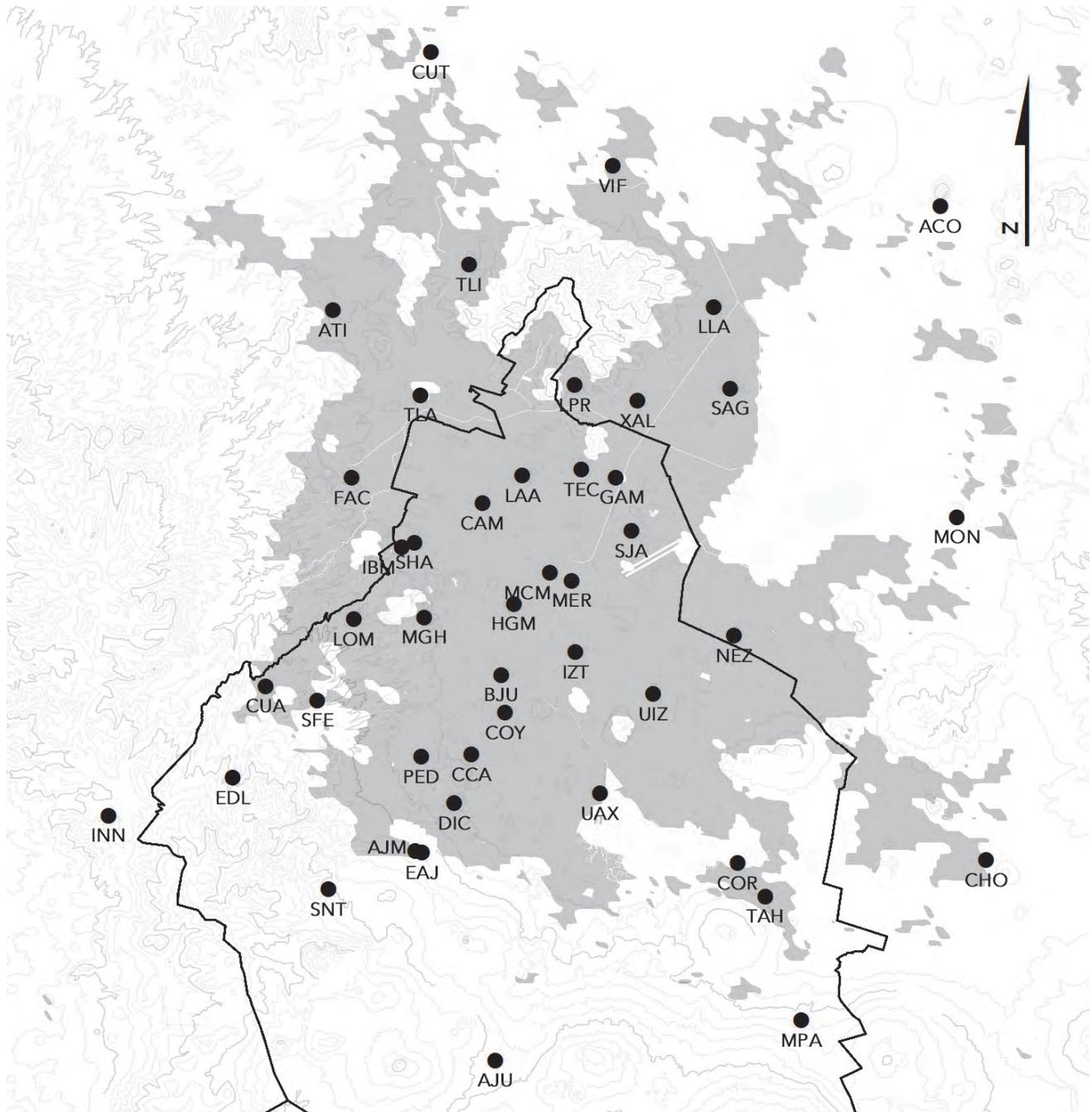


Figura A1.1. Distribución de los sitios del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT).

Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)

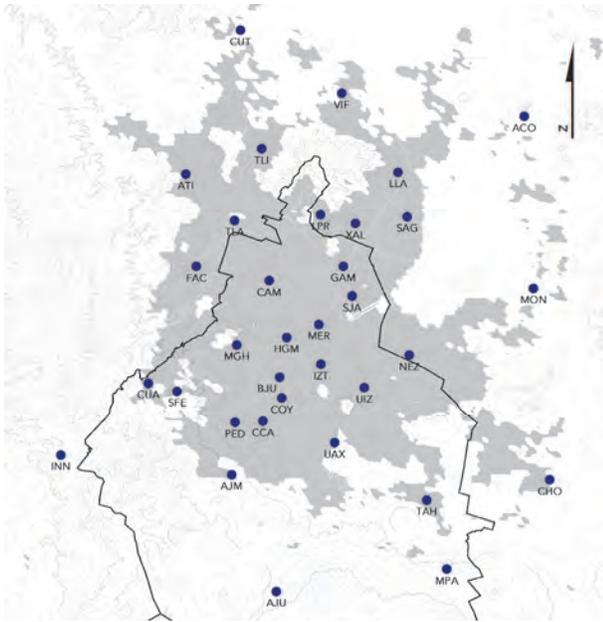


Figura A1.2. Estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico en operación durante 2017.

Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)

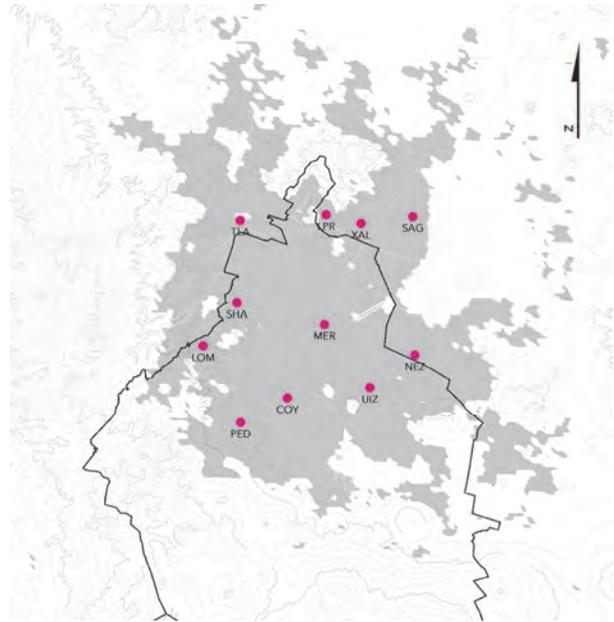


Figura A1.3. Estaciones de la Red Manual de Monitoreo Atmosférico en operación durante 2017.

Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)

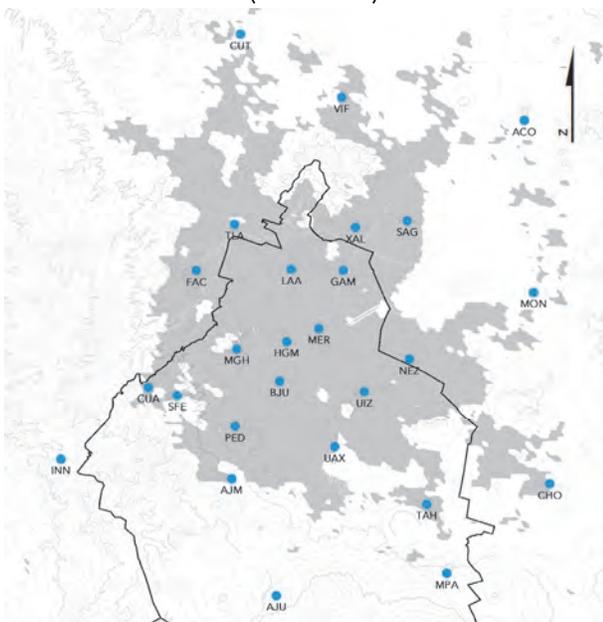


Figura A1.4. Estaciones de la Red de Meteorología y Radiación Solar en operación durante 2017.

Red de Depósito Atmosférico (REDDA)

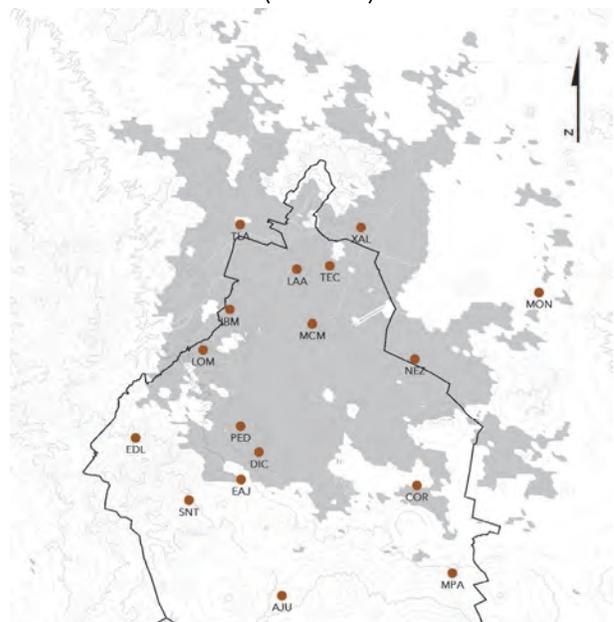


Figura A1.5. Estaciones de la Red de Depósito Atmosférico en operación durante 2017.

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	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 2017.

Delegación	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Álvaro Obregón	Pedregal	PED	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	01/01/2017	1:00	31/12/2017	24:00	Falla del equipo, falta de suministros para su reparación
				O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO	04/09/2017	1:00	21/09/2017	11:00	Retiro de equipo para mantenimiento en laboratorio
				SO ₂	24/03/2017	1:00	20/04/2017	18:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo
Azcapotzalco	Camarones	CAM	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO	06/09/2017	20:00	17/10/2017	24:00	Baja de canal por problemas con el aire acondicionado
				SO ₂	19/09/2017	13:00	17/10/2017	24:00	Problemas con el aire acondicionado
				O ₃ , CO	02/10/2017	13:00	17/10/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento en laboratorio
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	23/09/2017	1:00	31/12/2017	24:00	Fuera de línea temporal por falta de suministros
				CO	11/11/2017	1:00	31/12/2017	24:00	Incremento de la temperatura interna de la estación
				O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO	28/11/2017	24:00	31/12/2017	24:00	Problemas de energía eléctrica
				SO ₂	27/11/2017	1:00	31/12/2017	24:00	Instrumentación en acondicionamiento por reactivación eléctrica del sitio
Coyoacán	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO	19/04/2017	11:00	19/05/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo
				PM _{2.5}	10/07/2017	9:00	17/08/2017	9:00	Baja de canal debido a cortes eléctricos programados por el personal del CCA-UNAM
	Coyoacán	COY	RAMA	O ₃	29/11/2017	12:00	31/12/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento en laboratorio
				NO _x , NO ₂ , NO, PM _{2.5}	24/07/2017	13:00	01/08/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento en laboratorio
				O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, PM _{2.5}	19/09/2017	12:00	31/12/2017	24:00	Estación apagada por daños ocasionados por el sismo
UAM-Xochimilco	UAX	RAMA	PM _{2.5}	19/09/2017	12:00	31/12/2017	24:00	Sitio de muestreo retirado por daños ocasionados por el sismo	
			PM _{2.5}	24/04/2017	11:00	19/05/2017	24:00	Falla de comunicación, obras cercanas al sitio de monitoreo	
Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	RAMA	PM ₁₀	23/08/2017	10:00	18/10/2017	24:00	Se realizó actividades de raspado de pared, pintura y aplicación de terracota
				O ₃	23/08/2017	11:00	08/09/2017	3:00	Acondicionamiento de la estación (trabajos de mantenimiento en general de la estación)
				REDMET	WSP, WDR, RH, TMP	18/08/2017	20:00	07/09/2017	24:00
	Santa Fe	SFE	RAMA	CO	27/02/2017	1:00	07/04/2017	24:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
				O ₃	10/04/2017	23:00	05/05/2017	3:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
				CO	01/07/2017	1:00	31/07/2017	24:00	Falla en el equipo
				O ₃	23/10/2017	12:00	01/12/2017	3:00	Falla en el equipo
REDMET	UVA, UVB	01/01/2017	1:00	24/03/2017	24:00	Retiro del sensor para mantenimiento en laboratorio			
Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	RAMA	O ₃	13/07/2017	9:00	24/07/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento en laboratorio
Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	RAMA	PM _{2.5}	01/01/2017	1:00	31/03/2017	24:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				REDMET	WSP, WDR	26/09/2017	19:00	31/10/2017	24:00
	Laboratorio de Análisis	LAA	REDMET	PBa	01/01/2017	1:00	31/01/2017	24:00	Mantenimiento del sensor
UVA, UVB				01/01/2017	1:00	12/05/2017	24:00	Retiro del sensor para mantenimiento en laboratorio	
WSP, WDR, RH, TMP				01/01/2017	1:00	03/02/2017	24:00	Mantenimiento de los sensores	
San Juan de Aragón	SJA	RAMA	SO ₂ , CO, O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, PM _{2.5}	19/09/2017	12:00	31/12/2017	24:00	Estación apagada por daños ocasionados por el sismo	

Delegación	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Iztacalco	Iztacalco	IZT	RAMA	O ₃	11/09/2017	11:00	26/09/2017	3:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				SO ₂ , CO, O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, PM ₁₀	11/12/2017	12:00	31/12/2017	24:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	RAMA	O ₃	27/02/2017	24:00	31/03/2017	24:00	Fuera de línea por falta de suministros
				SO ₂ , CO, NO _x , NO ₂ , NO	01/03/2017	1:00	31/03/2017	24:00	Retiro de equipos para mantenimiento preventivo
				O ₃	13/11/2017	1:00	01/12/2017	24:00	Falla del sistema de aire acondicionado
				SO ₂ , CO	13/11/2017	1:00	04/12/2017	24:00	Falla del sistema de aire acondicionado, restablecimiento de los analizadores
Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO, SO ₂ , CO	20/04/2017	11:00	12/05/2017	1:00	Retiro de equipos para mantenimiento preventivo
			REDMET	WSP, WDR	10/03/2017	1:00	06/04/2017	24:00	Falla del sensor
			WSP, WDR	06/07/2017	24:00	01/11/2017	24:00	Falla del sensor	
Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	RAMA	CO	01/03/2017	1:00	31/03/2017	24:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				SO ₂ , O ₃	14/03/2017	1:00	30/03/2017	24:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				O ₃	12/10/2017	11:00	01/11/2017	3:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
			REDMET	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	18/09/2017	6:00	30/11/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo
			UVA, UVB	01/03/2017	1:00	19/04/2017	24:00	Retiro del sensor para mantenimiento en laboratorio	
			WSP, WDR, RH, TMP	06/06/2017	11:00	08/08/2017	24:00	Retiro del sensor para mantenimiento en laboratorio	
Tlalpan	Ajusco Medio	AJM	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	29/05/2017	19:00	16/06/2017	24:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				SO ₂ , O ₃	11/08/2017	11:00	30/08/2017	24:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
				CO	11/08/2017	1:00	31/08/2017	24:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
	Ajusco	AJU	RAMA	PM _{2.5}	25/06/2017	15:00	13/07/2017	24:00	Registros aislados, comportamiento irregular
				O ₃	27/08/2017	1:00	10/10/2017	24:00	Se desactiva el servicio por problemas con el voltaje
				PM _{2.5}	27/08/2017	14:00	31/10/2017	24:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
REDMET	RH	27/08/2017	14:00	06/10/2017	24:00	Problemas de comunicación			
Venustiano Carranza	Merced	MER	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	22/02/2017	6:00	25/03/2017	24:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio
			SO ₂ , O ₃	01/08/2017	13:00	11/08/2017	24:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio	
			REDMET	UVA, UVB	01/01/2017	1:00	24/03/2017	24:00	Retiro del sensor para mantenimiento en laboratorio
			Pba	20/10/2017	10:00	31/12/2017	24:00	Retiro del sensor para mantenimiento en laboratorio	
Xochimilco	Tláhuac	TAH	RAMA	CO	10/03/2017	23:00	07/04/2017	23:00	Falla del Brower del equipo
				NO _x , NO ₂ , NO	21/03/2017	1:00	05/06/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo
				SO ₂	29/05/2017	1:00	12/06/2017	2:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo
				PM ₁₀	31/07/2017	14:00	15/06/2017	13:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo
				O ₃	18/09/2017	11:00	18/10/2017	24:00	Falla en el equipo

Tabla A2.2. Periodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa en las estaciones de monitoreo ubicadas en los municipios conurbados del Estado de México, durante 2017.

Municipio	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo			
Acolman	Acolman	ACO	RAMA	O ₃	19/01/2017	11:00	07/02/2017	17:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio			
				CO	16/04/2017	1:00	05/05/2017	3:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio			
				PM ₁₀	04/05/2017	9:00	16/05/2017	24:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio			
				O ₃	08/06/2017	10:00	23/06/2017	24:00	Retiro del equipo para mantenimiento en laboratorio			
Atizapán	Atizapán	ATI	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO	01/01/2017	1:00	06/05/2017	24:00	Verificación remota de zero/span			
				PM ₁₀	01/01/2017	1:00	10/03/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo			
				SO ₂	16/01/2017	12:00	01/02/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo			
				NO _x , NO ₂ , NO	01/01/2017	1:00	31/12/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo			
				PM ₁₀	01/01/2017	1:00	10/03/2017	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento mayor y calibración en laboratorio			
Chalco	Chalco	CHO	RAMA	SO ₂ , O ₃ , PM ₁₀ , CO	01/12/2017	1:00	31/12/2017	24:00	Falla del sistema de aire acondicionado			
			REDMET	UVA, UVB	01/01/2017	1:00	30/04/2017	24:00	Se retira el sensor para mantenimiento en el laboratorio			
Coacalco	Villa de las Flores	VIF	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO, CO	31/12/2016	1:00	01/02/2017	3:00	Datos aislados y fallas de comunicación con la estación			
				SO ₂	31/12/2016	1:00	31/01/2017	24:00	Datos aislados y fallas de comunicación con la estación			
				PM ₁₀	28/08/2017	1:00	15/09/2017	22:00	Datos aislados y fallas de comunicación con la estación			
Ecatepec	Los Laureles	LLA	RAMA	CO	01/01/2017	1:00	17/05/2017	3:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo			
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	01/01/2017	1:00	05/03/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo			
	San Agustín	SAG	RAMA	O ₃	30/01/2017	24:00	14/02/2017	24:00	Falla en el sistema del aire acondicionado			
				NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , O ₃	22/05/2017	1:00	05/06/2017	24:00	Falla en el sistema del aire acondicionado			
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	22/05/2017	1:00	30/06/2017	24:00	Falla en el sistema del aire acondicionado			
	Xalostoc	XAL	RAMA	REDMET	UVA, UVB	01/01/2017	1:00	24/03/2017	24:00	Retiro del sensor para mantenimiento en laboratorio		
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	21/08/2017	11:00	11/09/2017	24:00	Falla del equipo			
Naucalpan	FES-Acatlán	FAC	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , O ₃	19/10/2017	9:00	03/11/2017	24:00	Se retiran los equipos para mantenimiento en el laboratorio			
				CO	21/04/2017	6:00	03/05/2017	24:00	Falla eléctrica			
				O ₃	26/07/2017	12:00	04/09/2017	24:00	Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio			
				NO _x , NO ₂ , NO, CO, O ₃	01/09/2017	10:00	27/09/2017	24:00	Se apaga estación para arreglo de filtración de agua y servicio			
				PM ₁₀	01/09/2017	10:00	27/09/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo			
			REDMET	UVA, UVB	29/03/2017	1:00	31/12/2017	24:00	Se retira el sensor para mantenimiento en el laboratorio			
				WSP, WDR	01/05/2017	12:00	24/05/2017	24:00	Falla del sensor			
				NO _x , NO ₂ , NO	24/01/2017	1:00	18/2/2017	1:00	Falla en el software del equipo			
				CO	26/01/2017	12:00	17/02/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo			
				O ₃	28/03/2017	23:00	31/05/2017	24:00	Falla del sistema de aire acondicionado			
Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , PM _{2.5}	28/03/2017	22:00	01/06/2017	1:00	Equipos fuera de operación por revisión del sistema de aire acondicionado			
				SO ₂	18/07/2017	6:00	03/08/2017	18:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo			
				REDMET	WSP, WDR	16/10/2017	16:00	30/11/2017	24:00	Se retira el sensor para mantenimiento en el laboratorio		
			Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	RAMA	O ₃	14/03/2017	9:00	15/05/2017	8:00	Problema de flujo del equipo
							PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	26/03/2017	13:00	15/05/2017	7:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo
Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	REDMET	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	26/07/2017	1:00	14/08/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo			
				WSP, WDR	01/01/2017	1:00	07/02/2017	24:00	Falla del sensor			
Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	REDMET	TMP	01/01/2017	1:00	31/12/2017	24:00	Se retira el sensor para mantenimiento			

Tabla A2.2. (continuación) Periodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa en las estaciones de monitoreo ubicadas en los municipios conurbados del Estado de México, durante 2017.

Municipio	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Tepotztlán	Cuautitlán	CUT	RAMA	PM ₁₀	01/05/2017	1:00	05/06/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo
			REDMET	UVA, UVB	23/02/2017	1:00	30/04/2017	24:00	Se retira el sensor para mantenimiento en el laboratorio
Texcoco	Montecillo	MON	RAMA	O ₃	21/08/2017	1:00	20/09/2017	2:00	Falla del sistema de aire acondicionado
				CO, NO _x , NO ₂ , NO	22/08/2017	18:00	30/10/2017	24:00	Falla del sistema de aire acondicionado
				O ₃	22/09/2017	11:00	05/10/2017	24:00	Isla de información
			REDMET	SO ₂ , O ₃	19/10/2017	24:00	30/10/2017	24:00	Falla del sistema de aire acondicionado
				WSP, WDR	01/08/2017	1:00	01/09/2017	2:00	Falla del sensor
				RH, TMP	22/10/2017	24:00	30/11/2017	24:00	Falla del sensor
Tlalnepantla	La Presa	LPR	RAMA	SO ₂	02/04/2017	8:00	16/06/2017	3:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo
				CO	16/05/2017	14:00	16/06/2017	3:00	Falla eléctrica
	Tlalnepantla	TLA	RAMA	SO ₂	28/01/2017	24:00	17/02/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento en laboratorio
				O ₃	30/01/2017	1:00	10/03/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento en laboratorio
				NO _x , NO ₂ , NO, CO	30/01/2017	1:00	17/02/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento en laboratorio
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	01/08/2017	2:00	01/09/2017	19:00	Registros aislados, comportamiento irregular
REDMET	NO _x , NO ₂ , NO	13/09/2017	24:00	09/10/2017	16:00	Registros aislados, comportamiento irregular			
	UVA, UVB	01/1/2017	1:00	24/03/2017	24:00	Retiro del sensor para mantenimiento en laboratorio			
Tultitlán	Tultitlán	TLI	RAMA	CO	01/07/2017	1:00	09/08/2017	3:00	Isla de información, falla del equipo
				NO _x , NO ₂ , NO	10/10/2017	12:00	01/11/2017	3:00	Retiro de equipo para mantenimiento en laboratorio
				PM ₁₀	10/10/2017	12:00	31/10/2017	24:00	Retiro de equipo para mantenimiento preventivo

ANEXO 3

Baja de estaciones de monitoreo

Tabla A3.1. Información básica de la baja de estaciones de monitoreo debido al sismo del 19 de septiembre de 2017.

Entidad	Estación	Clave	Subred	Parámetros	Inicio / fin de operación
/Ciudad de México	Coyoacán	COY	RAMA	O ₃ , NO ₂ , NO _x , NO, PM _{2.5}	01/08/2003 01:00 19/09/2017 13:00
			REDMA	PM _{2.5}	01/08/2003 01:00 19/09/2017 13:00
	San Juan de Aragón	SJA	RAMA	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , CO, NO _x , NO, PM _{2.5}	01/08/2003 01:00 19/09/2017 13:00

Mapa con la ubicación de las estaciones de monitoreo

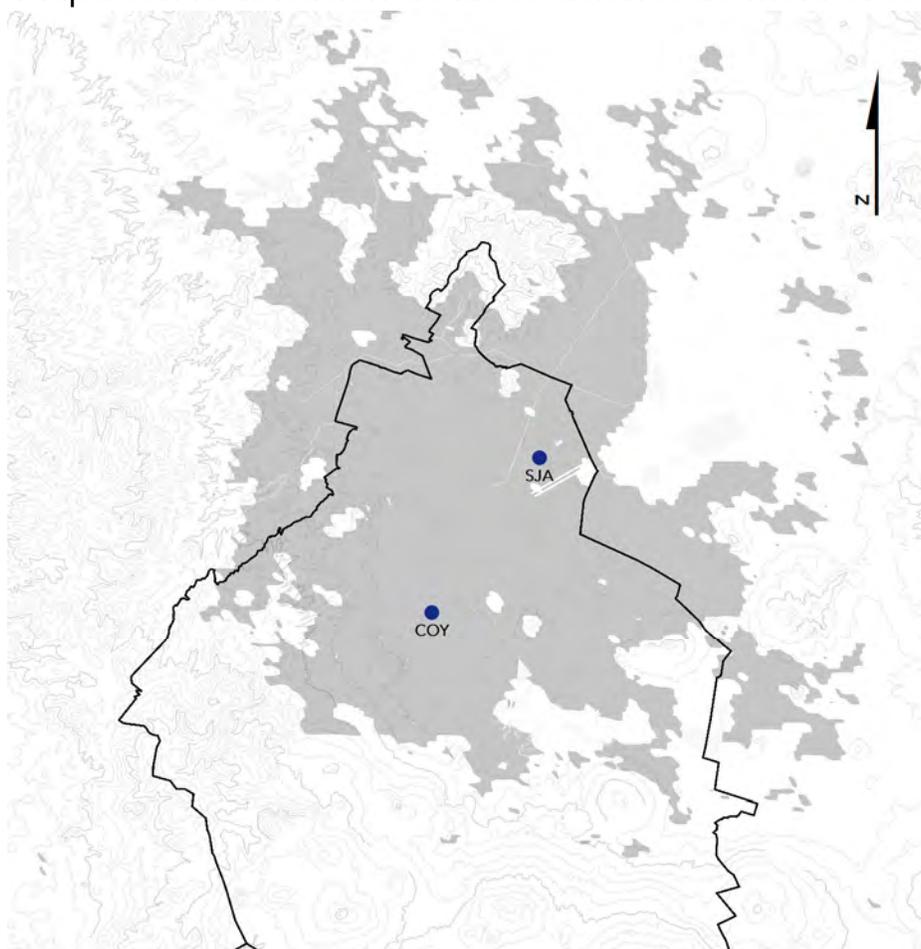


Figura A3.1. Ubicación de las estaciones de monitoreo que se dieron de baja

Coyoacán (COY)

Domicilio: Av. Hidalgo No. 62, Colonia del Carmen Coyoacán, Coyoacán, C.P. 104000, Ciudad de México.

Latitud: 19.350258 **Longitud:** -99.157101 **Altitud:** 2260 msnm

RAMA: O₃, NO₂, NO_x, NO, PM_{2.5}

REDMA: PM_{2.5}

Observaciones: En el edificio de la Secundaria Técnica Número 17, "Artes Decorativas", la estación se retiró por daños provocados por el sismo del 19 de septiembre de 2017



Figura A3.2. Estación Coyoacán (COY)

San Juan de Aragón (SJA)

Domicilio: Av. 504 y 506 s/n 2ª Sección, Col. Unidad San Juan de Aragón, Gustavo A. Madero, C.P. 07920, Ciudad de México.

Latitud: 19.452592 **Longitud:** -99.086095 **Altitud:** 2258 msnm

RAMA: O₃, NO₂, SO₂, CO, NO_x, NO, PM_{2.5}

Observaciones: En el edificio de la Secundaria Técnica número 41, "Alfonso Sierra Partida", la estación se retiró por daños provocados por el sismo del 19 de septiembre de 2017.



Figura A3.2. Estación San Juan de Aragón (SJA)

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	91	4	93	4	0	6	3	1	1	2	4	10	19	38	4	Si
	Benito Juárez	BJU	92	4	122	5	0	10	4	1	1	2	5	12	35	63	5	Si
	Camarones	CAM	73	3	223	6	0	12	4	1	2	3	6	14	—	—	—	—
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	87	4	128	4	0	7	2	1	1	2	3	8	27	58	4	Si
	Cuajimalpa	CUA	87	3	89	4	0	7	3	1	1	2	4	10	21	47	4	Si
	Hospital General de México	HGM	91	4	145	5	0	10	3	0	1	2	4	13	49	75	5	Si
	Iztacalco	IZT	87	4	133	5	0	9	3	1	1	2	4	11	39	70	5	Si
	Merced	MER	89	4	170	6	0	11	3	1	2	3	5	12	52	97	6	Si
	Miguel Hidalgo	MGH	90	3	121	5	0	9	4	1	1	2	5	12	32	55	5	Si
	Milpa Alta	MPA	85	4	67	3	0	4	2	1	1	1	3	7	19	32	3	Si
	Pedregal	PED	83	4	105	4	0	7	3	0	1	2	4	9	25	45	4	Si
	San Juan de Aragón	SJA	66	3	136	3	0	7	2	0	1	1	3	6	—	—	—	—
	Santa Fe	SFE	94	4	78	4	0	7	3	1	1	2	4	9	21	37	4	Si
	Tláhuac	TAH	85	3	61	3	0	4	2	1	1	2	3	6	19	27	3	Si
	UAM Iztapalapa	UIZ	78	2	125	4	0	8	3	1	1	2	4	8	39	56	4	Si
UAM Xochimilco	UAX	95	4	86	3	0	6	2	1	1	1	3	7	25	46	3	Si	
Estado de México	Acolman	ACO	88	4	95	2	0	5	1	0	1	2	4	14	34	2	Si	
	Atizapán	ATI	87	3	172	7	0	12	6	0	1	2	7	17	35	70	7	Si
	Chalco	CHO	83	3	56	2	0	3	1	0	1	1	2	4	12	20	2	Si
	Cuautitlán	CUT	92	4	400	7	0	16	4	1	1	2	5	15	72	158	7	Si
	FES Acatlán	FAC	90	4	160	6	0	11	5	1	1	2	6	14	32	64	6	Si
	Investigaciones Nucleares	INN	81	3	85	2	0	4	1	0	1	1	2	4	13	27	2	Si
	La Presa	LPR	76	3	125	4	0	8	3	0	1	2	4	10	31	56	4	Si
	Los Laureles	LLA	93	4	350	5	0	12	3	0	1	2	4	11	52	97	5	Si
	Montecillo	MON	80	3	73	2	0	4	1	0	1	1	2	3	12	23	2	Si
	Nezahualcóyotl	NEZ	71	2	120	4	0	8	2	0	1	1	3	8	—	—	—	—
	San Agustín	SAG	81	2	323	5	0	10	3	1	1	2	4	10	37	72	5	Si
	Tlalnepantla	TLA	90	3	224	8	0	13	6	1	2	4	8	18	66	112	8	Si
	Tultitlán	TLI	88	3	291	8	0	16	5	1	2	3	7	20	54	132	8	Si
	Villa de las Flores	VIF	85	3	135	6	0	12	4	1	1	2	5	14	46	63	6	Si
	Xalostoc	XAL	89	3	96	5	0	8	4	1	2	3	6	11	28	58	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	92	86	18	1	9	12	7	11	16	23	30	0	Si
	Benito Juárez	BJU	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Camarones	CAM	69	115	33	5	15	19	16	22	30	41	52	—	Si
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	77	91	25	2	12	15	12	16	22	31	41	0	Si
	Coyoacán	COY	63	92	26	3	13	17	12	17	24	34	43	—	—
	Cuajimalpa	CUA	91	105	23	2	13	16	10	14	20	30	41	0	Si
	Hospital General de México	HGM	87	119	31	4	15	20	14	20	29	40	52	0	Si
	Iztacalco	IZT	84	113	31	5	14	19	15	20	29	39	49	0	Si
	Merced	MER	85	121	35	4	16	21	17	23	33	44	56	0	Si
	Miguel Hidalgo	MGH	89	130	30	4	15	19	14	19	26	38	51	0	Si
	Pedregal	PED	90	97	23	2	12	16	10	14	21	30	40	0	Si
	San Juan de Aragón	SJA	67	100	30	5	16	23	12	17	28	40	51	—	—
	Santa Fe	SFE	94	105	22	3	12	14	10	14	19	28	38	0	Si
	Tláhuac	TAH	64	89	20	2	11	14	8	12	18	26	34	—	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	79	117	28	3	14	19	11	17	26	36	47	0	Si
UAM Xochimilco	UAX	95	117	24	2	12	16	10	15	23	31	39	0	Si	
Estado de México	Acolman	ACO	95	93	17	2	10	14	6	9	15	23	29	95	Si
	Atizapán	ATI	1	56	20	6	10	15	9	11	18	26	30	—	—
	Chalco	CHO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Cuautitlán	CUT	93	85	19	2	12	16	6	10	17	26	35	93	Si
	FES Acatlán	FAC	86	128	26	1	15	18	10	15	22	33	46	86	Si
	La Presa	LPR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Los Laureles	LLA	4	87	33	8	15	21	16	22	31	43	55	—	—
	Montecillo	MON	71	72	18	1	11	16	5	9	16	25	34	71	Si
	Nezahualcóyotl	NEZ	66	112	26	4	13	18	11	16	24	34	44	—	—
	San Agustín	SAG	83	94	25	3	13	17	10	15	22	32	42	83	Si
	Tlalnepantla	TLA	77	125	33	1	15	18	17	22	31	40	52	77	Si
	Tultitlán	TLI	86	112	26	1	15	22	8	13	23	35	46	86	Si
	Villa de las Flores	VIF	84	94	19	2	13	18	6	9	16	27	36	84	Si
Xalostoc	XAL	88	129	31	2	16	21	13	19	29	40	52	88	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	89	1.7	0.5	0	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	1.1	Si
	Benito Juárez	BJU	82	3.5	0.6	0	0.4	0.4	0.2	0.4	0.5	0.8	1.2	2.1	Si
	Camarones	CAM	68	5.0	0.7	0	0.5	0.4	0.2	0.4	0.5	0.8	1.2	—	—
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	87	3.0	0.5	0	0.3	0.4	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.5	Si
	Cuajimalpa	CUA	92	3.0	0.5	0	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	1.7	Si
	Hospital General de México	HGM	86	3.2	0.6	0	0.4	0.4	0.2	0.4	0.5	0.8	1.2	2.3	Si
	Iztacalco	IZT	86	5.5	0.8	0	0.5	0.5	0.3	0.5	0.7	1.0	1.4	2.4	Si
	Merced	MER	86	4.0	0.8	0	0.5	0.5	0.3	0.5	0.7	1.0	1.4	2.8	Si
	Miguel Hidalgo	MGH	90	3.7	0.7	0	0.4	0.4	0.3	0.4	0.6	0.8	1.2	2.2	Si
	Milpa Alta	MPA	76	1.9	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.1	Si
	Pedregal	PED	89	2.1	0.5	0	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.3	Si
	San Juan de Aragón	SJA	67	5.7	0.8	0	0.5	0.5	0.4	0.5	0.7	1.0	1.4	—	—
	Santa Fe	SFE	72	1.8	0.4	0	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	—	—
	Tláhuac	TAH	82	3.2	0.5	0	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.6	0.9	1.5	Si
	UAM Iztapalapa	UIZ	79	4.9	0.7	0	0.4	0.4	0.3	0.4	0.6	0.8	1.2	2.1	Si
UAM Xochimilco	UAX	95	3.6	0.6	0	0.3	0.4	0.3	0.4	0.6	0.8	1.1	2.5	Si	
Estado de México	Acolman	ACO	90	2.8	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	1.7	sl
	Atizapán	ATI	91	4.2	0.5	0	0.4	0.4	0.2	0.2	0.4	0.6	1	2.0	Si
	Chalco	CHO	76	4.8	0.6	0	0.4	0.3	0.2	0.4	0.5	0.7	1.1	2.0	Si
	FES Acatlán	FAC	89	4.2	0.6	0	0.5	0.4	0.2	0.3	0.5	0.7	1.2	2.2	Si
	Investigaciones Nucleares	INN	74	0.9	0.2	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	—	—
	La Presa	LPR	87	6.0	0.7	0	0.6	0.6	0.2	0.3	0.6	0.9	1.4	2.9	Si
	Los Laureles	LLA	58	4.3	0.6	0	0.5	0.4	0.2	0.3	0.5	0.7	1.1	—	—
	Montecillo	MON	75	3.2	0.4	0	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.9	1.7	Si
	Nezahualcóyotl	NEZ	63	5.2	0.7	0	0.5	0.5	0.2	0.3	0.5	0.8	1.3	—	—
	San Agustín	SAG	84	4.4	0.6	0	0.5	0.5	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	2.5	Si
	Tlalnepantla	TLA	89	3.3	0.6	0	0.4	0.4	0.2	0.4	0.5	0.8	1.1	2.1	Si
	Tultitlán	TLI	81	3.8	0.6	0	0.4	0.4	0.2	0.3	0.4	0.7	1.1	2.8	Si
	Villa de las Flores	VIF	85	3.5	0.5	0	0.4	0.4	0.2	0.2	0.4	0.6	0.9	2.3	Si
Xalostoc	XAL	90	5.8	0.9	0	0.7	0.6	0.3	0.5	0.7	1.1	1.7	3.8	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)	Cumple
Ciudad de México	Ajusco	AJU	78	163	38	0	28	43	6	14	30	57	79	252	110	No
	Ajusco Medio	AJM	91	178	43	0	27	35	13	23	37	58	82	388	131	No
	Benito Juárez	BJU	91	190	33	0	31	44	2	7	22	51	81	368	132	No
	Camarones	CAM	73	161	28	0	29	41	1	4	18	45	72	167	119	No
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	83	185	34	0	31	43	2	9	24	52	82	381	128	No
	Coyoacán	COY	66	175	36	0	32	46	4	9	25	55	84	312	131	No
	Cuajimalpa	CUA	92	139	29	0	21	28	6	13	25	41	59	66	99	No
	Gustavo A. Madero	GAM	91	171	31	0	30	45	1	5	22	50	77	300	130	No
	Hospital General de México	HGM	91	176	31	0	29	41	2	7	21	48	75	254	124	No
	Iztacalco	IZT	86	179	30	0	30	43	2	5	20	48	77	292	128	No
	Merced	MER	88	166	25	0	26	35	1	4	16	39	65	103	120	No
	Miguel Hidalgo	MGH	86	189	28	0	28	36	2	6	19	42	70	186	124	No
	Milpa Alta	MPA	85	136	46	1	25	35	17	26	41	61	82	318	113	No
	Pedregal	PED	90	177	36	0	30	39	5	13	26	52	82	388	140	No
	San Juan de Aragón	SJA	67	154	31	0	30	46	1	4	21	50	77	214	118	No
	Santa Fe	SFE	78	158	30	0	26	30	5	12	23	42	68	191	109	No
	Tláhuac	TAH	82	154	37	0	29	44	5	13	29	57	79	258	114	No
UAM Iztapalapa	UIZ	79	167	31	0	29	42	2	7	21	49	76	227	132	No	
UAM Xochimilco	UAX	94	162	34	0	30	45	2	8	25	53	81	364	122	No	
Estado de México	Acolman	ACO	84	123	29	0	24	36	2	8	23	44	65	70	95	No
	Atizapán	ATI	93	135	27	0	23	32	2	9	21	41	62	61	98	No
	Chalco	CHO	83	119	31	0	27	45	2	7	26	52	71	75	102	No
	Cuatitlán	CUT	93	156	28	0	27	43	2	3	20	46	69	111	119	No
	FES Acatlán	FAC	84	160	30	0	27	37	2	8	22	45	71	160	114	No
	Investigaciones Nucleares	INN	77	139	39	0	21	27	15	23	35	50	69	120	109	No
	La Presa	LPR	93	139	29	0	26	40	1	6	24	46	68	145	111	No
	Los Laureles	LLA	93	133	28	0	26	39	2	5	19	44	68	105	102	No
	Montecillo	MON	77	123	31	0	26	45	1	5	27	50	69	68	100	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	73	107	23	0	21	32	2	5	17	37	57	3	75	No
	San Agustín	SAG	83	132	27	0	25	37	2	6	19	43	66	86	100	No
	Tlalnepantla	TLA	83	140	26	0	25	34	2	6	17	40	63	91	100	No
	Tultitlán	TLI	89	122	27	0	26	40	1	5	20	45	67	82	102	No
	Villa de las Flores	VIF	89	122	27	0	24	36	1	7	21	43	63	28	93	No
Xalostoc	XAL	91	135	28	0	26	39	2	5	21	44	67	128	106	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	92	132	22	1	14	17	8	12	19	29	40
	Benito Juárez	BJU	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Camarones	CAM	69	520	56	6	50	39	18	26	40	65	110
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	77	298	36	3	28	25	13	18	27	43	66
	Coyoacán	COY	63	326	38	4	29	29	14	19	29	48	74
	Cuajimalpa	CUA	91	299	33	2	29	23	12	16	24	39	63
	Hospital General de México	HGM	87	308	48	4	35	36	17	24	37	60	92
	Iztacalco	IZT	84	407	48	6	36	37	17	24	37	61	95
	Merced	MER	85	468	62	6	48	47	21	30	47	77	122
	Miguel Hidalgo	MGH	89	506	54	6	51	39	18	24	37	63	112
	Pedregal	PED	90	182	31	2	22	22	11	16	24	38	59
	San Juan de Aragón	SJA	67	506	53	5	52	48	13	20	36	68	113
	Santa Fe	SFE	94	196	31	3	24	22	11	16	24	38	62
	Tláhuac	TAH	64	217	27	2	20	23	9	13	22	36	51
	UAM Iztapalapa	UIZ	79	405	43	3	35	36	13	20	33	56	85
	UAM Xochimilco	UAX	95	250	35	3	26	29	12	16	27	45	67
Estado de México	Acolman	ACO	95	348	27	2	22	24	8	12	20	36	55
	Atizapán	ATI	1	122	27	6	22	22	9	11	20	33	54
	Chalco	CHO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Cuautitlán	CUT	93	349	39	3	42	38	8	12	23	50	91
	FES Acatlán	FAC	86	330	47	1	46	37	12	19	31	56	106
	La Presa	LPR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Los Laureles	LLA	4	351	73	10	60	65	19	29	54	94	160
	Montecillo	MON	71	475	39	2	49	36	7	11	20	47	97
	Nezahualcóyotl	NEZ	66	372	42	5	36	33	13	19	31	52	83
	San Agustín	SAG	83	403	43	3	39	37	12	18	29	55	92
	Tlalnepantla	TLA	77	351	57	3	43	39	21	29	43	68	110
	Tultitlán	TLI	86	394	43	1	43	39	10	15	29	54	96
	Villa de las Flores	VIF	84	261	31	2	32	29	7	10	19	39	73
	Xalostoc	XAL	88	542	66	4	62	55	19	27	44	82	142

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	92	80	4	0	7	4	0	1	2	5	12
	Benito Juárez	BJU	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Camarones	CAM	69	455	23	0	41	21	1	3	7	24	61
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	77	259	11	0	22	9	1	1	3	10	28
	Coyoacán	COY	63	272	12	0	20	12	1	1	4	13	33
	Cuajimalpa	CUA	91	257	10	0	20	7	1	2	4	9	24
	Hospital General de México	HGM	87	226	16	0	25	18	1	2	6	20	45
	Iztacalco	IZT	84	362	17	0	27	18	1	2	6	20	49
	Merced	MER	85	360	27	0	37	27	2	5	12	32	71
	Miguel Hidalgo	MGH	89	460	24	0	41	20	2	4	9	24	65
	Pedregal	PED	90	130	7	0	13	6	1	1	2	7	20
	San Juan de Aragón	SJA	67	444	23	0	43	23	1	2	5	25	67
	Santa Fe	SFE	94	162	9	0	16	8	1	1	3	9	25
	Tláhuac	TAH	64	183	7	0	13	6	0	1	3	7	19
	UAM Iztapalapa	UIZ	79	360	15	0	25	17	1	2	5	19	42
UAM Xochimilco	UAX	95	197	11	0	18	11	1	1	3	12	31	
Estado de México	Acolman	ACO	95	293	10	0	15	9	1	2	4	11	28
	Atizapán	ATI	1	91	7	0	14	8	0	0	1	8	22
	Chalco	CHO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Cuautitlán	CUT	93	307	20	0	36	19	1	2	4	21	60
	FES Acatlán	FAC	86	288	21	0	37	17	1	3	7	20	60
	La Presa	LPR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Los Laureles	LLA	4	299	39	1	54	49	2	4	15	53	121
	Montecillo	MON	71	434	21	0	42	18	1	1	3	19	68
	Nezahualcóyotl	NEZ	66	325	16	0	28	16	1	2	5	18	43
	San Agustín	SAG	83	354	18	0	32	18	1	2	5	20	54
	Tlalnepantla	TLA	77	298	24	0	34	21	2	5	11	26	60
	Tultitlán	TLI	86	317	18	0	32	15	1	2	4	17	52
	Villa de las Flores	VIF	84	197	12	0	24	9	1	1	2	10	38
	Xalostoc	XAL	88	491	35	0	52	33	3	7	14	40	96

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	84	Alto volumen	173	94	27	37	53	57	67	88	120	154
	Pedregal	PED	95	Alto volumen	113	57	16	22	33	34	39	52	72	84
	UAM Iztapalapa	UIZ	92	Alto volumen	152	88	23	34	58	51	62	83	120	135
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	95	Alto volumen	155	86	37	30	42	53	65	80	107	131
	Xalostoc	XAL	95	Alto volumen	338	133	37	58	70	76	98	116	168	201

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	65	35	8	13	17	19	27	32	44	54	65	35.5	Si
	Merced	MER	95	FRM Alto Volumen	101	51	15	20	29	28	37	47	66	78	101	50.6	No
	Pedregal	PED	93	FRM 16.67 lpm	60	32	9	12	17	19	23	28	40	48	60	31.8	Si
	Secretaría de Hacienda	SHA	0	FRM 16.67 lpm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	85	FRM Alto Volumen	82	48	9	18	27	26	36	44	63	75	82	45.9	No
Estado de México	La Presa	LPR	93	FRM Alto Volumen	115	51	6	29	34	14	34	47	68	91	115	51.4	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	93	FRM Alto Volumen	102	48	9	23	37	21	29	43	66	80	102	46.7	No
	Tlalnepantla	TLA	97	FRM Alto Volumen	82	49	19	16	22	31	37	48	59	75	82	49.1	No
	Xalostoc	XAL	97	FRM Alto Volumen	164	70	13	32	39	36	48	64	87	111	164	70.3	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	90	TEOM (30°C)	205	34	2	20	27	11	19	31	46	59
	Benito Juárez	BJU	95	TEOM (30°C)	221	42	2	24	32	15	24	39	56	74
	Camarones	CAM	64	TEOM (30°C)	352	55	2	28	34	25	35	50	69	90
	Cuajimalpa	CUA	78	BETA (35°C)	203	35	1	19	25	13	21	32	46	60
	Hospital General de México	HGM	84	TEOM (30°C)	197	44	2	24	31	17	26	39	57	76
	Iztacalco	IZT	87	BETA (35°C)	214	38	1	21	25	15	23	34	48	64
	Merced	MER	73	TEOM (30°C)	282	55	2	30	39	21	33	50	72	96
	Miguel Hidalgo	MGH	91	TEOM (30°C)	158	37	2	20	26	15	22	33	48	64
	Milpa Alta	MPA	71	TEOM (30°C)	281	36	2	25	29	11	19	31	48	67
	Pedregal	PED	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Santa Fe	SFE	88	TEOM (30°C)	187	37	2	20	27	14	22	33	49	64
	Tláhuac	TAH	72	TEOM (35°C)	448	46	1	32	39	12	23	40	62	88
UAM Iztapalapa	UIZ	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Estado de México	Acolman	ACO	90	BETA (35°C)	381	48	1	33	41	14	24	40	65	91
	Atizapán	ATI	72	TEOM (35°C)	290	39	1	26	30	12	21	33	51	72
	Chalco	CHO	78	TEOM (35°C)	417	55	1	38	46	14	28	47	74	104
	Cuautitlán	CUT	80	TEOM (35°C)	410	52	1	42	43	13	24	41	67	106
	FES Acatlán	FAC	83	TEOM (35°C)	280	39	1	28	33	10	20	34	53	75
	Investigaciones Nucleares	INN	71	TEOM (30°C)	147	23	1	15	20	7	11	20	31	44
	San Agustín	SAG	57	TEOM (30°C)	694	57	2	41	42	20	30	47	72	103
	Tlalnepantla	TLA	82	TEOM (30°C)	210	54	3	28	35	24	34	49	69	91
	Tultitlán	TLI	90	TEOM (35°C)	299	54	1	37	42	17	28	45	70	105
	Villa de las Flores	VIF	82	TEOM (35°C)	445	59	1	44	48	16	29	48	77	117
Xalostoc	XAL	88	TEOM (30°C)	611	80	3	53	60	29	43	66	103	151	

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	64	FRM 16.67 lpm	36	20	6	7	9	14	15	19	24	27	—	—	—
	Merced	MER	95	FRM 16.67 lpm	55	23	5	10	12	13	17	22	29	35	55	23.1	No
	Pedregal	PED	82	FRM 16.67 lpm	45	18	5	8	9	10	13	17	22	29	45	19.8	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	87	FRM 16.67 lpm	52	21	4	10	12	11	14	18	26	35	52	20.5	No
Estado de México	San Agustín	SAG	84	FRM 16.67 lpm	73	23	4	12	13	10	15	21	28	37	73	23.7	No
	Tlalnepantla	TLA	100	FRM 16.67 lpm	42	23	8	9	11	13	16	22	27	36	42	22.9	No
	Xalostoc	XAL	97	FRM 16.67 lpm	87	29	4	16	20	14	18	26	38	47	87	29.5	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	67	BETA (35°C)	302	21	1	16	17	6	11	19	28	37
	Ajusco Medio	AJM	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Benito Juárez	BJU	90	TEOM (30°C)	109	19	1	12	16	6	10	17	26	35
	Camarones	CAM	95	TEOM (30°C)	104	24	1	15	19	8	13	21	32	43
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	64	BETA (35°C)	108	26	1	14	18	11	16	24	34	45
	Coyoacán	COY	85	TEOM-FDMS (30°C)	116	20	1	12	15	7	11	18	26	35
	Gustavo A. Madero	GAM	67	TEOM-FDMS (30°C)	114	24	1	13	18	9	14	22	32	42
	Hospital General de México	HGM	68	TEOM (30°C)	359	26	1	18	22	7	13	22	35	49
	Merced	MER	84	TEOM (30°C)	123	25	1	15	20	8	13	22	33	45
	Miguel Hidalgo	MGH	73	TEOM (30°C)	158	26	1	16	21	8	14	24	35	47
	Milpa Alta	MPA	91	TEOM (30°C)	89	22	1	13	18	8	12	20	30	40
	Pedregal	PED	71	TEOM (30°C)	211	21	1	15	16	6	11	18	27	38
	San Juan de Aragón	SJA	0	BETA (35°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Santa Fe	SFE	88	TEOM (30°C)	104	20	1	13	16	7	11	18	27	37
	UAM Iztapalapa	UIZ	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	UAM Xochimilco	UAX	84	BETA (35°C)	209	22	1	15	17	7	12	20	29	40

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	71	TEOM (30°C)	81	14	1	9	13	4	7	13	20	28
	Nezahualcóyotl	NEZ	75	BETA (35°C)	179	24	1	18	20	7	11	20	31	45
	San Agustín	SAG	57	TEOM (30°C)	521	26	1	19	21	8	14	22	35	47
	Tlalnepantla	TLA	82	TEOM (30°C)	122	26	1	14	19	9	15	24	34	46
	Xalostoc	XAL	88	TEOM (30°C)	415	32	1	23	26	10	16	27	42	60

Tabla A4.12. Estadísticas básicas de la concentración horaria de PMcoarse 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	90	TEOM (30°C)	175	15	1	11	13	4	7	13	20	28
	Benito Juárez	BJU	95	TEOM (30°C)	173	19	1	13	16	5	9	16	25	35
	Camarones	CAM	64	TEOM (30°C)	319	28	1	18	19	11	17	25	36	50
	Hospital General de México	HGM	84	TEOM (30°C)	159	19	1	13	15	6	10	16	25	35
	Merced	MER	73	TEOM (30°C)	253	29	1	19	21	10	16	25	37	52
	Miguel Hidalgo	MGH	91	TEOM (30°C)	129	15	1	9	11	5	8	13	19	27
	Milpa Alta	MPA	71	TEOM (30°C)	265	16	1	15	14	3	6	12	20	32
	Pedregal	PED	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Santa Fe	SFE	88	TEOM (30°C)	135	17	1	11	13	5	9	15	22	30
	UAM Iztapalapa	UIZ	0	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Estado de México	Investigaciones Nucleares	INN	71	TEOM (30°C)	114	9	1	8	9	2	3	7	12	19
	San Agustín	SAG	57	TEOM (30°C)	331	31	1	28	22	9	15	23	37	61
	Tlalnepantla	TLA	82	TEOM (30°C)	180	28	1	17	21	10	16	25	37	50
	Xalostoc	XAL	88	TEOM (30°C)	331	48	1	36	37	15	24	38	61	95

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 tuvieron $\geq 75\%$ de trimestres válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM. El análisis químico se realizó con un ICP óptico.

2015					ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM	
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	# trimestres con más de 75% de datos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio trimestral 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Cumple
Ciudad de México	Merced	MER	90	4	0.079	0.027	0.007	0.015	0.014	0.012	0.017	0.023	0.031	0.049	0.033	Si
	Pedregal	PED	88	4	0.049	0.013	0.003	0.010	0.007	0.005	0.007	0.009	0.014	0.029	0.019	Si
	UAM Iztapalapa	UIZ	93	4	0.090	0.023	0.006	0.015	0.017	0.008	0.013	0.018	0.031	0.043	0.031	Si
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	93	4	0.231	0.036	0.004	0.035	0.022	0.014	0.017	0.025	0.039	0.062	0.054	Si
	Xalostoc	XAL	93	4	0.125	0.031	0.007	0.020	0.020	0.010	0.019	0.027	0.039	0.057	0.039	Si
2016					ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM	
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	# trimestres con más de 75% de datos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio trimestral 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Cumple
Ciudad de México	Merced	MER	80	2	0.111	0.021	0.005	0.018	0.014	0.008	0.010	0.015	0.025	0.042	—	—
	Pedregal	PED	80	3	0.106	0.011	0.001	0.018	0.007	0.002	0.004	0.007	0.011	0.020	0.023	Si
	UAM Iztapalapa	UIZ	89	3	0.102	0.017	0.003	0.017	0.011	0.005	0.007	0.012	0.018	0.035	0.026	Si
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	92	4	0.122	0.022	0.003	0.017	0.013	0.009	0.013	0.018	0.025	0.034	0.033	Si
	Xalostoc	XAL	89	4	0.178	0.026	0.005	0.026	0.019	0.009	0.013	0.022	0.031	0.043	0.045	Si
2017					ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO DE LA NOM	
Entidad	Estación	Clave	Porcentaje de datos válidos	# trimestres con más de 75% de datos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio trimestral 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Cumple
Ciudad de México	Merced	MER	67	2	0.134	0.021	0.006	0.020	0.008	0.010	0.013	0.018	0.021	0.032	—	—
	Pedregal	PED	77	3	0.041	0.009	0.002	0.008	0.006	0.003	0.005	0.006	0.010	0.018	0.013	Si
	UAM Iztapalapa	UIZ	75	3	0.119	0.009	0.0004	0.018	0.008	0.006	0.008	0.013	0.016	0.023	0.026	Si
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	80	3	0.049	0.018	0.009	0.007	0.008	0.011	0.013	0.016	0.021	0.023	0.020	Si
	Xalostoc	XAL	77	3	0.133	0.013	0.005	0.022	0.021	0.009	0.014	0.021	0.034	0.044	0.038	Si

Tabla A4.14. 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	82	23.2	10.0	-5.5	5.8	8.7	1.2	5.8	10.6	14.5	18.4
	Ajusco Medio	AJM	100	27.3	16.0	2.2	3.7	4.9	11.7	13.6	15.6	18.5	22.3
	Benito Juárez	BJU	99	29.8	17.6	3.4	4.3	5.9	12.0	14.8	17.2	20.7	24.9
	Cuajimalpa	CUA	94	26.5	14.2	1.1	3.9	5.3	9.4	11.5	13.7	16.8	21.0
	Gustavo A. Madero	GAM	95	30.5	17.8	1.9	4.6	6.2	12.0	14.9	17.4	21.1	25.5
	Hospital General de México	HGM	92	30.6	18.0	3.2	4.3	5.9	12.6	15.2	17.6	21.1	25.3
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	87	28.7	16.3	1.6	4.4	6.0	10.9	13.4	15.8	19.4	23.8
	Merced	MER	99	30.5	17.6	2.6	4.4	6.0	12.0	14.8	17.2	20.8	25.0
	Miguel Hidalgo	MGH	100	30.3	17.6	3.7	4.3	5.9	12.3	14.8	17.1	20.7	24.9
	Milpa Alta	MPA	73	29.0	15.5	0.7	4.6	6.3	9.9	12.3	15.2	18.6	23.5
	Pedregal	PED	97	29.5	17.0	3.3	4.3	5.9	11.6	14.2	16.5	20.1	24.4
	Santa Fe	SFE	99	27.4	15.0	1.6	4.0	5.3	10.0	12.5	14.7	17.8	21.7
	Tláhuac	TAH	92	30.5	16.9	0.8	4.9	6.7	10.4	13.7	16.4	20.4	25.0
	UAM Iztapalapa	UIZ	99	30.8	17.9	3.2	4.5	6.1	12.3	15.0	17.5	21.1	25.5
UAM Xochimilco	UAX	98	29.1	16.7	1.9	4.6	6.4	10.7	13.8	16.5	20.2	24.1	
Estado de México	Acolman	ACO	99	29.8	15.9	-2.2	5.5	7.4	8.2	12.6	15.8	20.0	24.8
	Chalco	CHO	97	29.6	16.0	-1.7	5.3	7.0	8.6	12.9	16.0	19.9	24.2
	Cuautitlán	CUT	98	29.4	14.7	-3.9	6.3	8.8	5.6	10.7	14.8	19.5	24.4
	FES Acatlán	FAC	97	34.1	17.0	-2.1	6.4	9.2	8.4	12.9	16.5	22.1	27.4
	Investigaciones Nucleares	INN	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Montecillo	MON	81	31.2	16.8	-1.0	5.9	8.0	8.6	13.2	16.5	21.2	26.1
	Nezahualcóyotl	NEZ	88	30.4	17.0	0.9	4.6	6.2	11.2	14.0	16.6	20.2	24.8
	San Agustín	SAG	98	31.4	18.3	1.9	4.7	6.1	12.1	15.5	17.9	21.6	26.1
	Tlalnepantla	TLA	93	30.3	17.0	2.0	4.7	6.5	10.9	14.0	16.6	20.5	24.8
	Villa de las Flores	VIF	99	30.8	17.0	-0.5	5.2	6.9	10.3	13.8	16.6	20.7	25.7
Xalostoc	XAL	99	29.7	17.2	1.5	4.3	5.8	11.7	14.5	17.0	20.3	24.3	

Tabla A4.15. 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	82	99	69	8	23	38	34	51	74	89	97
	Ajusco Medio	AJM	100	93	52	5	21	36	23	35	52	71	84
	Benito Juárez	BJU	99	94	52	5	21	35	23	34	53	69	85
	Cuajimalpa	CUA	94	95	55	5	22	36	26	37	56	73	88
	Gustavo A. Madero	GAM	95	99	56	9	21	36	27	38	58	74	88
	Hospital General de México	HGM	92	87	47	6	20	33	20	30	47	63	78
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	87	100	55	5	25	40	21	34	54	74	99
	Merced	MER	99	95	52	4	21	35	23	35	54	70	84
	Miguel Hidalgo	MGH	100	89	48	1	21	36	19	30	48	66	81
	Milpa Alta	MPA	74	95	53	3	21	36	24	35	53	71	86
	Pedregal	PED	97	94	53	5	21	34	24	36	54	70	87
	Santa Fe	SFE	98	94	56	6	21	36	26	38	57	74	87
	Tláhuac	TAH	91	92	53	3	21	33	24	37	54	70	84
	UAM Iztapalapa	UIZ	99	100	53	4	22	36	23	35	54	71	86
UAM Xochimilco	UAX	98	92	54	3	21	34	24	37	56	71	85	
Estado de México	Acolman	ACO	99	97	58	3	23	39	25	39	61	78	90
	Chalco	CHO	97	94	57	6	21	34	27	40	60	74	87
	Cuautitlán	CUT	98	98	64	5	25	44	26	43	69	87	95
	FES Acatlán	FAC	97	94	54	2	24	42	20	33	56	75	89
	Investigaciones Nucleares	INN	84	96	69	9	23	38	34	52	75	90	95
	Montecillo	MON	81	94	56	2	23	39	24	38	58	76	89
	Nezahualcóyotl	NEZ	88	92	52	5	20	34	24	35	53	69	82
	San Agustín	SAG	98	86	43	3	20	33	15	27	43	60	75
	Tlalnepantla	TLA	93	88	48	5	20	34	20	31	48	65	78
	Villa de las Flores	VIF	99	96	53	4	23	39	21	34	55	73	86
	Xalostoc	XAL	99	90	48	5	20	33	20	31	49	64	78

Tabla A4.16. 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	82	11.8	2.7	0.2	1.3	1.3	1.3	1.8	2.5	3.1	5.1	0.4	SSO
	Ajusco Medio	AJM	99	11.7	2.7	0.2	1.5	1.8	1.1	1.6	2.5	3.4	5.7	0.8	NO
	Benito Juárez	BJU	91	7.7	1.8	0.0	1.0	1.1	0.8	1.1	1.6	2.2	3.8	3.3	N
	Cuajimalpa	CUA	88	7.1	2.0	0.2	0.9	1.1	0.9	1.4	1.9	2.5	3.8	1.4	N
	Gustavo A. Madero	GAM	88	8.4	2.1	0.0	1.2	1.2	0.9	1.3	1.7	2.5	4.6	3.2	NNE
	Hospital General de México	HGM	92	7.3	1.8	0.0	1.0	1.4	0.8	1.0	1.5	2.4	3.8	7.5	NO
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	87	7.0	2.0	0.0	1.0	1.4	0.8	1.2	1.9	2.6	3.8	5.3	NO
	Merced	MER	93	7.5	2.2	0.0	1.1	1.5	0.9	1.3	1.9	2.8	4.3	2.5	N
	Miguel Hidalgo	MGH	58	7.4	2.0	0.0	1.0	1.2	0.9	1.3	1.9	2.5	3.9	5.2	N
	Milpa Alta	MPA	74	10.3	2.9	0.4	1.3	1.8	1.4	1.9	2.7	3.7	5.5	0.2	SO
	Pedregal	PED	97	8.4	2.0	0.2	0.9	1.1	1.0	1.3	1.8	2.4	3.8	1.1	NO
	Santa Fe	SFE	99	7.6	2.4	0.2	1.0	1.1	1.3	1.7	2.2	2.8	4.3	0.3	NO
	Tláhuac	TAH	92	7.7	2.1	0.3	1.2	1.5	0.9	1.2	1.8	2.7	4.5	0.9	ONO
	UAM Iztapalapa	UIZ	99	8.6	2.2	0.2	1.2	1.4	1.0	1.4	1.9	2.8	4.6	1.1	N
UAM Xochimilco	UAX	98	8.8	2.0	0.3	1.1	1.2	0.9	1.3	1.7	2.5	4.3	0.7	NE	
Estado de México	Acolman	ACO	99	10.2	2.4	0.4	1.4	1.7	1.1	1.4	2.0	3.1	5.3	0.3	N
	Chalco	CHO	97	6.9	1.7	0.0	1.2	1.6	0.6	0.8	1.3	2.4	4.2	13.4	SE
	Cuautitlán	CUT	82	6.4	1.7	0.0	0.9	1.4	0.6	0.9	1.6	2.3	3.4	13.1	N
	FES Acatlán	FAC	88	6.4	1.8	0.2	0.9	1.2	0.8	1.1	1.6	2.3	3.7	1.7	NO
	Investigaciones Nucleares	INN	84	7.4	1.7	0.0	1.0	1.4	0.7	0.9	1.5	2.3	3.4	5.4	NE
	Montecillo	MON	79	9.4	2.3	0.0	1.6	2.0	0.7	1.1	1.9	3.1	5.7	9.4	ENE
	Nezahualcóyotl	NEZ	83	8.6	2.5	0.0	1.4	1.9	1.0	1.4	2.1	3.3	5.4	3.0	NE
	San Agustín	SAG	98	5.3	1.6	0.0	0.8	1.2	0.7	0.9	1.4	2.1	3.2	6.5	NNE
	Tlalnepantla	TLA	93	7.0	2.1	0.0	1.1	1.6	0.8	1.2	1.8	2.8	4.2	6.1	NO
	Villa de las Flores	VIF	99	7.2	1.9	0.0	1.1	1.4	0.8	1.1	1.6	2.5	4.3	4.6	N
Xalostoc	XAL	99	11.6	2.7	0.0	2.0	2.6	0.8	1.2	2.0	3.8	6.9	7.2	NNE	

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

Tabla A4.17. Estadísticas básicas para radiación solar ultravioleta A, todas las unidades están en W/m².

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	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	63	5.994	1.912	0.001	1.602	2.807	0.038	0.365	1.646	3.172	4.241
	Merced	MER	77	6.013	1.965	0.001	1.642	2.908	0.043	0.369	1.699	3.276	4.345
	Milpa Alta	MPA	26	6.056	2.194	0.001	1.619	2.906	0.128	0.704	2.032	3.610	4.367
	Pedregal	PED	92	7.095	2.127	0.001	1.747	3.115	0.069	0.439	1.889	3.553	4.652
	Santa Fe	SFE	76	6.299	2.099	0.001	1.742	3.146	0.058	0.417	1.808	3.562	4.683
Estado de México	Chalco	CHO	66	6.027	2.165	0.001	1.650	2.894	0.137	0.615	1.986	3.509	4.513
	Cuautitlán	CUT	14	4.497	1.987	0.001	1.441	2.758	0.094	0.606	1.943	3.364	3.900
	FES Acatlán	FAC	24	5.324	1.967	0.001	1.525	2.832	0.051	0.467	1.859	3.298	4.024
	Montecillo	MON	91	6.265	2.145	0.001	1.708	3.046	0.072	0.489	1.927	3.535	4.600
	San Agustín	SAG	76	6.171	2.133	0.001	1.741	3.125	0.054	0.435	1.884	3.560	4.661
	Tlalnepantla	TLA	67	5.906	2.114	0.001	1.655	2.958	0.085	0.527	1.896	3.485	4.536

Tabla A4.18. Estadísticas básicas para radiación solar ultravioleta B, todas las unidades están en W/m².

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	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	63	0.318	0.080	0.000	0.078	0.123	0.001	0.009	0.056	0.132	0.203
	Merced	MER	76	0.315	0.088	0.000	0.082	0.141	0.001	0.012	0.065	0.152	0.211
	Milpa Alta	MPA	26	0.299	0.089	0.000	0.080	0.147	0.000	0.012	0.065	0.160	0.205
	Pedregal	PED	91	0.327	0.091	0.000	0.085	0.144	0.002	0.012	0.066	0.156	0.217
	Santa Fe	SFE	76	0.360	0.092	0.000	0.091	0.149	0.001	0.010	0.061	0.159	0.233
Estado de México	Chalco	CHO	65	0.313	0.092	0.000	0.080	0.136	0.003	0.015	0.076	0.151	0.214
	Cuautitlán	CUT	14	0.217	0.078	0.000	0.068	0.131	0.001	0.011	0.059	0.143	0.177
	FES Acatlán	FAC	24	0.276	0.085	0.000	0.077	0.138	0.001	0.010	0.065	0.149	0.191
	Montecillo	MON	91	0.347	0.087	0.000	0.084	0.139	0.001	0.010	0.061	0.148	0.213
	San Agustín	SAG	76	0.320	0.091	0.000	0.087	0.148	0.001	0.010	0.064	0.159	0.225
	Tlalnepantla	TLA	67	0.319	0.091	0.000	0.084	0.144	0.002	0.012	0.067	0.156	0.221

Tabla A4.19. Estadísticas básicas para depósito atmosférico húmedo.

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	1167	4.3	5.3	46	18.58	24.74	3.15	12.08	6.47	0.96	0.09	0.54	0.75
	Cerro del Tepeyac	TEC	716	4.1	5.4	18	12.38	16.58	1.37	8.40	4.17	0.60	0.03	0.38	0.32
	Corena	COR	455	5.4	6.0	19	12.80	15.94	2.09	9.20	3.83	0.64	0.01	0.39	0.45
	Diconsá	DIC	941	4.7	5.5	21	21.42	26.22	2.33	13.56	7.09	0.83	0.03	0.50	0.58
	Ecoguardas Ajusco	EAJ	1216	4.5	5.4	46	24.01	29.04	2.46	14.93	7.83	1.03	0.05	0.63	0.52
	Ex Convento Desierto de los Leones	EDL	1307	4.6	5.3	47	20.71	26.14	2.31	11.90	7.58	0.99	0.07	0.61	0.48
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	660	4.1	5.6	14	11.16	14.25	1.28	7.50	4.25	0.53	0.02	0.45	0.30
	Legaria	IBM	789	4.9	5.6	25	15.05	21.20	1.71	9.88	6.44	0.72	0.02	0.50	0.53
	Lomas	LOM	945	4.8	5.5	36	19.50	24.46	2.11	11.32	7.41	0.77	0.03	0.64	0.42
	Milpa Alta	MPA	543	4.1	4.8	48	11.13	15.08	3.11	6.57	3.86	0.75	0.09	0.49	0.52
	Museo de la Ciudad de México	MCM	684	5.7	6.2	0	14.16	19.06	1.80	10.35	5.17	0.68	0.00	0.41	0.61
San Nicolás Totolapan	SNT	1231	4.1	5.5	28	23.40	26.32	2.39	13.04	7.00	1.66	0.04	0.66	0.54	
Estado de México	Montecillo	MON	462	4.9	5.9	20	9.62	12.14	1.29	6.64	2.98	0.47	0.01	0.29	0.25
	Nezahualcóyotl Sur	NEZ	660	4.8	6.0	14	10.58	13.38	1.74	8.55	4.02	0.50	0.01	0.30	0.28
	Tlalnepantla	TLA	668	4.8	5.8	15	14.50	18.08	1.49	9.10	6.06	0.61	0.01	0.36	0.36
	Xalostoc	XAL	589	5.1	5.9	9	13.64	16.39	1.65	8.71	5.53	0.69	0.01	0.37	0.51

Tabla A4.20. 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	81	27	54	—	—	—	72	2	70	28	55
	Ajusco Medio	AJM	95	40	55	93	1	92	93	1	92	41	59
	Benito Juárez	BJU	95	39	56	97	8	89	97	7	90	44	55
	Camarones	CAM	76	18	58	66	15	52	66	2	64	28	55
	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	86	37	49	—	—	—	87	2	85	39	56
	Coyoacán	COY	69	29	40	—	—	—	69	4	65	30	40
	Cuajimalpa	CUA	95	9	86	80	0	79	—	—	—	9	87
	Gustavo A. Madero	GAM	96	28	68	—	—	—	70	8	62	32	65
	Hospital General de México	HGM	95	26	69	88	7	81	88	5	82	33	63
	Iztacalco	IZT	90	30	60	89	4	85	—	—	—	33	60
	Merced	MER	93	11	82	78	23	55	78	6	72	30	65
	Miguel Hidalgo	MGH	90	20	70	94	2	93	94	3	91	23	71
	Milpa Alta	MPA	89	29	60	75	3	72	75	4	71	33	61
	Pedregal	PED	95	40	54	—	—	—	—	—	—	40	54
	San Juan de Aragón	SJA	70	21	50	—	—	—	—	—	—	21	50
	Santa Fe	SFE	81	19	63	92	1	92	92	1	91	19	81
	Tláhuac	TAH	86	27	59	78	10	68	—	—	—	33	62
UAM Iztapalapa	UIZ	83	23	60	—	—	—	—	—	—	23	60	
UAM Xochimilco	UAX	98	38	60	—	—	—	88	5	84	41	58	
Estado de México	Acolman	ACO	88	7	81	92	24	68	—	—	—	28	72
	Atizapán	ATI	96	8	89	76	3	73	—	—	—	10	88
	Chalco	CHO	87	10	76	82	26	56	—	—	—	32	58
	Cuautitlán	CUT	98	10	88	84	24	60	—	—	—	30	68
	FES Acatlán	FAC	88	16	71	88	4	84	—	—	—	19	77
	Investigaciones Nucleares	INN	82	16	67	77	0	77	77	0	77	16	70
	La Presa	LPR	98	16	81	—	—	—	—	—	—	16	81
	Los Laureles	LLA	98	12	87	—	—	—	—	—	—	12	87
	Montecillo	MON	82	9	73	—	—	—	—	—	—	9	73
	Nezahualcóyotl	NEZ	77	1	76	—	—	—	77	8	69	9	69
	San Agustín	SAG	90	10	80	62	19	43	62	6	56	26	65
	Tlalnepantla	TLA	87	11	76	87	18	69	87	4	83	23	76
	Tultitlán	TLI	93	9	84	93	27	66	—	—	—	31	63
Villa de las Flores	VIF	94	3	91	87	32	55	—	—	—	34	64	
Xalostoc	XAL	95	16	79	91	55	36	91	25	66	57	42	
Total	Ciudad de México *		100	62	38	100	29	71	100	16	84	70	30
	Estado de México *		100	42	58	100	57	43	100	26	74	68	32
	Zona metropolitana *		100	64	36	100	57	43	100	27	73	79	21

* Considerando todas las estaciones de monitoreo.

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 (fase, derogada en 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 (fase, derogada en 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 CUA	159 151	10-abr 19:00	50 h
	Ozono	05-may 16:00	IZT SFE SJA	157 154 1156	06-may 18:00	26 h
	Ozono	09-may 17:00	PED CCA	161 152	10-may 20:00	27 h
	Ozono	10-jun 16:00	COY TPN	152 151	12-jun 17:00	49 h
	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 (fase, derogada en 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
	Ozono	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 2017.

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
2017	PM ₁₀	06-ene 09:00	XAL	153	Fase I, Regional	07-ene 09:00	24 h
	Ozono	15-may 16:00	AJM	151	Fase I*	21-may 19:00	147 h
	Ozono	22-may 15:00	GAM	162	Fase I*	24-may 18:00	51 h
	PM ₁₀	14-dic 11:00	SAG	154	Fase I, Regional	15-dic 09:00	22 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})

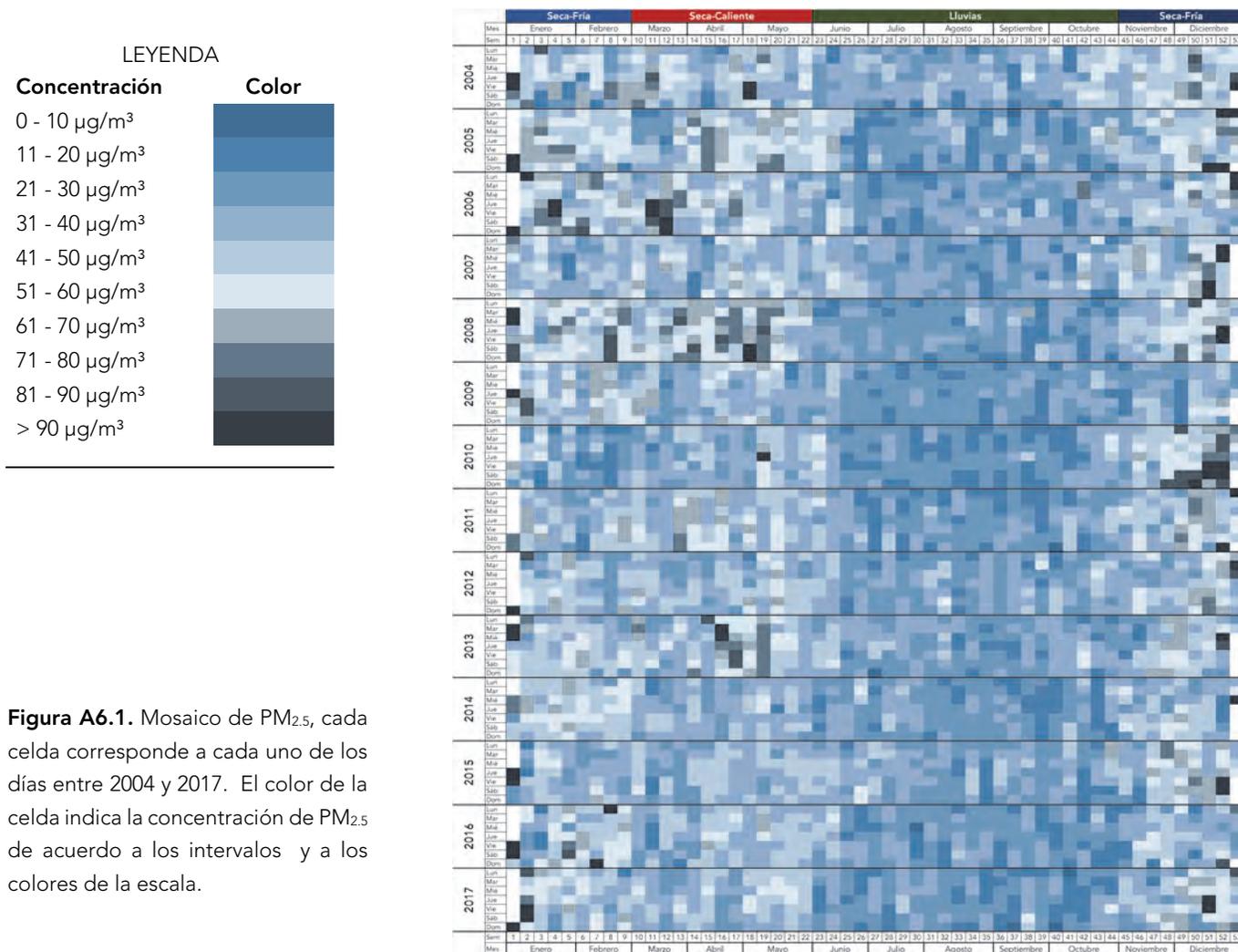


Figura A6.1. Mosaico de PM_{2.5}, cada celda corresponde a cada uno de los días entre 2004 y 2017. El color de la celda indica la concentración de PM_{2.5} de acuerdo a los intervalos y a los colores de la escala.

Partículas menores a 10 µm (PM₁₀)

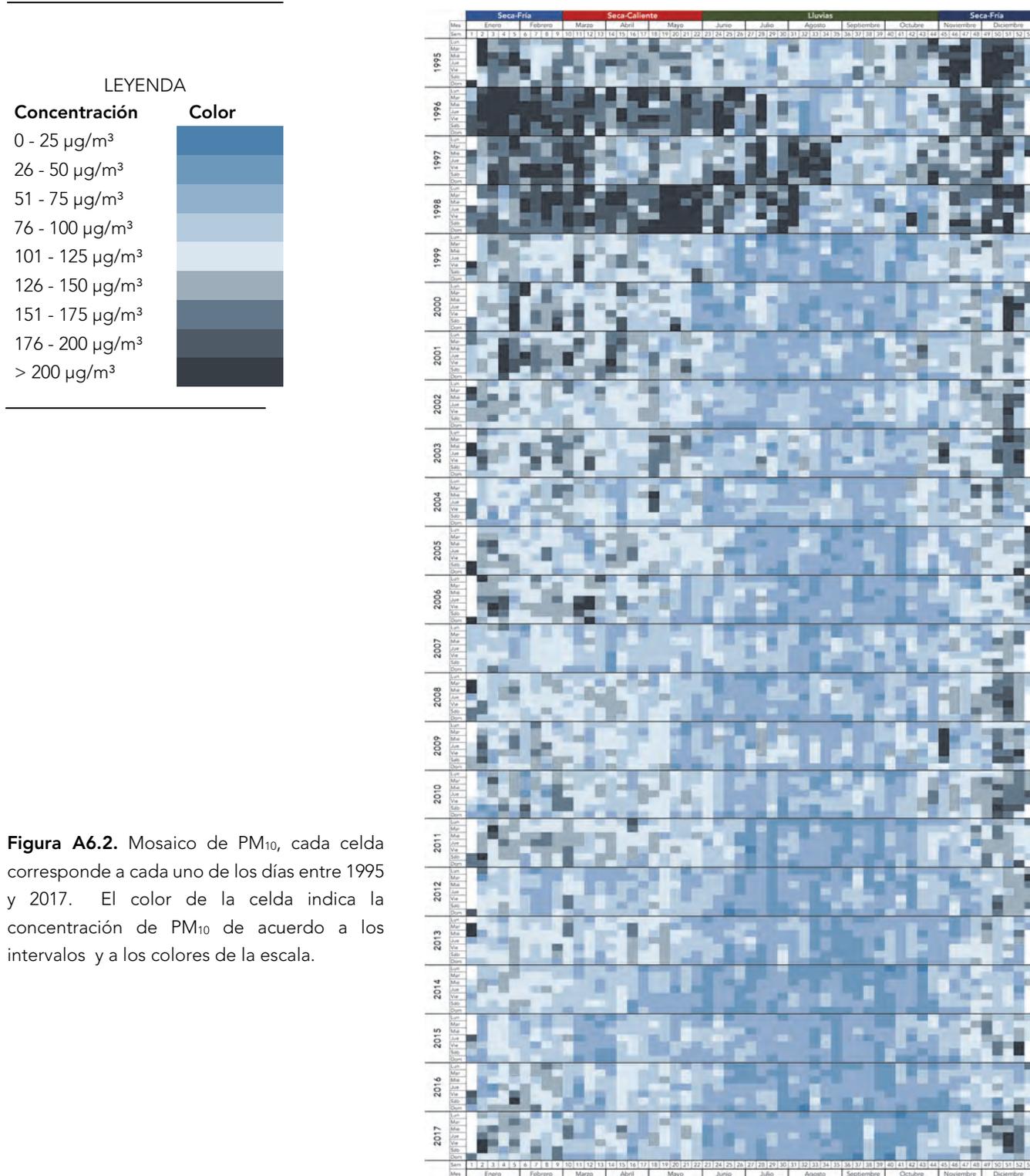


Figura A6.2. Mosaico de PM₁₀, cada celda corresponde a cada uno de los días entre 1995 y 2017. El color de la celda indica la concentración de PM₁₀ de acuerdo a los intervalos y a los colores de la escala.

Ozono

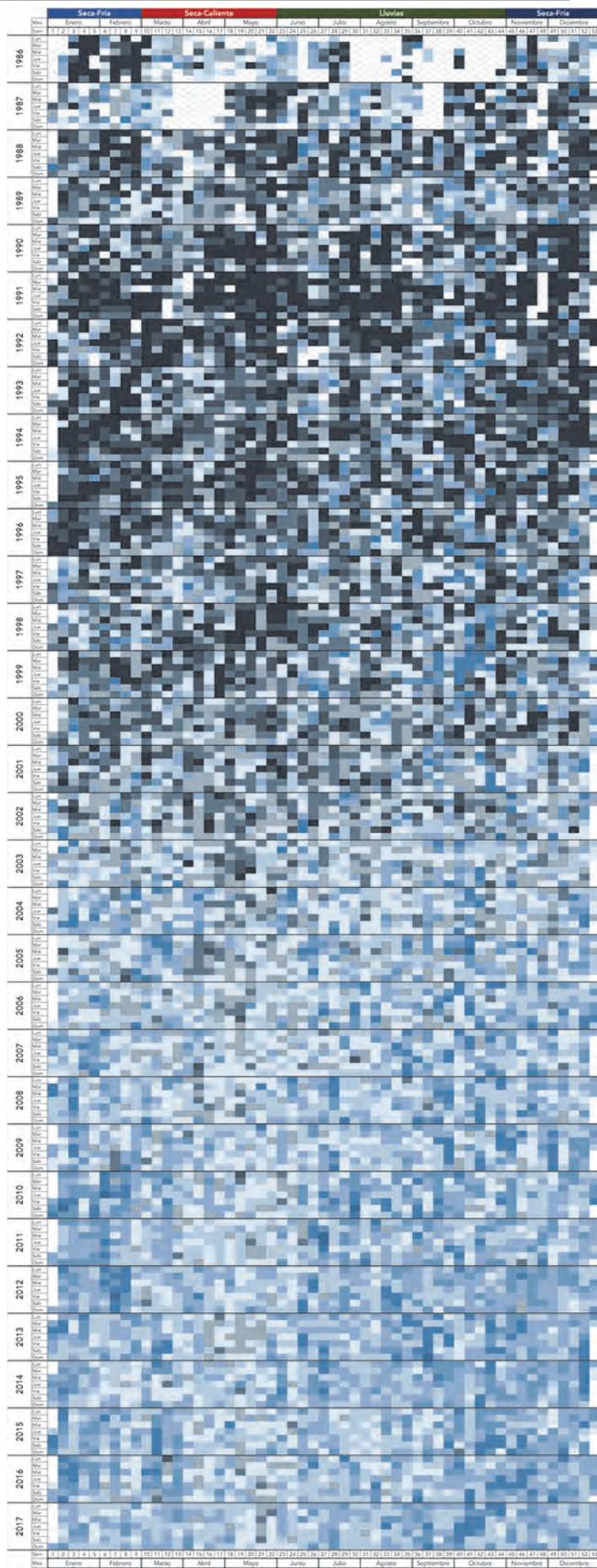
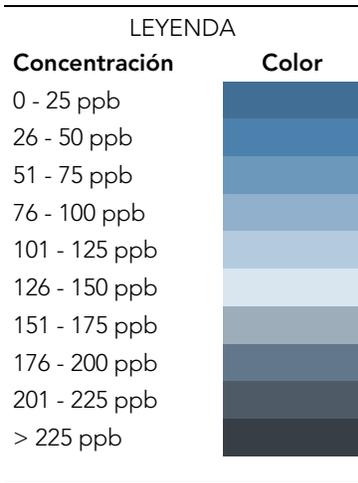


Figura A6.3. Mosaico de ozono, cada celda corresponde a cada uno de los días entre 1986 y 2017. El color de la celda indica la concentración del ozono de acuerdo a los intervalos y a los colores de la escala.



www.aire.cdmx.gob.mx



@Aire_CDMX



App AIRE disponible en:  

CDMX
CIUDAD DE MÉXICO

